

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA

ESTUDO DO DESENCADEAMENTO DAS EROSÕES LINEARES  
CONCENTRADAS EM UMA ÁREA DO MUNICÍPIO DE SÃO  
PEDRO / SP

THIAGO PEIXOTO DE ARAUJO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

OSNI JOSÉ PEJON

SÃO CARLOS - SP  
*2011*

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

A663e Araujo, Thiago Peixoto  
Estudo do desencadeamento das erosões lineares  
concentradas em uma área do município de São Pedro/SP /  
Thiago Peixoto Araujo ; orientador Osni José Pejon. --  
São Carlos, 2011.

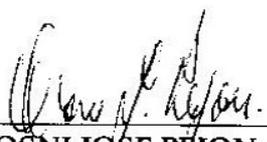
Dissertação (Mestrado-Programa de Pós-Graduação e Área  
de Concentração em Geotecnia) -- Escola de Engenharia de  
São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

1. Limiar topográfico. 2. SIG. 3. MDT. 4. Predição de  
erosão linear. 5. São Pedro/SP. I. Título.

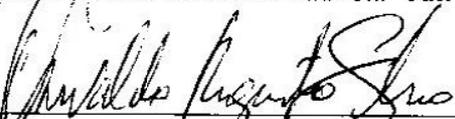
**FOLHA DE JULGAMENTO**

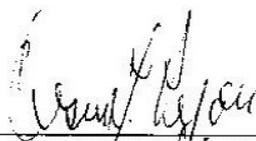
Candidato(a): Geólogo THIAGO PEIXOTO DE ARAUJO.

Dissertação defendida e julgada em 02/05/2011 perante a Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **OSNI JOSÉ PEJON** – (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **JOSE AUGUSTO DE LOLLO**  
(Universidade Estadual Paulista "Julio de Mesquita Filho"/UNESP/campus de Ilha Solteira) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. **OSWALDO AUGUSTO FILHO**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Titular **OSNI JOSÉ PEJON**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE**  
Presidente da Comissão da Pós-Graduação da EESC



*À Angi e Carol,  
com todo meu amor.*



## AGRADECIMENTOS

---

Ao Professor Osni Pejon pela orientação e principalmente pela grande amizade e estímulo ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, meu muitíssimo obrigado;

Aos professores, principalmente ao Lázaro e Çula (pelos “discursos no café”), “*mapeadores*”, técnicos, secretários, enfim, todos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos, pelo apoio, amizade e auxílio prestados;

Gostaria de agradecer em especial ao Junio, Aline, Simone, Fernando Jamal, Vinicius, Gian Franco, Pablito, Julio, Gustavo e a todos os amigos e familiares (Nelson, Regina, Rafael e Rhaissa) que de forma direta ou indireta fizeram parte desta fase tão importante em minha vida;

Gostaria de demonstrar aqui minha gratidão aos professores da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, universidade na qual me graduei em geologia, principalmente aos professores Fernando, Miguel e Citroni, pois sem eles, não estaria aonde cheguei.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de mestrado concedida para o desenvolvimento deste estudo;

Em especial agradeço a duas pessoas, às quais dedico este trabalho, por terem entrado em minha vida de uma forma tão especial. Angi e Carol, obrigado pelo amor, estímulo e por me esperarem durante um longo período. *“E desde então, sou porque tu és... E desde então és... Sou e somos... E por amor Serei... Serás...Seremos...”* (Pablo Neruda).



*"Images of broken light which dance before me like a million eyes, they call me on and on across the universe."*

***Across the Universe (John Lennon & Paul McCartney)***

*"Olha meu bem o céu*

*Vê quanta luz, quanta estrela*

*Quase todas mortas*

*Só não é chegado para nós o tempo que se apagarão*

*A gente tá na lanterna do tempo que virá."*

***Tempo/Espaço (Lulu Santos)***



## RESUMO

---

Araujo, T. P. **Estudo do desencadeamento das erosões lineares concentradas em uma área do município de São Pedro / SP**. São Carlos, 2011. 181 p. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

O presente trabalho propõe índices que indicam o limiar topográfico para predição do desencadeamento de canais de erosão linear em uma região de clima tropical. A área escolhida para a realização do estudo localiza-se no município de São Pedro/SP e apresenta uma área de aproximadamente 7km<sup>2</sup>. Nesta área foi realizado um inventário detalhado das feições erosivas pré-existentes para obtenção dos valores das áreas das bacias de contribuição, considerando as cabeceiras de algumas erosões e as declividades médias dessas áreas, por meio de ferramentas de SIG e também por fotografias aéreas ortorretificadas. Trabalhos de campo, com o auxílio de GPS de precisão, permitiram definir a situação atual das erosões e com o uso de fotografias aéreas de anos anteriores foi possível observar a sua evolução. Com isso, através dos mapas em SIG, como MDT, declividade, direção de fluxo e etc. foram obtidos os valores de área de contribuição (A) e declividade média (S). Os valores de A x S foram representados em gráficos que permitiram identificar o ponto mínimo para a ocorrência de um evento erosivo e estabelecer de forma empírica os limiares topográficos que definem as condições para o início do processo erosivo. Para o Índice I foram feitas duas equações (uma para canais menos profundos que 1 metro e outra para canais mais profundos que 1 metro) e para o Índice II foi obtida apenas uma equação, pois em fotografias aéreas nas escalas disponíveis (1:25.000 e 1:30.000) foram possíveis serem observados apenas os canais profundos. Os índices obtidos neste trabalho foram para o Índice I:  $S = 0,0219A^{-0,376}$  (canais profundos) e  $S = 0,0128A^{-0,443}$  (canais rasos); enquanto que para o Índice II o valor obtido é:  $S = 0,0588A^{-0,377}$ . Para a validação destes índices propostos, foram realizados os mesmos procedimentos para obtenção das áreas de contribuição (A) e declividade média (S), porém em outra área. A área

escolhida para se fazer a validação dos índices foi a Bacia do Ribeirão do Meio, que apresenta 48km<sup>2</sup> aproximados de área e apresenta características físicas semelhantes da área utilizada neste presente estudo, ou seja, apresenta semelhança em geologia, geomorfologia, clima, uso e ocupação. Foi observado com esta validação, que todos os pontos com problemas de erosão da área usada para validação localizam-se dentro da área prevista pelos índices para ocorrência de problemas de erosão, o que significa dizer que os índices exprimem o limiar topográfico para erosões lineares nas condições encontradas na área de estudo e em áreas semelhantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Limiar Topográfico, SIG, MDT, Predição de Erosão Linear, São Pedro / SP.

## ABSTRACT

---

Araujo, T. P. **Study of the trigger of concentrated gully erosion in an area of São Pedro / SP.** São Carlos, 2011. 181 p. Master Dissertation – School of Engineering of Sao Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2011.

This paper proposes indexes indicating the topographic threshold for predicting the trigger of gully erosion in a tropical climate region. The area chosen for the study is located in São Pedro / SP and presents an area of approximately 7km<sup>2</sup>. In this area was carried out a detailed inventory of pre-existing erosion to obtain the values of watershed areas of contribution, considering the headwaters of some erosions and the mean slope of these areas, using GIS tools and also orthorectified aerial photographs. Fieldwork, with the assistance of GPS accuracy, allowed defining the current condition of erosion and with the use of aerial photographs from previous years was possible to observe its evolution. Thus, through the maps in GIS, as DEM, Slope, Flow Direction among others, were obtained values from contribution area (A) and mean slope (S). The values of A x S were represented in charts allowing to identify the lower point for the occurrence of an erosion event and establish empirically the topographic thresholds that define the conditions for initiating the erosion process. For the index I were made two equations (one for channels less than 1 meter deep and one for channels deeper than 1 meter) and Index II was obtained only one equation, because in aerial photographs available (scales 1:25,000 and 1:30,000) were possible only be observed the deep channels. The indexes obtained in this paper were for the Index I:  $S = 0,0219A^{-0,376}$  (deep channels) and  $S = 0,0128A^{-0,443}$  (shallow channels), while the index II the value obtained is:  $S = 0,0588A^{-0,377}$ . To validate these proposed indexes, the same procedures were performed to obtain the contribution area (A) and mean slope (S), but in another area. The area chosen to perform the validation of the indexes was the Basin Ribeirão do Meio, which is 48km<sup>2</sup> extents

and shows similarity in geology, geomorphology, climate, use and occupation. The results have been showed that the selected points with erosion problem of the area used for validation are located within the area specified by the indexes for the occurrence of erosion problems, which means that the indexes reflect the topographic threshold for gully erosions in conditions found in the study area and similar areas.

**KEY-WORDS:** Topographical Thresholds, GIS, DEM, Prediction of Gully Erosion, São Pedro / SP.

## LISTA DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1</b> – Divisão da paisagem dentro dos regimes de processos com diferentes transportes sedimentares e mecanismos de iniciação de canais. $A$ = área de drenagem das bacias; $S$ = declividade local da superfície do solo. Fonte: modificado de Montgomery & Dietrich (1994). .....	38
<b>Figura 2.2</b> – Exemplo de feição erosiva laminar no município de São Pedro. ....	43
<b>Figura 2.3</b> – Exemplo da feição erosiva do tipo sulco no município de São Pedro, dentro da área de estudo. ....	44
<b>Figura 2.4</b> – Exemplo da feição erosiva do tipo ravina no município de São Pedro. ....	45
<b>Figura 2.5</b> – Exemplo da feição erosiva do tipo boçoroca no município de São Pedro, dentro da área de estudo. ....	47
<b>Figura 2.6</b> – Efeito da gota de chuva sobre o solo ( <i>raindrop</i> ). ....	50
<b>Figura 2.7</b> – Fluxograma dos métodos de avaliação de erosão hídrica. Fonte: Almorox <i>et al.</i> (1994). ....	56
<b>Figura 2.8</b> – Ilustração de quatro tipos de concavidade e convexidade das formas do terreno. Fonte: Modificado de Troeh (1965). ....	61
<b>Figura 2.9</b> – Reflectividade de um solo argiloso (a) e uma areia (b), NIR e MIR, em dependência da umidade. Fonte: modificado de Kronberg (1984). ....	68
<b>Figura 2.10</b> – Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. Fonte: Câmara (1995). .....	75
<b>Figura 2.11</b> – Limiar de desencadeamento obtido por Menéndez-Duarte <i>et al.</i> (2007) para canais profundos e canais rasos. ....	80
<b>Figura 3.1</b> – Localização da área de estudo. ....	82

<b>Figura 3.2</b> – Mapa do Substrato Rochoso da área de estudo. Fonte: modificado de Gomes (2002). .....	84
<b>Figura 3.3</b> – Mapa de Material Inconsolidado da área de estudo. Fonte: modificado de Gomes (2002). .....	87
<b>Figura 3.4</b> - Mapa de <i>Landform</i> da área de estudo. Fonte: modificado de Gomes (2002). ....	91
<b>Figura 4.1</b> – Fluxograma com as etapas de trabalho. ....	97
<b>Figura 4.2</b> – Pluviógrafo Onset instalado na Sub-bacia do Ribeirão do Retiro. ....	102
<b>Figura 4.3</b> – a) Base estática do GPS GTR-G <sup>2</sup> ; e b) detalhe da coletora de dados da base. ....	103
<b>Figura 4.4</b> – a) Coletora de dados em campo, com o operador; b) computador para armazenamento e organização dos dados coletados; e c) receptor OEMV. ....	103
<b>Figura 4.5</b> – Marco fixo no campo, em local conhecido, para instalação da base do GPS GTR-G <sup>2</sup> (coordenadas do marco em UTM Sirgas: latitude 198663,857m e longitude 7496408,704m e elevação 528,678m, com precisões respectivas de 0,044; 0,009; e 0,025m). ....	104
<b>Figura 4.6</b> – Coleta de um dos Pontos de Controle de Campo (P1), mostrando o procedimento adotado. ....	107
<b>Figura 4.7</b> – a) Estereoscópio de espelho e b) estereoscópio de bolso utilizados para a fotointerpretação deste trabalho. ....	108
<b>Figura 4.8</b> - Estereoscópio Wild Heerbrugg – Type 392824 utilizado no trabalho. ....	109
<b>Figura 4.9</b> – a) marcação do ponto de cabeceira da erosão em campo, com o GPS de Precisão; e b) caminhada no entorno da erosão com o mesmo GPS. ....	113
<b>Figura 4.10</b> – a) Exemplo de uma amostra com <i>Sink</i> e b) mostrando este <i>Sink</i> já corrigido. Fonte: Sobrinho <i>et al.</i> (2010). ....	114

<b>Figura 4.11 - a)</b> Código de direções empregado para distinguir as 8 direções de fluxo possíveis no método D8; <b>b)</b> direção de fluxo adotada automaticamente através da regra da maior declividade. Fonte: Buarque <i>et al.</i> (2009). .....	116
<b>Figura 4.12</b> – Janela de resultados para o ajuste de curvas do programa <i>LabFit</i> . .....	120
<b>Figura 5.1</b> – Mapa de Documentação. ....	125
<b>Figura 5.2</b> – Modelo Digital de Terreno, representado em escala de cinza. ....	127
<b>Figura 5.3</b> – Mapa de Direção de Fluxo. ....	129
<b>Figura 5.4</b> – Porcentagem relativa em área em função das direções de fluxo. ....	130
<b>Figura 5.5</b> – Carta de Declividade. ....	133
<b>Figura 5.6</b> – Mapa de Feições Erosivas. ....	135
<b>Figura 5.7</b> – Fotografia aérea do ano de 1995 ortorretificada. ....	140
<b>Figura 5.8</b> – Fotografia aérea do ano de 2000 ortorretificada. ....	141
<b>Figura 5.9</b> – Fotografia aérea do ano de 2005 ortorretificada. ....	142
<b>Figura 5.10</b> – <b>(a e b)</b> feição erosiva do tipo ravina sendo a erosão 5 da Tabela 5.3; <b>(c e d)</b> feição erosiva do tipo ravina, porém, evoluindo para uma boçoroca. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 1. ....	146
<b>Figura 5.11</b> – Feição erosiva de encosta do tipo ravina que atualmente sofre muita influência do escoamento que vem de uma estrada de chão usada para se chegar a um areal próximo ao rio e que é um dos pontos de controle neste estudo (ponto Pareia da Tabela 5.2). Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 2. ....	147
<b>Figura 5.12</b> – Mesma feição erosiva mostrada na Figura 5.11. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 2. ....	148
<b>Figura 5.13</b> – Feição erosiva de drenagem do tipo ravina, porém evoluindo para uma boçoroca. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 3. ....	149

<b>Figura 5.14</b> – (a, b, c e d) feição erosiva de drenagem do tipo boçoroca. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 4. ....	150
<b>Figura 5.15</b> – (a, b, c e d) principal boçoroca na área de estudo. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 5. ....	151
<b>Figura 5.16</b> – Índice I da relação S x A para cabeceiras de erosões definidas em fotografias aéreas. ....	153
<b>Figura 17</b> – Frequência entre os canais profundos e canais rasos para o Índice I. ....	154
<b>Figura 5.18</b> – Índice II da relação S x A para cabeceiras de erosões definidas em fotografias aéreas. ....	155
<b>Figura 5.19</b> – Frequência entre os canais para o Índice II. ....	156
<b>Figura 5.20</b> – Gráfico com os limiares do Índice I e II representados. ....	158
<b>Figura 5.21</b> – Gráfico com os pontos e limiares para os Índices I e II e também os pontos plotados dos canais rasos e profundos utilizados para a validação dos índices, da Bacia Ribeirão do Meio. ....	161

## LISTA DE TABELAS

---

<b>Tabela 2.1</b> – Agentes causadores de erosão. Fonte: Lal (1990). .....	40
<b>Tabela 2.2</b> – Característica dos processos erosivos. Fonte: Modificado de Vandaele <i>et al.</i> (1996). .....	48
<b>Tabela 2.3</b> – Relação entre velocidade final e altura de queda. Fonte: Rodrigues (1982). .....	52
<b>Tabela 2.4</b> – Métodos de avaliação de erosão hídrica. Fonte: Almorox <i>et al.</i> (1994). .....	54
<b>Tabela 2.5</b> – Fatores que influenciam na erodibilidade do solo. Fonte: Lal (1990). .....	59
<b>Tabela 2.6</b> – Atributos fundamentais para o mapeamento geotécnico. Fonte: modificado de Pejon (1992). .....	63
<b>Tabela 2.7</b> – Regiões do espectro mais adequadas ao estudo de propriedades de minerais e rochas. Fonte: modificado de ENVI (2006). .....	69
<b>Tabela 2.8</b> – Valores recomendados pelo <i>MEET NATIONAL MAP ACCURACY STANDARDS</i> para o tamanho do pixel da imagem em relação à escala do produto final. Fonte: Furquim & Sallem Filho (2002). .....	72
<b>Tabela 2.9</b> – Valores dos coeficientes de regressão ( $a$ e $-b$ ) em diversos estudos realizados no mundo e as unidades que se encontram os valores de área (A) e declividade (S). .....	78
<b>Tabela 3.1</b> – Descrição geral das Formações Geológicas da área. Fonte: IPT (1981). .....	85
<b>Tabela 3.2</b> - Tabela de resultados de ensaios de material inconsolidado associados à Formação Pirambóia na bacia Ribeirão do Meio, segundo Gomes (2002). .....	86
<b>Tabela 4.1</b> – Fotografias aéreas utilizadas neste estudo. ....	100

<b>Tabela 5.1</b> – Definição das classes de declividade conforme as recomendações do uso e restrições e/ou problemas esperados. Fonte: Gomes (2002). .....	131
<b>Tabela 5.2</b> – Pontos de Controle de Campo com as coordenadas planimétricas (com suas precisões em metros) e altimétricas de cada ponto. ....	139
<b>Tabela 5.3</b> – Dados e características das erosões mostradas no Mapa de Feições Erosivas. ....	143
<b>Tabela 5.4</b> – Coeficientes encontrados para as equações dos índices I e II e algumas características relevantes da área deste presente estudo. ....	157
<b>Tabela 5.5</b> – Correlação entre os dados obtidos neste estudo (Brasil) com do estudo desenvolvido na Espanha. ....	159

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

---

A – Área de contribuição da cabeceira de uma erosão

a – Coeficiente de regressão

ABNT / NBR – Associação Brasileira de Normas Técnicas / Norma Brasileira

A<sub>cb</sub> – Índice de atividade da fração argila

APP – Área de Proteção Permanente

b – Coeficiente de regressão

CTC – Capacidade de Troca Catiônica (solo)

CW<sub>a</sub> – Clima Sub-Tropical Úmido

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica

d<sub>pi</sub> – Pontos por polegada

E – Índice de erodibilidade

EESC / USP – Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo

eo – Índice de vazios

EUA – Estados Unidos da América

EUPS – Equação Universal de Perda dos Solos

GNSS - Sistema de Navegação Global por Satélite

GPS – Sistema de Posicionamento Global

IAEG – Associação Internacional de Geologia de Engenharia

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IG – Instituto Geológico do Estado de São Paulo

IGC – Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISPRS – Sociedade Internacional para Fotogrametria e Sensoriamento Remoto

JKb – Formação Botucatu

JKsg – Formação Serra Geral

M.I.R. – Material Inconsolidado Residual

M.I.T. – Material Inconsolidado Transportado

MDT – Modelo Digital de Terreno

MIR – Infra-vermelho médio

NIR – Infra-vermelho próximo

P – Perda de peso por imersão

Prof. – Profundidade

Qa – Sedimentos Aluvionáres

RBMC / POLI - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo / Estação Politécnica

RBMC / PPTE - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo / Estação Presidente Prudente

S – Declividade média

S – Índice de absorção d'água

S.A. – Sedimentos Aluvionares

SE – Superfície específica (solo)

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SP – São Paulo

TrJp – Formação Pirambóia

UFCG / PB – Universidade Federal de Campina Grande / Paraíba

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

UNESP - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

USP – Universidade de São Paulo

UTM – Universal Transverse Mercator

VAIL - Varredura e Integração Locacional

VB – Volume de azul de metileno adsorvido

VIS – Visível

$\rho_d$  – Massa específica seca de campo

$\rho_s$  – Massa específica dos sólidos



# SUMÁRIO

---

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	31
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A TEMÁTICA EM ESTUDO .....	31
1.2 JUSTIFICATIVA .....	33
1.3 OBJETIVOS .....	34
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	35
2.1 EROÇÃO .....	35
2.1.1 Definição .....	35
2.1.2 Principais Tipos de Erosão .....	39
2.1.2.1 <i>Eólica</i> .....	40
2.1.2.2 <i>Glacial</i> .....	40
2.1.2.3 <i>Hídrica</i> .....	41
2.1.3 Feições Erosivas .....	42
2.1.3.1 <i>Laminar</i> .....	42
2.1.3.2 <i>Linear</i> .....	43
2.1.3.2.1 <i>Sulco</i> .....	43
2.1.3.2.2 <i>Ravina</i> .....	44
2.1.3.2.3 <i>Boçoroca</i> .....	45
2.1.4 Dinâmica de Erosão .....	49

2.1.4.1	<i>Impacto das gotas de chuva</i>	49
2.1.4.2	<i>Escoamento Superficial</i>	52
2.1.4.3	<i>Mecanismo de Transporte</i>	53
2.2	MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO EROSIVO	54
2.2.1	Método Qualitativo	55
2.2.2	Método Quantitativo	55
2.2.2.1	<i>Modo Direto</i>	55
2.2.2.2	<i>Modo Indireto</i>	56
2.2.3	Equação Universal de Perda do Solo (EUPS)	56
2.3	FATORES QUE INTERFEREM NA EROSÃO	57
2.3.1	Erosividade da Chuva	57
2.3.2	Erodibilidade do Solo	57
2.3.3	Relevo	60
2.3.4	Vegetação	61
2.4	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO	62
2.4.1	Atributos do Meio Físico	62
2.4.2	Principais Metodologias e Sistemáticas Nacionais e Internacionais	64
2.5	FERRAMENTAS AUXILIARES NO ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS	66
2.5.1	Sensoriamento Remoto	66
2.5.1.1	<i>Fotografias Aéreas</i>	70
2.5.1.2	<i>Imagens de Satélites</i>	72

2.5.2 Geoprocessamento .....	73
2.5.2.1 Sistema de Informação Geográfica (SIG) .....	74
2.6 ÍNDICES QUE RELACIONAM ÁREA (A) VERSUS DECLIVIDADE (S) .....	77
<b>3 CARACTÉRISTICAS GERAIS DA ÁREA .....</b>	<b>81</b>
3.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO .....	81
3.2 CLIMA .....	82
3.3 VEGETAÇÃO .....	83
3.4 GEOLOGIA .....	83
3.4.1 Substrato Rochoso .....	83
3.4.2 Materiais Inconsolidados .....	86
3.5 GEOMORFOLOGIA .....	89
3.6 SOLO .....	91
3.7 ÁGUAS .....	92
3.7.1 Águas Superficiais .....	92
3.7.2 Águas Subterrâneas .....	93
3.7.2.1 Aquífero Botucatu .....	93
3.7.2.2 Aquífero Serra Geral .....	94
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>95</b>
4.1 COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES E DEFINIÇÃO DA ÁREA .....	95
4.1.1 Revisão da Literatura .....	95
4.1.2 Documentos Cartográficos .....	96

4.1.2.1	<i>Mapas Topográficos</i>	96
4.1.2.2	<i>Mapas Geotécnicos</i>	99
4.1.3	Documentos de Sensores Remotos	99
4.1.3.1	<i>Imagens de Satélite</i>	99
4.1.3.2	<i>Fotografias Aéreas</i>	100
4.2	FOTOINTERPRETAÇÃO E TRABALHO DE CAMPO I	100
4.2.1	Etapa I	100
4.2.1.1	<i>Campo de Reconhecimento</i>	100
4.2.1.2	<i>Implantação do Pluviógrafo</i>	101
4.2.1.3	<i>Implantação da Base/marco</i>	102
4.2.1.4	<i>Pontos de Controle de Campo (PCC)</i>	106
4.2.2	Etapa II	107
4.2.2.1	<i>Digitalização das Curvas de Nível</i>	107
4.2.2.2	<i>Fotointerpretação</i>	108
4.3	ORTORRETIFICAÇÃO	109
4.3.1	Procedimento	109
4.3.1.1	<i>MDT</i>	109
4.3.1.2	<i>Orientação Interna e Orientação Externa</i>	111
4.4	TRABALHO DE CAMPO II	112
4.4.1	Levantamento das Erosões	112
4.5	GERAÇÃO DO ÍNDICE (S x A)	113

4.5.1	Processamento Automático .....	114
4.5.1.1	<i>Fill (Preenchimento)</i> .....	114
4.5.1.2	<i>Flow Direction (Direção de Fluxo)</i> .....	115
4.5.1.3	<i>Flow Accumulation (Acumulação de Fluxo)</i> .....	116
4.5.1.4	<i>Stream to Feature (Canal Matricial para Vetorial)</i> .....	116
4.5.1.5	<i>Watershed (Determinação das Áreas de Contribuição das Erosões)</i> .....	117
4.5.2	Processamento Manual .....	117
4.5.3	Relação entre Declividade (S) <i>versus</i> Área de Contribuição (A) .....	117
4.5.4	LabFit .....	119
4.6	VALIDAÇÃO DO ÍNDICE (S x A) .....	120
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>123</b>
5.1	DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS .....	123
5.1.1	Mapa de Documentação .....	123
5.1.2	MDT (Modelo Digital de Terreno) .....	124
5.1.3	Mapa de Direção de Fluxo / Vertente .....	128
5.1.4	Carta de Declividade .....	130
5.1.5	Mapa de Feições Erosivas .....	132
5.2	ORTOCORREÇÃO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS .....	123
5.3	INVENTÁRIO DAS FEIÇÕES EROSIVAS .....	143
5.4	GERAÇÃO DO ÍNDICE A PARTIR DA RELAÇÃO S x A .....	151
5.4.1	Índice I .....	152

5.4.2 Índice II .....	154
5.4.3 Comparação entre os Índices I e Índice II .....	156
5.5 VALIDAÇÃO DOS ÍNDICES .....	160
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>163</b>
<b>7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>167</b>

# INTRODUÇÃO

---

## 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS SOBRE A TEMÁTICA EM ESTUDO

Em todo o mundo, as erosões lineares (sulcos, ravinas e boçorocas) causam grandes perdas econômicas e representam riscos ambientais. O processo de erosão envolve um conjunto de fatores que estão intrinsecamente ligados, tais como condições climáticas, características hidrológicas, hidrogeológicas, geológicas, pedológicas e geomorfológicas de cada local e inicia-se onde há uma combinação de vários destes fatores. Um fator fundamental é a quantidade e a velocidade de escoamento superficial da água e sua concentração em determinado ponto, seja este escoamento influenciado de maneira natural ou antrópica, por exemplo, através de vias de escoamento de estradas vicinais. Uma relação muito encontrada na literatura diz respeito à relação entre a declividade ( $S$ ) de um determinado terreno e a área ( $A$ ) de contribuição necessária para que este processo, de erosão linear, tenha início.

Ligações entre processos erosivos e mudanças climáticas são sugeridos por Poesen *et al.* (2003), que indicam a necessidade de estudos a longo período de tempo, para avaliar a contribuição das erosões para a perda total do solo e para a produção de sedimento. Diferentes estudos sobre a morfometria das erosões lineares têm encontrado correlações entre taxas de erosão e áreas de drenagem,

como mostram Vandekerckhove *et al.* (2000a) e também com o comprimento dos canais, segundo Nachtergaele *et al.* (2001). Patton & Schumm (1975) encontraram uma relação inversa entre a área de drenagem (A) e declividade (S) acima do topo dos canais e identificaram o limite inferior de dispersão destes dados, estabelecendo uma relação entre a declividade crítica e a área que pode indicar o limiar de início de um canal de erosão linear. Esta dependência dos fatores topográficos para canais de iniciação são formulados através da equação  $S=aA^{-b}$  (onde a e b são coeficientes de regressão) e tem sido amplamente usados nas análises de processos erosivos, como relatado por vários autores (Patton & Schumm, 1975; Dietrich *et al.*, 1986, 1992; Montgomery & Dietrich, 1994; Prosser & Abernethy, 1996; e Vandekerckhove *et al.*, 2000a e b; Nachtergaele *et al.*, 2001; Poesen *et al.*, 2003; Stankoviansky, 2003; Gábris & Zámbo, 2003; Martínez-Casasnovas, 2003; Vanwallegem *et al.*, 2003, 2005; Menéndez-Duarte *et al.*, 2007; Samani *et al.*, 2009; entre outros). Essas relações morfométricas foram usadas para propor um limiar topográfico para formação de canais de erosão linear e explorar a sua variabilidade espacial.

Dentre os diversos tipos de ocorrência da erosão linear, a mesma pode ser classificada, simplificadamente, em três feições principais, que a depender de sua magnitude classificam-se em: sulco (erosão linear com até 0,5m de profundidade), ravina (erosão linear com profundidade maior que 0,5m e perfil em “V”) e boçoroca (erosão linear de grande porte, com perfil em “U” e, geralmente, alcança o nível d’água). O estudo de áreas com problemas deste tipo exige uma análise de certas particularidades, tais como: tipo de solo, propriedades do solo, características da chuva local e regional, e características do terreno. O substrato rochoso e o uso e ocupação dos solos são, freqüentemente, introduzido como variáveis de controle na análise das condições dos processos erosivos (Kirkby & Bull, 2000; Hessel & Van Asch, 2003; Poesen *et al.*, 2003; Moeyersons, 2003; Vanwallegem *et al.*, 2005; Valentin *et al.*, 2005). Estudos na Europa revelam que estes processos erosivos estão quase sempre associados a eventos históricos e a processos de desmatamento e de mudanças em práticas agrícolas (Howard, 1999). A análise histórica das erosões

é muitas vezes baseada na interpretação de fotografias aéreas e mapas históricos, que mostram claramente correlações entre mudanças na utilização dos solos e o desenvolvimento da erosão, permitindo uma estimativa da quantidade de material erodido (Stankoviansky, 2003; Gábris & Zámbo, 2003; Martínez-Casasnovas, 2003; Vanwallegem *et al.*, 2003, 2005). O papel do desmatamento no desenvolvimento da erosão tem sido amplamente descrito em diversos locais, como por exemplo, nos Estados Unidos (Montgomery & Dietrich, 1994; Howard, 1999) e Europa (Poesen *et al.*, 2003; Menéndez-Duarte *et al.*, 2007).

Muitos estudos foram desenvolvidos no Brasil a respeito dos processos erosivos, podendo ser destacados os estudos de Vieira (1978); Rodrigues (1982); Vilar (1987); IPT (1987 e 1989); Bertoni & Lombardi Neto (1990); DAEE (1990); Pejon (1992); Pejon & Zuquette (1999); Gomes (2002); Zuquette (2002); e Dantas-Ferreira (2008). No entanto, nenhum dos estudos realizados no país propõe um limiar topográfico para o início do processo erosivo, através da relação inversa entre a área de drenagem (A) e declividade (S).

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Em uma breve pesquisa bibliográfica, notou-se a necessidade da criação e aplicação de um modelo, utilizando-se de vários parâmetros, sejam eles geológico, pedológico, geomorfológico e de uso e ocupação do solo, com a aplicação desse estudo a um programa de SIG (Sistema de Informação Geográfica), com o fim de se obter um índice de limiar topográfico para o desencadeamento do processo erosivo linear. Com isso, este trabalho se justifica, pois pretende preencher algumas lacunas de dados para esta relação entre área de drenagem (A) e declividade média (S), para o estudo de predição de processos erosivos para climas tropicais, onde as condições do solo se apresentam diferentes, em relação aos estudos desenvolvidos em outros países, como nos Estados Unidos e Europa.

A área geográfica onde será aplicado o modelo está compreendida no município de São Pedro – SP e foi escolhida por ser intensamente afetada pelos diferentes tipos de processos erosivos e por ter tido inúmeros estudos que subsidiarão o emprego do modelo a ser desenvolvido em termos dos parâmetros que serão considerados. A área de estudo abrange duas sub-bacias (Córrego Água dos Alpes e Córrego do Retiro) da bacia do Córrego Ribeirão do Meio, e se caracteriza litologicamente por apresentar arenitos avermelhados de granulação média a fina, com estratificações cruzadas, pertencente à Formação Pirambóia.

### **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo principal deste estudo é propor um índice que relacione a área de contribuição (A), a partir da cabeceira das erosões existentes na área de estudo, com a declividade média desta área (S).

Pretende-se também comparar os índices obtidos a partir das áreas de contribuição (A) e declividade média (S), determinadas a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) e a partir da delimitação das bacias de contribuição em fotografias aéreas ortorretificadas.

Outro objetivo que se pretende alcançar neste estudo é fazer a validação do índice obtido por meio de sua aplicação em uma área maior e verificar sua adequação.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

---

### 2.1 EROSÃO

#### 2.1.1 Definição

De acordo com Fournier (1960) e Zachar (1982) o significado etimológico da palavra “Erosão”, proveniente do Latim “*Erodere*” ou “*Erosio*” (Lal, 1990), é corroer, desgastar. O termo erosão foi usado pela primeira vez em geologia para descrever a formação de “buracos” causados pela água, através do desgaste de material sólido pela ação das águas dos rios (Penck, 1884), enquanto que o carreamento e precipitação da superfície erosiva foram chamados de ablação.

Uma das primeiras definições de erosão do solo pode ser encontrada no trabalho de Ellison (1947d) (importante estudo do autor realizado em sete partes), como sendo um processo de desagregação e transporte de materiais do solo por agentes erosivos, caracterizado por dois eventos seqüenciais principais: no primeiro as partículas do solo se tornam soltas (desagregadas) de sua estrutura, com isso, disponíveis para o transporte; no segundo evento (transporte), os materiais desagregados (partículas) do solo são transportados.

Erosão do solo para Weggel & Rustom (1992) é a desagregação e carreamento de partículas do solo, a partir de uma posição inicial, resultado da ação de processos naturais, como por exemplo: precipitação, escoamento

superficial, ventos e escorregamentos; assim como das atividades antrópicas que alteram a cobertura de proteção da superfície do terreno.

Segundo os autores Vilar (1987) e Vilar & Prandi (1993), a erosão consiste em diversos processos pelos quais, os materiais da superfície terrestre são desagregados, dissolvidos ou desgastados e carreados de um ponto a outro pelos agentes erosivos, como as geleiras, rios, mares, vento ou chuva.

A fim de se buscar um entendimento quanto a este tipo de fenômeno, possibilitando sugerir medidas de prevenção e controle, associado, principalmente, ao uso e ocupação do solo, diversos estudos vêm sendo realizados para o controle de erosão do solo, como, por exemplo, os trabalhos dos autores Vieira (1978); e Bertoni & Lombardi Neto (1990). Para esses autores a *“erosão é um fenômeno complexo e ocorre de formas diversas de acordo com as características do meio físico”*, sendo o resultado do balanço de forças ativas e passivas. Como forças ativas são considerados: chuva, declividade e o comprimento do declive do terreno e a capacidade que o solo apresenta de absorver água; enquanto que para as forças passivas são considerados a resistência do solo à ação erosiva da água e a densidade da cobertura vegetal.

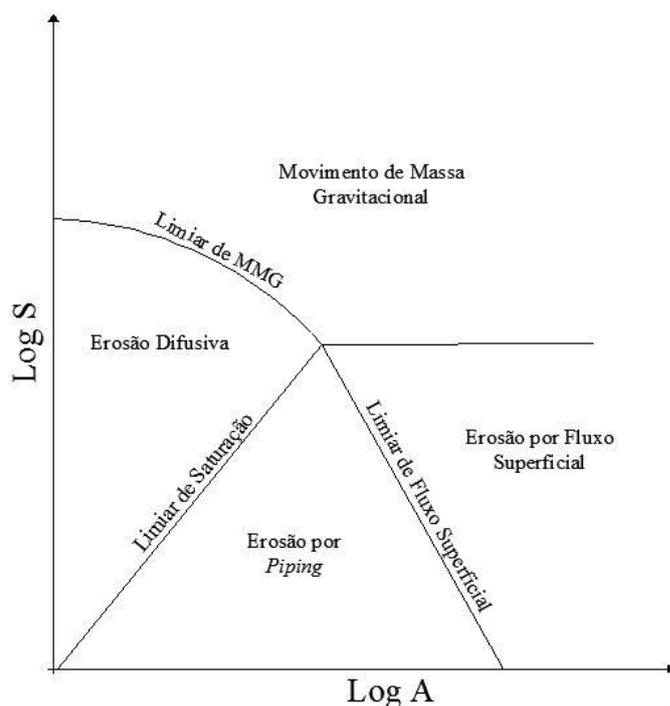
Nordström (1988) diferencia, em função de fatores ambientais como clima, topografia, vegetação, solo e uso e ocupação, os processos de erosão do solo e movimentos de massa.

Pejon (1992) diz que o fenômeno da erosão consiste na ação combinada de uma gama de fatores que provocam o destacamento e o transporte de materiais sobre a superfície terrestre. Os processos erosivos dependem de uma série de fatores naturais que podem ser intensificados pela ação antrópica, ocasionando uma aceleração do processo erosivo. O autor ainda define as erosões quanto à sua forma, em: erosão laminar e erosão linear.

Os processos de erosão são comuns em todo o mundo, porém, suas causas dependem de diferentes fatores que somados, podem ser mais ou

menos intensos em determinado ambiente. Uma relação muito encontrada na literatura sobre as erosões é o fato de as mesmas serem relacionadas a diversos processos naturais, principalmente com fatores climáticos.

Alguns autores (Dietrich *et al.*, 1986, 1992; Montgomery & Dietrich, 1994; e Prosser & Abernethy, 1996) propuseram um modelo analítico simples para a iniciação de canais de erosão por diferentes processos, que envolvem diferentes relações entre a contribuição da área de drenagem ( $A$ ) e a declividade local ( $S$ ) no canal principal, enquanto que outros autores (Patton & Schumm, 1975; Schumm *et al.*, 1980; Moeyersons, 2003; Vanwallegem *et al.*, 2005; Menéndez-Duarte *et al.*, 2007; e Samani *et al.*, 2009) consideram esta mesma área de contribuição ( $A$ ), porém relacionado com a declividade média ( $S$ ) desta área. De acordo com Vandekerckhove *et al.* (2000a e b) a variação espacial no domínio de diferentes canais iniciados e mecanismos de transporte de sedimentos, pode ser definido quantitativamente. Na Figura 2.1, conforme Montgomery & Dietrich (1994) é apresentado uma divisão teórica da paisagem dentro do processo de erosão em termos de  $S$  e  $A$ , embora a posição individual de cada limiar possa variar de acordo com os diferentes climas e uso da terra.



**Figura 2.1** – Divisão da paisagem dentro dos regimes de processos com diferentes transportes sedimentares e mecanismos de iniciação de canais.  $A$  = área de drenagem das bacias;  $S$  = declividade local da superfície do solo. Fonte: modificado de Montgomery & Dietrich (1994).

Schumm *et al.* (1984) definem erosão como um tipo de canal cuja formação é causada por uma grande variedade de fatores: geológico, geomorfológico, climático, hidrológico, orgânico e antrópico. Já Poesen *et al.* (2003) sugerem ligações entre erosões e mudanças climáticas e indicam, ainda, a necessidade de estudos de longo período de tempo, para avaliar a contribuição dessas erosões para a perda total do solo.

Estudos sobre a morfometria das erosões têm encontrado correlações entre taxas de erosão do solo e as áreas de drenagem (Vandekerckhove *et al.*, 2000a e b), e também com o comprimento dos canais, segundo Nachtergaele *et al.* (2001).

A análise histórica da evolução das ravinas e de seu relacionamento com o desenvolvimento da ocupação e uso da terra é um importante instrumento para o melhor entendimento das causas dos processos erosivos. Nesse sentido, os estudos baseados na interpretação de fotos aéreas e imagens de satélites podem mostrar claramente correlações entre as mudanças na

utilização de solos e o desenvolvimento da ravina, permitindo estimar quantitativamente o material erodido (Stankoviansky, 2003; Gábris & Zámbo, 2003; Martínez-Casasnovas, 2003; Vanwalleghem *et al.*, 2003, 2005).

Segundo Pejon (1992) com o passar dos anos e a conscientização por parte de estudiosos da área, passaram-se a utilizar as informações do meio físico. Assim, o mapeamento geotécnico passou a ter grande importância para estudos do meio físico, por reunir, interpretar e apresentar, de forma compreensível à profissionais de outras áreas, informações geológico – geotécnicas.

Menéndez-Duarte *et al.* (2007) estudaram processos erosivos ocorridos na Cordilheira Cantabrian (norte da Espanha), vinculando sua forma com diversos fatores, tais como as características de uso e ocupação do solo, topografia local e elementos geológicos e geomorfológicos. Essas análises foram baseadas em estudos comparando bacias com e sem evidência de ravinamento e foram feitos estudos de campo e de fotointerpretação de imagens aéreas, bem como a combinação de informações cartográficas e análises morfométricas em SIG (Sistema de Informação Geográfica).

### **2.1.2 Principais Tipos de Erosão**

A erosão é um fenômeno que pode ser percebido em todo o globo terrestre, porém, sob as diferentes condições dos diversos tipos de ambientes, ela pode surgir de várias maneiras. Com o intuito de entender melhor este fenômeno que pode ser definido em função de dois principais agentes: o homem (acelerada ou induzida) e os fenômenos naturais (ação das águas, vento, gelo), muitos estudiosos ao longo dos anos vem estudando este processo (Bennett, 1939; Ranzani, 1969; El Swaify & Dangler, 1982; Lal, 1990; Pejon, 1992; Poesen *et al.*, 2003; Menéndez-Duarte *et al.*, 2007).

De acordo com cada agente causador do processo erosivo, Lal (1990) classifica os diversos tipos de erosão, como pode ser observado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** – Agentes causadores de erosão. Fonte: Lal (1990).

Tipo de Agente			Tipo de Erosão	
Vento			Eólica	
Fluidos	Água	Chuva		Por impacto das gotas
		Escoamento	Superficial	Sulcos Ravinas Boçorocas Canais fluviais
			Subsuperficial	Em condutos subterrâneos
		Oceano		Costeira
	Gelo		Glacial	
Gravidade	Movimento de Massa		Avalanche Escorregamento Solifluxão Rastejo	

Como pode ser visto na Tabela 2.1, existem 3 principais tipos de agentes erosivos, que são: i) ventos; ii) fluidos; e iii) gravidade, apresentando como principais tipos de erosão, respectivamente, a erosão eólica, erosão hídrica e o movimento de massa.

### 2.1.2.1 Eólica

O processo de erosão eólica se dá pela desagregação e remoção de fragmentos e partículas de solo e rocha pela ação do vento. Em rochas, somente a ação do vento não produz erosão, o desgaste da rocha é provocado pelo impacto das partículas sólidas existentes no ar e carregada pelo vento. Em solos, o vento atua como veículo de transporte, pois as partículas são desagregadas mais facilmente por diversos agentes, agindo no sentido de colocá-las em suspensão (Fornasari Filho *et al.*, 1992).

### 2.1.2.2 Glacial

O gelo provoca erosão das rochas de maneira semelhante à erosão causada pela ação das águas. Tanto o gelo quanto a água, como agentes transportadores, podem exercer grande força contra um obstáculo e

desfragmentá-lo e podem carregar esses fragmentos de rocha como instrumentos de abrasão da superfície por onde passam. A água apresenta uma maior velocidade de fluxo e turbulência, enquanto que o gelo apresenta uma maior rigidez e habilidade de fundir-se e regelar durante a passagem por um obstáculo. Como feições mais comuns da erosão e transporte pela ação do gelo, temos: arranhaduras e sulcos traçados na superfície das rochas e as superfícies facetadas, polidas, dos fragmentos rochosos (Bloom, 1970).

### ***2.1.2.3 Hídrica***

Como um dos fenômenos mais comuns na natureza, a erosão hídrica tem como principal característica o desgaste da superfície terrestre, tendendo a suavizar os acidentes geográficos, sendo definido como erosão normal por Ranzani (1969). Esse tipo de erosão, quando ganha mais energia, é conhecida como erosão acelerada, podendo manifestar-se sob duas formas: laminar e linear.

Duas classes de erosão hídrica foram distinguidas por Bennett (1939) e mais tarde por El Swaify & Dangler (1982), sendo a primeira natural ou geológica e a segunda conhecida como acelerada. Porém Bennett (1939) considerou apenas a erosão acelerada como sendo realmente uma erosão do solo e a dividiu em naturalmente acelerada e acelerada pelo homem, enquanto que El Swaify & Dangler (1982) diz que a erosão natural (ou geológica) é um processo lento e contínuo de evolução da superfície terrestre e que a erosão acelerada é um processo rápido, induzido, principalmente, pelas atividades humanas.

Bennett (1939) diz ainda que a erosão do solo deve se referir somente a situações mais severas, em relação à intensidade, do que aquelas que ocorrem em ambientes naturais sem interferência da ação antrópica.

Para Pejon (1992), a erosão é classificada como natural, quando há a atuação de processos erosivos em ambiente controlado apenas pelo equilíbrio

dos fatores naturais, se processando ao longo do tempo geológico, ou seja, sem a influência do homem.

### **2.1.3 Feições Erosivas**

Como visto anteriormente, a erosão hídrica pode ser, de acordo com a intensidade, tempo e agente erosivo, divididas em diversas nomenclaturas: natural ou geológica (Bennett, 1939; El Swaify & Dangler, 1982); superficial, em sulco e profunda (Carson & Kirkby, 1975; Pontes, 1980); laminar, em sulco e em boçoroca (Ranzani, 1969; Bertoni & Lombardi Neto, 1985; Guerra & Cunha, 1995); laminar e linear (Pejon, 1992; Yamanouth, 2003).

#### **2.1.3.1 Laminar**

A erosão laminar ocorre na superfície do solo, quando o escoamento superficial se distribui pela encosta como um todo, sem se concentrar em canais (Pejon, 1992; Guerra & Cunha, 1995), como pode ser observado na Figura 2.2.

Esta não é uma feição erosiva de fácil percepção, sendo evidenciada por tonalidades mais claras do solo, exposição de raízes e queda da produtividade agrícola, diz Ridente Jr. (2000).

Quando a velocidade da água causa uma ação erosiva mais intensa, tanto à jusante como à montante, o escoamento deixa de ser laminar e uniforme e passa a se concentrar em filetes, causando um abatimento vertical (Bigarella & Mazuchowski, 1985).



**Figura 2.2** – Exemplo de feição erosiva laminar no município de São Pedro.

### ***2.1.3.2 Linear***

A erosão linear é caracterizada pela formação de filetes ou canais que podem se apresentar como sulcos, ravinamentos, ou atingir maiores profundidades, denominados boçorocas, podendo, neste caso, interceptar o nível d'água (Pejon, 1992).

#### ***2.1.3.2.1 Sulco***

Este tipo de erosão se dá como um pequeno corte/talho no solo, apresentando uma largura e profundidade menor que 0,5m. Fournier (1960) descreve erosão em sulcos como sendo o arrastamento de partículas do solo pela água, perpendicularmente às curvas de nível, resultando em pequenas reentrâncias que se desenvolvem sobre a superfície.

No Glossary of Soil Science Terms (2008), sulcos são descritos como um processo erosivo, que ocorre principalmente em terrenos recentemente cultivados, em relevos inclinados, na qual ocorrem, aleatoriamente, numerosos canais pequenos, com poucos centímetros de profundidade.

A Figura 2.3 exibe um exemplo deste tipo de feição erosiva encontrada na área de estudo, na região de São Pedro/SP.



**Figura 2.3** – Exemplo da feição erosiva do tipo sulco no município de São Pedro, dentro da área de estudo.

#### 2.1.3.2.2 Ravina

É um processo erosivo mais intenso que o sulco, atingindo dimensões superiores a 0,5m e ocorre quando a água superficial se concentra em um determinado local, criando um canal preferencial de escoamento, apresentando assim uma seção transversal em forma de V e sem vegetação densa (Figura 2.4). Fournier (1960) diz que este é um processo no qual a água

escava o solo, em um canal preferencial, podendo atingir a rocha mãe, em fase mais avançada de evolução.

Poesen *et al.* (2003) definiram ravinas como sendo um processo erosivo, através do escoamento superficial da água que se dá, em função de seu acúmulo e que, freqüentemente, se repete em canais estreitos e, em períodos curtos, fazendo com que o solo seja removido, nesta área restrita a grandes profundidades.



**Figura 2.4** – Exemplo da feição erosiva do tipo ravina no município de São Pedro.

#### 2.1.3.2.3 Boçoroca

Para Pichler (1953), configura-se uma boçoroca a erosão desenvolvida não somente por águas superficiais, mas também por fluxos de águas

subterrâneas, através do lençol freático, com o surgimento de tubos do tipo *piping*.

Rodrigues (1982) apresenta uma ampla revisão a respeito do desenvolvimento dos conhecimentos acerca do fenômeno da boçoroca, que para ele são ravinas profundas de erosão que se desenvolvem, tanto em sedimentos como em solos, em taludes naturais e artificiais e que se instalam em terrenos de baixa declividade. São formadas através do escoamento superficial das águas, ou através da associação deste com a erosão sub-superficial.

Suguo (1998) define como:

*“Feição erosiva originada por ação de escoamento de água superficial que, através da erosão laminar, provoca uma incisão no manto de intemperismo ou em rochas sedimentares pouco coerentes da superfície do terreno. (...) Neste caso, o processo inicia-se pela erosão superficial a partir de estrias ou valetas antigas em regiões de topografias favoráveis que, freqüentemente pode ser combinada com a erosão subterrânea”.*

Samani *et al.* (2009) diz que as boçorocas são reconhecidas como um grave problema de degradação dos solos, causando impactos tanto no local, através da perda direta do solo; quanto mais distante de seu local de início, através da deposição de sedimentos em ambientes a jusante. Para alguns autores (Nordström, 1988; Poesen *et al.*, 2003), as boçorocas são formadas pela ação erosiva da água e são caracterizadas por um canal com uma acentuada incisão de cabeceira ativa, parede lateral instável e fluxo de água temporário.

A Figura 2.5 mostra um exemplo de uma feição erosiva do tipo boçoroca, de grandes dimensões, onde se pode observar que a mesma já se encontra em fase de estabilização, devido ao fato de apresentar bastante vegetação em seu interior, inclusive árvores de médio porte. Esta boçoroca se encontra dentro da área de estudo desta dissertação.



**Figura 2.5** – Exemplo da feição erosiva do tipo boçoroca no município de São Pedro, dentro da área de estudo.

Na Tabela 2.2 é apresentado, segundo Vandaele *et al.* (1996), um comparativo com as principais características dos diferentes tipos de erosão hídrica, a saber: erosão laminar e sulco; ravina e boçoroca.

**Tabela 2.2** – Característica dos processos erosivos. Fonte: Modificado de Vandaele *et al.* (1996).

<b>Erosão Laminar e Sulco</b>	<b>Ravina</b>	<b>Boçoroca</b>
Ocorre em relevos com declive bastante suave (sobre a linha de drenagem)	Ocorre em canais de drenagem rasos (à montante desses canais)	Ocorre, geralmente, bem definidas em canais de drenagem
Pode ser de qualquer tamanho, mas, normalmente, menor que canais de fluxos concentrado	Não possui um tamanho definido, porém, é intermediário entre o sulco e a boçoroca	São bem maiores em largura e profundidade em relação aos sulcos e ravinas
O padrão de fluxo desenvolve pequenos canais paralelos e desconectados que terminam em canais de fluxo concentrados	Normalmente apresenta uma forma dendrítica padrão por onde a água tende a escoar. Esse fluxo é influenciado, geralmente, por feições criadas pelo homem para a agricultura	Apresenta um padrão dendrítico por cursos naturais de escoamento. Pode ocorrer também em divisões de canais e em diques de estradas
Os cortes transversais dos sulcos, geralmente, são estreitos e pouco profundos	Os cortes transversais são geralmente mais largos e pouco profundos. Suas paredes laterais não são muito bem definidas	Os cortes transversais são geralmente mais estreitos em relação à profundidade. Suas paredes são bastante íngremes
Sulcos removidos pela agricultura, normalmente não voltam a aparecer no mesmo lugar	Feições temporárias, pois podem ser removidas e/ou recuperadas, por algum tipo de cultivo de terra	Não é removida por quaisquer tipos de cultivo de terra
Baixa taxa de erosão, dificilmente visível	Podem ou não ser visíveis	Erosão facilmente reconhecível e visível, devido suas grandes proporções
Separação e transporte por gotas de chuva e fluxo superficial, respectivamente	Separação e transporte por fluxo superficial	Destacamento e transporte por fluxo superficial, com quedas de bancos instáveis nos canais e alargamento da cabeceira

### Piping

*Piping* é um processo de erosão interna, ligado às boçorocas, que apresenta um mecanismo de atuação bastante complexo. Segundo Folque (1977), *piping* é um fenômeno causado por percolação de água em maciços terrosos, cujos mecanismos estão relacionados quantitativamente com a

resistência à tração do solo, dependendo assim, de seu estado de tensão, granulometria e composição.

Hagerty (1991) descreve este processo como sendo o momento em que as forças geradas pelo gradiente hidráulico superam as forças de resistência, tais como: atrito entre partículas, interferindo no movimento; coesão entre os grãos; cimentação e aglutinação por raízes.

Para Bonelli *et al.* (2006), erosão interna do solo (*piping*), é um fenômeno que ocorre com frequência em obras hidráulicas, onde envolve a formação e evolução de um túnel contínuo entre a montante e a jusante e quando induzida pelo fluxo de infiltração é a principal causa dos grandes fracassos de obras de engenharia (diques e barragens).

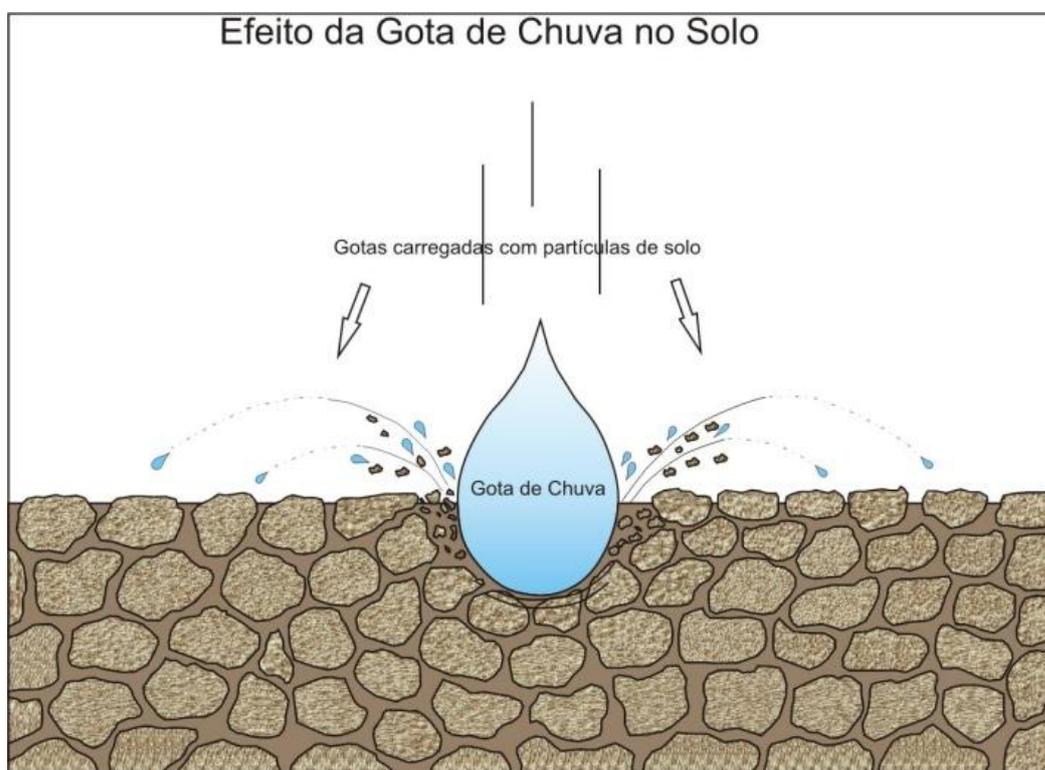
## **2.1.4 Dinâmica de Erosão**

### **2.1.4.1 Impacto das gotas de chuva**

Os primeiros estudos a respeito do efeito causado pelo impacto das gotas de chuva na erosão do solo, onde reúnem medidas da velocidade de queda das gotas e a distribuição das dimensões das mesmas sob chuva natural, foram realizados por Laws (1940).

Ellison (1944; 1947a e b) e Rose (1960) descreveram o impacto das gotas da chuva como sendo um dos processos mais atuantes para a causa da erosão, uma vez que causa o deslocamento e lançamento de partículas do solo por dezenas de centímetros. Neste trabalho (Ellison, 1947c), o autor considera a gota de chuva e o escoamento superficial como sendo dois agentes erosivos diferentes, onde a principal diferença está na energia da queda das gotas, que se dá no sentido vertical descendente, com velocidades de  $9,14\text{cm.s}^{-1}$ , enquanto que no escoamento esta energia se dá na horizontal com velocidade de poucos centímetros por segundo ( $\text{cm.s}^{-1}$ ).

Ainda com relação às gotas de chuva, Ellison (1944 e 1947a) observa que ao se colidirem contra o solo, lançam uma série de fragmentos ao ar (Figura 2.6). Ao serem lançadas ao ar, estas partículas de solo podem atingir alturas aproximadas de 0,6m e se deslocarem por até 1,5m na horizontal. Outro fato importante observado pelo autor é que, sobre taludes com inclinação maior que 10% e sem influência do vento,  $\frac{3}{4}$  das partículas lançadas pelo impacto das gotas movem-se para jusante do ponto de colisão, contra  $\frac{1}{4}$  que se movem para a montante.



**Figura 2.6** – Efeito da gota de chuva sobre o solo (*raindrop*).

A erosão do solo poderá sofrer influência da gota de chuva de três maneiras distintas, descreve Ellison (1947a e b), sendo: i) através do rompimento de torrões e agregados do solo em partículas menores, processo também chamado de destacamento; ii) as partículas são lançadas para fora do local de impacto, processo chamado de transporte; e iii) seu poder erosivo é aumentado quando há a formação de turbulência onde essas partículas atingem uma lâmina de escoamento superficial.

Meyer *et al.* (1975) diz que não somente o impacto das gotas de chuva desagrega as partículas de solo, como os impactos subseqüentes quebram os agregados do solo, que são carregados mais tarde, através do fluxo superficial laminar, em direção aos sulcos.

Quando uma gota de chuva atinge o solo verticalmente, ocorrem duas situações (Carson & Kirkby, 1975): i) há o aparecimento de uma pequena cratera de impacto com uma borda circundante elevada; e ii) há o lançamento de um número considerável de partículas de solo em todas as direções, que pode chegar a distâncias consideráveis.

Uma gota de chuva, ao atingir o solo, levanta partículas do solo e as arremessa longe, envoltas por uma lamina d'água. Como efeitos secundários deste processo têm-se: remoção de novas partículas com o impacto das primeiras; armação do solo, produzida pela retirada de finos e a compactação e fechamento da superfície (Vilar, 1987).

Para Lal (1990), a ação do impacto das gotas de chuva acontece em dois momentos diferentes: através do destacamento e transporte das partículas de solo. E uma vez transportadas, o transporte poderá se dar de duas formas: um causado pelo próprio impacto físico das gotas contra o solo e outro através do carregamento realizado pelo escoamento superficial.

Muitos autores (Clowes & Comfort, 1983; Al-Durrah & Bradford, 1981 e 1982) realizaram mensurações a respeito do tamanho médio de uma gota de chuva e velocidade que as mesmas atingem o solo. Porém, coube a Rodrigues (1982) apresentar uma relação direta entre diâmetros estabelecidos e altura necessária de queda para que se atinja 95% da velocidade final, como pode ser observado na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Relação entre velocidade final e altura de queda. Fonte: Rodrigues (1982).

<b>Diâmetro da gota (mm)</b>	<b>Velocidade final (m/s)</b>	<b>Altura de queda para atingir 95% da velocidade final (m)</b>
0,3	1,0	-
0,5	2,0	-
1,0	4,0	2,2
2,0	6,5	5,0
3,0	8,1	7,2
4,0	8,8	7,8
5,0	9,1	7,6
6,0	9,3	7,2

#### **2.1.4.2 Escoamento Superficial**

Grande parte dos trabalhos sobre erosão são estudos realizados, principalmente, em países de clima Temperado (clima Temperado Quente) e clima Continental (clima Temperado Frio), que são caracterizados por apresentarem estações bem definidas, segundo a classificação de Köppen (1936), atualizado por Peel *et al.* (2007).

Diferente dos estudos desenvolvidos em países de climas mais frios, o processo erosivo em clima Tropical, tem como principal característica a presença de forte precipitação ao longo do ano, também segundo a classificação de Köppen-Geiger.

Deste modo, o processo erosivo, como qualquer sistema natural, apresenta uma gama de atributos do meio físico que estão em equilíbrio, como o fator climático, relevo, vegetação, uso e ocupação e um condicionante muito importante, a ação da água pluvial. Tão frágil é este equilíbrio, que qualquer que seja o fator que interfira em um destes parâmetros, haverá uma desestabilização da condição inicial, tendendo este meio a um novo equilíbrio. Como resposta à este desequilíbrio, o escoamento superficial, porém, poderá ser o fator de iniciação, desencadeando o processo erosivo.

Para Rodrigues (1982), o escoamento superficial trata-se basicamente da ocorrência e transporte da água na superfície do terreno, porém, separa o escoamento em três tipos diferentes, sendo: a) escoamento em filetes, parcela

de água da chuva que não infiltra no solo e se acumula nos terrenos planos, principalmente, tendendo a escoar pelas encostas; b) escoamento laminar, com o aumento da precipitação, a carga sólida transportada é maior e com grãos mais grossos da fração areia, sendo este transporte preferencialmente por saltação e rolamento, com velocidade muito inferior à da água e sua carga em suspensão; e c) escoamento concentrado, quando o fluxo de água se concentra em canais estáveis e a capacidade de transporte é bastante alta, carreando materiais de quaisquer granulometria encontrados na área.

A erosão causada pelo escoamento superficial (*runoff*) das águas pluviais foi classificada em natural e antrópica por Oliveira *et al.* (1987), e Stein *et al.* (1987). A erosão classificada como natural é quando, segundo Pejon (1992), os processos erosivos ocorrem em ambiente, onde é controlada apenas pelo equilíbrio dos processos naturais e ocorrem lentamente ao longo do tempo geológico, podendo receber a nome de erosão normal. Segundo o mesmo autor, a erosão antrópica é quando o homem interfere no meio natural, desequilibrando-o. E considera também que a mesma só pode ser considerada como erosão acelerada, sendo mais rápida que a erosão acelerada natural, podendo evoluir em poucos anos e por extensas áreas.

Escoamento superficial, no Glossary of Soil Science Terms (2008), é definido como: “*água que flui sobre a superfície do solo em direção a um canal, ao atingir o canal, ele é chamado de escoamento superficial. Também conhecido como fluxo de superfície*”.

#### **2.1.4.3 Mecanismo de Transporte**

Ao definir erosão do solo como destaque de massa de solo e transporte de materiais, Ellison (1947a) subdivide o processo de transporte em dois mecanismos, um por processo de *splash* (impacto das gotas de chuva) e outro por escoamento superficial. Porém, Ellison (1947e) expressa o transporte de material do solo em função de três fatores, como apresentado na Equação 2.1.

$$T1 = f(T2, T3, D1) \quad (2.1)$$

Onde:

T2 = transportabilidade do solo;

T3 = capacidade do agente transportador; e

D1 = destacabilidade do solo.

O impacto das gotas de chuva é considerado, por Miller & Baharuddin (1987), como principal agente responsável pelo destacamento de partículas da matriz do solo, onde as mesmas são transportadas, por uma lâmina delgada, para os canais. Os autores consideram como fator importante, o tamanho das partículas e a estabilidade dos agregados, no processo de destaque e transporte de material.

## 2.2 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO PROCESSO EROSIVO

Para a avaliação da erosão hídrica, são conhecidos dois métodos, cujo objetivo é o de qualificar e quantificar este fenômeno erosivo sob diversos aspectos em seu desenvolvimento. Esses métodos foram classificados como (Almorox *et al.*, 1994): método de avaliação qualitativa e método de avaliação quantitativa (Tabela 2.4), sendo o primeiro a análise das formas e grau da erosão e o segundo características pertinentes do sistema.

**Tabela 2.4** – Métodos de avaliação de erosão hídrica. Fonte: Almorox *et al.* (1994).

<b>Método Qualitativo</b>	Formas de erosão Graus de erosão	
<b>Método Quantitativo</b>	Avaliação direta	
	Avaliação indireta	Modelo físico
		Modelo estatístico
		Modelo paramétrico

### 2.2.1 Método Qualitativo

Almorox *et al.* (1994) dizem que os métodos qualitativos apresentam diferentes características que controlam o processo erosivo, não se utilizando de valores numéricos. Os autores dizem que estudos através de sensores remotos (fotografias aéreas e ainda imagens de satélites ou radar (Alves, 1993) e trabalho de campo se fazem necessários para uma comprovação de que a análise fotointerpretativa corresponde com a realidade.

Através das fotografias aéreas e também de imagens de satélites é possível estimar, por exemplo, os fatores C e P relativos à Equação Universal de Perda do Solo (EUPS), que significam, respectivamente, fator uso e manejo; e fator relativo à prática conservacionista adotada, equação esta proposta por Wischmeier & Smith (1978).

### 2.2.2 Método Quantitativo

É o método, que ao contrário do qualitativo, permite uma estimativa numérica da erosão, estabelecendo diferentes graus de erosão. Este método pode ser subdividido em: modo direto e modo indireto.

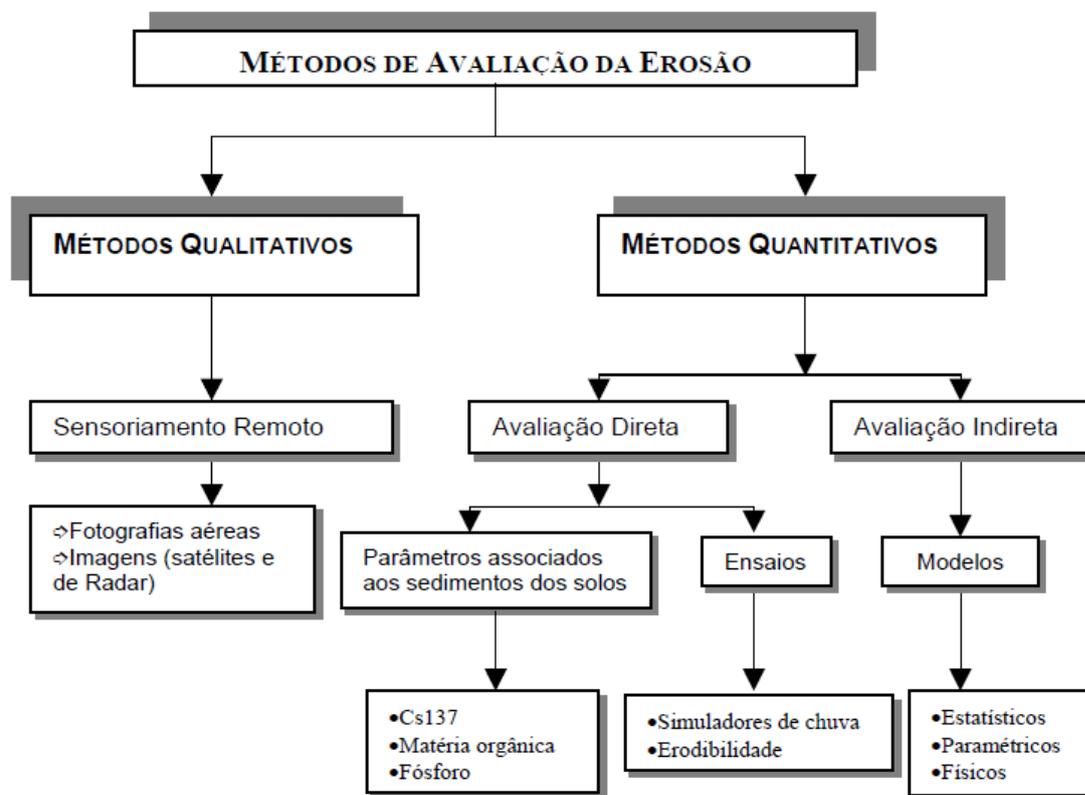
#### 2.2.2.1 Modo Direto

No modo direto do método quantitativo as avaliações são realizadas *in situ*, onde, a partir de ensaios como: parcelas experimentais e simuladores de chuva, bem como medidas de parâmetros junto aos sedimentos no solo ( $Cs^{137}$  (Loughan *et al.*, 1987)) e matéria orgânica, por exemplo), os fatores de erosão são estimados (Almorox *et al.*, 1994). Para Bertoni & Lombardi Neto (1999), a precisão de ambos (experimento e técnica empregados) deve ser considerada, uma vez que, sendo o problema determinar a melhor entre duas alternativas, não se deve aplicar muito tempo apenas na técnica experimental.

### 2.2.2.2 Modo Indireto

A utilização de modelos, para simplificar a realidade do sistema natural é fundamental para a análise e compreensão do processo erosivo, consistindo assim no método quantitativo de modo indireto (Silva, 2003). Para Almorox *et al.* (1994) os modelos utilizados para essa simplificação do real são os modelos: estatístico; físico; e paramétrico.

A Figura 2.7 mostra um esquema, elaborado por Almorox *et al.* (1994), dos métodos de avaliação da erosão hídrica.



**Figura 2.7** – Fluxograma dos métodos de avaliação de erosão hídrica. Fonte: Almorox *et al.* (1994).

### 2.2.3 Equação Universal de Perda do Solo (EUPS)

Tendo como objetivo avaliar a perda média dos solos por erosão laminar, em uma determinada área, foi desenvolvida, no final dos anos 1950, a Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) no “*Runoff and Soil - Loss*

*Data Center*”, do *Agricultural Research Service*, na *University of Purdue*, nos *EUA* (Bertoni & Lombardi Neto, 1990). Com o intuito de superar algumas limitações surgidas nas equações anteriores, Wishmeier & Smith (1978) propuseram a atual EUPS, superando restrições climáticas e geográfica, por exemplo, limitações que existiam nos primeiros estudos, devido sua aplicação generalizada.

## **2.3 FATORES QUE INTERFEREM NA EROSÃO**

### **2.3.1 Erosividade da Chuva**

A erosividade da chuva expressa o “potencial erosivo” que a chuva apresenta, frente à perda de solo por unidade de área que pode ser esperada em uma área sem cobertura vegetal e resíduos vegetais (Nishiyama, 1998). Esse “potencial erosivo” é função do solo, declive e características da chuva, segundo Lombardi Neto & Moldenhauer (1992).

A erosividade da chuva se deve, parte ao impacto direto da gota de chuva no solo e parte ao escoamento superficial, sendo que a capacidade da chuva em causar erosão é atribuída à sua intensidade e ao tamanho de suas gotas, determinando assim a energia da chuva (Lal, 1988).

### **2.3.2 Erodibilidade do Solo**

Os fatores dominantes que controlam a intensidade da erosão do solo são: precipitação; topografia; e cobertura vegetal. Porém, tem sido reconhecido que, mesmo quando esses fatores permanecem constantes, a diferença nas propriedades do solo pode produzir variações na perda de solo (Bryan, 1968). O primeiro pesquisador a reconhecer formalmente a variabilidade das propriedades resistentes à erosão dos solos foi Bennett (1926), denominado de "erosividade do solo" (*soil erosivity*) por Middleton

(1930) e posteriormente de "erodibilidade do solo" (*soil erodibility*) por Cook (1936).

Para Bryan *et al.* (1989) o conceito de erodibilidade do solo, denotando a suscetibilidade do solo à erosão, tem sido muito utilizado em ambas às abordagens teóricas e práticas para os processos de erosão do solo, em parte por ter sido incorporado à Equação Universal de Perda de Solo. Com isso, o termo erodibilidade do solo não tem sido muito bem definido, porém, o termo evoluiu em torno de três pressupostos implícitos:

1. Uma classificação de erodibilidade do solo pode ser definida, o que é válido para todos os processos erosivos;
2. Uma classificação de erodibilidade do solo pode ser unicamente definida através da medida de poucas propriedades do solo, geralmente por propriedades físicas; e
3. Classificações de erodibilidade relativa não são afetadas por pequenas alterações, particularmente em relação ao teor de umidade do solo.

Vilar (1987) diz estar relacionado à erodibilidade de materiais inconsolidados, dois fatores: o primeiro são as forças de atração, características dos materiais argilosos; e o tamanho das partículas sólidas, interferindo no transporte destas.

De acordo com Zuquette (1987), a denominação de erodibilidade é uma condição do solo, ou seja, sua vulnerabilidade à erosão. Tal vulnerabilidade é função de suas características físicas e de seu uso. Para reduzir a erodibilidade dos solos, Owoputi & Stole (2001), apresentam vários fatores, a saber: compactação do solo pelo impacto das gotas da chuva, maior profundidade do fluxo e uma menor declividade na zona erodida.

Pejon (1992), após uma avaliação sobre diversos métodos que procuravam caracterizar a erodibilidade do solo, diz que nenhum dos métodos conseguiu uma identificação total dos materiais erodíveis, situando os melhores resultados por volta dos 80%, porém, o que apresentou melhor resposta foi o proposto por Nogami & Villibor (1979), apresentando as

seguintes vantagens: i) utilização de amostras indeformadas; ii) considera o efeito da secagem; iii) permite inferir as propriedades de desagregabilidade e infiltração; iv) facilidade e rapidez de execução; e v) não necessita de equipamentos sofisticados.

Na tabela 2.5, Lal (1990) apresenta vários fatores que influenciam na erodibilidade dos solos, como suas propriedades físicas/hidrológicas, químicas/mineralógicas e biológicas/bioquímicas, bem como as características do perfil, além das propriedades físicas que afetam a resistência do solo.

**Tabela 2.5** – Fatores que influenciam na erodibilidade do solo. Fonte: Lal (1990).

<b>FATORES QUE INFLUEM NA ERODIBILIDADE</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Fatores</b>	<b>Características</b>
Mecânica	Textura	Influi no destacamento e carreamento de partículas do solo; Determina a facilidade com que o solo é dispersado; Determina a força limite necessária para o destacamento.
	Estrutura	Formação de agregado que resistem á dispersão, aos efeitos abrasivos da água de escoamento e ao destacamento; Grau de agregação e distribuição de agregados estáveis; Tamanho dos agregados.
	Tamanho dos torrões e cultivo do solo	Superfície rugosa e cheia de torrões possui elevada capacidade de detenção; Resistência à desagregação pela chuva e erosão pelo vento; Responsável pela alta taxa de escoamento superficial.
	Formação de crosta	Desenvolve-se em solos com baixa porcentagem de matéria orgânica.
Resistência	Resistência ao cisalhamento	Importante no destacamento de partículas do solo (impacto e escoamento superficial); Rolamento e deslizamento de grãos.
Hidrológico	Retenção de água	O estado de energia da água do solo ou pressão neutra influencia a resistência ao cisalhamento do solo; Resistência do solo ao arrastamento pela água é influenciada pela umidade inicial.
	Transmissão de água no solo - Infiltração	Taxa de infiltração determina o maior ou menor volume de escoamento superficial.
	Permeabilidade	Solos com permeabilidade extremamente baixa a moderada geram mais escamento superficial.
Reológica	Sistema solo/água	A umidade do solo influi na susceptibilidade á erosão por afetar a coesão, a resistência ao cisalhamento, consistência e plasticidade.

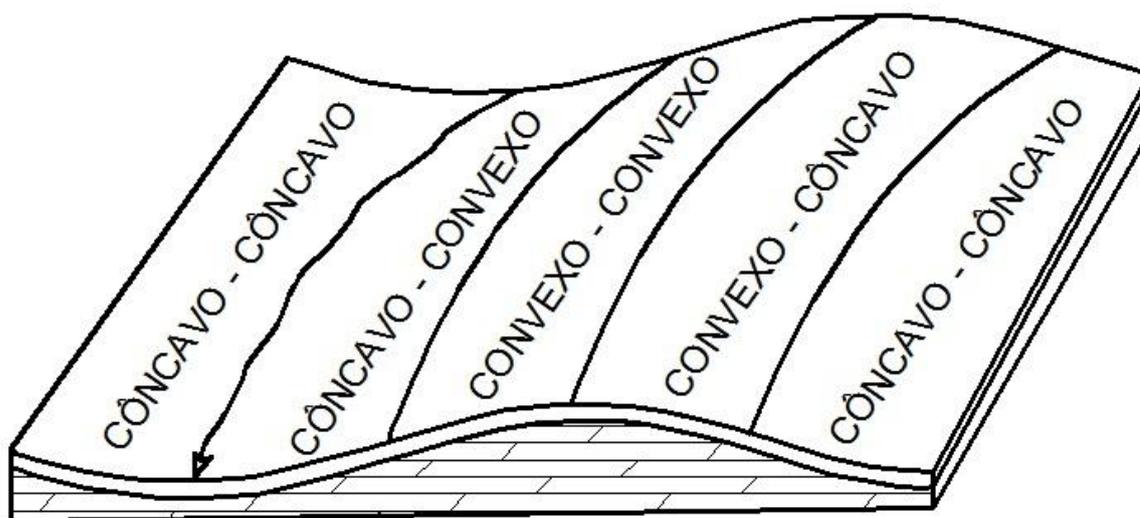
<b>FATORES QUE INFLUEM NA ERODIBILIDADE</b>		
<b>Propriedade</b>	<b>Fatores</b>	<b>Características</b>
Química e Mineralógica	Matéria Orgânica	Influencia a distribuição granulométrica, propriedade de retenção e transmissão de água; Fortalece as ligações que estabilizam as unidades estruturais e mantém um balanço favorável entre retenção e transmissão nos poros; Diminui o efeito da compactação; Concentração de matéria orgânica nos micro-agregados aumentando a sua resistência á desagregação ( <i>slaking</i> ) e à dispersão.
	Argilo – Minerais	A estrutura do solo e a sua resistência são influenciadas pela quantidade e natureza dos argilo-minerais; A fração fina do solo interage com materia orgânica para formar agregados estáveis que resistem ao impacto das gotas da chuva.
Características do perfil	Diretos ou Indiretos	Influem a erosão direta e indiretamente; Influem sobre o escoamento subsuperficial de água em decorrência de mudanças nas propriedades hidrológicas de horizontes diferentes; Influência sobre o crescimento vegetativo.

**Continuação: Tabela 2.5.**

### 2.3.3 Relevo

O condicionamento do processo erosivo é atribuído por Rodrigues (1982) a três principais componentes do relevo, que são: i) forma das encostas; ii) extensão de declividade; e iii) grau de declividade, sendo este último o mais relevante fator topográfico para o desenvolvimento dos processos erosivos acelerados. Já para se obter o fator topográfico da EUPS, de Wischmeier & Smith (1978), são considerados apenas dois componentes do relevo: i) comprimento da encosta; e ii) grau de declividade da encosta.

Troeh (1965) apresenta cinco tipos possíveis de configurações de encostas (Figura 2.8), como produtos da associação da curvatura do perfil longitudinal com as curvas de nível, a saber: côncavo-côncavo; côncavo-convexo; convexo-convexo; convexo-côncavo; e côncavo-côncavo.



**Figura 2.8** – Ilustração de quatro tipos de concavidade e convexidade das formas do terreno. Fonte: Modificado de Troeh (1965).

Rodrigues (1982) associa a feição erosiva do tipo boçoroca, a diferentes tipos de forma de encosta, como por exemplo: na Figura 2.8 (convexo-côncavo e convexo-convexo), enquanto que na Figura 2.8 (côncavo-côncavo e côncavo-convexo), representam uma situação menos favorável ao desenvolvimento das boçorocas.

### 2.3.4 Vegetação

Nishiyama (1998) chama a atenção do importante papel que exerce a cobertura vegetal em um determinado local, com o intuito de minimizar a ação dos processos erosivos e demais fenômenos que instabilizam as encostas.

Bailey (1941) constata que o ângulo de repouso de partículas em terrenos com vegetação é da ordem de  $60^\circ$ , e que quando há a remoção desta vegetação, este ângulo cai para cerca de  $36^\circ$ , mostrando assim a importância da cobertura vegetal diante da ação dos processos erosivos.

Rodrigues (1982) mostra que a remoção da cobertura vegetal em um determinado local provoca uma série de mudanças, como: a interrupção do efeito estabilizador da floresta; interrupção da interceptação, retenção e evapotranspiração, funções da cobertura vegetal; desaparecimento do

horizonte orgânico, acarretando no aumento da infiltração de água no solo; aumento do grau de saturação do maciço devido à elevação do lençol freático; e diminuição da resistência mecânica do solo pela deterioração do sistema de raízes.

## **2.4 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO**

Para Varnes (1974), um mapa geotécnico necessita de operações básicas de adição, seleção, generalização e transformações das informações referentes à litologia e estruturas dos solos e rochas, hidrogeologia, geomorfologia e geologia. O ato de mapear, significa delinear áreas homogêneas ou “aceitavelmente” heterogêneas para uma determinada finalidade, sendo apresentado em 2D (bi-dimensão) e tendo seus atributos essenciais representados por letras, números e símbolos.

Segundo a IAEG (1976) o mapa geotécnico é um tipo de mapa geológico, oferecendo uma representação geral dos componentes do ambiente geológico, relevantes ao planejamento e ao uso da terra, seja em projetos, construção e manutenção de obras civis e de mineração.

Matula (1976) diz que um bom mapa geotécnico, servindo às finalidades de engenharia, é o modelo mais ilustrativo do ambiente geológico.

De acordo com Zuquette (1987), o mapeamento geotécnico é uma ferramenta fundamental para orientar e auxiliar as mais diversas atividades antrópicas capazes de modificar o meio físico, ressaltando que estes mapas podem ser utilizados como fonte de informação para o planejamento urbano e regional.

### **2.4.1 Atributos do Meio Físico**

A definição dos atributos está relacionada com a finalidade e a escala do trabalho a ser realizado sendo que ambos, a eficiência e qualidade do

mapeamento geotécnico, dependem, em grande parte, da escolha dos atributos corretos (Pejon, 1992).

O principal problema na realização de trabalhos de mapeamento geotécnico consiste em definir, isolar e identificar os atributos necessários para o estabelecimento correto das unidades que compõem os documentos, afirma Zuquette (1991). Neste mesmo estudo, Zuquette estabelece os atributos associados ao planejamento, selecionando os considerados importantes dentro dos estudos do meio físico, como pode ser observado na Tabela 2.6.

**Tabela 2.6** – Atributos fundamentais para o mapeamento geotécnico. Fonte: modificado de Pejon (1992).

Campos de Conhecimento	Tipo / Aspecto	Grupos de Atributos	Atributos
Águas	Superficiais		1 Escoamento 2 Infiltração 3 Áreas de acumulo de água 4 Características físico-químicas
	Subterrâneas		5 Aquíferos (livres e confinados) 6 Áreas de recarga 7 Profundidade/espessura/poços/senilidade 8 Características físico-químicas
Geomorfologia	Morfometria	Unidades Básicas	9 Altitudes 10 Declividade e sentido
	Morfografia		11 <i>Landforms</i> (encosta, bacia) 12 Formas de encosta 13 Comprimentos das encostas ou <i>landforms</i>
Geologia	Substrato Rochoso	Materiais	14 Tipo rochoso 15 Litologia 16 Mineralogia 17 Densidade 18 Resistência 19 Permeabilidade 20 Estruturas 21 Distribuição 22 Profundidade 23 Grau de intemperismo 24 Alterabilidade 25 Potencial para material de construção

Campos de Conhecimento	Tipo / Aspecto	Grupos de Atributos	Atributos
	Materiais Inconsolidados	Processos	26 Erosão 27 Deposição 28 Sismicidade 29 Subsidência
		Gerais	30 Origem, textura 31 Distribuição 32 Permeabilidade 33 Índice de vazios 34 Mineralogia 35 Erodibilidade 36 Fertilidade 37 Potencial de corrosividade 38 Expansibilidade
		Específicos	39 Variação em profundidade 40 Características químicas 41 Capacidade campo e murchamento 42 Processos de intemperismo e pedológicos 43 Resistência/suporte 44 Massas específicas dos sólidos e aparente seca 45 Potencial para aterros
Clima			46 Pluviosidade 47 Temperatura/umidade/ventos/insolação 48 Evapotranspiração 49 Intensidades pluviométricas

**Continuação: Tabela 2.6.**

### 2.4.2 Principais Metodologias e Sistemáticas Nacionais e Internacionais

Não se sabe ao certo o primeiro documento cartográfico, porém, se sabe que desde o século XV excelentes mapas, assim considerados para a época, foram elaborados, podendo ser observados na publicação *Cartography – Atlases and Maps* (1940) (Zuquette & Gandolfi, 2004). A importância das informações do meio físico, principalmente questões relativas ao artifício que melhor representaria as variações dos componentes e do espaço tridimensional começam a ser discutidas a partir do século passado (Zuquette & Gandolfi, 2004).

Langen apresentou, em 1913, na feira de construções de *Leipzig* (Alemanha), documentos gráficos, que deram início a cartografia geotécnica no mundo, dizem Zuquette & Gandolfi (2004). Após este evento, os mapas foram surgindo com maiores detalhes de informações, análises diferenciadas e em função das escalas, onde se classificavam os atributos do meio físico para usos da engenharia, planejamento e meio-ambiente.

A seguir seguem alguns dos trabalhos desenvolvidos e que acabaram por aprimorar as técnicas de mapeamento (Zuquette, 1987):

- i) Método de Moldenahawer (1919): Conversão da carta geológica da Vila de *Danzzig* (Alemanha) em uma carta geotécnica.
- ii) Método Stremme (1932): Conjunto de cartas de *Ostendorff* (Alemanha) que tratava de geologia e geotecnia.
- iii) Método Muller (1938): Inúmeras cartas de caráter geotécnico voltadas ao planejamento urbano na comunidade de *Mark* (Alemanha), utilizando cores e sinais para diferentes características.
- iv) Método de Groschopf (1951): Cartas geológico – geotécnicas da região de *Ulm* (Alemanha).
- v) Método de Benz (1951): Cartas geotécnicas com delimitações de zonas na cidade de *Stuttgart* (Alemanha).
- vi) Método de Gwinner (1956): Individualização de unidades geotécnicas, definindo e diferenciando materiais. Este método marcou a mudança das cartas normais para as aplicadas à engenharia.

Após a década de 1950, conforme as necessidades e as características, de cada região, foram desenvolvidas e aplicadas muitas metodologias.

No Brasil, em 1966, o pesquisador pioneiro em mapeamento geotécnico Hermann Haberlehner, professor da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), publica a Carta Geotécnica da cidade do Rio de Janeiro (Zuquette & Gandolfi, 2004). Após esta publicação de 1966, outros trabalhos foram

surgindo no Brasil, como os trabalhos de Grehs (1967) no Paraná; Coulon (1973) e Maciel Filho (1978) no Rio Grande do Sul; e em São Paulo os trabalhos de Prandini (1974) e Singnemartin (1979), dentre muitos outros.

A partir da década de 1980 o desenvolvimento das metodologias se intensificou, destacando as publicações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) e da Universidade Estadual Paulista (UNESP/Rio Claro).

## **2.5 FERRAMENTAS AUXILIARES NO ESTUDO DE PROCESSOS EROSIVOS**

Nos últimos anos tem havido uma crescente demanda por informações geotecnológicas aplicadas à áreas como de geologia, engenharia entre outras, principalmente onde se pretende realizar projetos de implantação de unidades de conservação, intervenção ou recuperação ambiental de áreas degradadas, como locais onde é corrente o problema de erosão do solo (Araujo, 2008). Com isso, nota-se uma infinidade de ferramentas, materiais e técnicas disponíveis para estudos dos processos erosivos. Como exemplos de algumas destas ferramentas temos: o GPS; fotografias aéreas e terrestres; imagens de satélites; programas de tratamento de dados como *ArcGis*, *AutoCad* e programas de modelamento como o *WEPP*, *EUROSEN* e *EGEM*.

### **2.5.1 Sensoriamento Remoto**

O sensoriamento remoto é uma importante fonte de dados para o SIG, pois permite a análise de uma grande quantidade de dados espaciais, o que permite uma visão panorâmica das unidades de paisagem existentes na superfície. Isto possibilita a interpretação e classificação destas unidades, sem que seja necessário o contato direto com as mesmas, o que diminui o tempo de pesquisa, bem como o custo de sua aplicação. Por esse motivo o sensoriamento remoto tem sido largamente utilizado para a análise geoambiental em áreas onde ocorrem problemas relacionados à erosão, por

exemplo, auxiliando no monitoramento multitemporal das transformações impostas a essas áreas devido a ações antrópicas e/ou naturais.

Em 1980, a ISPRS (*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) conceitua a fotogrametria e o sensoriamento remoto como:

*“fotogrametria e sensoriamento remoto é a arte, ciência e tecnologia de se obter informação confiável de imagens de sensores imageadores e outros, sobre a Terra e seu meio ambiente, e outros objetos físicos e processos através de gravação, medição, análise e representação”.*

Este “é”, no singular, vem destacar a idéia de junção entre fotogrametria e sensoriamento remoto, em um só conceito (Brito & Coelho, 2002).

Lillesand & Kiefer (1987) definem sensoriamento remoto da seguinte maneira:

*“... é a ciência e arte de receber informações sobre um objeto, uma área ou fenômeno pela análise dos dados obtidos de uma maneira tal que não haja contato direto com este objeto, esta área ou este fenômeno.”*

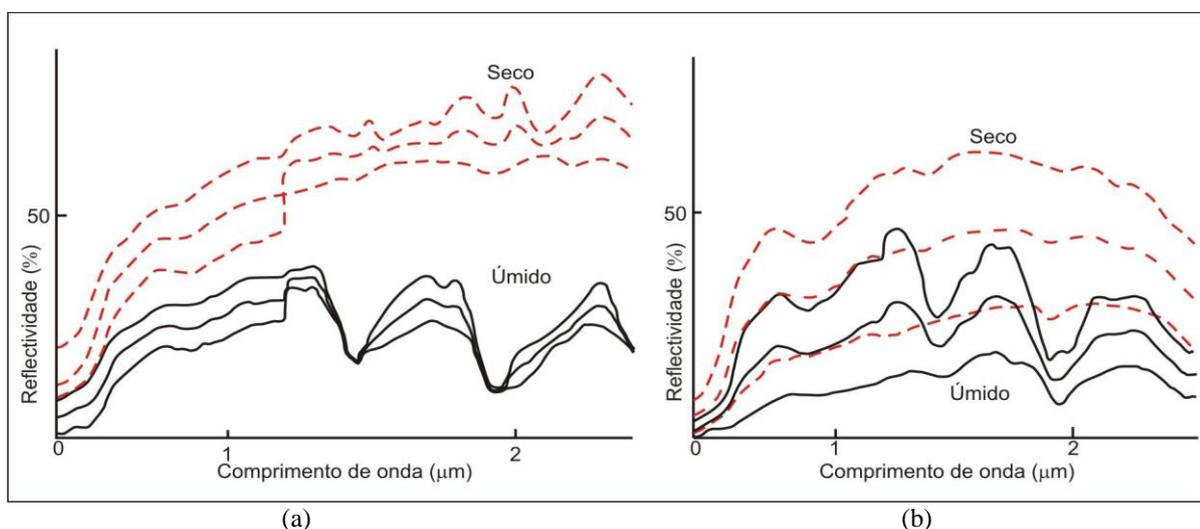
De acordo com IBGE (2003), o conceito de sensoriamento remoto engloba não só o processo de obtenção do registro e análise das interações entre a radiação eletromagnética e as substâncias componentes do planeta, como também consideram sendo parte deste conceito o conjunto de sensores, equipamentos para processamento e transmissão de dados, aeronaves, espaçonaves, etc.

As informações conseguidas no sensoriamento remoto são através da radiação eletromagnética, supondo que a mesma possa chegar diretamente ao sensor. Entretanto, isto não é possível em toda a escala do espectro eletromagnético, pois a transmissividade atmosférica é variável para os diversos comprimentos de onda (ENVI, 2006).

No guia do usuário do ENVI (*Environment for Visualizing Images*) (ENVI, 2006), a determinação da natureza dos alvos pelos métodos de

sensoriamento remoto está baseada no fato de que diferentes materiais são caracterizados por reflectâncias próprias em cada banda do espectro. A reflectância é proporcional à razão da radiação refletida pela radiação incidente. Quando as respostas espectrais de vários materiais são conhecidas, as propriedades de alvos desconhecidos podem ser determinadas pela comparação das respostas espectrais desses alvos com os dados de referência. Neste mesmo manual há algumas especificações para o estudo do sensoriamento remoto para os solos, minerais e rochas, vegetação e áreas urbanas.

- **Solo:** As características dos solos sem vegetação podem ser analisadas nas bandas com valores de reflexão baixos, no intervalo espectral do azul ( $0,4 - 0,5 \mu\text{m}$ ), os quais aumentam continuamente em direção da luz vermelha, do NIR (*near infrared*) e do MIR (*mid infrared*). A reflectividade dos solos é reduzida em grande parte das substâncias orgânicas, principalmente nos comprimentos de onda acima de  $0,6 \mu\text{m}$ . Em todos os comprimentos de onda, uma alta umidade do solo é caracterizada por valores baixos de reflexão, pois o índice de refração nas áreas frontais da interface água/partícula é menor que o índice de refração nessas áreas em solos secos. Em fotografias aéreas e imagens de satélite, os solos úmidos são caracterizados por tons de cinza escuros, significando uma reflectividade menor. A Figura 2.9 mostra dois exemplos da reflectividade de um solo argiloso (a) e uma areia (b), em dependência da umidade (Kronberg, 1984).



**Figura 2.9** – Reflectividade de um solo argiloso (a) e uma areia (b), NIR e MIR, em dependência da umidade. Fonte: modificado de Kronberg (1984).

- **Mineral e Rocha:** Apresentam comportamentos espectrais próximos aos dos solos, sendo que um dos elementos de maior diferenciação entre as curvas de rochas e de solos é a presença de matéria orgânica encontrada nos solos. As faixas espectrais utilizadas na detecção da presença de óxido de ferro ou argilas são apresentadas na Tabela 2.7.
- **Vegetação:** A determinação e a diferenciação da vegetação através dos métodos de sensoriamento remoto são possíveis no intervalo de 0,4 até 2,5 $\mu\text{m}$ . Os comportamentos específicos de reflexão, absorção e transmissão, das folhas, são caracterizados neste intervalo de comprimentos de onda. No VIS (visível), o comportamento da reflexão é determinado pela clorofila, na qual sua absorção se encontra no intervalo da luz azul (0,4 – 0,5  $\mu\text{m}$ ) e vermelha (0,6 – 0,7  $\mu\text{m}$ ), e reflete no intervalo da luz verde (0,5 – 0,6  $\mu\text{m}$ ).

**Tabela 2.7** – Regiões do espectro mais adequadas ao estudo de propriedades de minerais e rochas.

Fonte: modificado de ENVI (2006).

REGIÃO DO ESPECTRO ( $\mu\text{m}$ )	APLICAÇÃO
0,44 – 0,55	Detecção de ferro: várias bandas de absorção de óxido de ferro
0,80 – 1,00	Detecção de $\text{Fe}^{3+}$ (0,92 $\mu\text{m}$ ) e $\text{Fe}^{2+}$ (1,0 $\mu\text{m}$ )
1,60	Identificação de zonas de alteração hidrotermal ricas em argila
2,17 – 2,20	Detecção de minerais de argila
2,74	Detecção de minerais com hidroxila

- **Área Urbana:** A reflectividade das cidades é função da variabilidade de materiais utilizados no seu interior, caracterizadas por uma aparência heterogênea, como por exemplo, em áreas residenciais, por serem formadas por diversos materiais como concreto, asfalto, vidro, ferro e vegetação, além da influência das sombras causadas pelas altas edificações. O aumento de reflexão causado pelas áreas urbanas não parece tão regular como aquele provocado pela vegetação ou pelos solos.

Um conceito que não se pode deixar de citar, em sensoriamento remoto, é a resolução, que pode ser subdividida em três tipos independentes, a saber: resolução espacial; resolução espectral; e resolução radiométrica.

- **Resolução Espacial**: é determinada pela capacidade do detector em distinguir objetos na superfície terrestre;
- **Resolução Espectral**: é um conceito inerente às imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. É definida pelo número de bandas espectrais de um sistema sensor e pela amplitude do intervalo de comprimento de onda de cada banda; e
- **Resolução Radiométrica**: é dada pelo número de valores digitais representando níveis de cinza, usados para expressar os dados coletados pelo sensor. Quanto maior o número de valores, maior é a resolução radiométrica.

Assim, vimos que sensoriamento remoto é uma importante fonte de dados para SIG permitindo uma interpretação visual e análise de numerosos dados espaciais, seja sob a forma analógica (através de fotografias aéreas) ou digital (através de imagens orbitais), buscando a identificação de feições impressas nas imagens e a determinação de seu devido significado (Araujo, 2008).

#### ***2.5.1.1 Fotografias Aéreas***

As fotografias aéreas contribuem para a apresentação de detalhes quanto a ocupação territorial e a cobertura vegetal, o que permite uma comparação histórica da ocupação e possibilita uma projeção dos limites de ocupação (Polz & Pinheiro, 2002).

Diversas pesquisas foram baseadas nas técnicas de sensoriamento remoto, através do uso de fotografias aéreas e fotogrametria, a fim de se otimizar a obtenção de dados de erosão e para manter seu monitoramento ao longo do tempo (Bocco, 1991; Nachtergaele & Poesen, 1999; Stankoviansky, 2003; Martínez-Casasnovas, 2003; Vandekerckhove *et al.* 2003).

A qualidade geométrica dos mapas, aliados com a riqueza de informações da fotografia aérea, são as grandes vantagens que trazem as ortofotos, que despontou como um produto de grande aceitação no meio

acadêmico, em substituição ou complementação às bases vetoriais convencionais (Tommaselli, 2002). Segundo o autor, a diferença entre uma ortofoto e uma fotografia aérea convencional é que a última é uma representação em perspectiva do espaço, o que significa que dois pontos com as mesmas coordenadas planimétricas, mas em diferentes altitudes, serão registrados em diferentes posições na imagem. Este deslocamento é conhecido como deslocamento devido ao relevo.

No caso das cartas topográficas, que são projeções ortográficas nas quais as linhas projetantes são perpendiculares ao plano de referência horizontal, a escala é sempre uniforme e a mudança de altitude não afeta a representação de um objeto. A ortofoto nada mais é do que a fotografia aérea transformada em uma projeção ortográfica, sendo necessário, para isso, o MDT (Tommaselli, 2002). Furquim & Sallem Filho (2002) definem ortofoto como sendo uma imagem fotográfica onde os objetos contidos são apresentados em suas verdadeiras posições no espaço. Desta forma, podem ser realizadas medidas diretas de posição, distâncias, ângulos horizontais e áreas. Porém, os elementos básicos necessários para a geração de uma ortofoto digital são: imagem digital, pontos de controle de campo, MDT e parâmetros da câmara fotográfica.

Para Queiroz Filho (1993), a ortofoto digital é o produto do processo de transformação da projeção central da imagem (fotografia aérea) em projeção ortogonal, mediante meios e métodos digitais. Neste mesmo trabalho foi realizada uma verificação do potencial da ortofoto digital como fonte de dados para a atualização de cartas em um SIG, onde foi utilizada uma fotografia aérea do município de Santo André – SP (escala 1:8.000) e um MDT baseado em carta altimétrica (escala 1:2.000). Segundo o autor, para gerar uma ortofoto digital, os dados de entrada necessários são a imagem digital (fotografia aérea scannerizada), os dados de orientação interior e exterior da câmara e o MDT. A rasterização de fotografias aéreas é realizada basicamente por equipamentos scanners (equipamentos periféricos de entrada gráfica de dados). O método de ortorretificação, do tipo diferencial, transfere

os tons de cinza da fotografia aérea para uma malha fina e regular que representa a projeção ortogonal do terreno (MDT).

De acordo com Furquim & Sallem Filho (2002), a precisão relativa na ortofoto digital está diretamente relacionada com a escala da foto, podendo chegar a 50 micra (0,050mm), o que significa dizer, por exemplo, que a precisão relativa de uma foto 1:10.000 é de 50cm. Já a precisão absoluta dependerá dos pontos de controle usados para orientar a imagem digitalizada e da precisão do MDT usado na retificação. O tamanho do pixel da imagem deve ser adequado para a representação dos detalhes do terreno na escala do produto final e na Tabela 2.8 são apresentados os valores recomendados pelo *MEET NATIONAL MAP ACCURACY STANDARDS*.

**Tabela 2.8** – Valores recomendados pelo *MEET NATIONAL MAP ACCURACY STANDARDS* para o tamanho do pixel da imagem em relação à escala do produto final. Fonte: Furquim & Sallem Filho (2002).

<b>Escala do Produto Final</b>	<b>Tamanho Aproximado do Pixel</b>
1:250	0,025m
1:500	0,050m
1:1.250	0,125m
1:2.500	0,250m
1: 5.000	0,500m
1:7.500	0,750m
1:10.000	1,000m
1:15.000	1,500m

### **2.5.1.2 Imagens de Satélites**

Como imagem de satélite ou orbital, considera-se a aquisição de dados de sensoriamento remoto através de equipamentos sensores coletores a bordo de satélites artificiais. Estas imagens, quando corrigidas geometricamente de alguns efeitos como: rotação e esfericidade da Terra; variações de atitude; latitude e velocidade do satélite constituem-se em valiosos instrumentos para

a cartografia, na representação das regiões onde a topografia é difícil e onde as condições de clima adversas não permitem fotografar por métodos convencionais (IBGE, 2003).

As radiações do espectro visível e do infravermelho próximo podem ser registradas pelos sistemas passivos do sensoriamento remoto com métodos fotográficos, de TV e de varredura (*scanners*). Esses sistemas registram a radiação eletromagnética que é refletida ou emitida pelos alvos terrestres. Enquanto os métodos fotográficos e de TV são limitados ao intervalo de 0,4 a 0,9  $\mu\text{m}$ , a técnica de varredura permite o registro de imagens nos comprimentos de onda do ultravioleta até o infravermelho térmico (0,3 – 14,0  $\mu\text{m}$ ). A radiação refletida e/ou emitida pela superfície terrestre atravessa o sistema óptico do "scanner" e é focalizada sobre os detectores. Estes transformam a radiação em sinais elétricos que são gravados em fita magnética. Um "scanner" multiespectral pode gravar sinais provenientes de vários intervalos de comprimento de onda.

Para que o sistema de coleta de dados funcione são necessárias que sejam preenchidas algumas condições, como: i) existência de fonte de radiação; ii) propagação de radiação pela atmosfera; iii) incidência de radiação sobre a superfície terrestre; iv) ocorrência de interação entre a radiação e os objetos da superfície; e v) produção de radiação que retorna ao sensor após propagar-se pela atmosfera.

Entre os satélites de observação mais utilizados em estudos ambientais, temos: os satélites da série LANDSAT; SPOT; IKONOS; SATÉLITE TERRA; MODIS; ASTER; QUICKBIRD; ENVISAT; WORLDVIEW e os satélites nacionais SCD1; SCD2; CBERS1; CBERS 2; e CBERS 2B.

### **2.5.2 Geoprocessamento**

O geoprocessamento é um conjunto de técnicas computacionais que opera sobre bases de dados (que são registros de ocorrências) georreferenciados e que para transformá-los em informação relevante, deve-se

apoiar em estruturas de percepção ambiental que proporcionem o máximo de eficiência nesta transformação (Xavier-da-Silva & Zaidan, 2004). Uma destas estruturas é a visão sistêmica, na qual a realidade é percebida como composta por entidades físicas ou virtuais (sistemas identificáveis), que se organizam segundo diversos tipos de relacionamentos, entre os quais ressaltam, para as investigações ambientais, as relações de inserção (hierarquias), justaposição (proximidade/contigüidade) e funcionalidade (causalidade). Segundo esta perspectiva, a realidade ambiental pode ser, portanto, percebida como um agregado de sistemas relacionados entre si, dizem Xavier-da-Silva & Zaidan (2004).

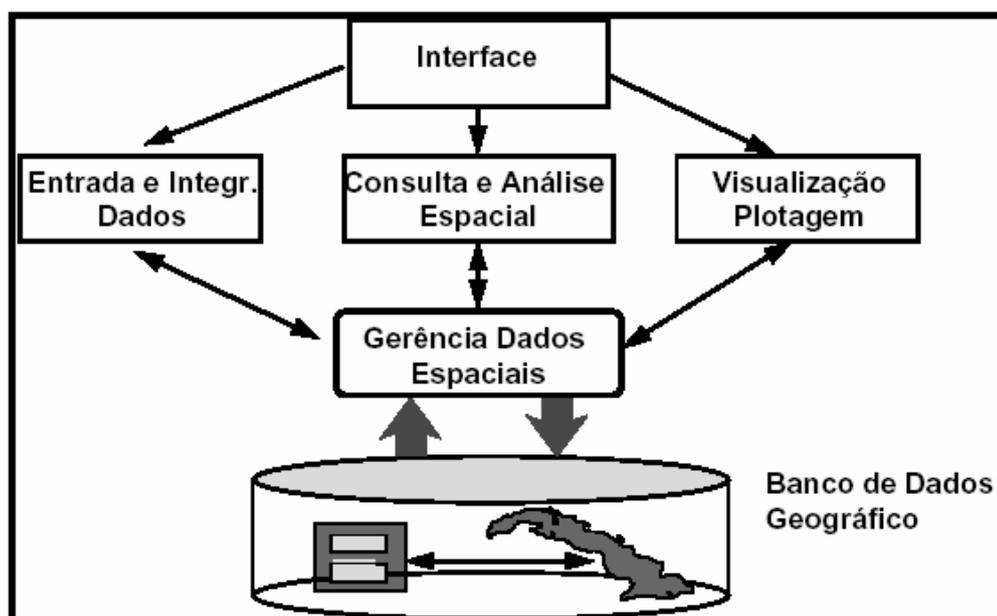
O geoprocessamento permite que procedimentos de Varredura e Integração Locacional (VAIL) sejam usados na pesquisa ambiental. Tais procedimentos baseiam-se na existência de uma base de dados digitais a ser pesquisada e no uso do processamento eletrônico de dados como procedimento capaz de executar, incansavelmente, a busca absolutamente exaustiva de ocorrências singulares ou combinadas de características de entidades que estejam registradas na base de dados (Xavier-da-Silva, 1997).

### ***2.5.2.1 Sistema de Informação Geográfica (SIG)***

Burrough (1987) define SIG como sendo “um conjunto poderoso de ferramentas para coletar, armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados sobre o mundo real”.

Para Câmara (1995) o termo Sistema de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Devido às várias áreas de aplicações (como na agricultura, floresta, cartografia, dentre muitos outros), há pelo menos três maneiras de utilizar um SIG: i) como ferramenta para produção de mapas; ii) como suporte para análise espacial de fenômenos; e iii) como um banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação de informação espacial.

Segundo Câmara (1995), um SIG possui uma gama de componentes, tais como interface com o usuário, entrada e integração dos dados, funções de processamento gráfico e de imagens, visualização e plotagem, armazenamento e recuperação de dados. Todos estes componentes são organizados sob a forma de banco de dados geográficos e seu inter-relacionamento pode ser observado na Figura 2.10, e a sua implementação ocorre de forma distinta em cada sistema, em função dos seus objetivos e necessidades.



**Figura 2.10** – Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica. Fonte: Câmara (1995).

Mapeamento temático, diagnóstico ambiental, avaliação de impacto ambiental, ordenamento territorial e os prognósticos ambientais são alguns dos campos de atuação, ligados aos estudos ambientais, que se utilizam da tecnologia dos SIG, dizem Medeiros & Câmara (2002).

De acordo com Petersen *et al.* (1998), a disponibilidade de fontes de dados na forma digital, e a capacidade de computadores para tratar grandes volumes de dados atualizados, têm aumentado a aplicação dos SIG no planejamento e estudo dos recursos naturais. Os dados atribuídos à degradação do solo em um SIG consistem das observações ou parâmetros medidos registrados, enquanto mapas são digitalizados ou estimados da combinação de outros parâmetros espaciais contidos em uma base de dados

existente. A aplicação do SIG na avaliação da degradação do solo tem sido em áreas de análise e exposição de relevantes dados de atributos, a parametrização de modelos de simulação, e a ligação do SIG com estes modelos.

Em um estudo realizado por Gournellos *et al.* (1997), os autores utilizaram a tecnologia SIG para investigar uma complexa inter-relação entre variáveis geológicas, geomorfológicas e ambientais, com o objetivo de desenvolver estratégias apropriadas para o manejo de recursos, proteção ambiental, avaliação de riscos e planejamento regional. A análise de variáveis requereu um grande número de dados espaciais e temporais, os quais foram obtidos de várias fontes. Como resultado final, os autores obtiveram a criação de diferentes camadas de base de dados e mapas temáticos, concluindo que estes tipos de dados e análises podem ser aplicados para diferentes aspectos, naturais ou sócio-econômicos.

Como exemplo de uso desta ferramenta, o estudo de Menéndez-Duarte *et al.* (2007), onde a metodologia de um SIG foi utilizada para, não somente documentar, como também otimizar o trabalho com dados geológico-geotécnicos para o estudo do desenvolvimento de processos erosivos. A aplicação do método apresenta o caso da região ao norte da Península Ibérica (Espanha), na cordilheira *Cantabrian*. Uma extensa cadeia de dados geológico-geotécnicos foram relatados e efetivamente manejados. O SIG permitiu analisar complexos problemas considerando a relação entre fatores associados com o desenvolvimento dos processos erosivos e parâmetros geológico-geotécnicos.

Weber *et al.* (2003) comentam que em um estudo realizado para diagnosticar os principais usos do solo e água da bacia hidrográfica do rio Caí/RS, os resultados demonstraram que o SIG é uma tecnologia fundamental de apoio para qualquer projeto onde se pretenda solucionar problemas ambientais relacionados à este tema. Neste estudo, os autores acrescentam que com o uso desta ferramenta, além de baixo custo, ou seja, sem investimentos

elevados, o processo de geração de informações para subsidiar tanto o diagnóstico quanto o gerenciamento torna-se bem rápido.

Para mapear a cobertura vegetal de Áreas de Proteção Permanente (APP) e Áreas de Uso Restrito, definidas pelo Código Florestal, Santos & Valeriano (2002) desenvolveram uma metodologia baseada em técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, onde os resultados mostraram que estas técnicas e o SIG permitem o mapeamento destas áreas e a detecção de transgressões na cobertura da terra.

## **2.6 ÍNDICES QUE RELACIONAM ÁREA (A) *VERSUS* DECLIVIDADE (S)**

Há algumas décadas, diversos estudos vêm propondo índices que sirvam de limiares para o início do processo erosivo, em diversos tipos de solos e diferentes climas. Esses índices relacionam a área de contribuição para um determinado ponto do terreno e a declividade média desta área, sendo esta relação de Declividade x Área ( $S \times A$ ) apresentada da seguinte forma:  $S = aA^{-b}$ , onde  $a$  e  $-b$  são coeficientes. Essa idéia de um limiar para o desencadeamento da erosão é muito encontrada na literatura em diferentes ambientes geomorfológicos. Para Horton (1945) a erosão só ocorre quando a tensão de cisalhamento gerada pelo escoamento superficial da água é superior a resistência do solo. Patton & Schumm (1975) estabelecem, para a iniciação de canais de erosão, uma relação de potência entre a declividade ( $S$  em  $m.m^{-1}$ ) e a área da bacia de contribuição ( $A$  em ha) da cabeceira da erosão.

A partir deste trabalho, diversos outros estudos chegaram a utilizar esta relação de potência, estabelecidos por Patton & Schumm (1975), para chegar a limiares para o desencadeamento do processo erosivo para diversos locais, como mostra a Tabela 2.9. Nesta mesma tabela é apresentada a declividade crítica para o desencadeamento do processo erosivo em todos os estudos para áreas de contribuição de cabeceira de 1 e 2 hectares.

**Tabela 2.9** – Valores dos coeficientes de regressão ( $a$  e  $-b$ ) em diversos estudos realizados no mundo e as unidades que se encontram os valores de área (A) e declividade (S).

Referencia	Local		$a$	$-b$	S* (%)		Chuva Anual (mm)
					1ha	2ha	
Patton & Schum, 1975	Colorado		0,16	0,26	16	13,4	508
Schumm <i>et al.</i> , 1980	Colorado		0,008	0,26	0,8	0,67	380
Montgomery & Dietrich, 1988	Oregon		0,25	0,4	25	18,9	1.500
Montgomery & Dietrich, 1988	Califórnia		0,27	0,4	27	20,5	760
Montgomery & Dietrich, 1988	Sierra Nevada		0,35	0,6	35	23,1	260
Govers, 1991	Bélgica		0,0035	0,4	0,3	0,26	557
Moeyersons, 2003	Ruanda*		0,6	0,6	60	39,6	1.074
			0,3	0,6	30	19,8	1.166
Vanwalleghem <i>et al.</i> , 2005	Bélgica	Canais Profundos	0,0578	0,152	5,8	5,2	750
		Canais Rasos	0,02	0,141	2	1,8	
Menéndez-Duarte <i>et al.</i> , 2007	Espanha	Canais Profundos	0,4568	0,176	46	40,4	1.500
		Canais Rasos	0,3451	0,252	35	28,9	
Samani <i>et al.</i> , 2009	Irã	Automático	0,0121	0,2624	1,2	1	150
		Manual	0,0146	0,2726	1,5	1,2	

Dentre os estudos realizados e que estão presentes na Tabela 2.9, há um estudo realizado em Ruanda\* (África). Ruanda, embora esteja numa zona de clima tropical, o próprio autor Jan Moeyersons não considera Ruanda como um país de clima tropical, pois este país apresenta uma altitude média de 1000 metros acima do nível do mar e uma temperatura média anual de 20°C.

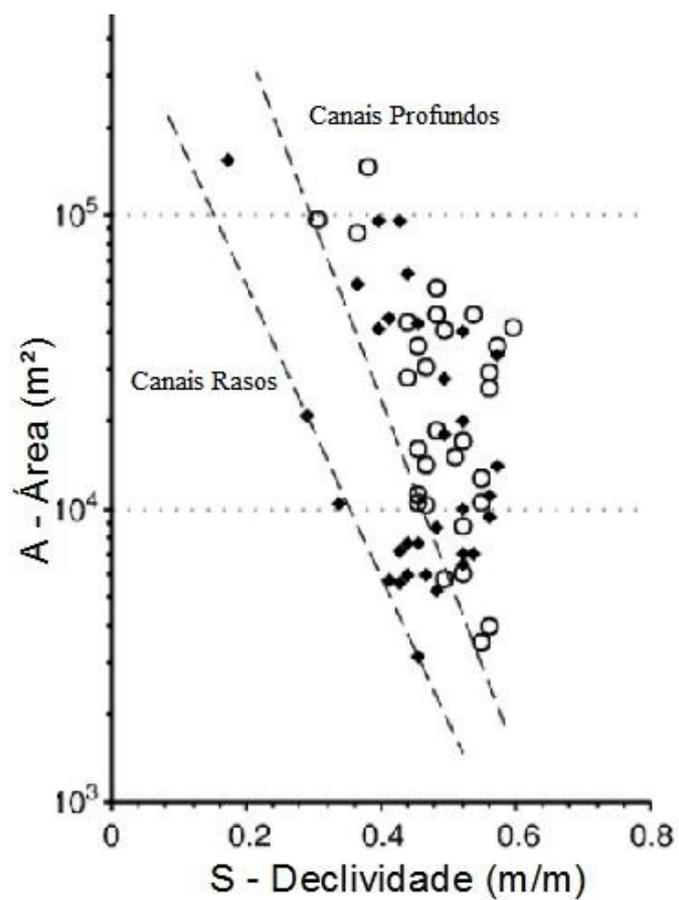
Como pode ser observado na Tabela 2.9, não há um valor pré-estabelecido global para o limiar de desencadeamento das erosões, pois muitos parâmetros devem ser considerados (embora não entrem na equação),

tais como: geomorfologia, geologia local, clima, materiais inconsolidados, entre outros. A título de comparação, podemos observar os limiares obtidos para a região do Colorado, nos estudos realizados por Patton & Schumm (1975) e Schumm *et al.* (1980). No primeiro, a equação obtida foi  $S = 0,16A^{-0,26}$  e no segundo foi  $S = 0,008A^{-0,26}$ . Em ambos os estudos o clima da região é o semi-árido, porém, o estudo de Patton & Schumm (1975) se deu na bacia estrutural do *Piceance Creek* e o estudo desenvolvido por Schumm *et al.* (1980) se deu numa região chamada de *Oil Shale Region*, ambos no Colorado (Estados Unidos da América). Para Schumm *et al.* (1980) essa diferença se dá devido a outros fatores, como cobertura vegetal, geologia e uso do solo. Neste trabalho, as áreas das bacias de contribuição das cabeceiras das erosões são cerca de 10 vezes maiores que no estudo de Patton & Schumm (1975).

Outro estudo interessante foi o realizado por Menéndez-Duarte *et al.* (2007), que obtiveram valores para canais rasos e profundos, sendo considerados canais rasos os com profundidade inferior a 1 metro e canais profundos com profundidades superiores a 1 metro. Os valores obtidos foram  $S = 0,3451A^{-0,252}$  para os canais rasos e  $S = 0,4568A^{-0,176}$  para canais profundos, como indicados na Tabela 2.9.

O estudo de Menéndez-Duarte *et al.* (2007) se deu na cadeia *Cantabrian*, na Espanha, e sua área de estudo foi de aproximadamente 70km<sup>2</sup> composta principalmente por arenitos, quartzitos e ardósia. A área apresenta altitudes que variam entre 100 e 1.000m, caracterizada por um clima atlântico com pluviosidade média anual de 1.500mm (Marquínez *et al.*, 2003) e temperaturas moderadas. Neste estudo, para se obter as bacias e as declividades foram utilizados ferramentas de SIG (programa *ArcInfo*) e também fotografias aéreas e imagens de satélites.

A Figura 2.11 mostra o gráfico obtido por Menéndez-Duarte *et al.* (2007), com os limiares para canais profundos e para canais rasos.



**Figura 2.11** – Limiar de desencadeamento obtido por Menéndez-Duarte *et al.* (2007) para canais profundos e canais rasos.

## 3 CARACTÉRISTICAS GERAIS DA ÁREA

---

### 3.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A área deste presente estudo, que está compreendida totalmente dentro do município de São Pedro, região que fica localizada no centro-leste do estado de São Paulo e é limitada pelas coordenadas UTM 196500m e 199500m E; e 7501000m e 7496000m N, na zona 23S, apresenta uma área e um perímetro aproximados de, respectivamente, 7 km<sup>2</sup> e 14 km (Figura 3.1).

O local de estudo engloba duas sub-bacias (sub-bacia Córrego Água dos Alpes e Córrego do Retiro) pertencentes a Bacia do Córrego Ribeirão do Meio, com canais principais dispostos preferencialmente no sentido NE-SW e com suas nascentes nos terrenos do Planalto Ocidental, como podem ser vistos também na Figura 3.1.

Como principais vias de acessos à área de estudo, temos as rodovias SP – 310 (Washington Luiz) e a SP – 191 (Irineu Penteadó/Carlos Mauro), além de algumas estradas vicinais já no município de São Pedro.

Os municípios limítrofes à São Pedro são: Itirapina e Torrinha (ao norte); Piracicaba (ao sul); Charqueada (a leste); e Santa Maria da Serra (a oeste).

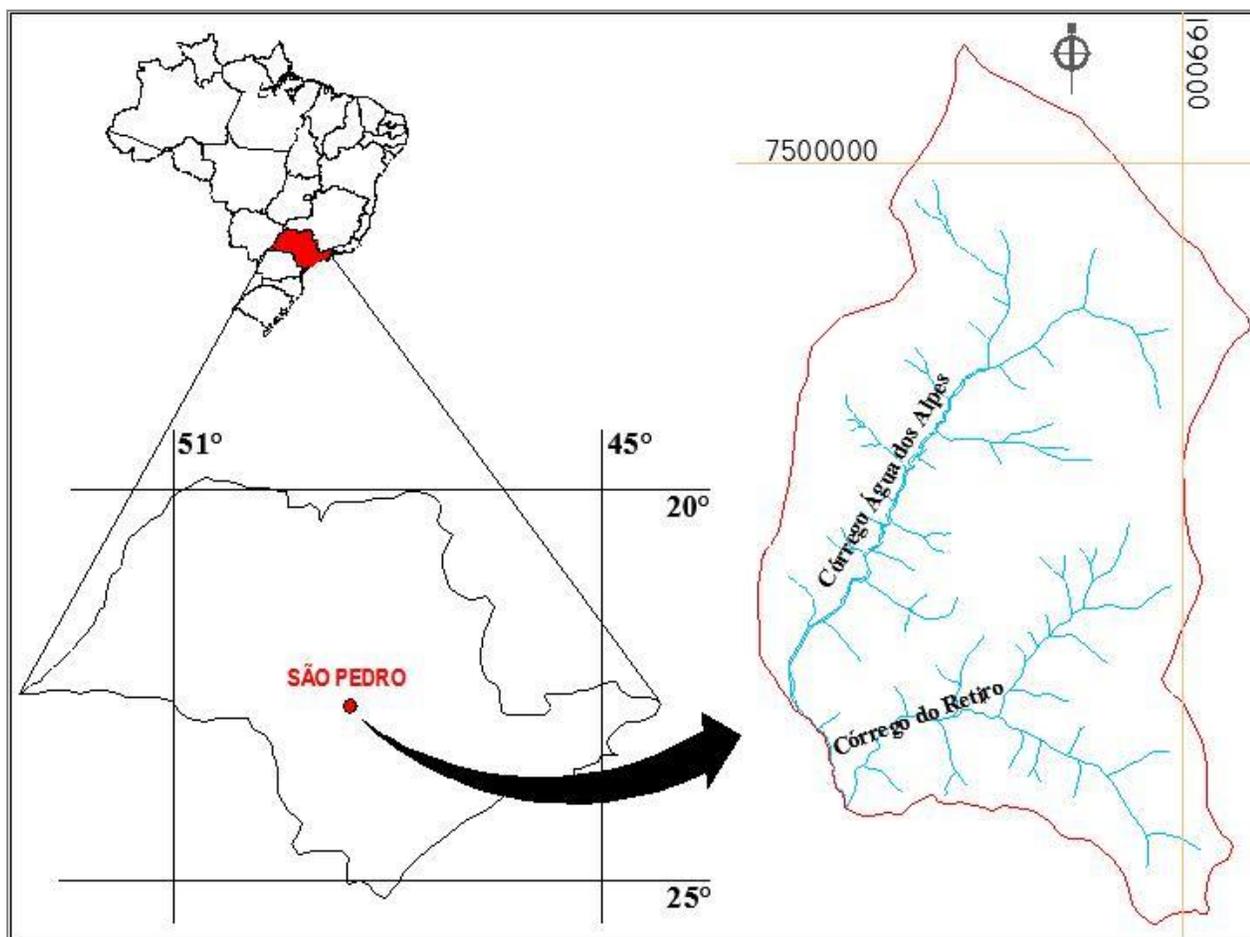


Figura 3.1 – Localização da área de estudo.

### 3.2 CLIMA

O clima da região de São Pedro, de acordo com a classificação de Köppen (1936), está indicado como CWa (clima Sub-Tropical Úmido), com inverno seco e verão quente (precipitação menor que 30mm no mês mais seco). De acordo com o mapa de clima do IBGE (2002), a região apresenta um clima Tropical Subquente Úmido (média entre 15° e 18°C em pelo menos 1 mês) com 3 meses secos.

A região apresenta um índice pluviométrico anual que varia entre 1.400 a 2.227mm (distribuição mensal entre novembro de 1942 a julho de 2000), sendo

observado meses com taxas acima de 300mm e dias com taxas acima de 80mm (Dantas-Ferreira & Pejon, 2004).

No ano de 2009, no período entre 12/12/2008 a 15/12/2009, foi registrado o valor de 1.222 mm de chuva.

### **3.3 VEGETAÇÃO**

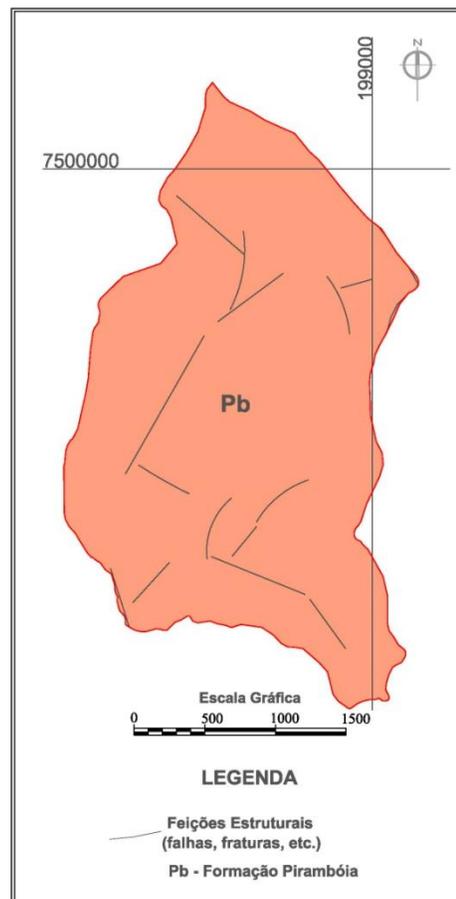
Apenas próximo às escarpas da Serra de São Pedro encontram-se resquícios de cobertura vegetal natural da região, que foi quase totalmente dizimada pela ação antrópica. Pejon (1992) cita o predomínio da cultura da cana-de-açúcar em praticamente 70% da área, seguido das pastagens com 25% e apenas 5% de outras culturas, porém, atualmente este quadro está um pouco diferente, pois há, na região, um predomínio do cultivo de *Eucaliptos* e também muitos locais com plantação de capim *Anapiê*.

### **3.4 GEOLOGIA**

#### **3.4.1 Substrato Rochoso**

O termo substrato rochoso é utilizado porque neste mapa não estão representados nem os aluviões e nem os sedimentos cenozóicos, sendo que os mesmos são representados no mapa de materiais inconsolidados (Pejon, 1992).

A região de São Pedro foi mapeada por diversos autores (IPT, 1981; Pejon, 1992; Pejon & Zuquette, 1999), e, segundo os mesmos, na região de São Pedro afloram rochas sedimentares das Formações Pirambóia e Botucatu, além de rochas ígneas da Formação Serra Geral (unidades pertencentes ao Grupo São Bento). Na área deste presente estudo, observa-se apenas a Formação Pirambóia, como pode ser observada na Figura 3.2.



**Figura 3.2** – Mapa do Substrato Rochoso da área de estudo. Fonte: modificado de Gomes (2002).

O Grupo São Bento é formado pelas Formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral, sendo que as unidades Pirambóia e Botucatu ocorrem interdigitadas. O Grupo São Bento sucede aos sedimentos do Passa Dois, no estado de São Paulo, freqüentemente, com uma brecha basal na zona de contato onde há fragmentos da formação Corumbataí, encontrando-se dispersos em matriz arenosa do arenito Botucatu (Fúlfaro & Bjornberg, 1993).

A Formação Pirambóia se caracteriza litologicamente por arenitos avermelhados de granulação média a fina, com estratificações cruzadas. Em alguns locais ainda ocorrem lentes mais argilosas com estratificação plano-paralelas.

O ambiente deposicional da fácies Pirambóia é atribuída a planícies aluviais, com fácies de canal e planícies de inundação (Fúlfaro *et al.*, 1980), iniciando a fase mesozóica da bacia do Paraná, com sedimentos exclusivamente de origem continental.

Pejon (1992), tendo mapeado a folha de Piracicaba (1:100.000), considera a Formação Pirambóia a maior distribuição em área na região mapeada, representando quase 50% do total da área. São arenitos finos de cores vermelha, branca e amarela, apresentando menos de 15% de argila em sua porção superior e aumentando para 25% próximo ao contato com a Formação Corumbataí. Segundo o mesmo autor, onde há afloramentos deste arenito, se apresentam com cimento de baixa resistência e raramente silicificados, além de estratificações cruzadas de pequeno a médio porte, predominantes.

A Tabela 3.1 mostra as principais características das Formações Serra Geral, Botucatu e Pirambóia (Grupo São Bento), além dos sedimentos Aluvionáres do Quaternário (IPT, 1981).

**Tabela 3.1** – Descrição geral das Formações Geológicas da área. Fonte: IPT (1981).

Unidades		Principais Características
<b>Qa</b>	<b>Sedimentos Aluvionáres</b>	Aluviões em geral, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais subordinadamente, em depósitos de calha e/ou terraços.
<b>Grupo São Bento</b>	<b>JKsg</b>	<b>Formação Serra Geral</b> Basaltos toleíticos de cor preta, textura afanítica, com intenso fraturamentos do tipo colunar.
	<b>Jkb</b>	<b>Formação Botucatu</b> Arenitos de granulação fina a média, bem selecionados e silicificados, de cores amarelados, com estratificação cruzada de médio a grande porte, e fraturamentos verticais e horizontais. São bastante resistentes ao processo de intemperismo.
	<b>TrJp</b>	<b>Formação Pirambóia</b> Depósitos fluviais e de planície de inundação incluindo arenitos finos a médios, siltico argiloso, de estratificação cruzada ou plano-paralela; níveis de folhelhos e arenitos argilosos de cores variadas e raras intercalações de natureza areno-conglomerática.

### 3.4.2 Materiais Inconsolidados

A área de estudo apresenta como substrato rochoso apenas rochas da Formação Pirambóia, porém, existe uma grande variedade de materiais inconsolidados, resultado de uma diversidade litológica da região no entorno.

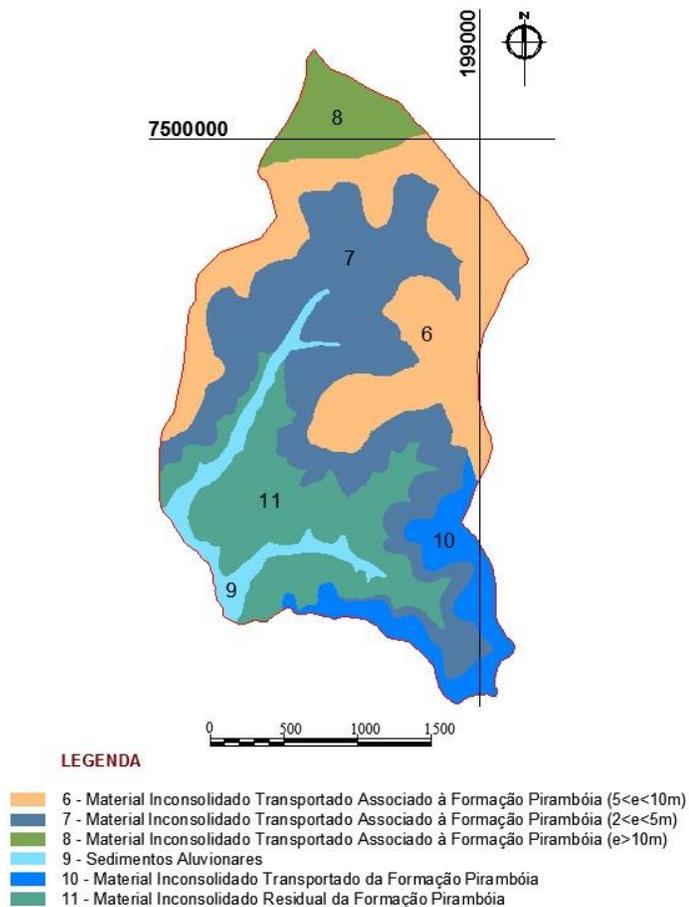
Os materiais inconsolidados foram mapeados em diversas escalas por diversos autores (Pejon (1992), Pejon & Zuquette (1999) na escala 1:100.000; Gomes (2002) na escala 1:20.000; e Zuquette (2002), Dantas-Ferreira (2004) na escala 1:10.000).

No desenvolvimento deste trabalho, foram utilizados, principalmente, os dados de materiais inconsolidados de Gomes (2002), que em seu trabalho, caracterizou o solo da bacia do Ribeirão do Meio, através de ensaios *in situ* e de laboratório. As duas micro bacias deste presente estudo estão localizadas na Bacia do Ribeirão do Meio e apresentam apenas a Formação Pirambóia, com isso, a Tabela 3.2 mostra os resultados dos ensaios realizados por Gomes (2002), que caracterizam bem os Materiais Inconsolidados encontrados na área e a Figura 3.3 mostra o mapa de Materiais Inconsolidados.

**Tabela 3.2** - Tabela de resultados de ensaios de material inconsolidado associados à Formação Pirambóia na bacia Ribeirão do Meio, segundo Gomes (2002).

Classificação	Granulometria			Índices Físicos			Ensaio de Azul de Metileno				Ensaio de Erodibilidade			
	Ag (%)	St (%)	Ar (%)	ps (g/cm <sup>3</sup> )	pd (g/cm <sup>3</sup> )	eo	VB (g/100g solo)	Acb (g/100g argila)	CTC (mEq/100g solo)	SE (m/g argila)	S (%)	P (%)	E (%)	
<b>Formação Pirambóia</b>														
<b>Transportado</b>	<b>Mín.</b>	5,0	1,4	79,9	2,608	1,503	0,42	0,056	1,407	0,176	1,377	0,22	25,38	0,22
	<b>Med.</b>	10,3	4,1	85,7	2,645	1,574	0,66	0,431	3,916	1,293	10,426	0,68	53,51	0,62
	<b>Max.</b>	16,2	11,1	93,6	2,699	1,751	0,75	0,970	6,994	2,995	23,965	1,26	77,37	1,66
<b>Saprolítico</b>	<b>Mín.</b>	4,3	3,6	66,9	2,602	1,470	0,57	1,785	7,385	5,126	43,664	0,24	2,18	1,26
	<b>Med.</b>	17,3	10,4	73,2	2,643	1,648	0,60	3,319	26,965	9,510	69,323	0,47	5,55	4,87
	<b>Max.</b>	27,2	21,7	85,0	2,689	1,750	0,67	4,569	84,399	14,282	111,783	0,67	10,52	12,29
<b>Saprolito</b>	<b>Mín.</b>	16,8	4,9	49,0	2,603	1,570	0,45	1,681	3,475	2,159	16,664	0,39	0,08	30,89
	<b>Med.</b>	20,9	11,9	67,2	2,641	1,603	0,51	2,858	15,356	6,926	64,117	0,50	0,25	156,63
	<b>Max.</b>	25,3	26,3	78,3	2,673	1,670	0,61	4,852	34,156	13,104	118,720	0,61	0,79	270,18

Ag-argila; St-silte; Ar-areia; ps-massa específica dos sólidos; pd-massa específica seca de campo; eo-índice de vazios; VB- volume de azul de metileno adsorvido; Acb- índice de atividade da fração argila; CTC- capacidade de troca catiônica (solo); SE- superfície específica (solo); S- índice de absorção d'água; P- perda de peso por imersão; e E- índice de erodibilidade.



**Figura 3.3** – Mapa de Material Inconsolidado da área de estudo. Fonte: modificado de Gomes (2002).

O Mapa de Materiais Inconsolidados da área de estudo, como mostra a Figura 3.3, apresenta 6 unidades de materiais diferentes, que são a unidade 6, Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia ( $5 < e < 10\text{m}$ ); a unidade 7, Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia ( $2 < e < 5\text{m}$ ); unidade 8, Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia ( $e > 10\text{m}$ ); unidade 9, Sedimentos Aluvionares; a unidade 10, Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia ( $e < 2\text{m}$ ); e a unidade 11, Material Inconsolidado Residual da Formação Pirambóia.

- Transportado Associado à Formação Pirambóia

Os materiais transportados associados à Formação Pirambóia ocorrem em grande parte da área de estudo, com espessuras que vão de maiores que 10m até menores que 0,5m. São materiais muito arenosos de cor marrom avermelhado,

tendo como textura areia fina à média, segundo a ABNT (NBR6502); apresenta estrutura porosa, sem cimentação, concreções e matéria orgânica; e consistência/coerência muito baixa. Estas características, quando se trata de erosão dos solos, sugerem que quando sujeitas a determinadas condições, como alta declividade e/ou ausência de cobertura vegetal, este é um fator propício para o desenvolvimento deste fenômeno.

Para a individualização dos diferentes materiais inconsolidados transportados associados a Formação Pirambóia, Gomes (2002) considerou as diferentes espessuras do mesmo, por exemplo, subdividindo nas unidades 6, 7, 8 e 10. A unidade 6 ocorre em grande parte da área com espessuras variando entre 5 e 10m, já a unidade 7 com espessuras menores, variando entre 2 e 5m; a unidade 8 com espessuras superiores a 10m; e a unidade 10 representa terrenos com espessuras menores que 2m.

- *Materiais Aluvionares*

Os materiais Aluvionares são materiais de textura arenosa que se caracterizam pela fonte do material e são formadas por sedimentos transportados da Formação Pirambóia. São compostos por material de textura areia grossa, com porcentagem de areia variando entre 94 e 96,6%. Esse material apresenta uma coloração esbranquiçada à acinzentada. Os valores de CTC e SE obtidos por Gomes (2002) indicaram atividades muito baixa dos argilominerais.

- *Residual da Formação Pirambóia*

Gomes (2002) individualizou o solo residual da Formação Pirambóia, da base para o topo, em dois tipos de materiais: residual jovem (saprólito), com espessuras que variam desde 0,5 a 2m; e residual maduro (saprolítico), com espessura superior a 2m, preservando as estruturas de estratificação cruzada de médio porte.

Os materiais residuais da Formação Pirambóia apresentam uma textura (ABNT, NBR6502) de areia fina, com estrutura maciça no topo e estratificada na

base, constituída com cimento e concreções, e de consistência/coerência rija. O solo residual saprolítico apresenta porcentagens de areia variando entre 66,9 e 85%, enquanto que o saprólito com porcentagens de areia variando entre 49 e 75%. Os valores de CTC e SE indicaram para ambos os casos, uma predominância de argilominerais de atividade baixa.

### 3.5 GEOMORFOLOGIA

Uma característica geomorfológica marcante das Bacias Sedimentares é que os Planaltos, nestas bacias, são quase que inteiramente circundados por Depressões Periféricas e que apresentam nos contatos (planalto – depressões), um relevo bastante escarpado, caracterizado por frentes de *Cuestas* (Ross, 1985).

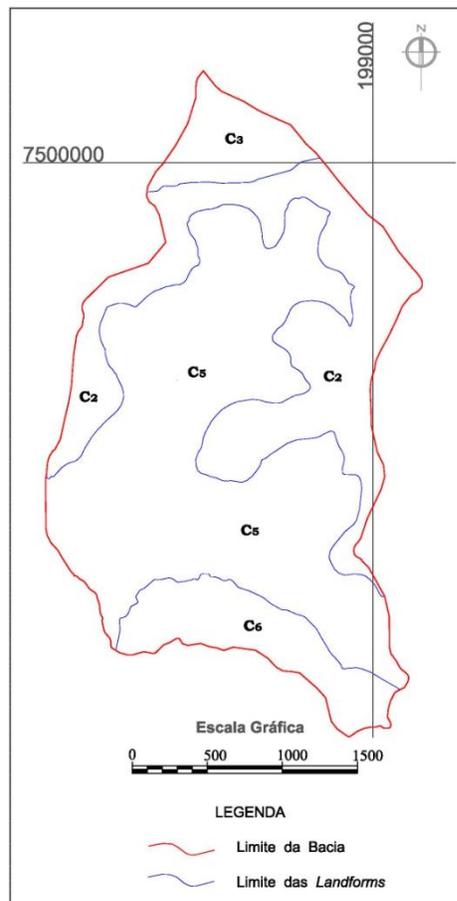
De acordo com o Mapa Geomorfológico do IPT (1997), em escala 1:500.000 do estado de São Paulo, a região do município de São Pedro apresenta as seguintes unidades geomorfológicas: Planalto Ocidental Paulista (Serra de São Pedro); Escarpa da Serra (*Cuestas* Basálticas); e a Depressão Periférica, que são descritas a seguir:

- i) Planalto Ocidental (Serra de São Pedro): apresentam escarpas festonadas, topografia suave, com entalhamento pouco profundo devido ao papel de soleira representada pelos basaltos, drenagem de moderada intensidade, padrão subparalelo a dendrítico.
- ii) Escarpa da Serra (*Cuestas* Basálticas): corresponde à encosta oriental do planalto Ocidental que é constituída no topo pela Formação Serra Geral, na zona intermediária pela Formação Botucatu e na base pela Formação Pirambóia (onde encontra-se a área de estudo). No topo das *cuestas* predominam as colinas amplas e médias que se estendem sob os sedimentos cenozóicos e coberturas residuais das Formações Botucatu e Pirambóia.
- iii) Depressão Periférica: é caracterizada pelo relevo suave sob a forma de colinas e morrotes esculpidas em rochas sedimentares. As colinas apresentam topos aplainados,

vertentes com perfis retilíneo-convexo e côncavo-convexo. Os morrotes apresentam uma estrutura mais arredondada ao norte e alongada ao sul da região de São Pedro, com interflúvio sem orientação preferencial, topos angulosos, vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Os morrotes alongados e espigões associam-se aos arenitos da Formação Pirambóia. A drenagem é marcada pela sua baixa densidade, de padrão sub-retangular; vales abertos e fechados, planícies aluviais interiores restritas mais ao norte da região.

Gomes (2002) dividiu as *landforms*, na Bacia do Ribeirão do Meio, em 3 sistemas (A, B e C), sendo o Sistema B subdividido em 3 Unidades e o Sistema C subdividido em 12 Unidades. Na área deste presente estudo foram encontradas 4 Unidades de terreno (Figura 3.4), a saber:

- Unidade C2: formada por colinas amplas de topos aplainados e suavemente ondulados, vertentes com perfis retilíneos a convexos, e declividade baixa. Unidade caracterizada por apresentar baixa densidade de canais de drenagem e onde foram, também, registradas as ocorrências de erosões em ravina e boçoroca;
- Unidade C3: formada por colinas amplas de topos aplainados, vertentes com perfis retilíneos, declividade muito baixa, cujos canais de drenagem são praticamente ausentes. Nesta área foram evidenciadas feições erosivas de diferentes níveis, desde sulcos até ravinas;
- Unidade C5: formada por vales com encostas retilíneas e convexas associada às planícies aluviais. São vales fechados cuja disposição geométrica dos canais de drenagem, são de: densidade média a alta; sinuosidade mista; angularidade média à alta; e formas anômalas em arco;
- Unidade C6: formada por morrotes com vertentes convexas de topos arredondados a angulosos, e declividade de relevo moderada. Os canais de drenagem apresentam uma disposição geométrica bastante interessante sob o ponto de vista estrutural, que é sua tropia ordenada.



**Figura 3.4** - Mapa de *Landform* da área de estudo. Fonte: modificado de Gomes (2002).

### 3.6 SOLO

Oliveira (1989) elaborou, pelo Instituto Agronômico de Campinas, um levantamento pedológico em escala de semi-detalhe (escala 1:100.000). Neste mapa observa-se uma grande diversidade de solos, sendo 51 unidades diferentes. Há, no entanto, um predomínio de solos podzólicos, correspondendo a aproximadamente 50% da área mapeada neste estudo. Foram identificados 11 tipos de podzólicos vermelho-amarelos, apresentando textura desde muito argilosa até muito arenosa, com espessuras pequenas e formando associações com materiais litológicos das Formações Corumbataí e Pirambóia, principalmente.

Nas proximidades de São Pedro os latossolos vermelho-escuros e roxos ocupam grandes extensões, como por exemplo, ao norte da cidade de Piracicaba, associados às áreas de ocorrência dos migmatitos básicos e, ao sul, às litologias da Formação Irati. Estes solos apresentam, geralmente, textura argilosa com espessuras acima de 5 metros e perfis bem homogêneos. Ocorrem também latossolos vermelho-amarelos de textura média a arenosa em pequenas áreas isoladas (Pejon, 1992).

Na região, encontram-se associados às litologias da Formação Pirambóia e Corumbataí, solos litólicos, que são materiais de espessura bastante reduzida, com restos de rocha e, na maioria das unidades mapeadas (Pejon, 1992), não puderam ser individualizados dos solos podzólicos pouco espessos.

Gomes (2002) identifica na Bacia do Ribeirão do Meio, em São Pedro, que engloba a área deste estudo, 4 unidades pedológicas descritas por Oliveira (1989) em seu levantamento pedológico na escala de 1:100.000, a saber: i) *Latossolos Vermelhos-escuros (latossolo vermelho)*, que compreendem os solos que ocupam os topos dos interflúvio; ii) *Podzólicos Vermelho Amarelo (argilosos vermelhos)*, ocupam, geralmente, as encostas; iii) *Areias Quartzosas (neossolos quartzarenico)*, localizam-se nas porções mais baixas, próximas das cabeceiras de drenagem em anfiteatros de erosão e próximo das margens de rios; e iv) *Solos Hidromórficos (gleissolos)*, localizam-se nas pequenas várzeas de canais.

### **3.7 ÁGUAS**

#### **3.7.1 Águas Superficiais**

O Córrego Ribeirão do Meio, que nasce a aproximadamente 900m de altitude, na Serra de Itaqueri, é o principal canal da Bacia Hidrográfica que leva o mesmo nome, drenando quase que exclusivamente a depressão periférica, percorrendo uma extensão aproximada de 19.360m, até desaguar no Rio

Piracicaba, com contribuição dos córregos, cursos intermitentes e represas. À leste, a Bacia do Ribeirão do Meio faz fronteira com a Bacia do Ribeirão Samambaia e a oeste, com a Bacia do Ribeirão Vermelho (Gomes, 2002).

A área deste estudo compreende as sub-bacias dos córregos Água dos Alpes, próximo à área urbana, e o Córrego do Retiro, próximo ao Porto de Areia Retiro, sendo estes os principais afluentes do Córrego Ribeirão do Meio e que estão situados na margem direita do mesmo (Figura 3.1). Quanto à forma de seus vales, esta bacia apresenta três trechos distintos: i) Alto Curso, caracterizado pelo gradiente hidráulico elevado em vale bastante estruturado, relativamente estreitos e com vertentes de inclinações acentuadas; ii) Médio Curso, representado pelo gradiente hidráulico moderado a baixo com vales preferencialmente encaixados, mas pouco expressivos; e iii) Baixo Curso, curso com gradiente hidráulico baixo, vales abertos em quantidades expressivas.

### **3.7.2 Águas Subterrâneas**

Na região são encontrados 2 aquíferos, o Aquífero Botucatu e o Aquífero Serra Geral, que foram descritos por Corrêa (1996), Gomes (2002) e Dantas-Ferreira (2008).

#### ***3.7.2.1 Aquífero Botucatu***

Representado pelos arenitos das Formações Botucatu e Pirambóia, este aquífero constitui uma unidade aquífera de porosidade primária intersticial, predominando condições livres na maior parte da área; condições confinadas ocorrem nas porções limítrofes da bacia. As áreas de afloramento dos arenitos caracterizam-se como zona de recarga do Aquífero Botucatu.

### ***3.7.2.2 Aquífero Serra Geral***

Sobreposto ao Aquífero Botucatu encontra-se representado pelos basaltos da Formação Serra Geral; unidade aquífera constituída por camadas com porosidade predominantemente secundária (por fraturamento), apresentando-se litologicamente homogênea e hidraulicamente anisotrópica, com circulação em meio fraturado. É um aquífero em condições livres em toda área com potencial em águas subterrâneas, em aquíferos associados a sistemas de fraturamento. No entanto, na área deste presente estudo não há sua ocorrência, pois ocorre restritamente nos altos da Serra de São Pedro, que não está localizado na área das duas sub-bacias estudadas.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

---

Para a realização dos índices que expressam o limiar topográfico para o desencadeamento dos processos erosivos foram executadas etapas de trabalho que podem ser observadas no fluxograma da Figura 4.1.

### **4.1 COMPILAÇÃO DAS INFORMAÇÕES E DEFINIÇÃO DA ÁREA**

#### **4.1.1 Revisão da Literatura**

Este trabalho se iniciou com uma pesquisa bibliográfica a respeito do tema a ser abordado e também com um levantamento dos documentos cartográficos da região estudada. Aqui se buscou os primeiros trabalhos a respeito do tema de erosão, levando em conta alguns itens importantes para este trabalho, a saber: tipos de erosão, processos erosivos, tipos de feições erosivas e os mecanismos que podem levar ao desencadeamento do processo. Foram pesquisados diversos livros, artigos, dissertações e teses nacionais e internacionais, mapas topográficos, fotografias aéreas, imagens de satélite e mapas geotécnicos, buscando inserir este trabalho em um contexto global.

#### **4.1.2 Documentos Cartográficos**

Na etapa de compilação das informações deste trabalho, foi realizado um levantamento dos documentos cartográficos existentes da região de estudo, a princípio, para se definir uma área de interesse e que atendesse as condições desejadas para o desenvolvimento deste estudo.

A etapa seguinte, definição da área de estudo, foi realizada com base nos documentos cartográficos e de sensores remotos (mapas topográficos, mapas geotécnicos, fotografias aéreas e imagens de satélite) pesquisados na etapa de compilação das informações. Os documentos cartográficos utilizados neste trabalho serão apresentados a seguir.

##### ***4.1.2.1 Mapas Topográficos***

A área escolhida para este presente estudo possui aproximadamente 7km<sup>2</sup> e está inserida em 4 mapas topográficos do IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo), na escala 1:10.000, além de estar na zona de mudança de fuso UTM, do fuso 23S para o fuso 22S. Os mapas topográficos utilizados foram:

- São Pedro II (SF-23-Y-A-IV-1-NO-C) em escala 1:10.000 do ano de 1979 (Primeira edição), Datum UTM Córrego Alegre;
- São Pedro III (SF-23-Y-A-IV-1-NO-D) em escala 1:10.000 do ano de 1979 (Primeira edição), Datum UTM Córrego Alegre;
- São Pedro I (SF-23-Y-A-IV-1-NO-F) em escala 1:10.000 do ano de 1979 (Primeira edição), Datum UTM Córrego Alegre; e
- Ribeirão do Meio (SF-23-Y-A-IV-1-NO-E) em escala 1:10.000 do ano de 1979 (Primeira edição), Datum UTM Córrego Alegre.

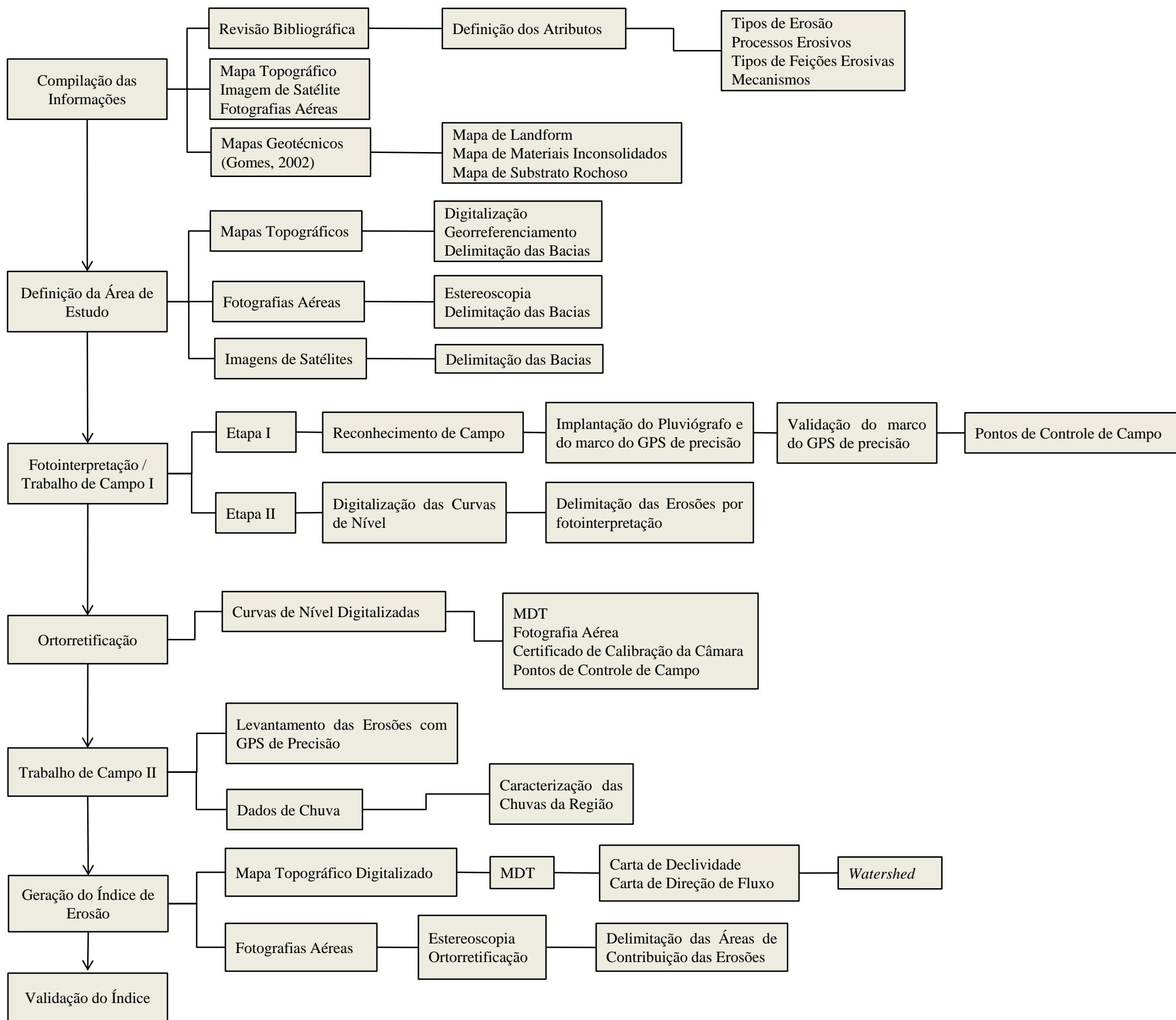


Figura 4.1 - Fluxograma com as etapas de trabalho.

#### **4.1.2.2 Mapas Geotécnicos**

Para a caracterização geológico-geotécnica da área de estudo foram utilizados dados de diversos trabalhos realizados pela EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo) e em diversas escalas, desde 1:100.000 até 1:10.000 (Pejon, 1992; Pejon & Zuquette, 1999; Gomes, 2002; Zuquette, 2002; Dantas-Ferreira, 2004, 2008). Os mapas de *Landform*, Substrato Rochoso e Materiais Inconsolidados utilizados foram os de Gomes (2002), por ter trabalhado somente na Bacia do Ribeirão do Meio, no município de São Pedro, onde estão inseridas as duas Sub-bacias aqui estudadas.

#### **4.1.3 Documentos de Sensores Remotos**

##### **4.1.3.1 Imagens de Satélite**

As imagens de satélites utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir do programa *Google™ Earth*, e correspondem a imagens do satélite *QuickBird* de setembro de 2007 e que utilizam uma câmara com distância focal de 8.900mm e apresenta tamanho do pixel igual a 0,70m (Salvini *et al.*, 2004) e também pela imagem do mesmo satélite, gentilmente cedida pela Prefeitura de São Pedro, obtida em 07/09/2007, e que cobre parte da área escolhida para este estudo e não sua totalidade. Estas duas primeiras imagens foram utilizadas na parte inicial deste estudo como auxílio para a escolha da área de estudo. Depois de decidida a área a ser trabalhada, foi comprada imagem do satélite *WorldView*, imagens pancromáticas com resolução de 0,50m, onde foram utilizadas principalmente na etapa de validação do índice, em toda a Bacia do Ribeirão do Meio.

### 4.1.3.2 Fotografias Aéreas

As fotografias aéreas utilizadas aqui podem ser observadas na Tabela 4.1, onde está indicado o ano das fotografias aéreas, bem como o número do projeto, faixa do voo, número da fotografia e escala. Todos os vãos mostrados na Tabela 4.1 possuem o Certificado de Calibração da Câmara utilizada no voo, o que é preciso para se fazer a ortorretificação das fotografias aéreas em uma etapa posterior e que será explicada mais a frente. A delimitação da área de estudo, em princípio, foi realizada através da técnica de estereoscopia das fotografias aéreas.

**Tabela 4.1** – Fotografias aéreas utilizadas neste estudo.

<b>Ano / Projeto</b>	<b>Faixa</b>	<b>Foto</b>	<b>Escala</b>
<b>1995 / B-0576</b>	08	01 02	1:25.000
	09	05	
<b>2000 / B-0719</b>	361	0072	1:30.000
	037	0060	
<b>2005-2006 / B-0917</b>	030	9539 9540	1:30.000
	131	3780 3781	

## 4.2 FOTOINTERPRETAÇÃO E TRABALHO DE CAMPO I

### 4.2.1 Etapa I

#### 4.2.1.1 Campo de Reconhecimento

Na fase de campo de reconhecimento, através de fotografias aéreas e também com o auxílio do programa *Google™ Earth* buscou-se uma área que não fosse totalmente urbanizada e que tivesse a ocorrência de muitos processos erosivos como sulcos, ravinas e boçorocas. Com isso foi realizada uma saída a campo para reconhecimento da área escolhida e também para se observar a logística do estudo a ser realizado, ou seja, os acessos à área de estudo, se

haveria local ideal para implantação de um pluviógrafo e de um marco para a utilização de um GPS de precisão. A área então escolhida para o trabalho foram duas sub-bacias da Bacia do Ribeirão do Meio, sendo elas as sub-bacias Córrego Água dos Alpes e Córrego do Retiro, que ficam dentro do Município de São Pedro, no interior do Estado de São Paulo.

#### ***4.2.1.2 Implantação do Pluviógrafo***

Foi instalado na área de estudo um pluviógrafo (Figura 4.2), a cerca de 5 metros da base implantada para o GPS de precisão que fica na Sub-bacia do Retiro, no dia 21 de outubro de 2009. Os dados de chuva anteriores a esta data foram utilizados de outro pluviógrafo, instalado em uma fazenda que fica a aproximadamente 6km do local onde está o pluviógrafo dentro da área de estudo.

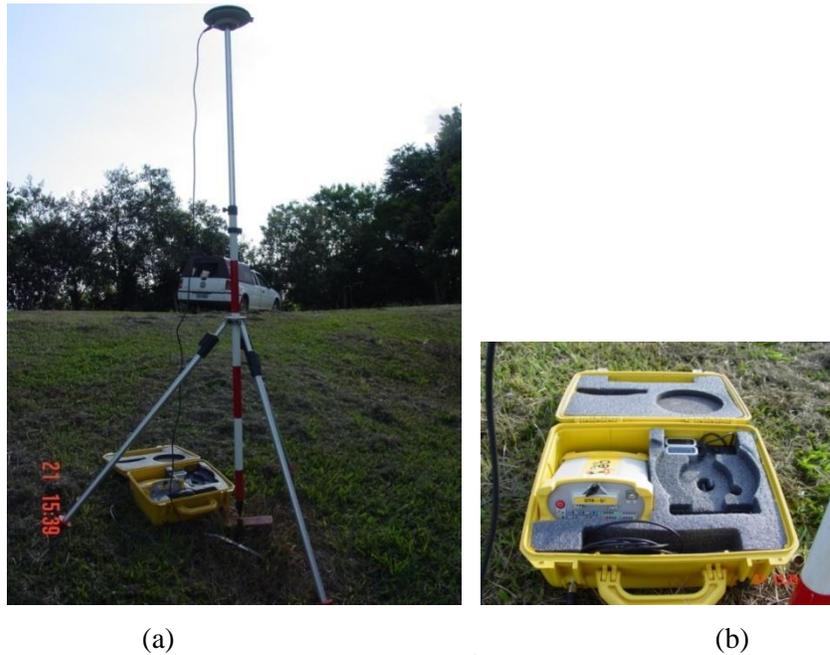
O mecanismo utilizado pelo pluviógrafo para registrar os eventos de chuva se dá da seguinte maneira: através de um sistema de caçambas autovertedoras interno, é realizado um golpe a cada 0,2 mm de chuva, sendo o instante do golpe registrado por um dispositivo eletrônico de memória. Com isso, o pluviógrafo registra os eventos de chuva no instante em que eles ocorrem e com uma precisão de 0,2 mm. Uma vez coletados os dados, os mesmos são abertos e processados através do programa *BoxCar Pro 4<sup>TM</sup>*.



**Figura 4.2** – Pluviógrafo Onset instalado na Sub-bacia do Ribeirão do Retiro.

#### ***4.2.1.3 Implantação da Base/Marco***

Para a realização deste trabalho foi implantada uma base/marco temporária dentro da área de estudo, para utilização de um aparelho GPS de precisão (GPS GTR-G<sup>2</sup>). Este aparelho de GPS funciona com uma base estática (Figura 4.3 *a* e *b*) em um ponto fixo pré-definido e uma coletora de dados (Figura 4.4 *a*, *b* e *c*) utilizada como modo cinemático. O GPS GTR-G<sup>2</sup> está configurado para obter informações do sistema GNSS (satélites dos Estados Unidos) e não para o sistema Glonas (satélites da Rússia).



**Figura 4.3** – a) Base estática do GPS GTR-G<sup>2</sup>; e b) detalhe da coletora de dados da base.



**Figura 4.4** – a) Coletora de dados em campo, com o operador; b) computador para armazenamento e organização dos dados coletados; e c) receptor OEMV.

Para a criação da base/marco na área de estudo foi necessário a implantação de um ponto fixo na área (Figura 4.5). Após a colocação deste

ponto, foi instalada a base móvel (Figura 4.3a) e a mesma ficou ligada e funcionando por 6 horas, tempo necessário para o processo de criação de uma base/marco. Depois de realizado esse procedimento no campo, os dados foram descarregados no computador e foi realizada a transferência de coordenadas, no programa *GTR Processor*, que necessita dos dados de duas outras bases conhecidas e homologadas pelo IBGE, do mesmo dia em que foi criada a base/marco.



**Figura 4.5** – Marco fixo no campo, em local conhecido, para instalação da base do GPS GTR-G<sup>2</sup> (coordenadas do marco em UTM Sirgas: latitude 198663,857m e longitude 7496408,704m e elevação 528,678m, com precisões respectivas de 0,044; 0,009; e 0,025m).

A base/marco foi criada no dia 11/03/2010 e foram utilizadas as estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), para transferência de coordenadas, da Estação Politécnica – POLI (Código internacional – 93800), na cidade de São Paulo/SP e também a Estação Presidente Prudente – PPTE (Código internacional – 93900), na cidade de Presidente Prudente/SP. Os arquivos necessários para este processamento foram baixados na página do IBGE, através do endereço <http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc>, onde se

deve colocar a data da criação da base/marco (neste caso 11/03/2010) e selecionar as estações desejadas (que neste caso foram a POLI e a PPTE).

O procedimento para esta operação de transferência de coordenadas foi todo realizado no programa *GTR Processor*, como descrito a seguir.

- GTR Processor

Seqüência de comandos para abrir os arquivos da base móvel (a) e das estações da RBMC (b), baixadas na página do IBGE:

- (a) “*Arquivo – Arquivos de Dados – Importar*” (arquivo do tipo \*.PDC)

Selecionar o arquivo da base móvel e mudar o tipo do arquivo para “*Estático*”.

- (b) “*Arquivo – Arquivos de dados – Importar*” (arquivo do tipo \*.??o)

Selecionar os arquivos com a extensão mencionada acima das estações da RBMC e mudar modelo da antena para “*nenhum*”. Mudar o tipo dos 2 arquivos para “*Base*” e “*OK*”.

Os arquivos do tipo “*base*” estarão em verde e o arquivo do tipo “*estático*” em vermelho. Deve-se, em seguida editar altura da base móvel (“*estático*”) dando um duplo clique no ícone vermelho. Ir na aba “*Ocupações*” e em “*Inclinação*” colocar 2m e “*OK*”.

Após esta etapa é necessário editar as coordenadas das bases RBMC, dando um duplo clique nos ícones verdes (“*bases*”), colocando os valores planimétricos, altimétrico e também os valores dos sigmas, que estão no Relatório de Informação das Estações, disponíveis pelo IBGE, porém, deve-se observar se o sistema de coordenadas no programa, em utilização, é o UTM SIRGAS. Após ajustar as coordenadas das duas bases, clicar em “*OK*”.

Após, no Menu Principal, ir em:

- “*Editar – Parâmetros de Processamento – Corte de Elevação*” (alterar para 15°)
- “OK”
- “*Iniciar Processo Automático*” (clcando no ícone )

Aparecerá, automaticamente após o processamento, o relatório do processamento. Pressionar a tecla F4 no teclado do computador para retornar à tela do programa.

Para finalizar o processo de transferência de coordenadas, deve-se clicar no ícone .

#### **4.2.1.4 Pontos de Controle de Campo (PCC)**

Os Pontos de Controle de Campo (PCC) são muito importantes para se fazer o georreferenciamento de fotografias aéreas e de mapas topográficos e servem também para se fazer a ortorretificação de fotografias aéreas. Os procedimentos utilizados para a obtenção dos PCCs: estacionar o GPS de precisão em um tripé no campo (Figura 4.6) e o deixar estacionado por 20 minutos para obter uma excelente precisão (da ordem de milímetros). Todos os PCCs ficaram próximos da base (do GPS de precisão – instalado nas coordenadas: latitude 198663,857m e longitude 7496408,704m), não estando nenhum dos PCCs mais distante que 4 km da base.



**Figura 4.6** – Coleta de um dos Pontos de Controle de Campo (P1), mostrando o procedimento adotado.

## 4.2.2 Etapa II

### 4.2.2.1 Digitalização das Curvas de Nível

Os mapas topográficos foram escaneados e foram digitalizadas as curvas de nível no programa *AutoDesk*<sup>TM</sup>. As curvas estão com equidistância de 5 em 5m e neste mesmo programa, foi acrescentada a elevação de cada curva de nível, sendo a menor cota de 465m e a maior de 620m. No programa supracitado, as curvas de nível foram exportadas para a extensão *shapefile* (.shp), com suas coordenadas e elevações através da seqüência: “*Map – Tools – Export*”. Esse procedimento foi necessário para ser criado o MDT em outros programas (*ArcGis*<sup>TM</sup> e *ENVI*<sup>TM</sup>).

#### 4.2.2.2 Fotointerpretação

Nesta etapa do trabalho, o processo de fotointerpretação utilizado foi o de estereoscopia, através de um par de fotografias aéreas consecutivas. Para este passo, foram utilizados um estereoscópio de espelho (Figura 4.7 a), da marca Wild Heerbrugg ST4 – 11168; um estereoscópio de bolso (Figura 4.7 b), da marca D.S. Vasconcellos; e também em estereoscópio Wild Heerbrugg – Type 392824 (Figura 4.8). A fotointerpretação foi realizada fazendo-se a delimitação da área de estudo (das duas sub-bacias), das erosões, marcando as drenagens encontradas.



**Figura 4.7 – a)** Estereoscópio de espelho e **b)** estereoscópio de bolso utilizados para a fotointerpretação deste trabalho.



**Figura 4.8** - Estereoscópio Wild Heerbrugg – Type 392824 utilizado no trabalho.

## **4.3 ORTORRETIFICAÇÃO**

### **4.3.1 Procedimento**

A ortorretificação, ou ortocorreção, tem por finalidade a correção das distorções fotográficas ocorridas pelo relevo, fazendo com que uma imagem fotográfica, que apresenta uma projeção cônica, apresente uma projeção ortogonal, mantendo a constância da escala em toda a imagem ortorretificada (Araujo, 2008).

#### 4.3.1.1 MDT

O Modelo Digital de Terreno (MDT) utilizado neste trabalho foi realizado pelo programa *ArcMap*<sup>™</sup>. O arquivo das curvas de nível digitalizadas do mapa topográfico com equidistância de 5m foi o arquivo base para a obtenção do MDT. Foram utilizados também pontos cotados em campo (como pontos de cabeceira de erosões, e pontos de controle de campo) e também toda a drenagem da área, para que o MDT fosse o mais completo e real possível. Após a criação do MDT, foi preciso realizar um teste (para avaliação da precisão do modelo) que consistiu em aplicar um filtro de 1<sup>a</sup> ordem e após, criar curvas de nível na metade do intervalo original, ou seja, a cada 2,5m e fazer uma verificação visual na precisão das curvas. Uma vez constatada a precisão do MDT, o mesmo foi utilizado em todas as etapas do trabalho, inclusive utilizado para a ortorretificação das fotografias aéreas.

O procedimento adotado para se fazer o MDT no *ArcMap*<sup>™</sup> foi: em “*3D Analyst Tools – Raster Interpolation – Topo to Raster*” são carregados os arquivos utilizados para sua criação e é especificado suas características, como por exemplo a drenagem, que deve ser identificado como *Stream*, os pontos cotados devem ser identificados como *Point Elevation*, as curvas de nível como *Contour*, e se houver necessidade de uma mascara que faça o recorte de uma área desejada, o mesmo deve ser identificado como *Boundary*. Após este primeiro procedimento, deve-se em “*Index – Filter*” aplicar o filtro, com o arquivo criado anteriormente, salvando o novo arquivo. Com isso, para finalizar os testes e a precisão no MDT, deve-se ir em “*3D Analyst Tools – Raster Surface – Contour*” e selecionar o arquivo filtro criado anteriormente e em “*Contour Interval*” colocar 2,5m, pois a equidistância original do mapa topográfico estava de 5 em 5 metros, e em “*Base Contour*” colocar a cota mínima da área.

Com todo o procedimento mostrado anteriormente, temos um MDT com uma maior precisão e que melhor representa o terreno real, no entanto, para a ortorretificação das fotografias aéreas no programa *Envi*<sup>™</sup>, é necessário

transformar o MDT numa extensão própria do programa percorrendo os seguintes passos: no Menu Principal do *Envi*<sup>TM</sup> ir em “*File – Open Vector File*” e informar o Datum utilizado, assim como também o fuso. A seguir foi criado um arquivo com a extensão *Envi Vector File (.evf)*. No Menu Principal ir em “*Vector – Convert Contours to DEM*”, para abrir o arquivo criado e digitar algumas características, por exemplo, altitude máxima e mínima do terreno, *Datum* utilizado, fuso entre outros.

#### **4.3.1.2 Orientação Interna e Orientação Externa**

Uma vez criado o MDT da área, deve-se abrir o arquivo da fotografia aérea digitalizada (escaneada em 1.200dpi) e entrar com os parâmetros da Orientação Interna e Orientação Externa das imagens.

Para a Orientação Interna, são necessários dados contidos no Certificado de Calibração, que é o certificado de calibração da câmara aérea utilizada para realizar o vôo da fotografia aérea usada. Nestes certificados, entre diversos parâmetros encontrados, para a Orientação Interna foram utilizados os dados da Distância Focal Calibrada; e as coordenadas do Afastamento do Ponto Principal de Autocolimação em x e em y; e das marcas fiduciais (os dados dos vôos utilizados neste trabalho estão no Capítulo 5 subitem **5.2 – Ortocorreção de Fotografias Aéreas**).

A Orientação Externa é realizada com os Pontos de Controle de Campo (PCC). Para isso, um cuidado que se deve tomar ao se fazer os pontos de controle, é se os mesmos são visíveis e fáceis de achar na fotografia aérea. Com isso, deve-se selecionar o local do ponto que se deseja utilizar e dar as coordenadas planimétricas e altimétricas do ponto, devendo ser o mais preciso possível, pois o programa *Envi*<sup>TM</sup> utiliza os dados da Orientação Interna e Externa, gerando um valor de erro acumulado, onde se o mesmo for grande

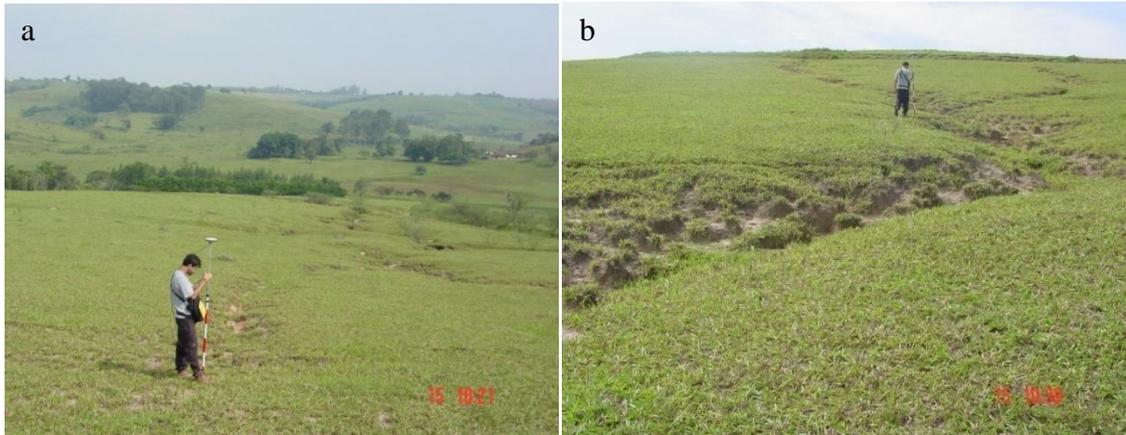
demais, o programa não ortorretifica a imagem, tendo que realizar todo o processo novamente.

Após todo o processo de ortorretificação da imagem, a mesma deverá ser salva na extensão *geotiff/tiff*, podendo, então, ser aberta em um SIG devidamente georreferenciada.

## **4.4 TRABALHO DE CAMPO II**

### **4.4.1 Levantamento das Erosões**

Nesta etapa do trabalho foram realizadas diversas saídas de campo com o fim de se fazer o levantamento das erosões encontradas na área de estudo. Esta etapa se deu da seguinte maneira: ao se detectar uma erosão no campo, primeiramente se marcava com o GPS de precisão o ponto de cabeceira (Figura 4.9a), deixando o GPS parado por pelo menos 60 segundos; após, foi realizado um caminhar ao redor da erosão (Figura 4.9b), com o GPS captando pontos de 1 em 1 segundo até retornar ao ponto de cabeceira; e quando possível, era feito um caminhar dentro da erosão, com o fim de se estimar a profundidade da mesma. Como este procedimento, de caminhar dentro das erosões não foi possível para todas as erosões, devido a inviabilidade de caminhar dentro delas entre outros problemas, as erosões foram então classificadas, com relação à profundidade, em mais profunda que 1 metro (>1m) ou menos profunda que 1 metro (<1m).



**Figura 4.9 – a)** marcação do ponto de cabeceira da erosão em campo, com o GPS de Precisão; e **b)** caminhamento no entorno da erosão com o mesmo GPS.

Foram encontradas mais de 65 feições erosivas no campo entre sulcos, ravinas e boçorocas. Algumas foram delimitadas apenas por fotografias aéreas, pois não houve a permissão para se chegar ao local, pois todas as erosões ficam dentro de propriedades particulares. Apenas em uma propriedade foi negado o acesso as erosões, portanto foram delimitadas por fotografias aéreas como comentado anteriormente.

Nesta etapa, e também na primeira etapa de campo, foram coletados os dados de chuva no Pluviógrafo instalado na área de estudo. Com isso, pôde-se calcular o quanto de chuva ocorreu na área, ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho e também dos anos anteriores a ele, pois como já dito, há um pluviógrafo instalado próximo à área de estudo (cerca de 6km de distância), tendo sido utilizado em trabalhos anteriores a este.

#### 4.5 GERAÇÃO DO ÍNDICE (S x A)

Nesta etapa foram gerados índices de declividade (S) *versus* área (A), onde a declividade obtida foi a declividade média da bacia de contribuição de cada erosão; e a área era efetivamente esta área de contribuição obtida. Estes índices foram gerados para diversas ocasiões diferentes, como por exemplo, foi

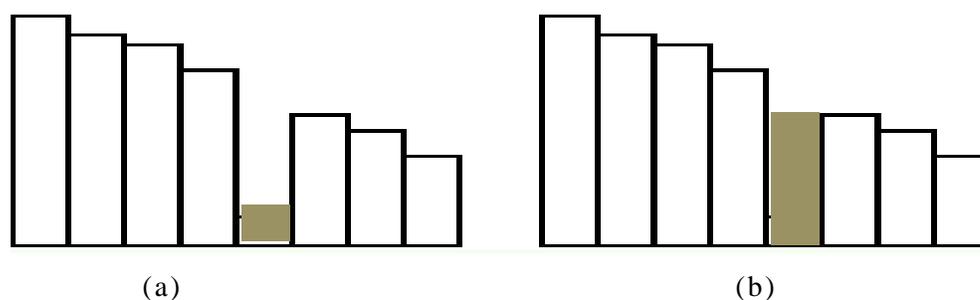
gerado de forma automática para os pontos de cabeceira das erosões nas condições atuais; automaticamente para os pontos de cabeceira das erosões nas condições iniciais da erosão, ou seja, esses pontos foram definidos através de fotografias aéreas antigas; e foi gerado um índice de Declividade (S) *versus* área (A), onde as mesmas foram feitas através de fotografias aéreas e depois digitalizadas e conferidas junto ao MDT.

#### 4.5.1 Processamento Automático

As bacias de contribuição das erosões foram geradas automaticamente através das ferramentas de hidrologia do *ArcMap*<sup>TM</sup>. A forma como foi obtido o MDT utilizado como base para todas as demais operações foi descrito no subitem 4.3.1.1 – MDT, deste mesmo capítulo.

##### 4.5.1.1 Fill (*Preenchimento*)

A ferramenta *Fill* no SIG serve para corrigir alguns erros que podem ser gerados no momento de criação do MDT. Esses erros levam o nome de *Sink* e a Figura 4.10 mostra como se dá essa correção. Essa ferramenta encontra-se em: “*ArcToolBox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Fill*”.



**Figura 4.10** – a) Exemplo de uma amostra com *Sink* e b) mostrando este *Sink* já corrigido. Fonte: Buarque *et al.* (2009).

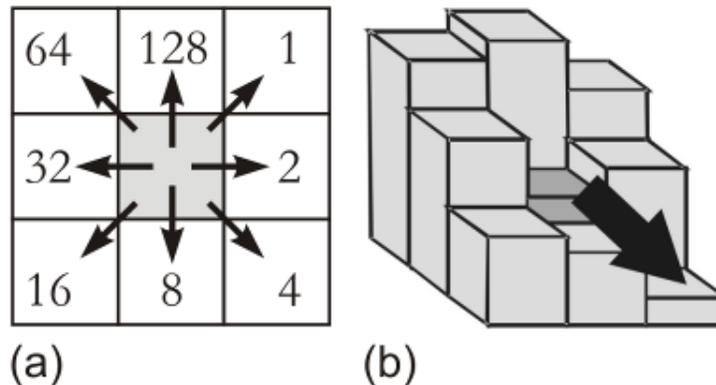
#### 4.5.1.2 Flow Direction (Direção de Fluxo)

Muitos são os métodos para se obter as direções de fluxo, baseados no MDT de determinada área, dizem Buarque *et al.* (2009). Segundo os mesmos autores, a maioria desses métodos definem, para cada *pixel*, um código de direção de fluxo que indica para qual dos 8 *pixels* vizinhos o escoamento deverá seguir, em outras palavras, uma direção de fluxo única; enquanto que há métodos que permitem a partição do escoamento de um determinado *pixel* para mais de um *pixel* vizinho, dando assim direções de fluxo múltiplas.

O critério adotado nos métodos que trabalham com direção de fluxo única é, normalmente, em função da declividade. A declividade é calculada da seguinte forma: a partir do *pixel* central (de uma grade 3x3) é identificada para qual *pixel* a declividade é máxima, fazendo assim uma linha ligando esses dois *pixels* (Mark, 1984; O'Callaghan & Mark, 1984), como mostra a Figura 4.11.

Essa idéia da origem aos algoritmos chamados D8 (*deterministic eight-neighbors*), como os de Jenson & Domingue (1988), que está implementado no programa *ArcGIS*<sup>TM</sup>, no conjunto de ferramentas *Arc-Hydro*<sup>TM</sup>, tendo sido realizada uma modificação, que foi proposta por Paz *et al.* (2006), o qual implementou o algoritmo e introduziu um fator de aleatoriedade para a definição da direção de fluxo em *pixels* de mesma declividade que as vizinhas, diminuindo o problema do aparecimento de possíveis drenagens paralelas.

A ferramenta *Flow Direction* no SIG, que utiliza o MDT como entrada e cria um arquivo matricial mostrando a direção de fluxo de cada célula, fundamentada no método D8 (*deterministic eight-neighbors*), como dito anteriormente. Essa ferramenta encontra-se em: “*ArcToolBox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Flow Direction*”.



**Figura 4.11 - a)** Código de direções empregado para distinguir as 8 direções de fluxo possíveis no método D8; **b)** direção de fluxo adotada automaticamente através da regra da maior declividade. Fonte: Buarque *et al.* (2009).

#### 4.5.1.3 Flow Accumulation (Acumulação de Fluxo)

Em seguida foi realizada a operação de *Flow Accumulation*, que consiste na integração entre o fluxo superficial e subsuperficial da água a montante de um determinado ponto no terreno. O arquivo gerado apresenta-se em escala de cinza (de 0 a 255), sendo que os valores mais elevados referem-se a áreas de concentração de fluxo e os valores mais baixos representam elevados topográficos que podem ser utilizados para identificar divisores de águas (Gimenes *et al.*, 2010). A partir da direção de fluxo, o fluxo acumulado é obtido somando-se a área das células (quantidade de células) na direção do fluxo (Mendes & Cirilo, 2001). Essa ferramenta encontra-se através dos comandos: “*ArcToolBox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Flow Accumulation*”.

#### 4.5.1.4 Stream to Feature (Canal Matricial para Vetorial)

Nesta etapa, uma rede de drenagem na forma raster (matricial) é convertida para forma vetorial e a seqüência de comandos a ser seguida é: “*ArcToolBox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Stream to Feature*”.

#### **4.5.1.5 Watershed (Determinação das Áreas de Contribuição das Erosões)**

Neste trabalho, a operação *Watershed*, para delimitação automática da área de contribuição para um determinado ponto, foi feito para pontos de cabeceiras das erosões, tanto nas erosões nas condições atuais (pontos definidos em campo) e também para as condições de início das erosões (pontos definidos através de fotografias aéreas antigas). Nesta operação, através do mapa de direção de fluxo, são geradas áreas de drenagem para um ponto escolhido. O comando a ser seguido para se realizar esta operação no SIG é: “*ArcToolBox – Spatial Analyst Tools – Hydrology – Watershed*”.

#### **4.5.2 Processamento Manual**

O processamento dito como manual para a geração do Índice *S versus A* é devido ao fato de as áreas de contribuição das cabeceiras das erosões terem sido feitas a mão, através de estereoscopia de fotografias aéreas. Após se obter a área de contribuição, as fotografias aéreas foram digitalizadas e depois foi adicionada ao projeto criado no SIG, para se fazer o cálculo da declividade média desta determinada área, assim como o valor desta área, para se obter os dados necessários para a geração do Índice de erosão manualmente.

#### **4.5.3 Relação entre Declividade (S) versus Área de Contribuição (A)**

Já na etapa final deste trabalho, foi realizada uma relação entre a área de contribuição dos pontos iniciais da cabeceira das erosões (tanto nos dias atuais, quanto no seu provável início – através de fotografias aéreas) e a declividade média em que se encontra esta área de contribuição.

Para se fazer esta relação, conforme proposto por diversos autores (Patton & Schum, 1975; Schumm *et al.*, 1980; Montgomery & Dietrich, 1988; Vandekerckhove *et al.*, 2000; Vanwalleghem *et al.*, 2005; Menéndez-Duarte *et al.*, 2007; entre outros) os dados de declividade média das áreas de contribuição de cada ponto de cabeceira, que estavam em % foram transformados para a unidade  $m.m^{-1}$ , apenas dividindo o valor da declividade média em % por 100 como na Equação 4.1.

$$S(m.m^{-1}) = S(\%) \div 100 \quad (4.1)$$

Os dados da área de contribuição de cada erosão obtida através do SIG em metro quadrado ( $m^2$ ) foi transformado em hectare (*ha*), como pode ser visto na Equação 4.2.

$$A(ha) = A(m^2) \times 0,0001 \quad (4.2)$$

Essas conversões se justificam devido ao fato de nos artigos que apresentam essas relações entre Declividade *versus* Área, aparecem deste modo. Então, neste trabalho também foi realizado desta maneira, para facilitar a comparação dos dados, ficando melhor a visualização das possíveis correlações.

Feita estas conversões, todos os pontos das erosões foram plotados, sendo separados em canais rasos e profundos. Canais rasos foram considerados os que apresentam profundidades menores que 1 metro e canais profundos os que apresentam profundidade maior que 1 metro. Com isso, foram plotados pontos de Declividade *versus* Área.

Depois de todos os pontos plotados, foram selecionados os limiares inferiores para os canais rasos e para os canais profundos, o que significa que abaixo deste limite, não foi observado nenhum processo erosivo. As coordenadas cartesianas (de área e declividade) destes pontos limítrofes foram lançados no programa *LabFit* (que será explicitado no próximo item) para que fosse ajustada

uma linha de tendência destes pontos. O melhor ajuste foi através de uma função de potência do tipo:  $Y = aX^{-b}$ .

#### 4.5.4 LabFit

*LabFit* é um programa de tratamento de dados experimentais, para ajuste de curvas, desenvolvido por pesquisadores da UFCG (Universidade Federal de Campina Grande – PB).

Para se fazer um ajuste de curva neste programa, basta copiar do arquivo *Excel* as colunas que deseja que estejam em X e em Y e colar no programa *LabFit*, através do comando: “Arquivo – Novo – Colar”. Depois salvar o arquivo de saída na extensão *txt*. Para escolher a função há dois caminhos, ou pedir ao programa para ajustar à melhor função automaticamente, ou, como é o caso deste presente trabalho, ir em “Ajuste de Curvas – Ajuste: Funções da Biblioteca” e selecionar a função desejada (que neste caso foi a função N.10: Potência) e clicar em “OK”.

O programa irá mostrar uma tela com as condições iniciais para o ajuste, aconselha-se a manter o *default* do programa e dar “OK”. Após o processo, irá aparecer uma tabela de resultados (Figura 4.12), com todos os parâmetros obtidos para os pontos de entrada de dados, inclusive com o  $R^2$  do ajuste. Clicar em “OK” e depois em “OK” novamente, então aparecerá uma janela onde se pode colocar a legenda de cada eixo e fazer os ajustes finais do gráfico.



**Figura 4.12** – Janela de resultados para o ajuste de curvas do programa *LabFit*.

#### 4.6 VALIDAÇÃO DO ÍNDICE (S x A)

Para a validação do índice, que foi feito na Bacia do Ribeirão do Meio, foi realizado todo o procedimento de obtenção do MDT, carta de declividade, direção de fluxo e todos os demais mapas e ferramentas do SIG utilizados na área deste presente estudo. O mesmo procedimento foi adotado para não deixar dúvida na hora de se fazer a comparação.

Os pontos de cabeceira das erosões foram definidos através da imagem de satélite de toda a Bacia do Ribeirão do Meio. A imagem utilizada foi a do satélite *WorldView*, com imagem pancromática e resolução de 0,50m.

A Bacia do Ribeirão do Meio apresenta três litologias diferentes que são referentes à Formação Pirambóia, Botucatu e Serra Geral. Os pontos de cabeceiras escolhidos para a validação dos índices foram todos em local onde apresenta apenas a Formação Pirambóia e que o uso das terras se assemelha ao

da área deste presente estudo. Foram obtidos 5 pontos para canais profundos ( $>1\text{m}$ ) e 5 pontos para canais rasos ( $<1\text{m}$ ).



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 5.1 DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS

#### 5.1.1 Mapa de Documentação

O Mapa de Documentação é um mapa auxiliar para registrar as várias informações reunidas no desenvolvimento deste estudo, tais como os pontos de cabeceira das erosões, local de instalação da base do GPS de Precisão, do Pluviógrafo, curvas de nível, entre outros dados, como pode ser observado na Figura 5.1. Os mapas utilizados neste trabalho foram em parte aproveitados de Gomes (2002), porém, foi realizado um ajuste nos mesmos, pelo fato da área de estudo ser menor (em relação à área trabalhada por Gomes (2002)) e utilizando os pontos de campo para refazer o georreferenciamento dos mapas topográficos digitalizados, obtendo maior precisão cartográfica. Os mapas topográficos (escala 1:10.000) que serviram de base para a topografia foram citados no Capítulo 4 (subitem **4.1.2.1 – Mapas Topográficos**). Optou-se por fazer um ajuste da base topográfica, por ser este mapa de documentação um dos documentos de maior importância para o desenvolvimento deste trabalho, pois a partir dele serão gerados os demais documentos cartográficos, como por exemplo, o MDT, o Mapa de Direção de Fluxo e a Carta de Declividade. Foi, então, digitalizada uma área maior que a área de estudo, para facilitar os

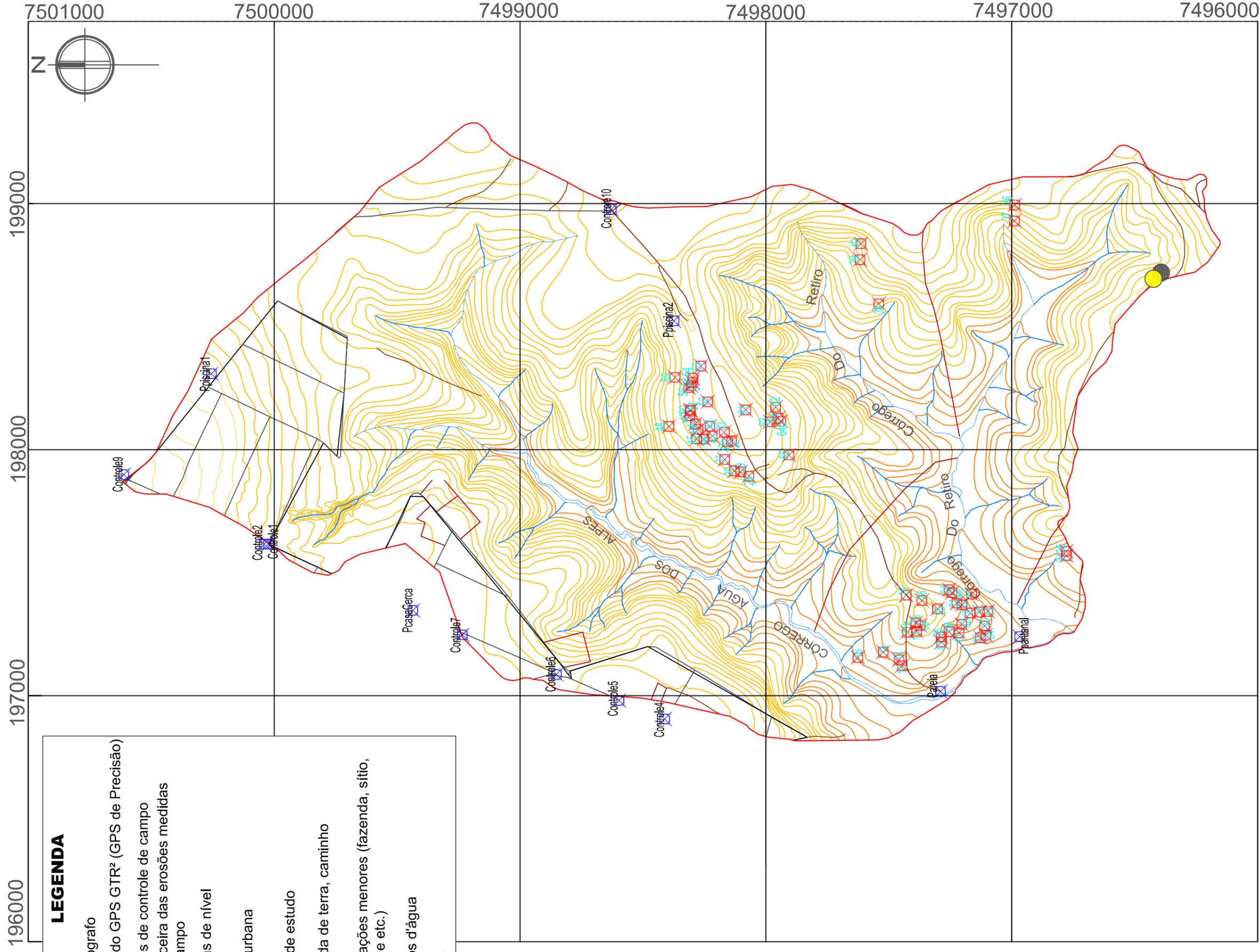
procedimentos de geração dos demais mapas e cartas supracitados e também eliminar o efeito de borda, acabando assim com possíveis erros dentro da área de estudo, dando então uma maior precisão cartográfica aos mapas neste estudo.

As Tabelas 5.2 e 5.3 sumarizam os dados coletados neste trabalho e que estão devidamente representados no Mapa de Documentação da Figura 5.1 e também no Mapa de Feições Erosivas da Figura 5.6. Os dados planimétricos e altimétricos, bem como as precisões alcançadas através do GPS de precisão para os Pontos de Controle de Campo que estão representados no Mapa de Documentação estão na Tabela 5.2, no subitem **5.2 – Ortocorreção de Fotografias Aéreas**, deste Capítulo.

### **5.1.2 MDT (Modelo Digital de Terreno)**

O MDT é uma representação matemática do terreno onde sua elevação é descrita através da expressão:  $Z = f(X,Y)$ . A forma como foi obtido o MDT para este trabalho está descrito no Capítulo 4 (no Item **4.3.1.1 – MDT**). Como descrito no Capítulo 4, a partir do MDT, foi realizado um filtro no mesmo e após um teste, para que fosse verificada sua qualidade, sendo o tamanho do pixel utilizado de 2x2m (4m<sup>2</sup>). O tamanho de pixel utilizado foi dado, pelo fato da área de estudo ser considerada razoavelmente pequena, pois para um mapa na escala de 1:10.000, o erro admissível é de 0,5mm, sendo assim, apresentando o tamanho de pixel de 5x5m, no máximo.

A Figura 5.2 apresenta o MDT da área de estudo, em escala de cinza, com as intensidades de tons de cinza variando entre 0 e 255 (nível de cinza), onde o 0 representa a cor preta e as cotas mais baixas do terreno, enquanto que o 255 representa a cor branca e as cotas mais elevadas do terreno.



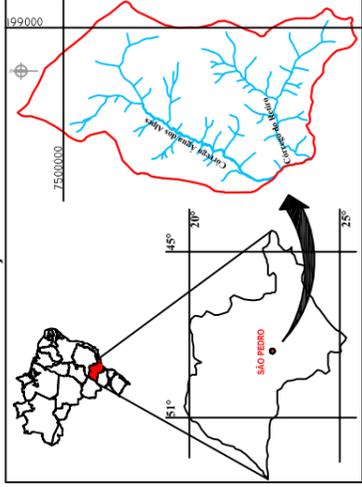
**LEGENDA**

- Pluviógrafo
- Base do GPS GTR<sup>2</sup> (GPS de Precisão)
- Pontos de controle de campo
- Cabeceira das erosões medidas em campo
- Curvas de nível
- Área urbana
- Área de estudo
- Estrada de terra, caminho
- Ocupações menores (fazenda, sítio, usina e etc.)
- Cursos d'água
- Ponte

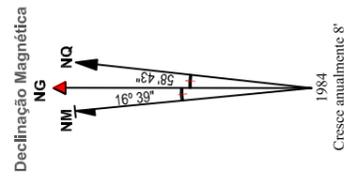
**Articulação da Folha**

São Pedro II SF-23-Y-AA-V-1-NO-C 068/084	São Pedro III SF-23-Y-AA-V-1-NO-D 068/085
Ribeirão do Meio SF-23-Y-AA-V-1-NO-E 068/084	Águas de São Pedro I SF-23-Y-AA-V-1-NO-F 068/085

**Localização da Área**

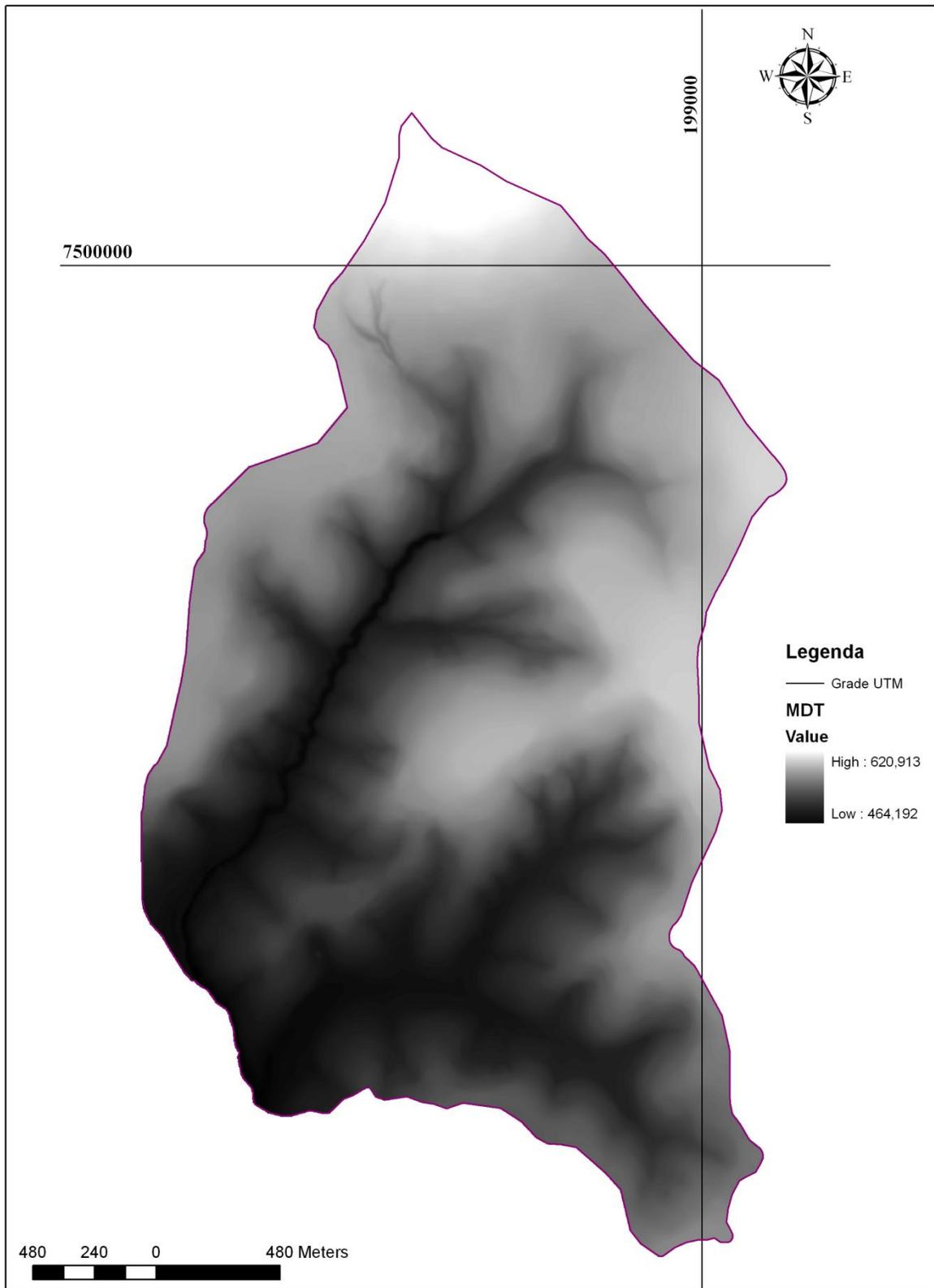


Projeção UTM (Universal Transverse Mercator)  
Datum Horizontal: Córrego Alegre  
Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba/SC  
Meridiano Central: 45° Fuso: 23 Sul



**Figura 5.1 - Mapa de Documentação**

Fonte: IGC (1979), Mapa Topográfico em escala 1:10.000 do Estado de São Paulo.



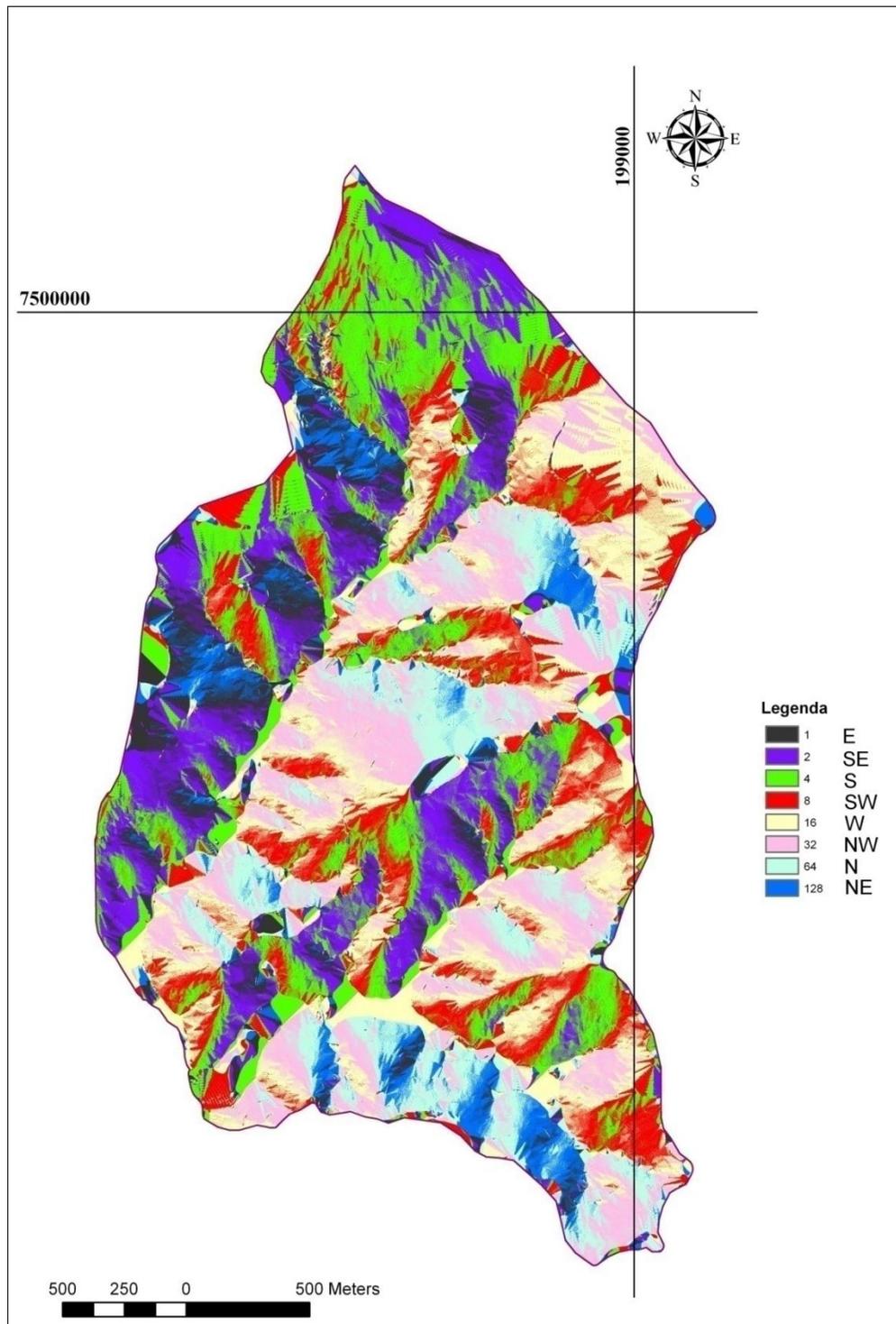
**Figura 5.2** – Modelo Digital de Terreno, representado em escala de cinza.

### 5.1.3 Mapa de Direção de Fluxo/Vertente

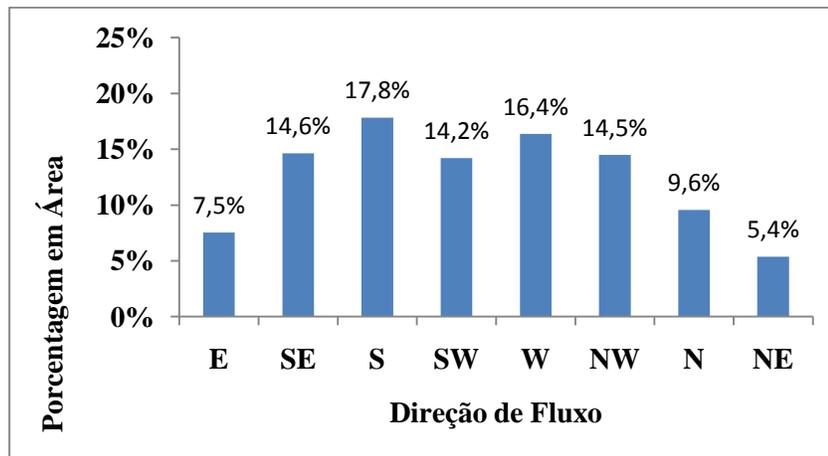
O Mapa de Direção de Fluxo ou Direção de Escoamento é, simplifiadamente, um mapa onde estão indicados, através de cores, as direções preferenciais de fluxo da água em determinado local do terreno, baseado no MDT e na declividade de cada *pixel* da imagem.

Na Figura 5.3 é mostrado o Mapa de Direção de Fluxo da área de estudo, indicando, através de cores, as direções de escoamento principais da área. Na legenda, cada cor é indicada por um valor e também é indicada a direção, como por exemplo, o número 8 indica a direção sudoeste (SW) e apresenta, no mapa, a cor vermelha.

Na Figura 5.4 pode ser observada a distribuição das direções de escoamento (em %), onde pode-se notar que a direção de fluxo que mais ocorre na área é com sentido ao sul (S), com 46,6% do total da área, seguido das direções de fluxo com sentido ao norte (N), com 29,5% e para as direções oeste (W) e leste (E), respectivamente 16,4% e 7,5% do total da área.



**Figura 5.3** – Mapa de Direção de Fluxo.



**Figura 5.4** – Porcentagem relativa em área em função das direções de fluxo.

#### 5.1.4 Carta de Declividade

A declividade é a relação entre a diferença de altura entre dois pontos e a distância horizontal entre os mesmos. Uma carta de declividade, no entanto, é a forma cartográfica de se representar a inclinação de um determinado terreno, podendo ser expressa em graus, ou seja, o grau de inclinação do terreno em relação ao plano horizontal; ou também expressa em porcentagem, onde é obtido pela tangente do ângulo de inclinação e depois multiplicado por 100.

Neste trabalho, foram definidas 8 classes de declividades, como realizado por Gomes (2002) que fez o estudo para a Bacia do Ribeirão do Meio, a mesma onde a área está inserida. Na Tabela 5.1 são apresentadas as características das classes de declividade utilizadas na obtenção da carta e as recomendações de uso e restrições, proposto pelo IG em 1993 (Gomes, 2002). Na Figura 5.5 pode ser observada a Carta de Declividade da área de estudo.

**Tabela 5.1** – Definição das classes de declividade conforme as recomendações do uso e restrições e/ou problemas esperados. Fonte: Gomes (2002).

Classes de Declividade		Recomendações do uso e restrições e/ou problemas esperados (IG)
Classes (%)	Características	
0 - 2	Terrenos planos ou quase planos, onde o escoamento superficial é muito lento ou lento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Favorável à implantação de aeroportos internacionais e às atividades agrícolas intensivas e ao uso de máquinas agrícolas;</li> <li>- Áreas impróprias às instalações de saneamento e canalização subterrâneas de água.</li> </ul>
2 - 5	Terrenos com declividades suaves nos quais o escoamento superficial é lento ou médio e os problemas de erosão requerem práticas simples de conservação	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Favorável ao uso agrícola mecanizado e à implantação de aeroportos locais, rodovias e ferrovias principais;</li> <li>- Áreas sujeitas à inundação.</li> </ul>
5 - 10	Terrenos inclinados, geralmente com relevo ondulado, nos quais o escoamento superficial é médio e rápido, porém com poucos problemas de erosão superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Favorável ao uso de máquinas agrícola;</li> <li>- Exige práticas simples de conservação, exceto no caso de utilização agrícola intensiva, onde medidas mais complexas devem ser adotadas;</li> <li>- Limite Máximo para implantação de saneamento, ferrovias e indústrias.</li> </ul>
10 - 15	Terrenos inclinados, ou colinosos, onde o escoamento superficial é rápido. Apresentam problemas de erosão superficial, exceto quando ocorrem solos permeáveis e pouco arenosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Recomendadas para cultura perene, pastagens ou reflorestamento. Propício para o uso de máquinas agrícola, ainda que com dificuldade;</li> <li>- Limite de vias principais e loteamento perpendicular às curvas de nível.</li> </ul>
15 - 20	Terrenos fortemente inclinados onde o escoamento superficial é muito rápido, com problemas de erosão superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Propício para a implantação de sistema viário local e de lotes paralelos às curvas de nível;</li> <li>- Limite Máximo para a implantação de projeto de engenharia simples e pouco complexos.</li> </ul>
20 - 25	Terrenos fortemente inclinados com escoamento superficial muito rápido, com problema de erosão superficial	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Classe limite para a implantação de residências individuais e estradas e também para estruturas de engenharia.</li> </ul>
25 - 50	Terrenos fortemente inclinados a muito íngremes, com escoamento superficial muito rápido e com desenvolvimento de solo raso a muito raso. Susceptível a processos erosivos e sujeito a movimentos de massa e queda de blocos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Até 30% é permitida por lei a ocupação de encostas sem projetos especiais;</li> <li>- De 30 – 47% é o limite para operação de veículos tracionados; aceitável como áreas de recreação ou qualquer tipo de ocupação;</li> <li>- Limite Máximo como corte raso de madeira, sem projeto de exploração sustentada.</li> </ul>
> 50	Terrenos muito íngremes ou escarpados, com desenvolvimento de solos muito rasos a sua total ausência com exposição de rocha. É extremamente susceptível a erosão	

### 5.1.5 Mapa de Feições Erosivas

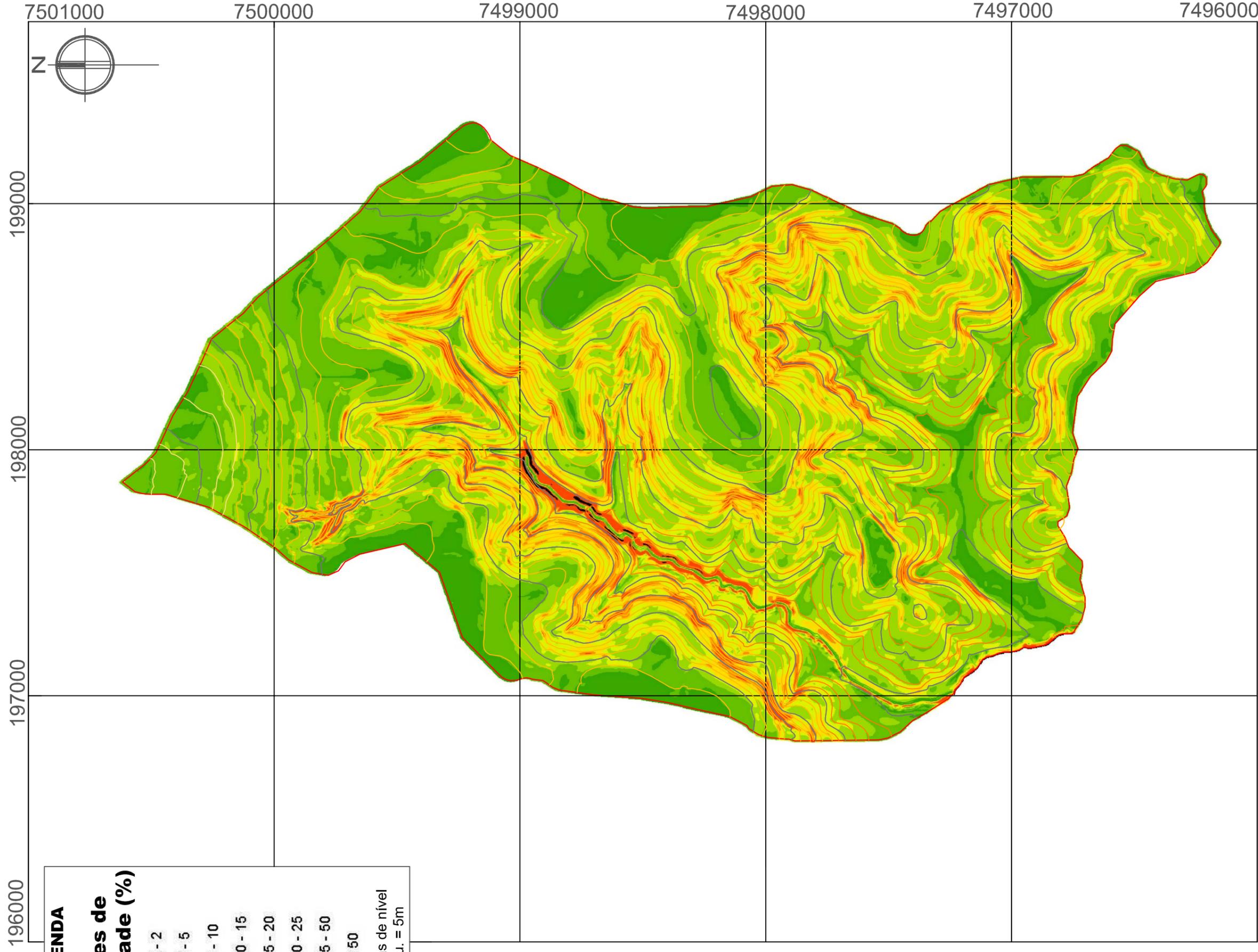
No Mapa de Feições Erosivas são observadas as erosões encontradas em campo e também as delimitadas por fotografias aéreas, como indicado no mapa da Figura 5.6. Neste mapa, pode-se perceber que as erosões se concentram, principalmente, em duas regiões dentro da área de estudo, sendo em uma região bem ao centro da área e em outra região à sudoeste desta área central.

No subitem **5.3 – Inventário das Feições Erosivas**, estas erosões serão melhor retratadas na Tabela 5.3, e os números encontrados neste mapa (Figura 5.6) são de fotografias de algumas destas feições erosivas que também estarão melhor representadas no subitem supracitado.

## 5.2 ORTOCORREÇÃO DE FOTOGRAFIAS AÉREAS

O processo de ortorretificação ou ortocorreção das fotografias aéreas se justifica, pois este processo corrige as distorções ocorridas no relevo, fazendo com que a fotografia aérea passe a apresentar uma projeção ortogonal. No Capítulo 4 (subitem **4.3 Ortorretificação**) deste trabalho é descrita a forma como são obtidas as fotografias aéreas ortorretificadas.

A seguir, podem ser observados os principais dados utilizados para se fazer a ortorretificação nas fotografias aéreas. As informações que se seguem, foram obtidas através do certificado de calibração da câmara utilizada no vôo, no momento de aquisição das fotografias. Esse certificado deve ser pedido junto à empresa na qual se compram as fotografias aéreas (que neste trabalho foi a Base S/A) e são fornecidos gratuitamente.

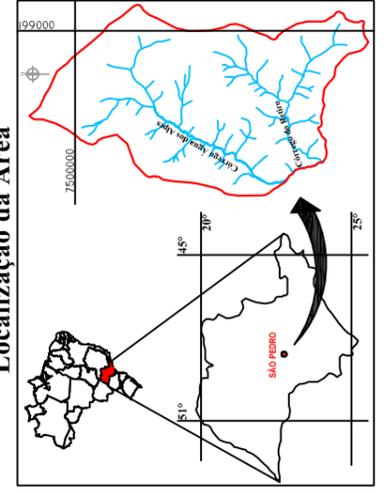


**LEGENDA**

**Classes de Declividade (%)**

- 0 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 15
- 15 - 20
- 20 - 25
- 25 - 50
- > 50

Curvas de nível  
Equ. = 5m



**Articulação da Folha**

São Pedro II SF-23-Y-A-IV-1-N0-C 068/084	São Pedro III SF-23-Y-A-IV-1-N0-D 068/085
Ribeirão do Meio SF-23-Y-A-IV-1-N0-E 069/084	Águas de São Pedro I SF-23-Y-A-IV-1-N0-F 069/085

Declinação Magnética

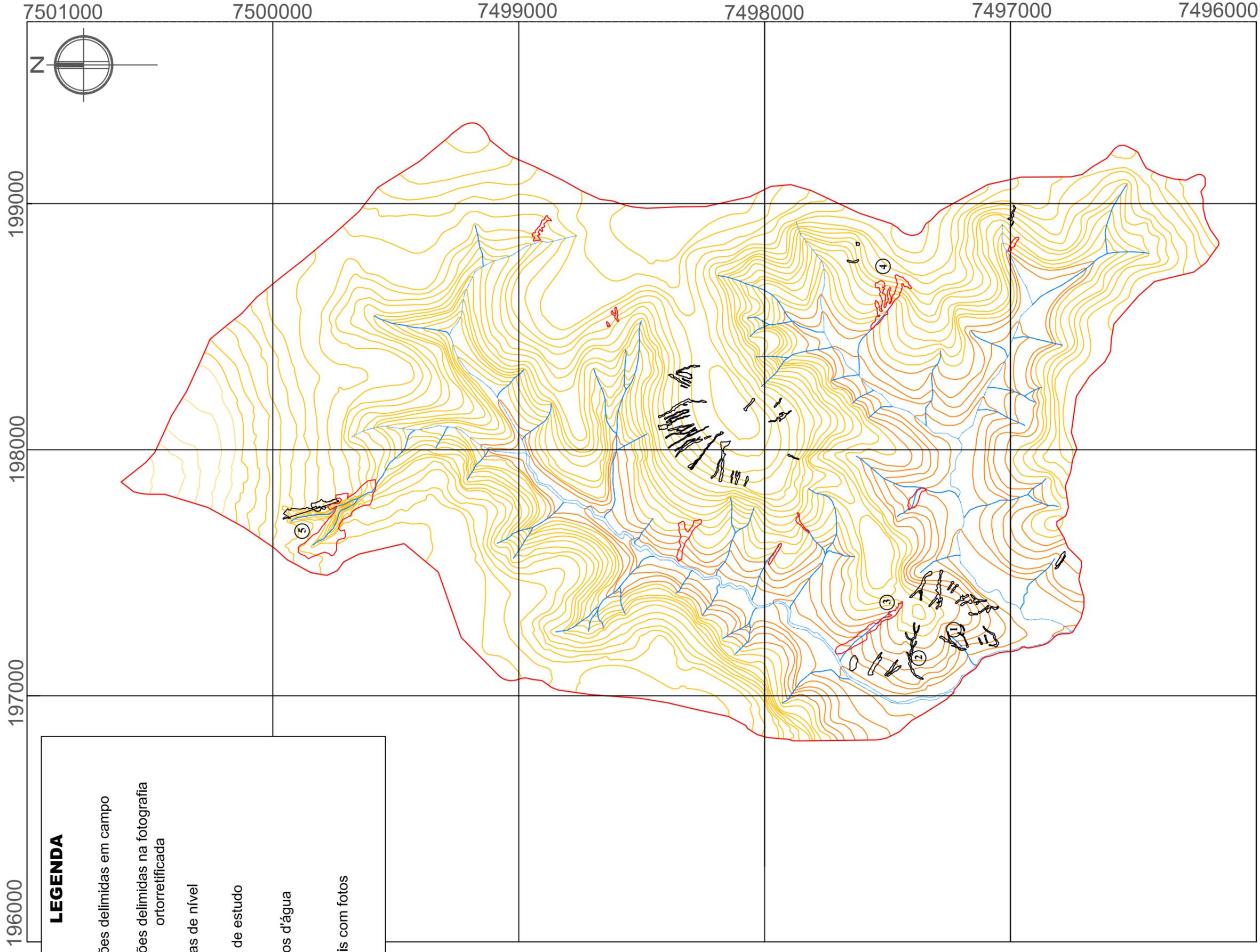
1984  
Cresce anualmente 8'

**Escala 1:15.000**

Projeção UTM (Universal Transverse Mercator)  
Datum Horizontal: Córrego Alegre  
Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba/SC  
Meridiano Central: 45° Fuso: 23 Sul

**Figura 5.5 - Carta de Declividade**

Fonte: IGC (1979). Mapa Topográfico em escala 1:10.000 do Estado de São Paulo.



**LEGENDA**

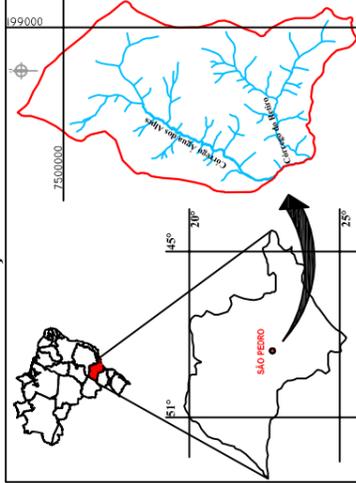
-  Erosões delimitadas em campo
-  Erosões delimitadas na fotografia ortorretificada
-  Curvas de nível
-  Área de estudo
-  Cursos d'água
-  Locais com fotos

**Articulação da Folha**

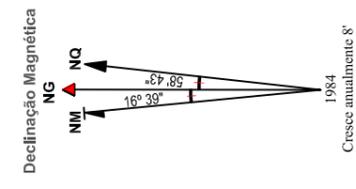
São Pedro II SF-23-Y-A-IV-1-NO-C 068/084	São Pedro III SF-23-Y-A-IV-1-NO-D 068/085
Ribeirão do Meio SF-23-Y-A-IV-1-NO-E 069/084	Águas de São Pedro I SF-23-Y-A-IV-1-NO-F 069/085

Fonte: IGC (1979). Mapa Topográfico em escala 1:10.000 do Estado de São Paulo.

**Localização da Área**



Projeção UTM (Universal Transverse Mercator)  
Datum Horizontal: Córrego Alegre  
Datum Vertical: Marégrafo de Imbituba/SC  
Meridiano Central: 45° Fuso: 23 Sul



**Figura 5.6 - Mapa de Feições Erosivas**

- **FOTOGRAFIA AÉREA DE 1995**

**Coordenadas das Marcas Fiduciais 1995**

	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1</b>	<b>-106.002</b>	<b>106.004</b>
<b>2</b>	<b>-106.001</b>	<b>-106.004</b>
<b>3</b>	<b>106.003</b>	<b>-106.006</b>
<b>4</b>	<b>106.004</b>	<b>106.006</b>

Distância Focal Calibrada = 153.52mm

Afastamento do Ponto Principal de Autocolimação

$$x = -0.007\text{mm}$$

$$y = 0.002\text{mm}$$

- **FOTOGRAFIA AÉREA DE 2000**

**Coordenadas das Marcas Fiduciais 2000**

	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1</b>	<b>113.015</b>	<b>-0.007</b>
<b>2</b>	<b>-112.993</b>	<b>-0.010</b>
<b>3</b>	<b>0.011</b>	<b>112.996</b>
<b>4</b>	<b>0.009</b>	<b>-113.015</b>
<b>5</b>	<b>113.011</b>	<b>113.009</b>
<b>6</b>	<b>-112.989</b>	<b>-113.013</b>
<b>7</b>	<b>-112.992</b>	<b>112.988</b>
<b>8</b>	<b>113.020</b>	<b>-112.998</b>

Distância Focal Calibrada = 152.755mm

Afastamento do Ponto Principal de Autocolimação

$$x = 0.005\text{mm}$$

$$y = -0.001\text{mm}$$

- **FOTOGRAFIA AÉREA DE 2005**

**Coordenadas das Marcas Fiduciais 2005  
(Corrigida)**

	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>1.</b>	<b>113.019</b>	<b>0.051</b>
<b>2.</b>	<b>-112.996</b>	<b>-0.055</b>
<b>3.</b>	<b>0.072</b>	<b>112.995</b>
<b>4.</b>	<b>-0.043</b>	<b>-112.995</b>
<b>5.</b>	<b>113.054</b>	<b>113.057</b>
<b>6.</b>	<b>-113.041</b>	<b>-113.049</b>
<b>7.</b>	<b>-112.947</b>	<b>112.942</b>
<b>8.</b>	<b>112.964</b>	<b>-112.939</b>

Distância Focal Calibrada = 152.749mm

Afastamento do Ponto Principal de Autocolimação

$$x = -0.075\text{mm}$$

$$y = 0.069\text{mm}$$

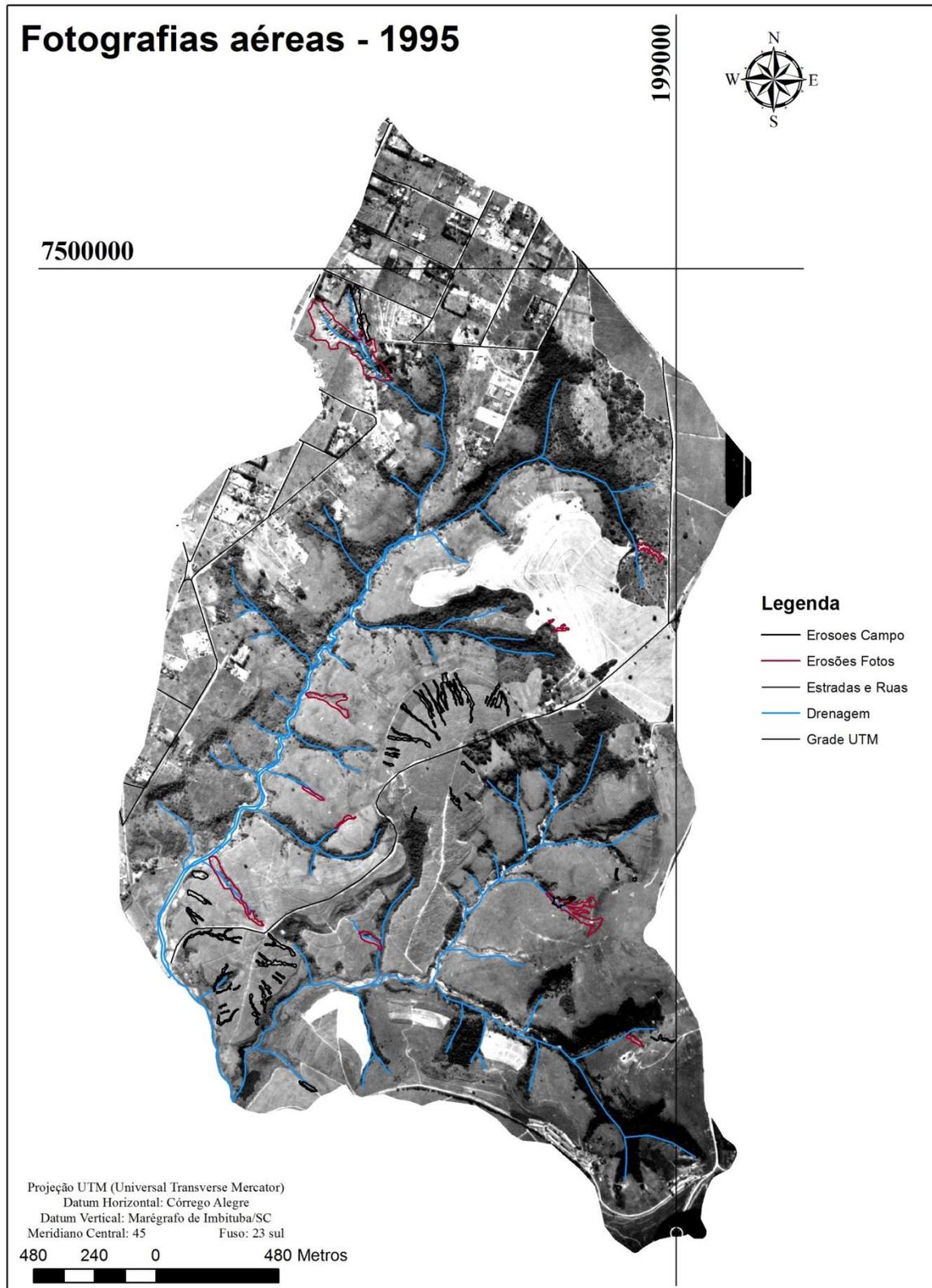
Além dos dados do certificado de calibração utilizados para se obter uma imagem ortorretificada são necessários, também, os Pontos de Controle de Campo (PCC). Os PCC's foram abordados no Capítulo 4 (subitem **4.2.1.4 Pontos de Controle de Campo**) e na Tabela 5.2 pode-se observar as coordenadas planimétricas e altimétricas de todos os pontos de controle utilizados neste estudo, sendo que os mesmos estão devidamente representados no mapa de documentação (Figura 5.1).

Nas Figuras 5.7, 5.8 e 5.9 observa-se as fotografias aéreas já ortorretificadas dos anos de 1995, 2000 e 2005, respectivamente. Nas imagens ortorretificadas é possível notar a delimitação das ruas e estradas vicinais, as drenagens (ambas digitalizadas através do mapa topográfico) e também as erosões que foram delimitadas através do GPS de precisão em campo, bem como erosões delimitadas nas imagens já ortorretificadas.

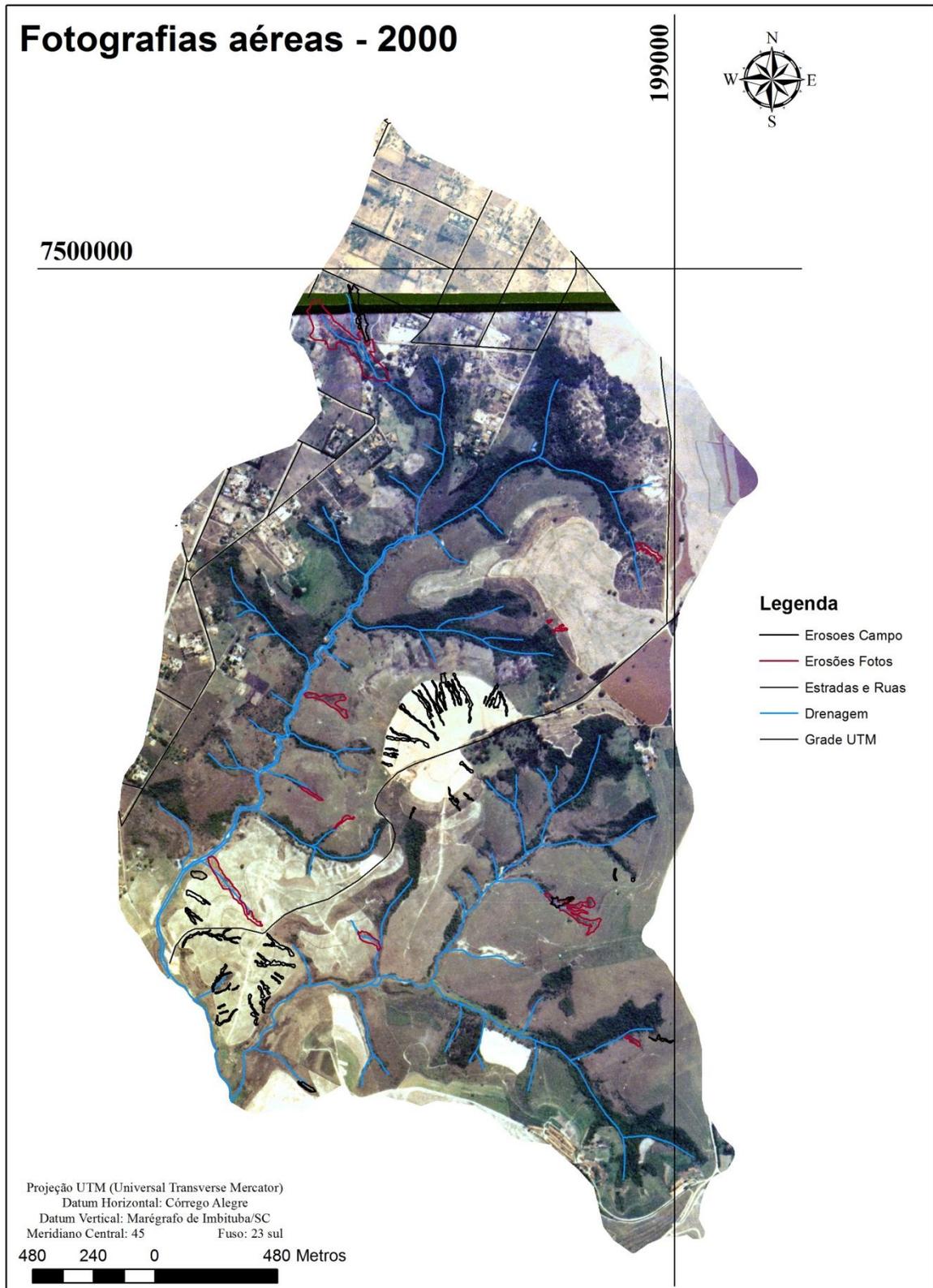
**Tabela 5.2** – Pontos de Controle de Campo com as coordenadas planimétricas (com suas precisões em metros) e altimétricas de cada ponto.

<b>Pontos de Controle de Campo (PCC)</b>			
<b>Pontos</b>	<b>Coordenadas (Datum Córrego Alegre)</b>		
	<b>X – Precisão (m)</b>	<b>Y – Precisão (m)</b>	<b>Z – Precisão (m)</b>
Controle1	197615,732 +/- 0,006	7500023,309 +/- 0,007	581,320 +/- 0,010
Controle2	197616.105 +/- 0.010	7500039.933 +/- 0.011	582.594 +/- 0.018
Controle3	196901.256 +/- 0.007	7498404.782 +/- 0.007	553.349 +/- 0.017
Controle4	196905.231 +/- 0.007	7498411.585 +/- 0.007	553.485 +/- 0.018
Controle5	196980.655 +/- 0.005	7498597.581 +/- 0.003	552.760 +/- 0.016
Controle6	197086.217 +/- 0.005	7498852.017 +/- 0.003	549.501 +/- 0.015
Controle7	197246.709 +/- 0.004	7499234.798 +/- 0.002	557.092 +/- 0.012
Controle8	197335.871 +/- 0.005	7499434.330 +/- 0.003	556.781 +/- 0.016
Controle9	197898.474 +/- 0.004	7500611.428 +/- 0.002	615.734 +/- 0.013
Controle10	198976.383 +/- 0.005	7498628.753 +/- 0.004	575.228 +/- 0.011
Piscina1	198308.160 +/- 0.003	7500255.116 +/- 0.003	595.639 +/- 0.011
Piscina2	198523.205 +/- 0.004	7498373.524 +/- 0.005	560.700 +/- 0.012
PcasaCerca	197346.639 +/- 0.004	7499435.700 +/- 0.004	557.423 +/- 0.008
P1	197871.761 +/- 0.002	7497938.006 +/- 0.004	551.496 +/- 0.008
Pareia	197017.336 +/- 0.004	7497289.870 +/- 0.003	467.017 +/- 0.008
Ppantanal	197240.383 +/- 0.003	7496968.757 +/- 0.004	468.807 +/- 0.008

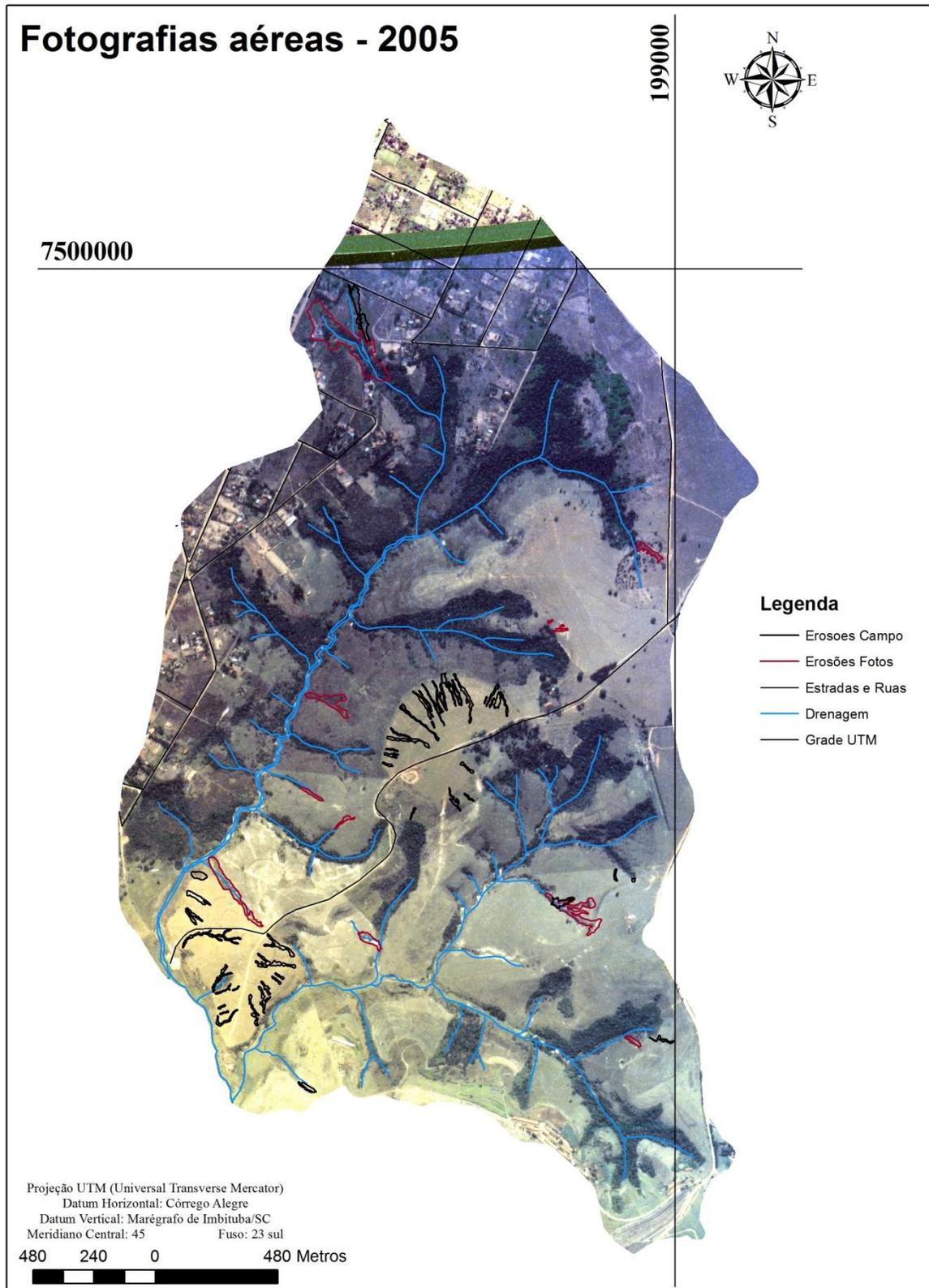
Este procedimento de ortocorreção das fotografias aéreas se deu pelo fato de poder realizar medidas nas imagens obtidas, ou seja, poder delimitar erosões, delimitar bacias de contribuição das erosões com precisão, fazendo com que os dados obtidos através destas medições sejam bem próximos do valor real.



**Figura 5.7** – Fotografia aérea do ano de 1995 ortorretificada.



**Figura 5.8** – Fotografia aérea do ano de 2000 ortorretificada.



**Figura 5.9** – Fotografia aérea do ano de 2005 ortorretificada.

### 5.3 INVENTÁRIO DAS FEIÇÕES EROSIVAS

Buscando complementar o Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6), serão apresentadas aqui as informações obtidas das erosões encontradas em campo e em fotografias aéreas. A Tabela 5.3 apresenta diversas informações sobre as erosões encontradas na área, como sua classificação quanto a feição, área, profundidade (se mais profundo ou menos profundo que 1 metro), sua posição (se é erosão de drenagem ou de encosta) e também as coordenadas (planimétricas e altimétricas) da cabeceira das mesmas.

**Tabela 5.3** – Dados e características das erosões mostradas no Mapa de Feições Erosivas. (Continua).

Cabeceira das Erosões	Coordenadas (Datum Córrego Alegre)			Tipo de Feição	Prof. (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Local da Feição	* Material Inconsolidado
	X	Y	Z					
01	197256	7497214	487	Ravina	>1	276	Encosta	9 S.A. e 11 M.I.R.
02	197290	7497203	491	Ravina	>1	108	Encosta	11 M.I.R.
03	197235	7497127	480	Ravina	>1	143	Encosta	11 M.I.R.
04	197246	7497106	480	Sulco	<1	144	Encosta	11 M.I.R.
05	197283	7497111	484	Ravina	>1	739	Encosta	9 S.A. e 11 M.I.R.
06	197239	7497287	496	Ravina	>1	351	Encosta	9 S.A. e 11 M.I.R.
08	197260	7497127	480	Boçoroca	>1	686	Encosta	11 M.I.R.
09	197284	7497372	505	Sulco	<1	119	Encosta	11 M.I.R.
10	197296	7497390	506	Sulco	<1	450	Encosta	11 M.I.R.
11	197258	7497425	499	Ravina	>1	1.521	Encosta	11 M.I.R.
12	197122	7497446	486	Sulco	<1	502	Encosta	11 M.I.R.
13	197145	7497459	487	Sulco	<1	540	Encosta	11 M.I.R.
14	197177	7497523	489	Ravina	>1	1.433	Encosta	11 M.I.R.
15	197409	7497429	507	Ravina	>1	7.634	Drenagem	11 M.I.R.
16	197155	7497626	478	Boçoroca	>1	1.411	Encosta	9 S.A.
17	197343	7497097	482	Sulco	<1	421	Encosta	11 M.I.R.
18	197340	7497131	487	Sulco	<1	272	Encosta	11 M.I.R.
19	197336	7497169	491	Sulco	<1	249	Encosta	11 M.I.R.
20	197369	7497202	495	Sulco	<1	373	Encosta	11 M.I.R.
21	197376	7497223	497	Sulco	<1	489	Encosta	11 M.I.R.
22	197412	7497163	486	Sulco	<1	588	Encosta	11 M.I.R.
23	197418	7497243	493	Sulco	<1	247	Encosta	11 M.I.R.

Continuação: Tabela 5.3.

Cabeceira das Erosões	Coordenadas (Datum Córrego Alegre)			Tipo de Feição	Prof. (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Local da Feição	* Material Inconsolidado
	X	Y	Z					
24	197431	7497255	492	Sulco	<1	229	Encosta	11 M.I.R.
25	197353	7497302	503	Ravina	>1	1.991	Encosta	11 M.I.R.
26	197387	7497365	507	Ravina	>1	1.614	Encosta	11 M.I.R.
28	197892	7498069	558	Sulco	<1	253	Encosta	6 M.I.T.
29	197909	7498103	559	Sulco	<1	503	Encosta	6 M.I.T.
30	197914	7498128	559	Sulco	<1	205	Encosta	6 M.I.T.
31	197960	7498167	563	Ravina	>1	765	Encosta	6 M.I.T.
32	198036	7498140	570	Ravina	>1	1.551	Encosta	6 M.I.T.
33	198071	7498169	571	Ravina	>1	1.175	Encosta	6 M.I.T.
34	197570	7496777	486	Ravina	>1	268	Drenagem	11 M.I.R.
35	197586	7496778	487	Ravina	>1	727	Drenagem	11 M.I.R.
36	198995	7496988	536	Ravina	>1	459	Drenagem	10 M.I.T.
37	198929	7496989	524	Ravina	>1	-	Drenagem	10 M.I.T.
38	198593	7497541	509	Boçoroca	>1	8.922	Drenagem	7 M.I.T.
39	198772	7497617	534	Sulco	<1	311	Encosta	7 M.I.T.
40	198837	7497613	540	Sulco	<1	134	Encosta	7 M.I.T.
42	198095	7498228	569	Ravina	>1	672	Encosta	6 M.I.T.
43	198056	7498218	568	Sulco	<1	123	Encosta	6 M.I.T.
44	198043	7498252	565	Ravina	>1	1.047	Encosta	6 M.I.T.
45	198043	7498282	563	Sulco	<1	349	Encosta	6 M.I.T.
46	198083	7498276	565	Ravina	>1	627	Encosta	6 M.I.T.
47	198104	7498287	565	Ravina	>1	801	Encosta	6 M.I.T.
48	198094	7498394	552	Boçoroca	>1	562	Encosta	6 M.I.T.
49	198138	7498310	564	Sulco	<1	364	Encosta	6 M.I.T.
50	198157	7498307	564	Sulco	<1	412	Encosta	6 M.I.T.
51	198162	7498307	565	Sulco	<1	386	Encosta	6 M.I.T.
52	198194	7498237	571	Ravina	>1	1.545	Encosta	6 M.I.T.
53	198339	7498264	567	Ravina	>1	465	Encosta	6 M.I.T.
54	198290	7498297	564	Sulco	<1	894	Encosta	6 M.I.T.
56	198251	7498314	564	Sulco	<1	86	Encosta	6 M.I.T.
57	198260	7498305	564	Sulco	<1	358	Encosta	6 M.I.T.
58	198274	7498299	564	Sulco	<1	182	Encosta	6 M.I.T.
59	198294	7498370	555	Ravina	>1	168	Encosta	6 M.I.T.

Cabeceira das Erosões	Coordenadas (Datum Córrego Alegre)			Tipo de Feição	Prof. (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Local da Feição	* Material Inconsolidado
	X	Y	Z					
60	197718	7499957	577	Boçoroca	>1	34797	Drenagem	6 M.I.T e 8 M.I.T
61	198161	7480082	572	Ravina	>1	471	Encosta	6 M.I.T.
62	198172	7497961	562	Ravina	>1	230	Encosta	6 M.I.T.
63	198113	7497984	569	Sulco	>1	104	Encosta	6 M.I.T.
64	198127	7497950	565	Ravina	>1	629	Encosta	6 M.I.T.
65	197978	7497906	559	Ravina	>1	211	Encosta	6 M.I.T.

\* Material Inconsolidado: 6 M.I.T. Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia (5 < e < 10m); 7 M.I.T. Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia (2 < e < 5m); 8 M.I.T. Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia (e > 10m); 9 S.A. Sedimentos Aluvionares; 10 M.I.T. Material Inconsolidado Transportado da Formação Pirambóia (e < 2m); e 11 M.I.R. Material Inconsolidado Residual da Formação Pirambóia.

**Continuação: Tabela 5.3.**

Além das informações contidas na Tabela 5.3, no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pode ser encontrado, também, locais com indicação de fotografias e que são apresentadas na Figura 5.10.



**Figura 5.10** – (a e b) feição erosiva do tipo ravina sendo a erosão 5 da Tabela 5.3; (c e d) feição erosiva do tipo ravina, porém, evoluindo para uma boçoroca. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 1.

Na Figura 5.10 (a e b) observa-se uma ravina que apresenta uma área de 736m<sup>2</sup> e um comprimento de 108m, sendo caracterizada como uma erosão de encosta. Já na Figura 5.10 (c e d) é observada uma feição do tipo ravina, porém evoluindo para uma boçoroca, apresentando locais com profundidades superiores a 4m.

A feição erosiva mostrada nas Figuras 5.11 e 5.12 é uma das feições de maior extensão na área de estudo, com aproximadamente 240m de comprimento e é alimentada por 5 braços distintos que se unem numa feição principal. Esta erosão apresenta locais com mais de 3 metros de profundidade e pelo menos 3

destes braços de contribuição atual vem direto da estrada que leva até um ponto de extração de areia.



**Figura 5.11** – Feição erosiva de encosta do tipo ravina que atualmente sofre muita influência do escoamento que vem de uma estrada de chão usada para se chegar a um areal próximo ao rio e que é um dos pontos de controle neste estudo (ponto Pareia da Tabela 5.2). Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 2.



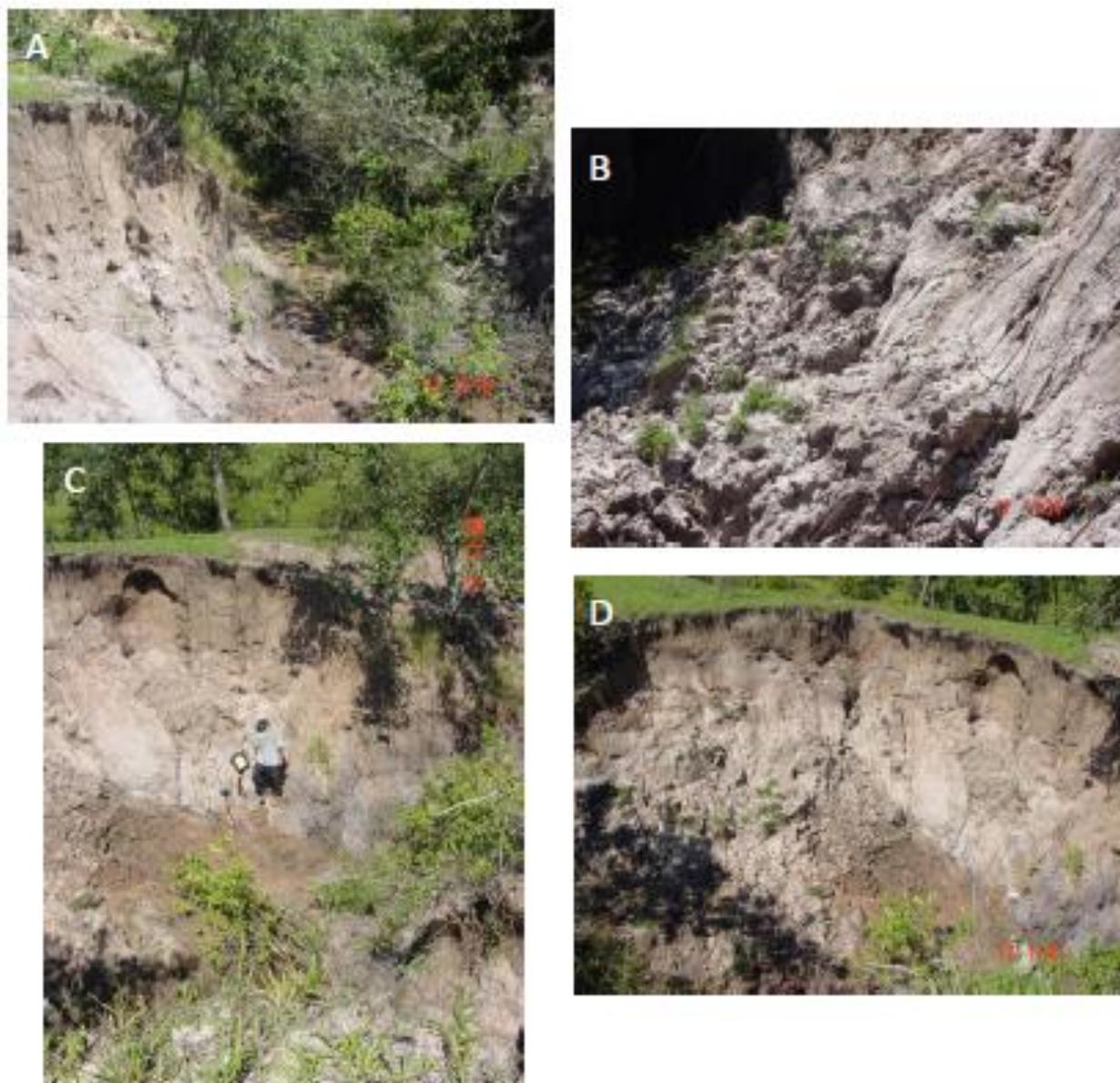
**Figura 5.12** – Mesma feição erosiva mostrada na Figura 5.11. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 2.

A feição erosiva da Figura 5.13 é a erosão de número 15 (Tabela 5.3) e é uma erosão de drenagem. Ela apresenta locais com profundidades superiores a 4 metros e ainda apresenta bancos ativos. Seu comprimento aproximado é de 350m e apresenta uma área de 7.634m<sup>2</sup>. Esta erosão foi classificada como ravina, embora esteja evoluindo para uma boçoroca, pois como dito, apresenta locais em evolução ainda hoje.



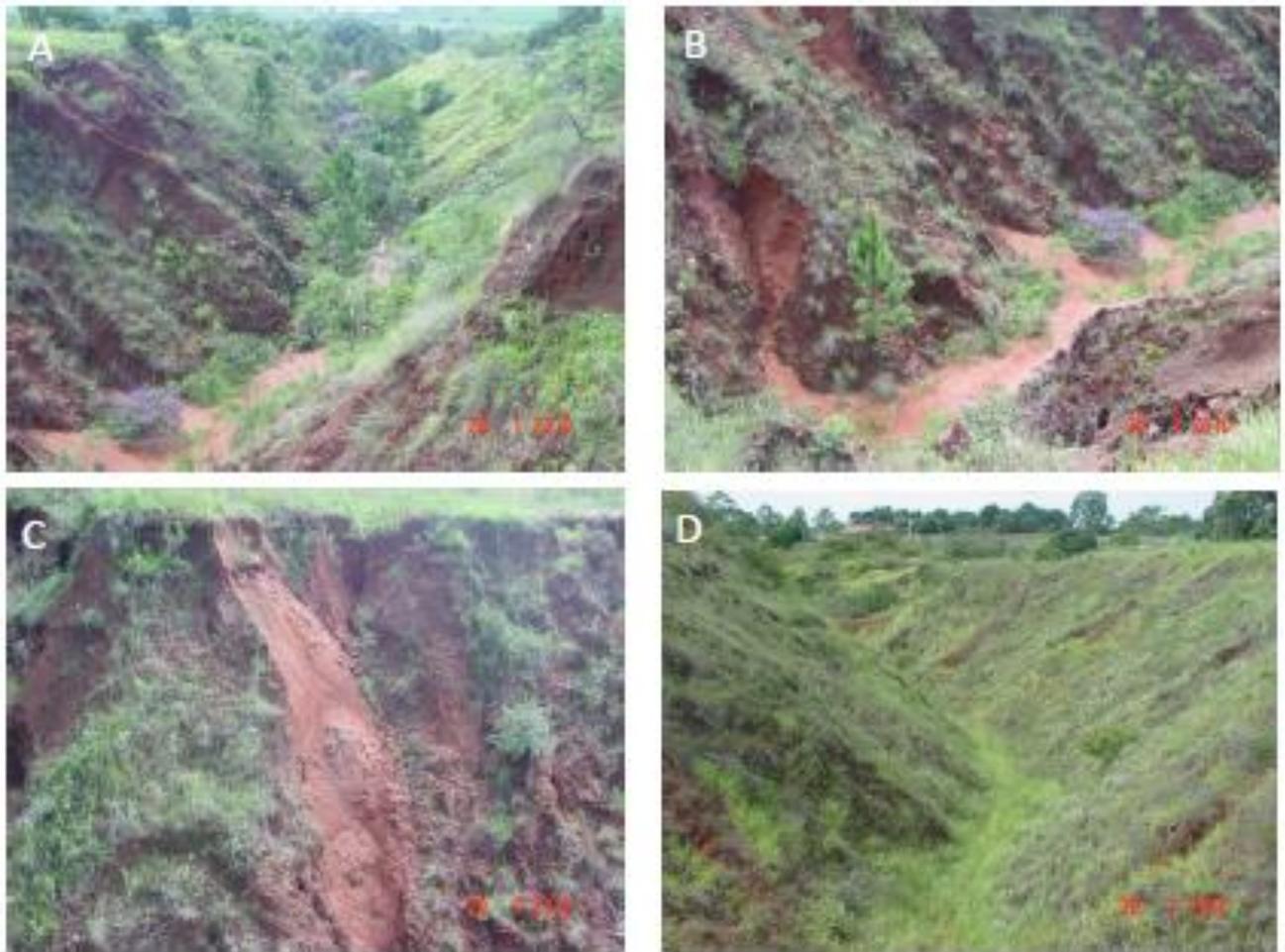
**Figura 5.13** – Feição erosiva de drenagem do tipo ravina, porém evoluindo para uma boçoroca. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 3.

A Figura 5.14 mostra uma erosão de drenagem do tipo boçoroca. Esta erosão está em plena atividade como pode ser visto, principalmente, na Figura 5.14b. Esta erosão foi delimitada por fotografia aérea, pois só foi permitido o acesso em um de seus quatro braços principais e mesmo assim, havia a dificuldade de caminhar no seu entorno. Ela apresenta uma área aproximada de  $9.000\text{m}^2$  (delimitada em fotografia aérea ortorretificada) e houve o caminhamento de uma área de  $1.780\text{m}^2$ .



**Figura 5.14** – (a, b, c e d) feição erosiva de drenagem do tipo boçoroca. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 4.

A boçoroca que pode ser vista na Figura 5.15 é a principal feição encontrada na área de estudo e sua evolução vem ocorrendo desde a década de 1960. Hoje, embora esteja coberta de vegetação secundária com árvores de médio porte, ela ainda apresenta alguns locais na sua encosta que estão ativos, como mostra a Figura 5.15c. Esta boçoroca apresenta uma área de 34.797m<sup>2</sup> e profundidades de até 30 metros.



**Figura 5.15** – (a, b, c e d) principal boçoroca na área de estudo. Indicado no Mapa de Feições Erosivas (Figura 5.6) pelo número 5.

#### **5.4 GERAÇÃO DO ÍNDICE A PARTIR DA RELAÇÃO $S \times A$**

Neste trabalho foram obtidos 3 diferentes índices, sendo um com base na área de contribuição referente às cabeceiras das erosões verificadas em campo, ou seja, nas condições atuais; um referente às cabeceiras marcadas em fotografias aéreas em seu estado mais inicial, ou seja, no início da feição erosiva; e o último através de fotografias aéreas ortorretificadas. O índice obtido através das erosões com as cabeceiras em seu estágio atual (medidas em campo) foi refutado, pois embora se tenham obtido as equações para os canais profundos e rasos, a maioria das áreas de contribuição utilizadas eram muito pequenas (em

média da ordem de 50 a 100m<sup>2</sup>). Outro fato importante para a tomada desta decisão foi o das erosões estarem em estágios bastante evoluídos em relação ao seu início, por exemplo, as cabeceiras tal como estão hoje são muito próximas das estradas, fazendo com que a área de contribuição para seu início não seja o real. Portanto, só serão considerados dois índices, nomeados como Índice I e Índice II, sendo o primeiro referente às cabeceiras das erosões definidas em fotografias aéreas e o segundo referente às fotografias aéreas ortorretificadas. Para a obtenção do Índice I e também do Índice II, foi realizado todo o procedimento descrito no Capítulo 4 (subitem **4.5.1 – Processamento Automático**).

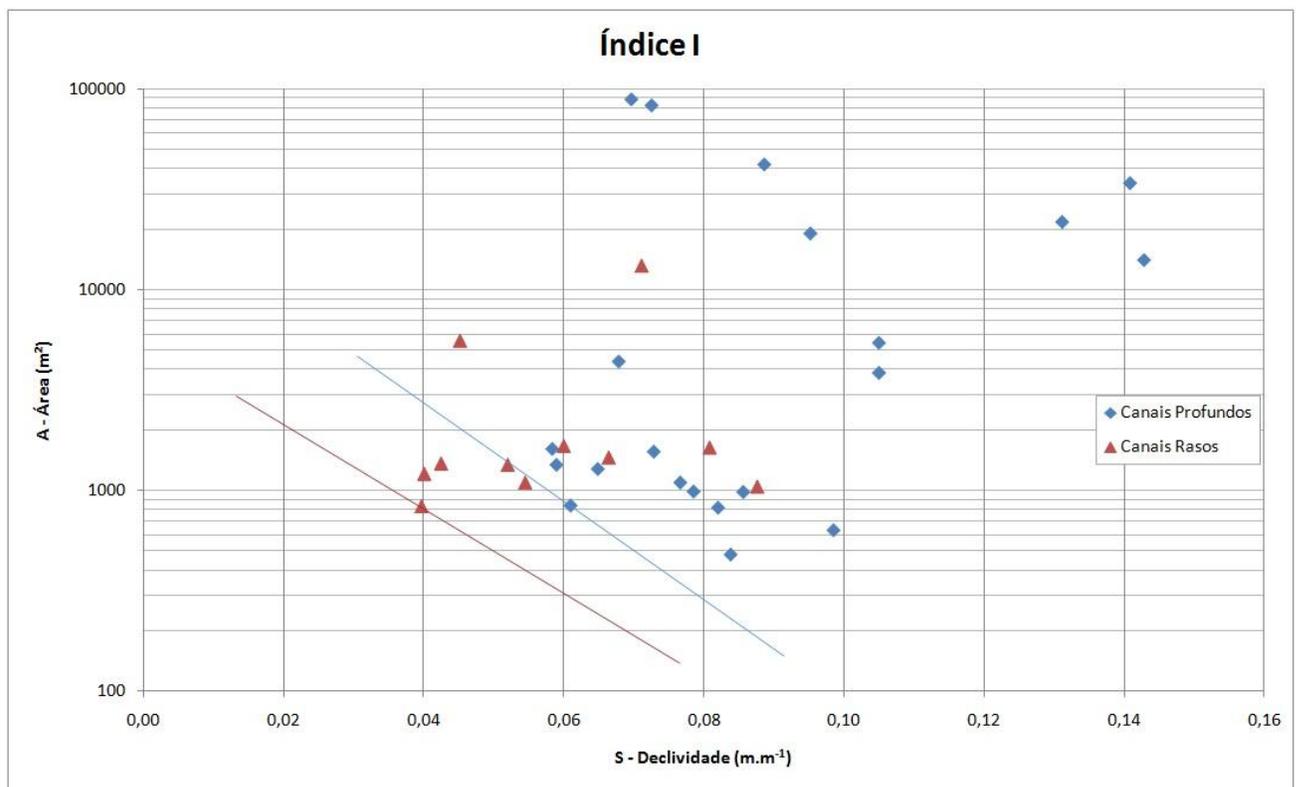
Para a obtenção dos índices I e II, todas as medidas de área foram transformadas de metro quadrado (m<sup>2</sup>) para hectare (ha), como já explicado no Capítulo 4 (subitem **4.5.3 – Relação entre Declividade (S) versus Área de Contribuição (A)**). A justificativa de ter realizado esta conversão se dá, devido ao fato de todos os trabalhos internacionais consultados fazerem desta maneira, com o fim de se fazer uma comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e os demais consultados. No entanto, nos gráficos das Figuras 5.16 e 5.18, que representam os limiares da relação SxA, os valores da área (A) plotados estão em metro quadrado (m<sup>2</sup>) para melhor visualização, mas os cálculos foram todos obtidos através da área em hectare (ha). Assim, para se obter valores de declividade (S), através da equação obtida nos Índices I e II, é necessário que entre com valores de área (A) em hectare (ha).

#### **5.4.1 Índice I**

O Índice I foi calculado para a cabeceira das erosões na condição mais próxima do início do processo erosivo, ou seja, foram analisadas fotografias aéreas antigas da área, para se definir a cabeceira das erosões. O procedimento adotado para o cálculo, assim como a delimitação da área de contribuição e declividade média foram os mesmos comentados anteriormente. A Figura 5.16

mostra o gráfico com o limiar para o desencadeamento do processo erosivo para erosões mais profundas que 1 metro e menos profundas que 1 metro. Para este índice foram utilizadas 33 erosões, sendo 21 canais profundos e 12 canais rasos.

As retas que definem o limiar topográfico para o desencadeamento das erosões lineares foram obtidas de forma empírica. Percebe-se, no gráfico da Figura 5.16, que os pontos que representam relações de declividade ( $S$ ) *versus* área ( $A$ ), que conduzem a geração dos processos erosivos, localizam-se na parte superior direita do gráfico. Portanto, as retas traçadas representam um limite que define as condições que levam ao aparecimento das erosões. Foram traçadas duas retas, uma referente aos limiares para canais profundos e outra para canais rasos (Figura 5.16).

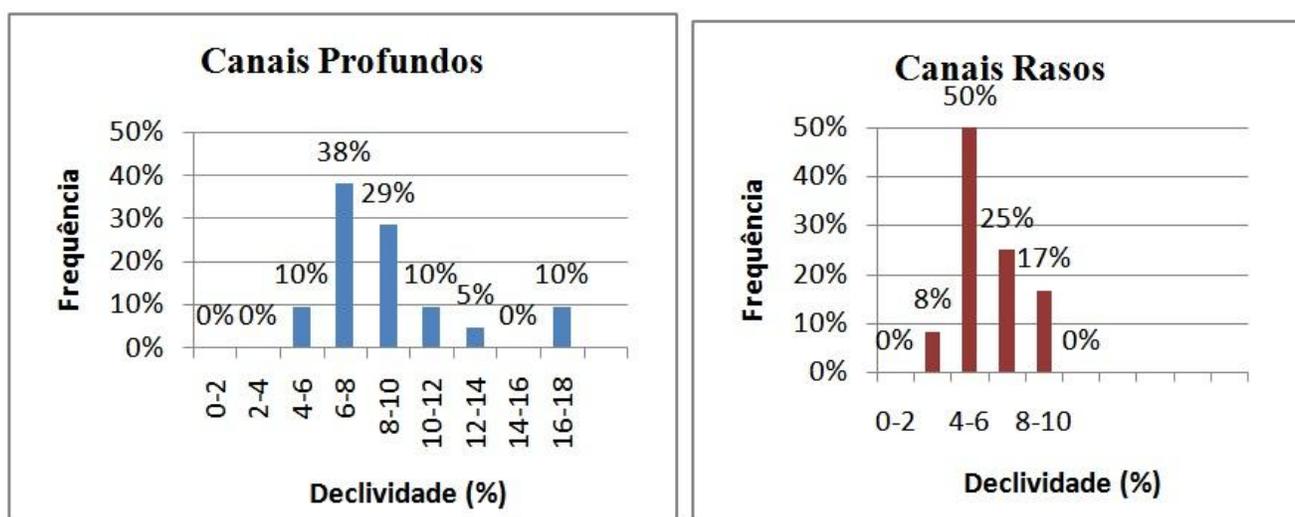


**Figura 5.16** – Índice I da relação  $S \times A$  para cabeceiras de erosões definidas em fotografias aéreas.

Com isso, para o Índice I, os Índices encontrados foram  $S = 0,0219A^{-0,376}$ , para os canais profundos, e  $S = 0,0128A^{-0,443}$ , para os canais rasos.

Observa-se, através do gráfico da Figura 5.16, que os limiares topográficos para o desencadeamento das erosões estão quase paralelos. Como exemplo, temos que para uma área de contribuição igual a  $1.000\text{m}^2$  ( $0,1\text{ha}$ ), a declividade crítica para o desencadeamento do processo erosivo, para canal raso é de  $3,55\%$  ( $0,0355\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ) e para canais profundos é de  $5,2\%$  ( $0,052\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

A Figura 5.17 mostra a frequência de canais observados em relação à declividade para o Índice I entre os canais profundos e os canais rasos.

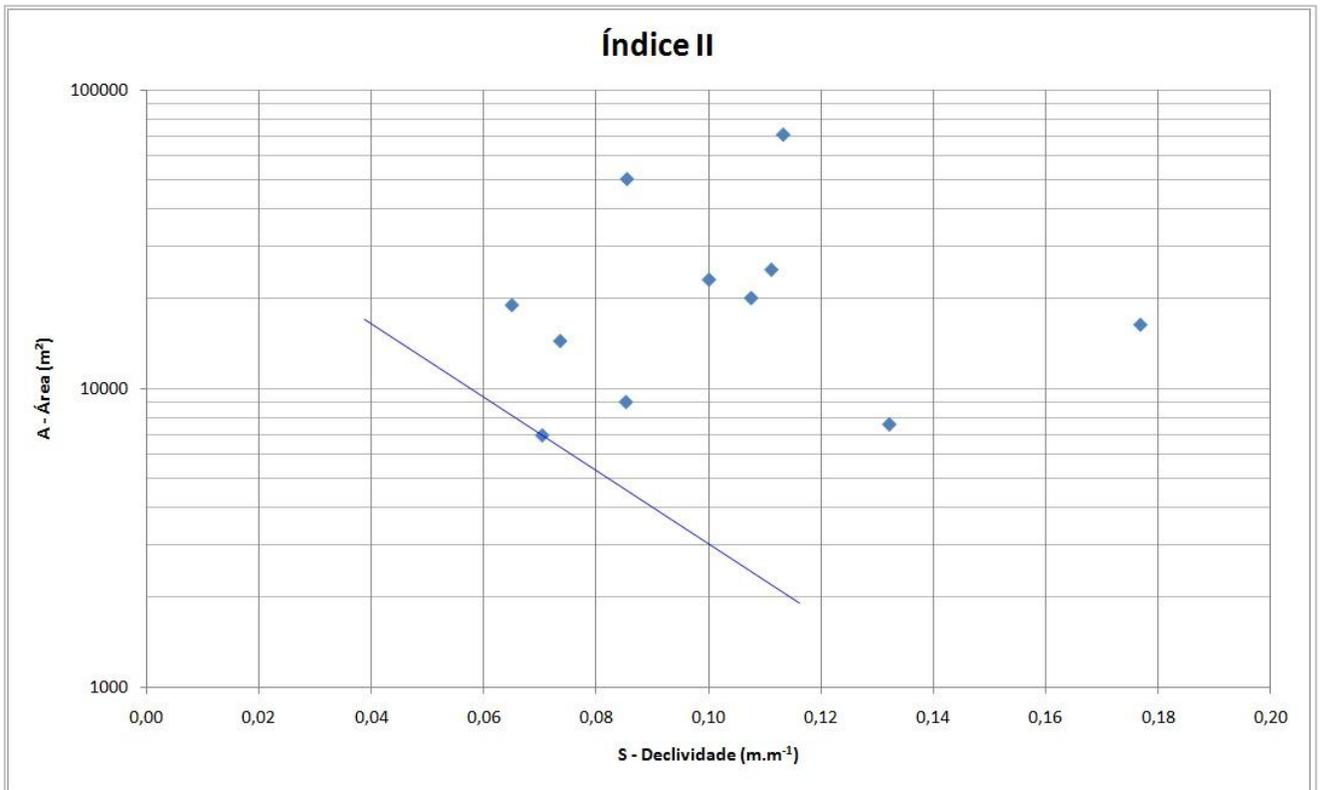


**Figura 17** – Frequência entre os canais profundos e canais rasos para o Índice I.

#### 5.4.2 Índice II

O Índice II foi calculado para feições erosivas feitas através das fotografias aéreas ortorretificadas. As feições erosivas consideradas são parte dos canais profundos, os mesmos do índice I, pois em fotografias aéreas em escala de  $1:30.000$ , fica muito difícil definir canais menores. Com isso, para este índice II, foi obtido apenas uma equação da relação  $SxA$ . Enquanto que para o índice I foram utilizados 21 canais profundos, para a obtenção do índice II foram 11 os canais utilizados.

A Figura 5.18 mostra o gráfico obtido para o Índice II e nele a reta empírica que representa o limiar topográfico para a relação de declividade (S) e área (A), obtidas através das fotografias aéreas ortorretificadas, seguindo o mesmo procedimento adotado para o Índice I.

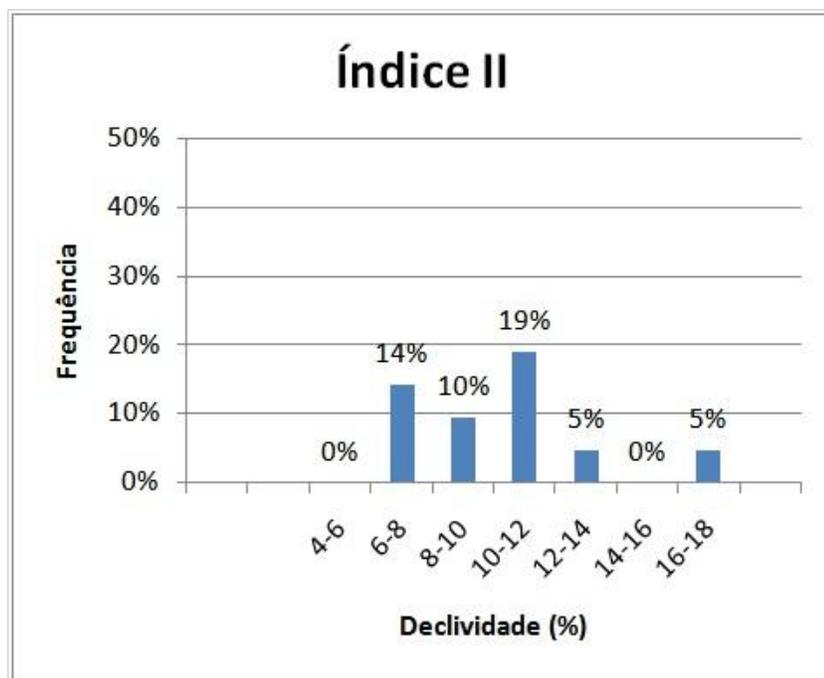


**Figura 5.18** – Índice II da relação S x A para cabeceiras de erosões definidas em fotografias aéreas.

A relação SxA, obtida para o índice II foi  $S = 0,0588A^{-0,377}$ . No gráfico da Figura 5.18 pode-se observar a reta que representa o limiar topográfico de deflagração do processo erosivo obtido através do processamento manual, feito nas fotografias aéreas ortorretificadas.

Em nível de exemplo, temos que substituindo na fórmula uma área igual a 10.000m<sup>2</sup> (1ha) obtemos como declividade crítica para o desencadeamento de uma erosão linear o valor de 5,88% (0,0588m.m<sup>-1</sup>).

A Figura 5.19 mostra a frequência de canais observados, nas fotografias aéreas ortorretificadas, em relação à declividade para o Índice II.



**Figura 5.19** – Frequência entre os canais para o Índice II.

### 5.4.3 Comparação entre os Índices I e Índice II

Dois foram os índices obtidos e que representam o limiar topográfico para o desencadeamento das erosões na área de estudo, um através da cabeceira das erosões em seu estágio mais inicial e outro através de medições feitas em fotografias aéreas ortorretificadas. Para o índice I foram obtidos dois valores, um para os canais rasos (<1m de profundidade) e outro para os canais profundos (>1m de profundidade). Para o índice II foi obtido apenas um valor, pois na escala das fotografias aéreas disponíveis da área (1:30.000 nos anos de 2000 e 2005; e 1:25.000 no ano de 1995) são possíveis de serem observadas apenas erosões de grande porte.

Na Tabela 5.4 podem ser observados os valores dos coeficientes de regressão  $a$  e  $b$  da equação do índice ( $S = aA^{-b}$ ) e outras informações relevantes

que não entram no cálculo para a obtenção do índice, mas são fatores de extrema importância e que devem ser considerados. Na Tabela 5.4 são apresentadas informações sobre as áreas onde ocorrem as erosões utilizadas para se fazer o índice, como o uso e ocupação e material inconsolidado. Essas informações foram aproveitadas de Martins (2010), que realizou um estudo na mesma área, cujo enfoque principal foi uma análise multitemporal das feições erosivas.

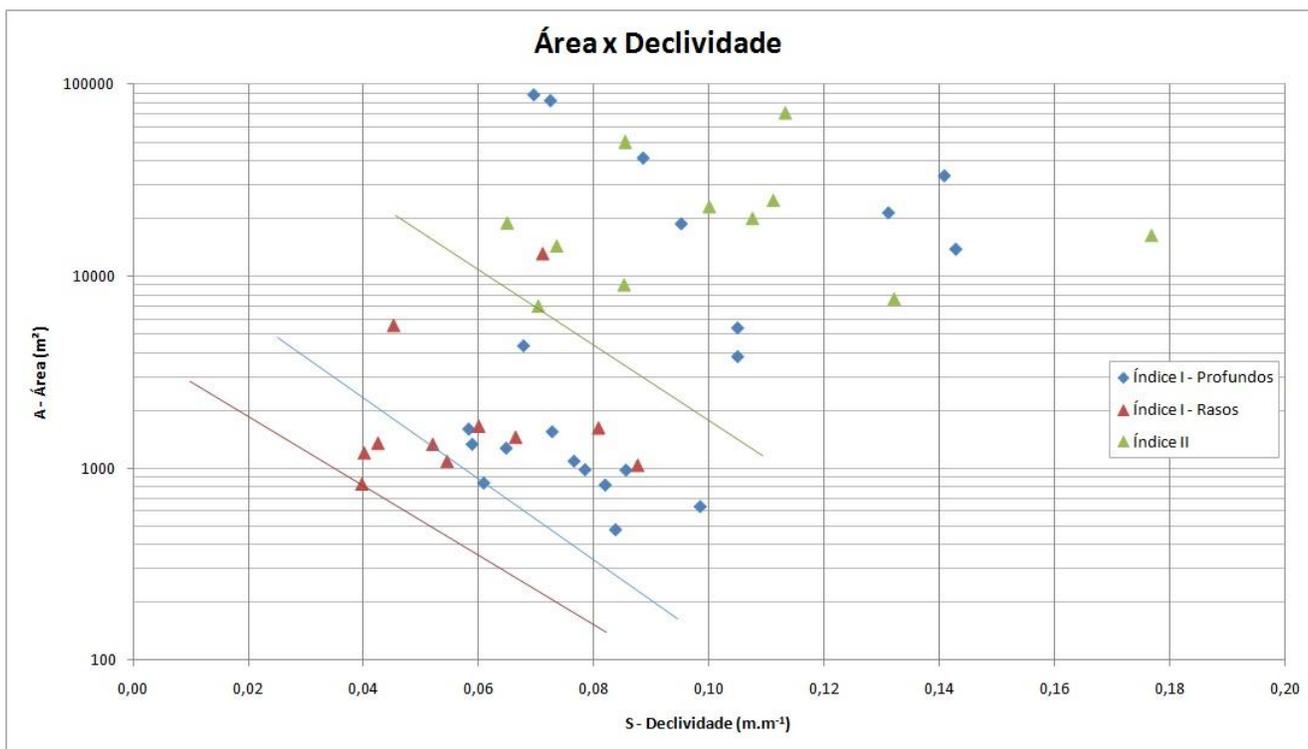
**Tabela 5.4** – Coeficientes encontrados para as equações dos índices I e II e algumas características relevantes da área deste presente estudo.

	<i>a</i>	<i>-b</i>	<i>S*</i> (%)		Geologia	Erosão x Uso e Ocupação	Erosão x Material Inconsolidado
			1ha	2ha			
<b>Índice I - Rasos</b>	0,0128	0,443	1,28	0,94	Arenito Pirambóia	Pastagem; Solo Exposto; e Área Urbana em Consolidação	Material Inconsolidado Transportado Associado à Formação Pirambóia (5<e<10m)
<b>Índice I - Profundos</b>	0,0219	0,376	2,19	1,69			
<b>Índice II</b>	0,0588	0,377	5,88	4,53		Pastagem; e Solo Exposto	

Como pode ser observado na Tabela 5.4, os índices obtidos para este trabalho, tanto de forma manual quanto de forma automática, são para situações de geologia, geomorfologia, uso e ocupação, e clima semelhantes, o que significa dizer que para se realizar um estudo como esse em outra área (com características diferentes desta em estudo) é necessário se criar um novo índice que leve em consideração as informações da nova área. Porém, toda a metodologia para a geração do índice é a mesma como a realizada neste estudo, podendo ser feita de forma automática ou até mesmo manual.

Na tabela também é apresentada a declividade crítica (*S\**), em porcentagem (%), de cada índice, para áreas de contribuição de cabeceiras iguais a 1 e 2 hectares (respectivamente 10.000m<sup>2</sup> e 20.000m<sup>2</sup>). Nota-se então, que a declividade crítica para que se desencadeie o processo erosivo tanto para 1 ou 2 hectares é bem maior para o Índice II e no Índice I essa declividade crítica é quase a mesma para os canais rasos e profundos. No gráfico da Figura 5.20 estão os limiares topográficos para o Índice I (rasos e profundos) e o Índice II.

Este resultado demonstra que para uma mesma área de contribuição, declividades maiores conduzem a processos erosivos de maiores dimensões. Portanto, as diferenças entre os índices I e II refletem o fato de que para a geração do índice II, devido a limitações da escala das fotografias aéreas, foram utilizadas somente as erosões de maior porte. Isto demonstra a importância da aplicação deste índice na definição das áreas sujeitas a processos erosivos de diferentes tamanhos.



**Figura 5.20** – Gráfico com os limiares do Índice I e II representados.

No gráfico (Figura 5.20) são apresentados os limiares dos dois índices obtidos neste trabalho e nota-se que a inclinação das retas limiares são bem parecidas nos três casos (Índice I – rasos e profundos; e Índice II).

Outra comparação que pode ser feita com os dados obtidos neste estudo pode ser encontrada na Tabela 5.5, onde se confronta as declividades críticas (%) para o desencadeamento de erosões obtidas neste estudo, para uma área de contribuição de 1ha, com dados de estudo recente realizado, por exemplo, na Espanha (Menéndez-Duarte *et al.*, 2007).

**Tabela 5.5** – Correlação entre os dados obtidos neste estudo (Brasil) com do estudo desenvolvido na Espanha.

Local		<i>S</i> (%)	Geologia	Geomorfologia	Clima	Chuva Anual (mm)
		1ha				
Brasil 2011	Índice I - Rasos	1,28	Arenito Pirambóia	Relevo Suave Ondulado	Tropical	1400
	Índice I - Profundos	2,19				
	Índice II	5,88				
Espanha 2007	Rasos	35	Arenito, Quartzito e Ardósia	Relevo Ondulado – Forte ondulado	Temperado	1500
	Profundos	46				

Podemos observar através dos dados obtidos pela Tabela 5.5 que há uma grande diferença entre a declividade crítica para o desencadeamento dos processos erosivos neste estudo, realizado no Brasil, com o estudo realizado em 2007 na Espanha. Observa-se também que embora as chuvas anuais estejam em valores bem próximos, há uma diferença em tipo de clima e também na geomorfologia, pois o estudo na Espanha foi desenvolvido em uma região montanhosa (declividade média de 27°) e o material também é diferente.

Outro fato que se deve levar em consideração é o de a região em estudo na Espanha estar em recente evolução tectônica, o que somado às queimadas e desmatamento das florestas, intensificou os processos erosivos lá encontrados.

Nota-se, contudo, que não existe um valor que expresse o limiar absoluto para o desencadeamento dos processos erosivos em determinados locais, sem antes conhecer os fatores geológicos, geomorfológicos e de uso e ocupação dos solos, principalmente, que influenciam na área que se pretende estudar. Outro fator que fortalece esta hipótese foi apresentado na Tabela 2.9 (Capítulo 2), onde se podem notar diferentes declividades críticas para o desencadeamento do processo erosivo, variando com declividades críticas entre 0,3% (Govers, 1991 - Bélgica) até 60% (Moeyersons, 2003 – Ruanda). Este último vale ressaltar que embora seja um país africano em uma zona potencialmente tropical, não é

considerado um país tropical pelo próprio autor, pois apresenta altitude média de 1000m acima do nível do mar e temperatura média anual de 20°.

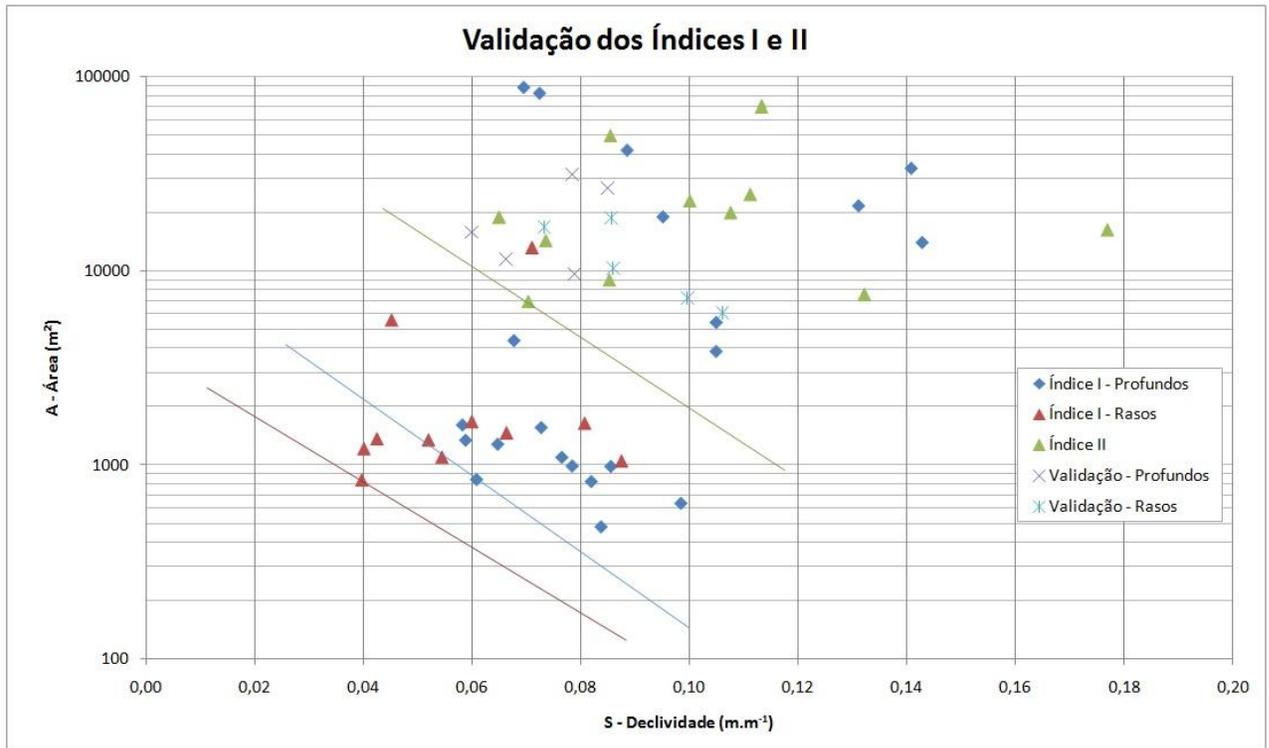
## 5.5 VALIDAÇÃO DOS ÍNDICES

Para a validação dos índices foi feito todo o procedimento para obtenção das bacias de contribuição das erosões para toda a Bacia do Ribeirão do Meio (com área aproximada de 48km<sup>2</sup>) e sob as mesmas condições (geológica, geomorfológica, climática e de uso e ocupação do solo) foram utilizadas 10 erosões, sendo 5 canais rasos e 5 canais profundos. Foram então obtidos resultados das áreas de contribuição das bacias e as declividades médias respectivas de cada uma das 10 feições erosivas selecionadas.

Com os valores de área e declividade média, foi substituído nos índices o valor de declividade média, obtendo assim o valor crítico de área de contribuição para o desencadeamento do processo erosivo. Com isso, foi feita uma revisão no tamanho da área obtida através do SIG e constatado se o tamanho obtido era igual ou maior que o valor encontrado através do índice. Se a área de contribuição para uma dada cabeceira de erosão for igual ou maior que a obtida através do índice, significa dizer que o índice é apropriado.

No gráfico da Figura 5.21, observam-se os pontos coletados na área de estudo, utilizados para se fazer o Índice I e também o Índice II, bem como os pontos utilizados para a validação destes índices, que foram retirados da Bacia do Ribeirão do Meio, estudada por Gomes (2002), através de imagem de satélite.

Observa-se na Figura 5.21 que todos os pontos com problemas de erosão localizam-se dentro da área prevista pelos índices para ocorrência de problemas de erosão.



**Figura 5.21** – Gráfico com os pontos e limiares para os Índices I e II e também os pontos plotados dos canais rasos e profundos utilizados para a validação dos índices, da Bacia Ribeirão do Meio.



## 6 CONCLUSÃO

---

Neste estudo são propostos índices que expressam o limiar topográfico para a predição de processos erosivos lineares para uma região de clima tropical. Este índice é representado pela equação  $S = aA^{-b}$  (onde  $A$  é a área de contribuição de uma erosão;  $S$  é a declividade média desta área de contribuição; e  $a$  e  $b$  são coeficientes de regressão). Por meio de erosões existentes mapeadas em campo, foram definidos os pontos de cabeceira das mesmas em sua condição inicial, através de fotografias aéreas antigas. Para a obtenção dos parâmetros utilizados nos índices propostos, foram utilizadas as ferramentas de *Hidrology* do programa *ArcGis ArcInfo*<sup>TM</sup> e também fotografias aéreas ortorretificadas (processo realizado no programa *Envi*<sup>TM</sup>). Para a utilização das ferramentas supracitadas, ao longo deste trabalho são mostrados todos os passos para a criação do MDT, mapa fundamental para a precisão dos demais mapas e para o processo de ortorretificação das fotografias aéreas.

Este estudo é importante, principalmente, para preencher uma lacuna de dados dessa natureza (limiar topográfico) em região tropical. Foram então obtidos dois índices sendo o Índice I subdividido entre canais rasos (considerando a profundidade do canal menor que 1 metro) e canais profundos (considerando a profundidade do canal maior que 1 metro); e o Índice II, obtido através das imagens ortorretificadas. Para o Índice I foram utilizadas informações de declividade ( $S$ ) e área ( $A$ ) de 33 erosões, sendo 21 canais profundos e 12 canais rasos. Para o Índice II, as feições erosivas consideradas são parte dos canais profundos do índice I, pelo fato de em

fotografias aéreas nas escalas disponíveis (escala de 1:25.000 e 1:30.000) ficar muito difícil definir canais pequenos. Com isso, para a obtenção do Índice II foram 11 os canais utilizados.

Os índices obtidos neste trabalho foram para o Índice I:  $S = 0,0219A^{-0,376}$  (canais profundos) e  $S = 0,0128A^{-0,443}$  (canais rasos); enquanto que para o Índice II o valor obtido é:  $S = 0,0588A^{-0,377}$ .

As retas traçadas, que representam o limiar topográfico para o desencadeamento das erosões lineares, foram obtidas de forma empírica e representam um limite que define as condições que levam ao aparecimento das erosões. Nos gráficos, onde essas retas limiaries foram apresentadas, percebe-se que as mesmas não são retas médias entre todos os pontos plotados. Esta reta parte do ponto mais crítico de erosão observado no gráfico e a partir dele é traçada uma reta empírica. Para o Índice I foram traçadas duas retas, uma referente aos limiaries para canais profundos e outra para canais rasos e para o Índice II foi traçada uma só reta.

Com o limiar topográfico para a predição de um evento erosivo traçado e com os índices calculados, foi necessário a validação dos mesmos, utilizando para tal uma área em que fossem observadas semelhanças na geologia, geomorfologia, clima, uso e ocupação do solo e etc.. Assim, para validar estes índices, foi realizado o mesmo procedimento de obtenção dos parâmetros de declividade média (S) e área de contribuição (A), descritos neste trabalho, porém em uma área bem maior, sendo escolhida a Bacia do Ribeirão do Meio, por ser a bacia hidrográfica na qual as duas sub-bacias utilizadas neste estudo estão englobadas. A área da região estudada nesta pesquisa é de aproximadamente 7km<sup>2</sup>, enquanto que a área da Bacia do Ribeirão do Meio apresenta em torno de 48km<sup>2</sup> de extensão e foram utilizados 10 canais de erosão (5 canais rasos e 5 canais profundos) para a validação dos índices propostos.

Foi observado neste estudo que todos os pontos com problemas de erosão da área utilizada para a validação dos índices localizam-se dentro da área prevista pelos mesmos, para ocorrência de problemas de erosão, o que significa dizer que os índices exprimem o limiar topográfico para erosões lineares nas condições encontradas na área de estudo e em áreas com características físicas semelhantes.

Foi mostrado, com este estudo, que em regiões tropicais, há uma relação entre área de contribuição (A) e declividade média (S) para o desencadeamento do processo erosivo linear. No entanto, salienta-se que neste estudo foram levadas em consideração as características físicas da área estudada (geologia, geomorfologia, clima e etc.), não sendo os índices obtidos neste estudo representativo para todas as regiões de clima tropical.

Conclui-se, também, com este estudo, que em comparação dos índices aqui obtidos com os dos estudos internacionais não há uma declividade crítica que indique o limiar topográfico para o desencadeamento do processo erosivo como um todo. Com isto, pode-se afirmar que para cada localidade devem ser levadas em consideração as condições físicas do local a ser empregado o modelo para estudo do desencadeamento do processo erosivo.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ABNT. 1984. *NBR6508/84*: Grãos de solo que passam na peneira 4,8mm – Determinação da Massa Específica.

AL-DURRAH, M. M.; BRADFORD, J. M. 1981. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. *Soil Science Society of America Journal* [S.I.], v. 45, p. 949-953.

\_\_\_\_\_. 1982. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. *Soil Science Society of America Journal* [S.I.], v. 46, p. 1086-1090.

ALMOROX, J. *et al.* 1994. *Métodos de Estimación de la Erosión Hídrica*. Madrid - España: Agrícola Española.

ALVES, L. M. 1993. *Sistemas de Informações Geográficas como Instrumentos para o Planejamento de Uso da Terra, em Bacias Hidrográficas*. Viçosa: UFV.

ARAUJO, T. P. 2008. *Novos Métodos Aplicados ao Processamento Digital de Imagens na Região de Mangaratiba – Angra dos Reis, RJ*. 95 f. (Trabalho Final de Graduação), UFRuralRJ, Seropédica.

BAILEY, R. W. 1941. Land erosion, normal and accelerated, in the Semiarid West. *Transactions-American Geophysical Union* [S.I.], v. 22, p. 240-250.

BENNETT, H. H. 1926. Some comparisons of the properties of humid tropical and humid temperate american soils with special reference to the indicated relations between chemical composition and physical properties. *Soil Science* [S.I.], v. 21, p. 249-275.

\_\_\_\_\_. 1939. *Soil Conservation*. 1. ed. New York and London: McGraw-Hill.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 1985. *Conservação do solo*. 1. ed. Piracicaba: Livroceres.

\_\_\_\_\_. 1990. *Conservação do Solo*. 2. ed. São Paulo: Ícone Editora Ltda.

\_\_\_\_\_. 1999. *Conservação do Solo*. 4. ed. São Paulo: Ícone Editora Ltda.

BIGARELLA, J. J.; MAZUCHOWSKI, J. Z. 1985. Visão Integrada da Problemática da Erosão. In: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, Maringá. ABGE / ADEA, p.332.

BLOOM, A. L. 1970. Erosão e transportes glaciais. *Superfície da Terra*. São Paulo: Edgard Blücher, Cap.7. p. 164-168.

BOCCO, G. 1991. Gully erosion: processes and models. *Progress in Physical Geography* [S.I.], v. 15, n. 4, p. 392-406.

BONELLI, S. *et al.* 2006. Observation, analysis and modelling in complex fluid media: on the modelling of piping erosion. *Compte Rendus Mecanique*. v. 334: Elsevier, p. 555–559.

BRITO, J. N.; COELHO, L. 2002. *Fotogrametria Digital*. 1. ed. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia.

BRYAN, R. B. 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma* [S.I.], v. 2, p. 5-26.

BRYAN, R. B.; GOVERS, G.; POESEN, J. 1989. The concept of soil erodibility and some problems of assessment and application. *Catena* [S.I.], v. 16, n. 4-5, p. 393-412.

BUARQUE, D. C. *et al.* 2009. Comparação de métodos para definir direções de escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* [S.I.], v. 14, n. 2, p. 91-103.

BURROUGH, P. A. 1987. *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Oxford: Clarendon Press.

CÂMARA, G. 1995. *Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos*. (Tese de Doutorado), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos.

CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. 1975. *Hillslope form and process*. Oxford: Cambridge University Press.

CLOWES, A.; COMFORT, P. 1983. *Process and landform: an outline of contemporary geomorphology*. Singapura: Oliver & Boid.

COOK, W. A. 1936. Engineering control of occupational - disease hazard. *Mechanical Engineering*. p. 105-108.

CORRÊA, U. M. P. 1996. *Estudo das águas subterrâneas das Bacias Hidrográficas dos rios Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira, no estado de São Paulo*. (Dissertação de Mestrado), EESC - USP, São Carlos.

COULON, F. K. 1973. *Mapa geotécnico das folhas de Morretes e Montenegro RS*. (Dissertação de Mestrado), UFRGS, Porto Alegre.

DAEE - DEPARTAMENTO DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA. 1990. *Controle de erosão: bases conceituais e técnicas, diretrizes para planejamento urbano e regional; orientação para o controle de boçorocas urbanas*. 2. ed. São Paulo: DAEE / IPT. 92 pg.

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)*. 191 f. (Dissertação de Mestrado), EESC - USP, São Carlos.

\_\_\_\_\_. 2008. *Proposta de índices para processos erosivos acelerados a partir de levantamento e diagnóstico geológico-geotécnico de áreas degradadas*. 447 f. (Tese de Doutorado), EESC - USP, São Carlos.

DANTAS-FERREIRA, M.; PEJON, O. J. 2004. Elaboração do mapa de materiais inconsolidados em áreas degradadas por processos erosivos: bacia do córrego do Tucum - São Pedro (SP). In: V Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, São Carlos. p.141-150.

DIETRICH, W. E. *et al.* 1992. Erosion thresholds and land surface morphology. *Geology* [S.I.], v. 20, p. 675-679.

DIETRICH, W. E.; WILSON, C. J.; RENEAU, S. L. 1986. Hollows, colluvium, and landslides in soil-mantled landscapes. In: ABRAHAM, A. D. (Ed.). *Hillslope Processes*. London: Allen and Unwin, p. 361-388.

ELLISON, W. D. 1944. Studies of Raindrop Erosion. In: LARONNE, J. B.; MOSLEY, M. P. (Ed.). *Erosion and sediment yield*: Hutchinson Ross Publishing Company.

\_\_\_\_\_. 1947a. Soil Erosion Studies - Part I. *Agricultural Engineering* [S.I.], v. 28, n. 4, p. 145 - 146.

\_\_\_\_\_. 1947b. Soil Erosion Studies - Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash. *Agricultural Engineering* [S.I.], v. 28, n. 4, p. 197-201.

\_\_\_\_\_. 1947c. Soil Erosion Studies - Part III: Some effects of soil erosion on infiltration and surface runoff. *Agricultural Engineering* [S.I.], v. 28, n. 4, p. 245-248.

\_\_\_\_\_. 1947d. Soil Erosion Studies - Part IV: Soil erosion, soil loss, and some effects of soil erosion. *Agricultural Engineering* [S.I.], v. 28, n. 4, p. 297-300.

\_\_\_\_\_. 1947e. Soil Erosion Studies - Part V: Soil transportation in the splash process. *Agricultural Engineering* [S.I.], v. 28, n. 4, p. 349-353.

EL-SWAIFY, S. A.; DANGLER, E. W. 1982. Rainfall erosion in the tropics: a state of art. In: KREBS, D. M. (Ed.). *Determinants of soil loss tolerance*. Madison: American Society of Agronomy, p. 1-25.

ENVI. 2006. Guia do Envi em Português. RSI Research System Inc.

FOLQUE, J. 1977. Erosão interna em solos coesivos. *Filtros de protecção*: Sociedade Portuguesa

de Geotecnia.

FORNASARI FILHO, N. *et al.* 1992. Alterações de processos do meio físico decorrentes de Usinas Hidrelétricas. In: Anais Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife. p.01-06.

FOURNIER, F. 1960. *Climat et erosion*. Press Universitaires de France.

FÚLFARO, J. V.; BJORNBERG, A. J. S. 1993. Geologia. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIERO, J. H. (Ed.). *Solos do interior de São Paulo*. São Carlos. Cap.1. p. 1-42.

FÚLFARO, V. J.; GAMA JR., E.; SOARES, P. C. 1980. *Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná*. São Paulo: Paulipetro.

FURQUIM, M. P. O.; SALLEM FILHO, S. 2002. Ortofotocartas digitais e geoprocessamento em rodovias. Curitiba: ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S. A.

GÁBRIS, Á. K.; ZÁMBÓ, L. 2003. Land use change and gully formation over the last 200 years in a hilly catchment. *Catena* [S.I.], v. 50, n. 2-4, p. 151-164.

GIMENES, F. B. Q.; AUGUSTO FILHO, O.; SOARES, W. C. 2010. Caracterização do sistema de drenagem natural na região metropolitana de João Pessoa (PB) utilizando ferramentas de hidrologia em SIG. In: VII Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, Maringá - PR. ABGE.

GOMES, D. M. 2002. *Mapeamento geotécnico para análise de feições erosivas concentradas na bacia do Córrego Ribeirão do Meio, São Pedro/SP na escala 1:20.000*. 242 f. (Dissertação de Mestrado), EESC - USP, São Carlos.

GOURNELLOS, T.; VASSILOPOULOS, A.; EVELPIDOU, N. 1997. Development of a GIS-based methodology to analyze geological, geomorphological and environmental data of the island of Zakynthos. In: Anais International Symposium on Engineering Geology and the Environment Proceedings, Athens. p.1245-1251.

GOVERS, G. 1991. Rill erosion on arable land in Central Belgium: Rates, controls and

predictability. *Catena* [S.I.], v. 18, n. 2, p. 133-155.

GREHS, S. A. 1967. A importância do geólogo no estudo preventivo de escorregamentos, deslizamentos e outros aspectos correlatos. In: 21º Congresso Brasileiro de Geologia, Curitiba / PR. SBG, p.119-123.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. 1995. *Geomorfologia: Uma Atualização de Bases e Conceitos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

HAGERTY, D. J. 1991. Piping/sapping erosion. I: Basic considerations. *Journal of Hydraulic Engineering*. v. 117. New York, p. 991-1008.

HESSEL, R.; VAN ASCH, T. 2003. Modelling gully erosion for a small catchment on the Chinese Loess Plateau. *Catena* [S.I.], v. 54, n. 1-2, p. 131-146.

HORTON, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Society of America Bulletin* [S.I.], v. 56, p. 275– 370.

HOWARD, A. 1999. Simulation of gully erosion and bistable landforms. In: DARBY, S. E., SIMON, A. (Ed.). *Incised River Channels*: John Wiley & Sons Ltd., p. 277–310.

IAEG; UNESCO. 1976. *Guide pour la préparation dès cartes géotechniques*. Paris: Les Press de l'Unesco.

IBGE. 2002. Mapa de climas do Brasil – Escala 1:5.000.000. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

\_\_\_\_\_. 2003. Manual de Noções Básicas de Cartografia. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IPT. 1981. *Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo.

\_\_\_\_\_. 1987. Orientações para o combate à erosão no Estado de São Paulo, *bacias do Peixe e Paranapanema*. Relatório São Paulo. DAEE.

\_\_\_\_\_. 1989. Controle de Erosão: *bases conceituais e técnicas, diretrizes para o planejamento urbano e regional. orientação para o controle de boçorocas urbanas*. São Paulo.

\_\_\_\_\_. 1997. *Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, escala 1:500.000*. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* [S.I.], v. 54, n. 11, p. 1593-1600.

KIRKBY, M. J.; BULL, L. J. 2000. Some factors controlling gully growth in finegrained sediments: a model applied in southeast Spain. *Catena* [S.I.], v. 40, n. 2, p. 127–146.

KÖPPEN, W. 1936. Das geographischa System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, G. (Ed.). *Handbuch der Klimatologie*: Gebr, Borntraeger, p. 1–44.

KRONBERG, P. 1984. *Fernerkundung der Erde - Grundlagen und Methoden der remote sensing in der Geologie*. Stuttgart: Enke-Verlag.

LAL, R. 1988. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. (Ed.). *Soil erosion research methods*. Ankeny, Iowa. Cap.7. p. 140-160.

\_\_\_\_\_. 1990. *Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management*. New York: McGraw-Hill.

LAWS, J. O. 1940. Recent studies in raindrops and erosion. *Agricultural Engineering* [S.I.], v. 21, n. 11, p. 431-433.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W. 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons Publishers.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W. C. 1992. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas. *Bragantia*. v. 51. n. 2, p. 189-196.

LOUGHRAN, R. J. *et al.* 1987. Soil erosion and sedimentation indicated by Caesium 137: Jackmoor Brook catchment, Devon, England. *Catena* v. 14. Braunschweig, p. 201-212.

MACIEL FILHO, C. L. 1978. *Caracterização geotécnica das formações sedimentares de Santa Maria, RS.* (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro - Instituto de Geociências, Rio de Janeiro.

MARK, D. M. 1984. Automated Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models. *Cartographica* [S.I.], v. 21, n. 2-3, p. 168-178.

MARQUÍNEZ, J.; LASTRA, J.; GARCÍA, P. 2003. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology* [S.I.], v. 270, p. 1-11.

MARTINEZ-CASASNOVAS, J. A. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena* [S.I.], v. 50, n. 2-4, p. 293-308.

MARTINS, A. G. S. 2010. *Análise multitemporal das feições erosivas e da evolução do uso e ocupação de uma região rural do município de São Pedro – SP.* (Trabalho de Graduação), Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.

MATULA, M. 1976. *Principles and types of engineering geological mapping.* Bulletin the International Association of Engineering Geology (Report of the omission on engineering geological mapping).

MEDEIROS, J. S.; CÂMARA, G. 2002. GIS para estudos ambientais. In: CÂMARA, G. E. A. (Ed.). *Introdução a ciência da geoinformação (livro on-line).*

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. 2001. *Geoprocessamento em Recursos Hídricos: princípios, integração e aplicação.* Porto Alegre: ABRH.

MENENDEZ-DUARTE, R. *et al.* 2007. Incised channels and gully erosion in Northern Iberian Peninsula: Controls and geomorphic setting. *Catena* [S.I.], v. 71, p. 267-278.

MEYER, L. D.; FOSTER, G. R.; ROMKENS, M. J. M. 1975. Source of soil eroded by water from upland slopes. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources ARS-S-40, Washington, DC. USDA Agricultural Research Service, p.177-189.

MIDDLETON, H. E. 1930. Properties of soils wich influence soil erosion. v. 178: U. S. Departament of Agricultural - Tech. Bull., p. 62.

MILLER, W. P.; BAHARUDDIN, M. K. 1987. Particle size of interhill-eroded sediments from highly wethered soils. *Soil Science Society of America Journal*. v. 51, p. 1610-1615.

MOEYERSONS, J. 2003. The topographic thresholds of hillslope incisions in southwestern Rwanda. *Catena* [S.I.], v. 50, n. 2-4, p. 381-400.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. 1994. Landscape dissection and drainage area–slope thresholds. In: KIRKBY, M. J. (Ed.). *Process Models and Theoretical Geomorphology*. Chichester: Wiley, p. 221–246.

\_\_\_\_\_. 1988. Where do channels begin. *Nature* [S.I.], v. 336, n. 6196, p. 232-234.

NACHTERGAELE, J.; J. POESEN. 1999. Assessment of soil losses by ephemeral gully erosion using high-altitude (stereo) aerial photographs. *Earth Surface Processes and Landforms* [S.I.], v. 24, n. 8, p. 693-706.

NACHTERGAELE, J. *et al.* 2001. The value of a physically based model versus an empirical approach in the prediction of ephemeral gully erosion for loess-derived soils. *Geomorphology* [S.I.], v. 40, n. 3-4, p. 237-252.

NISHIYAMA, L. 1998. *Procedimento de mapeamento geotécnico como base para análises ambientais do meio físico, em escala 1:100.000. Aplicação no município de Uberlândia – MG*. 363 f. 2v. (Tese de Doutorado), EESC - USP, São Carlos.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. 1979. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. In: Bulletin of the International Association of Engineering Geology. p.196 – 199.

NORDSTRÖN, K. 1988. *Gully erosion in the Lesotho lowlands*. Uppsala University.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* [S.I.], v. 28, n. 3, p. 323-344.

OLIVEIRA, A. M. S. *et al.* 1987. Questões metodológicas em diagnósticos regionais de erosão: a experiência pioneira da Bacia do Peixe Paranapanema – SP. In: Anais IV Simpósio de Controle de Erosão, Marília - SP.

OLIVEIRA, J. B. 1989. Carta Pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo. *Folha - SF-23-Y-A-IV - Piracicaba*: Secretaria de Agricultura e Abastecimento - Instituto Agrônômico.

OWOPUTI, L. O.; STOLTE, W. J. 2001. The role of seepage in erodibility. *Hydrological Processes*. v. 15: Elsevier, p. 13-22.

PATTON, P. C.; SCHUMM, S. A. 1975. Gully erosion, Northwestern Colorado - threshold phenomenon. *Geology* [S.I.], v. 3, n. 2, p. 88-90.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. 2006. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. *Water Resources Research* [S.I.], v. 42, n. 8.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. v. 11, p. 1633–1644.

PEJON, O. J. 1992. *Mapeamento geotécnico regional da folha de Piracicaba-SP, escala 1:100000: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos*. 224 f. 2v. (Tese de Doutorado), EESC - USP, São Carlos.

PEJON, O. J.; ZUQUETTE, L. V. 1999. Avaliação da metodologia utilizada para elaboração de carta de risco potencial a erosão acelerada – área de São Pedro, São Paulo, Brasil. *Sociedade & Natureza Uberlândia*. v. 10. n. 19. p. 79-91.

PENCK, W. 1884. Die morphologische analyse. In: PENCK, W. (Ed.). *Physikalischen geologie*.

PETERSEN, G. W.; NIZEYIMANA, E.; EVANS, B. M. 1998. Applications of geographic information systems in soil degradation assessments *Methods for assessment of soil degradation (Series: Advances in soil science)*. Boca Raton, Florida: CRC Press LLC, p. 377-391.

PICHLER, E. 1953. Boçoroca. *Boletim de Sociedade Brasileira de Geologia* [S.I.], v. 2, n. 1, p. 3 – 16.

POESEN, J. *et al.* 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena* [S.I.], v. 50, n. 2-4, p. 91-133.

POLZ, J. A.; PINHEIRO, A. 2002. Metodologia para seleção de áreas para implantação de aterro sanitário. In: Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, Itajaí - SC. Publicação em CD-ROM.

PONTES, A. B. 1980. A experiência brasileira no combate à erosão em áreas urbanas. In: Simpósio Sobre o Controle de Erosão, Curitiba. ABGE, p.29.

PRANDINI, F. L. 1974. *Condicionantes geológico-geotécnicas da degradação ambiental*. São Paulo: ABGE (Boletim nº 01).

PROSSER, I. P.; ABERNETHY, B. 1996. Predicting the topographic limits to a gully network using a digital terrain model and process thresholds. *Water Resources Research* [S.I.], v. 32, n. 7, p. 2289-2298.

QUEIROZ FILHO, A. P. 1993. *Ortofoto digital para atualização cartográfica em um sistema de informações geográficas*. (Dissertação de Mestrado), Escola Politécnica - USP, São Paulo.

RANZANI, G. 1969. *Manual de levantamento de solos*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher.

RIDENTE JR., J. L. 2000. *Prevenção e Controle da Erosão Urbana: Bacia do Córrego do Limoeiro e Bacia do Córrego do Cedro, Municípios de Presidente Prudente e Álvares Machado, SP*. 108 f. (Dissertação de Mestrado), IGC - UNESP, Rio Claro.

RODRIGUES, J. E. 1982. *Estudo de Fenômenos Erosivos Acelerados: Boçorocas*. (Tese de Doutorado), EESC - USP, São Carlos.

ROSE, C. W. 1960. Soil detachment caused by rainfall. *Soil Science*. Baltimore, Maryland: The Williams & Wilkins Company, p. 28-35.

ROSS, J. L. S. 1985. Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação. In: Revista do

Departamento de Geografia, São Paulo. FFLCH/USP.

SALVINI, R. *et al.* 2004. Quickbird stereo photogrammetry for geological mapping (Cyrene-Libya). *Technical report*. Center of Geotechnologies, San Giovanni Valdarno (AR), Italy.

SAMANI, A. N. *et al.* 2009. Geomorphic threshold conditions for gully erosion in Southwestern Iran (Boushehr-Samal watershed). *Journal of Asian Earth Sciences* [S.I.], v. 35, p. 180-189.

SANTOS, J. S. M.; VALERIANO, D. M. 2002. Metodologia para detecção de áreas em transgressão a normas do Código Florestal. In: Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, Itajaí - SC. Publicação em CD-ROM.

SCHUMM, S. A.; HARVEY, M. D.; WATSON, C. C. 1984. *Incised channels: morphology, dynamics and control*. Littleton, Colorado: Water Resources Publications.

SEIGNEMARTIN, C. L. 1979. *Geologia de áreas urbanas: o exemplo de Ribeirão Preto SP*. (Tese de Doutorado), Instituto de Geociências - USP, São Paulo.

SILVA, A. F. 2003. *Mapeamento Geotécnico e análise dos Processos Erosivos na Bacia do Córrego Tucum, São Pedro-SP, Escala 1:10.000*. 133 f. (Dissertação de Mestrado), EESC - USP, São Carlos.

SOIL SCIENCE GLOSSARY TERMS COMMITTEE. 2008. Soil Science Society of America. In: SSSA (Ed.). Madison, p. 92.

STANKOVIANSKY, M. 2003. Historical evolution of permanent gullies in the Myjava Hill Land, Slovakia. *Catena* [S.I.], v. 51, n. 3-4, p. 223-239.

STEIN, D. P. *et al.* 1987. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica, na Bacia do Peixe Paranapanema. In: IV Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Marília. p.105-135.

SUGUIO, K. 1998. *Dicionário de geologia sedimentar e áreas afins*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 1222.

TOMMASELLI, A. M. G. Ortofoto: Um conceito antigo com novas técnicas de produção. *Portal Mوندogeo*, v. 1, p.1 - 7, 2002.

TROEH, F. R. 1965. Landform equations fitted to contour maps. *American Journal of Science* [S.I.], v. 263, n. 7, p. 616-&.

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* [S.I.], v. 63, n. 2-3, p. 132-153.

VANDAELE, K. *et al.* 1996. Geomorphic threshold conditions for ephemeral gully incision. *Geomorphology* [S.I.], v. 16, n. 2, p. 161-173.

VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; GOVERS, G. 2003. Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena* [S.I.], v. 50, n. 2-4, p. 329-352.

VANDEKERCKHOVE, L. *et al.* 2000a. Thresholds for gully initiation and sedimentation in Mediterranean Europe. *Earth Surface Processes and Landforms* [S.I.], v. 25, n. 11, p. 1201 – 1220.

\_\_\_\_\_. 2000b. Characteristics and controlling factors of bank gullies in two Semi-arid Mediterranean environments. *Geomorphology* [S.I.], v. 33, p. 37-58.

VANWALLEGHEM, T. *et al.* 2005. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology* [S.I.], v. 69, n. 1-4, p. 76-91.

\_\_\_\_\_. 2003. Characteristics and controlling factors of old gullies under forest in a temperate humid climate: a case study from the Meerdaal Forest (Central Belgium). *Geomorphology* [S.I.], v. 56, n. 1-2, p. 15-29.

VARNES, D. J. 1974. *The logic of engineering geological and related maps. A discussion of the definition and classification of map units, with special references to problems presented by maps intended for uses in civil engineering.* U. S. Geological Survey - Professional paper 837.

VIEIRA, J. F. 1978. Estudos dos processos erosivos mais extensivos. *São Paulo, USP* [S.I.], p. 202.

VILAR, O. M. 1987. *Formulação de um modelo matemático para erosão dos solos pela chuva.*

196 f. (Tese de Doutorado), EESC - USP, São Carlos.

VILAR, O. M.; PRANDI, E. C. 1993. Erosão dos solos. In: CINTRA, J. C. A.; ALBIEIRO, J. H. (Ed.). *Solos do interior de São Paulo*. São Carlos. Cap.7. p. 177-206.

WEBER, E. *et al.* 2003. *Estruturação de sistemas de informação ambiental em bacias hidrográficas: o caso da bacia hidrográfica do rio Caí-RS*. Porto Alegre: UFRGS – Labgeo.

WEGGEL, J. R.; RUSTOM, R. 1992. Soil-erosion by rainfall and runoff state-of-the-art. *Geotextiles and Geomembranes* [S.I.], v. 11, n. 4-6, p. 551-572.

WISHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses - A guide to conservation planning. *U. S. Department of Agriculture - Agriculture Handbook* [S.I.], n. 537, p. 1-35.

XAVIER-DA-SILVA, J. 1997. Metodologia de Geoprocessamento. *Revista de Pós-graduação em Geografia - Universidade Federal do Rio de Janeiro* [S.I.], v. 1, p. 25-34.

XAVIER-DA-SILVA, J.; ZAIDAN, R. T. 2004. *Geoprocessamento e Análise Ambiental – Aplicações*. 1. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil.

YAMANOUTH, G. R. B. 2003. *Avaliação dos processos erosivos e das técnicas de controle e reabilitação - Bacia do Córrego do Espreado (São Pedro - SP)*. (Dissertação de Mestrado), EESC - USP, São Carlos.

ZACHAR, D. 1982. *Soil erosion*. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific (Série Developments in Soil Science, 10).

ZUQUETTE, L. V. 1987. *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras*. 673 f. 3v. (Tese de doutorado), EESC - USP, São Carlos.

\_\_\_\_\_. 1991. *Mapeamento geotécnico: Ribeirão Preto*. FAPESP, Relatório de Pesquisa – Inédito.

\_\_\_\_\_. 2002. *Elaboração de cartas de eventos perigosos e riscos associados aos processos erosivos - escala 1:10.000 - região de São Pedro (SP): desenvolvimento metodológico*. Relatório

da FAPESP (Processo N 00/03027-7).

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. 2004. *Cartografia Geotécnica*. São Paulo: Oficina de Textos.