

## TÉCNICAS AEROFOTOGRAMÉTRICAS DIGITAIS APLICADAS AO ESTUDO DA EROSÃO

Marcos Roberto PINHEIRO

Igor André Cubateli REDIVO

## RESUMO

As fotografias aéreas são um dos produtos de sensoriamento remoto mais utilizados nos estudos de erosão, porém a medição direta de feições erosivas lineares sobre as fotos não é adequado, devido aos problemas geométricos inerentes a estas. Nesse contexto, este trabalho apresenta um exemplo de aplicação de uma técnica mais precisa para o estudo da erosão a partir de fotos aéreas, a aerofotogrametria digital. Esta foi empregada na análise da evolução temporal (1962 a 2006) de ravinas e voçorocas da bacia do córrego Querosene (São Pedro/SP, sudeste do Brasil). O estudo foi realizado por meio de uma estação fotogramétrica constituída de um *notebook*, o *software* DVP e um estereoscópio de espelhos próprio para o uso no computador. Para a correção da geometria das fotos (1962: 1:25.000; 1978: 1:35.000; 1995: 1:25.000; 2006: 1:30.000) foram usados os parâmetros técnicos das câmeras utilizadas nos aerolevantamentos, coordenadas obtidas em cartas planialtimétricas (1:10.000) e um modelo digital de terreno elaborado a partir destas cartas base. Os resultados mostraram o grande potencial da aerofotogrametria digital para visualizar e representar mais precisamente as formas de relevo e as feições erosivas, inclusive de pequenas dimensões, como sulcos e trilhas de pisoteio. Além disso, a medição das dimensões das feições erosivas lineares de 1962 até 2006 permitiu entender a sua evolução temporal e calcular seu ritmo de expansão. O método mostrou-se eficiente não apenas para o estudo da erosão, como também para o mapeamento geomorfológico.

*Palavras-chaves:* Aerofotogrametria digital; erosão; fotografias aéreas; fotogrametria; erosão linear.

## ABSTRACT

DIGITAL AEROPHOTOGRAMMETRIC TECHNIQUES APPLIED TO RESEARCH ON EROSION. Aerial photographs are one of the main remote sensing products used to study erosion. However, it is not appropriate to measure linear erosional features directly on photos because of geometric distortions. Thus, this paper presents an example of the use of a more accurate technique, the digital aerophotogrammetry, which was applied to the temporal study (1962 – 2006) of ravines and gullies, in the Querosene River Basin (São Pedro municipality – São Paulo State – Southeastern Brazil). The research was carried out using a photogrammetric station constituted by a notebook, the DVP software and a mirror stereoscope for computers. In order to correct the geometry of the aerial photographs used in this research (1962: 1:25,000; 1978: 1:35,000; 1995: 1:25,000; 2006: 1:30,000), internal parameters of the cameras used in aerial surveys, coordinates from planialtimetric charts (1:10,000 scale), and a digital elevation model developed from these maps were used. The results demonstrated the great potential of digital aerophotogrammetry for the study of erosion, since this technique allows the identification and representation of the principal morphological and erosional features, including small ones, such as grooves and cattle trails. In addition, the measurement of linear erosive features from 1962 to 2006 allowed the understanding of their temporal evolution and the calculation of their growth rate. This method proved to be efficient not only for erosion study, but also for geomorphological mapping

*Keywords:* Digital aerophotogrammetry; erosion; aerial photos; photogrammetry; linear erosion.

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão é um processo natural que consiste no desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo provocado pela água e pelo vento (BERTONI & LOMBARDI NETO 1993). Esse fenômeno é um dos principais mecanismos de morfoesculturação da superfície terrestre e pode ser dividido em dois tipos principais (BIGARELLA 2003): normal e acelerada. A normal é de natureza geológica, lenta e está dentro dos limites do ambiente, enquanto a acelerada é mais rápida e, em geral, está relacionada à intervenção do homem no ambiente.

Os principais tipos de erosão acelerada são por escoamento difuso (erosão em lençol) e linear (QUEIROZ NETO & CHRISTOFOLETTI 1968, BIGARELLA & MAZUCHOWSK 1985, GUERRA 1994, BIGARELLA 2003, entre outros). A primeira é originada pelo escoamento difuso da água e ocorre de forma lenta, transportando principalmente as partículas mais finas da superfície do solo. A segunda, por sua vez, é constituída por incisões lineares no solo em decorrência do escoamento superficial concentrado e podem ser classificadas como sulcos, ravinas, e, quando atingem o lençol freático, evoluem para voçorocas (IPT/DAEE 1990). As voçorocas podem ser formadas também a partir do escoamento concentrado sub-superficial (*piping*).

Diversos métodos podem ser aplicados aos estudos de erosão, de acordo com os objetivos de cada pesquisa. Em escala de detalhe, os estudos podem se restringir a uma única feição erosiva, como uma voçoroca, abrangendo desde o monitoramento de campo da evolução da sua área até a identificação dos desequilíbrios pedogeoquímicos e hidrológicos da cobertura pedológica responsáveis pela erosão, tal como realizado por SALOMÃO (1994) na região de Bauru/SP. Em escalas médias e pequenas os estudos abrangem áreas maiores, sendo possível identificar a distribuição das feições erosivas na paisagem ou, a partir de mapas base/temáticos e produtos de sensoriamento remoto, estimar as perdas de solo por erosão laminar pela aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo – EUPS (WISCHMEIER & SMITH 1978). É possível ainda a realização de estudos multiescalares que envolvam diferentes técnicas e formas de análise próprias a cada nível de abordagem, sendo a cartografia morfopedológica de CASTRO & SALOMÃO (2000), inspirada no trabalho de TRICART & KILLIAN (1979), uma das propostas mais adequadas e didáticas.

Dentre os produtos de sensoriamento mais utilizados nos estudos de processos erosivos destacam-se as fotografias aéreas verticais. Estas constituem a base de inúmeros trabalhos nacionais e internacionais (BERGSMAN 1974, POLITANO *et al.* 1983, SANCHEZ *et al.* 1986-1987, MODENESI & JORDÃO 1992, OLIVEIRA 1994, SOBREIRA *et al.* 1998, DABA *et al.* 2003, MARTÍNEZ-CASASNOVAS 2003, VANDEKERCKHOVE *et al.* 2003, PAULO 2005, PINHEIRO 2009, GARCIA *et al.* 2011, KAISER *et al.* 2014, DANIEL & VIEIRA 2015, entre outros) e representam um retrato da paisagem, apresentando duas características fundamentais para a análise do relevo: a alta resolução espacial, em especial para as fotos com escala maior que 1:30.000, e a visão estereoscópica, recurso este ainda bastante restrito e de alto custo em outros produtos de sensoriamento remoto. Em contrapartida, as fotografias aéreas apresentam grande distorção geométrica, o que é fruto sobretudo da projeção cônica inerente à fotografia convencional e das irregularidades do relevo. Essas distorções comprometem a qualidade e confiabilidade de medições de objetos do terreno.

Nesse cenário, a estimativa da área abrangida por feições erosivas a partir de medições em fotografias aéreas convencionais pode ser insatisfatória. Para que as medidas possam ser mais confiáveis é necessária a correção geométrica das fotos, procedimento atualmente realizado em *softwares* de fotogrametria ou em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), como demonstrado por PINHEIRO (2009), DANIEL (2012) e DANIEL & VIEIRA (2015). Essas técnicas aumentam a precisão das medidas, que pode chegar até a centímetros no terreno. Sua utilização é bastante difundida principalmente em mapeamentos de áreas urbanas, como no MDSP - Mapeamento Digital do Município de São Paulo, realizado na década de 2000, e em outros mapeamentos cadastrais recentes dos municípios brasileiros. Assim, a proposta deste trabalho é demonstrar o potencial das técnicas de aerofotogrametria digital para o mapeamento morfológico e para a análise qualitativa e quantitativa de feições erosivas lineares.

## 2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para avaliar a pertinência do uso da aerofotogrametria digital no estudo da erosão foi selecionada a bacia do córrego do Querosene, município de São Pedro, região centro-oriental do estado de São Paulo, integrante da bacia do ribeirão Araquá, que é tributária da margem direita do rio Piracicaba

(Figura 1). A bacia está próxima da borda nordeste da Bacia do Paraná, na transição de duas grandes morfoesculturas: a Depressão Periférica Paulista e o Planalto Ocidental (ROSS & MOROZ 1997). Esta região é conhecida como Serra de São Pedro, nome regional da Serra Geral, e constitui um dos exemplos mais típicos do relevo de cuesta no estado de São Paulo (PINHEIRO & QUEIROZ NETO 2014, 2015).

Nesse trecho, o reverso da serra apresenta altitudes que ultrapassam 900 m e caracteriza-se pela presença de colinas e morrotes sustentados por arenitos finos a conglomeráticos de matriz argilosa, folhelhos, arenitos silicificados (ALMEIDA & BARBOSA 1953) e ferricretes (BUZATO 2000,

LADEIRA 2001), sobre os quais se desenvolvem Latossolos argilosos, Plintossolos, Neossolos Litólicos e Cambissolos (OLIVEIRA & PRADO 1984, 1989). Na transição entre o Planalto Ocidental e a Depressão Periférica o relevo é escarpado e apresenta desnível topográfico de até 300 m. A escarpa é sustentada por uma sequência de derrames basálticos eocretáceos da Formação Serra Geral (RENNE *et al.* 1992, THIEDE & VASCONCELOS 2010) e arenitos eólicos eocretáceos finos da Formação Botucatu (SCHERER 1998), recobertos predominantemente por solos rasos (Neossolos Litólicos e Cambissolos). Na base da escarpa, na Depressão Periférica, domina um relevo colinoso constituído por amplos interflúvios de topos

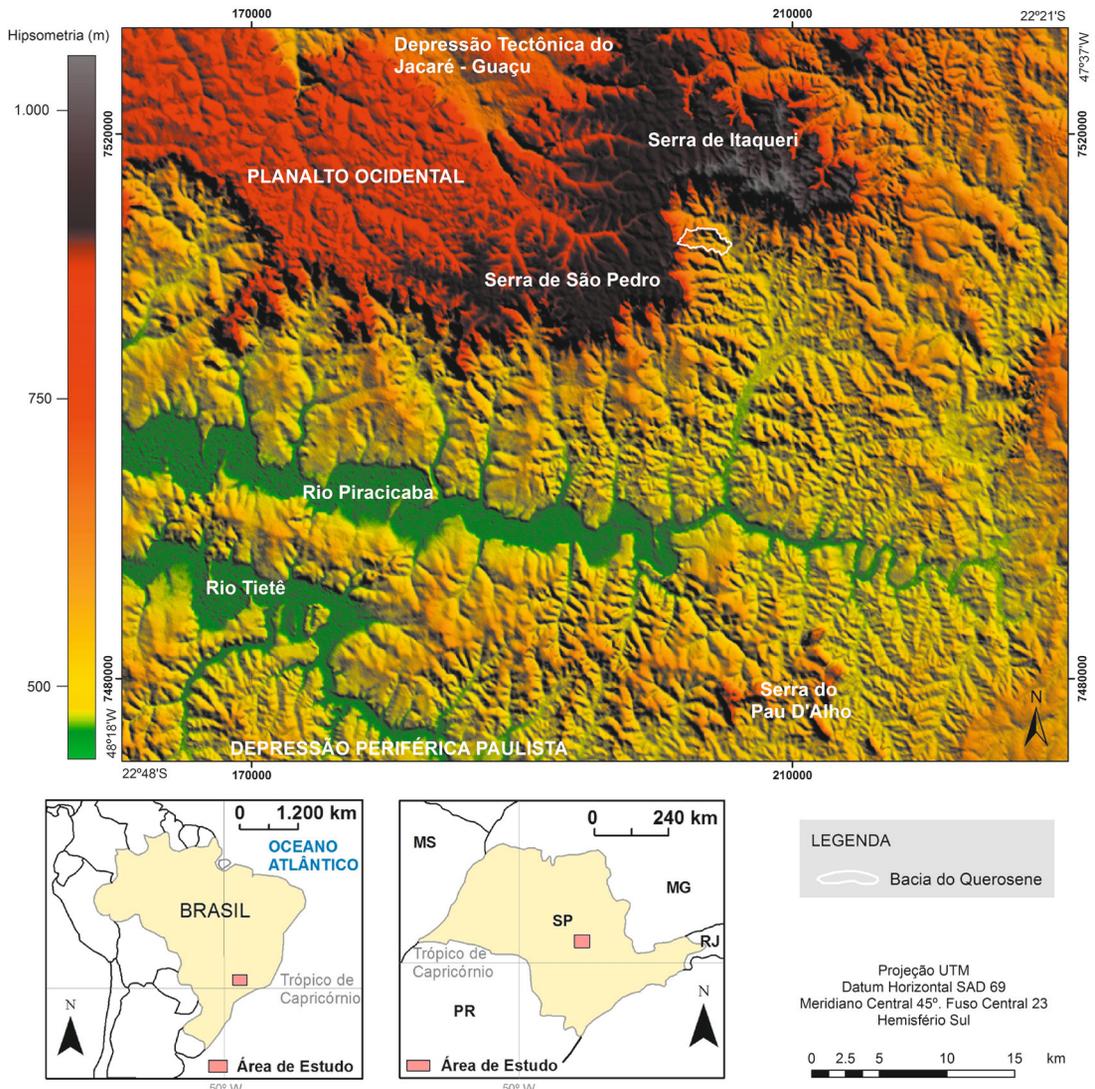


FIGURA 1 – Mapa de localização da bacia do córrego do Querosene, município de São Pedro, SP.

convexos genericamente denominados de glaciais (QUEIROZ NETO & JOURNAUX 1978). Seu substrato é formado por arenitos finos a conglomeráticos triássicos da Formação Pirambóia recobertos por supostos depósitos neocenoicos arenosos e sem estrutura (MELO 1995, MELO *et al.* 1997, PINHEIRO 2014, PINHEIRO & QUEIROZ NETO 2016), sobre os quais se formaram Neossolos Quartzarênicos com eventuais bandas onduladas (DIAS FERREIRA 1997, FURQUIM 2002, FURQUIM *et al.* 2013), Neossolos Litólicos, Argissolos Vermelho-Amarelos e, nas planícies fluviais, Neossolos Flúvicos e Gleissolos Háplicos (FURQUIM 2002, PINHEIRO 2009).

A área era originalmente coberta por vegetação de cerrado, porém esta foi progressivamente substituída por pastagens, cana-de-açúcar e silvicultura de eucaliptos. Em relação aos aspectos climáticos, de acordo com a proposta de Köppen (SETZER 1966), a região é classificada como sendo de Clima Quente (Cwa), com temperatura média do mês mais quente acima de 22 °C e média do mês mais frio inferior a 18 °C. A precipitação média anual é próxima de 1.400 mm (estação meteorológica D4-054), com volumes de chuva concentrados entre os meses de Outubro e Março.

Essas características naturais conferem à região uma suscetibilidade elevada à erosão, que é potencializada pelo desmatamento e adoção de práticas e usos inadequados à capacidade suporte

do meio, sobretudo no trecho da Depressão Periférica, onde está a maior parte da bacia do córrego Querosene. Nesse contexto, a erosão constitui um problema crônico na região e já foi alvo de diversos estudos, tais como os de SANCHEZ *et al.* (1986-1987), SANTORO (1991), IPT (1995), CAPELLARI (1996), CARPI JUNIOR (1996), OLIVEIRA (1996), DIAS FERREIRA (1997), PINHEIRO (2009), DANIEL (2012), DANIEL & VIEIRA (2015), entre outros.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O mapeamento morfológico e das feições erosivas lineares foi realizado numa estação fotogramétrica composta por um *notebook* com tela de 17", um estereoscópio de espelhos para uso em computadores e o *software* aerofotogramétrico DVP. As fotografias aéreas (Tabela 1) foram escaneadas com resolução de 1.200 dpi e orientadas no *software* de acordo com as características técnicas (distância focal e coordenadas de marcas fiduciais) das câmeras de vôo (orientação interior), dos pontos homólogos entre as fotos (orientação relativa) e dos pontos de controle do terreno (orientação absoluta), os quais foram extraídos de cartas planialtimétricas 1:10.000 (Projeto Macro-Metrópole 1979). As fotografias foram aerotrianguladas para estabelecer o controle planimétrico e altimétrico dos modelos. O modelo digital de terreno, elabora-

TABELA 1 – Informações básicas e parâmetros dos aerolevantamentos utilizados.

Ano	Empresa	Escala	Distância Focal	Coordenadas das Marcas Fiduciais <sup>1</sup>
1962	Prospec S.A.	1:25.000	152,2 mm	(1): -106.000; 106.000 (2): 106.000; 106.000 (3): 106.000; -106.000 (4): -106.000; -106.000
1978	Não Especificada	1.35.000	151,79 mm	(1): 106.000; -106.000 (2): -106.000; -106.000 (3): -106.000; 106.000 (4): 106.000; 106.000
1995	BASE S.A.	1.25.000	153,52 mm	(1): -106.000; 106.000 (2): 106.000; 106.000 (3): 106.000; -106.000 (4): -106.000; -106.000
2006	BASE S.A.	1:30.000	151,980 mm	(1): -106.004; -106.006 (2): 106.001; 106.004 (3): -106.002; 106.004 (4): 106.003; -106.006

<sup>1</sup> As coordenadas das marcas fiduciais dos vôos de 1962, 1978 e 1995 são estimadas, uma vez que a documentação das câmeras utilizadas nesses vôos antigos não está mais disponível. As estimativas foram feitas a partir de medições das distâncias entre as fiduciais.

do a partir das cartas base mencionadas, subsidiou a ortoretificação das fotos, dando origem às ortofotos. Em seguida, foi realizada a restituição das feições de relevo, em especial das formas erosivas, as quais foram exportadas no formato *dxg* para os softwares AutoDesk Map 2004 e Arcgis 10, onde foi realizada a edição e elaboração do *layout* final dos mapas.

Por fim, foi avaliado o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) das ortofotos geradas, conforme a proposta de MERCHANT (1982). Efetuou-se uma análise estatística dividida em duas partes: tendência (*T-student*) e precisão (Qui-quadrado). Na análise de tendência verificou-se a existência de tendências para os resíduos das componentes planimétricas, enquanto a análise da precisão buscou identificar as discrepâncias entre o desvio padrão e o erro padrão. O encadeamento do PEC e das outras etapas está exposto na figura 2.

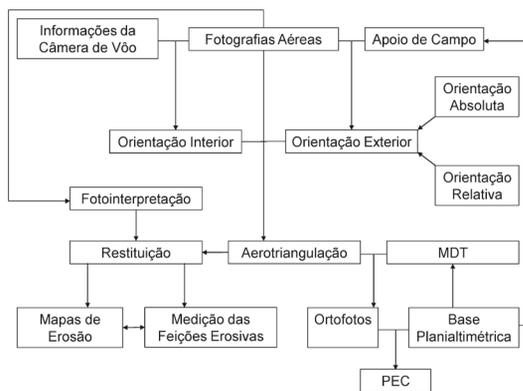


FIGURA 2 – Principais etapas do trabalho.

O mapeamento morfológico e de feições erosivas lineares da bacia do córrego Querosene foi realizado em dois momentos distintos (1962 e 2006). Utilizou-se os levantamentos de fotografias aéreas pancromáticas do ano de 1962, escala 1:25.000, do IA/SA (Instituto Agrônomo da Secretaria de Agricultura/SP), e coloridas do ano de 2006, escala 1:30.000, da BASE Aerofotogrametria e Projetos S.A. A legenda adotada para a representação da morfologia do relevo consiste numa adaptação da proposta de QUEIROZ NETO & JOURNAUX (1978), enquanto os elementos que simbolizam as feições erosivas (linhas de pisoteio, terracetes, sulcos, ravinas e voçorocas) e de deposição foram baseados no trabalho de MODENESI & JORDÃO (1992). Os mapas possibilitaram registrar a distribuição das feições erosivas na área e sua evolução no período de 1962 a 2006. Não

foram estabelecidas análises detalhadas da morfologia do relevo e de sua relação com as feições erosivas porque este trabalho não se propôs a entender a gênese da erosão.

Com base nesses dois mapas foram selecionadas duas feições erosivas lineares (uma ravina e uma voçoroca) para a medição do comprimento e área. Além dos levantamentos aerofotogramétricos citados anteriormente, utilizou-se também fotografias pancromáticas do ano de 1978, escala 1:35.000 (Projeto Macro Metrópole - IGC), e de 1995, escala 1:25.000 (Base Aerofotogrametria e Projetos S.A.) (Tabela 1). Desse modo, foi possível calcular a taxa anual de crescimento dessas feições entre 1962 e 2006, bem como estimar suas dimensões em 2009, ano em que foram realizados trabalhos de campo para medições *in loco*. Esse procedimento foi aplicado por VANDEKERCKHOVE *et al.* (2003), que estimaram com sucesso o tamanho de voçorocas no sudeste da Espanha para o ano de 1999, tendo como base a restituição dessas feições a partir de fotografias aéreas que compreendiam o período de 1956 a 1994.

A medição da largura das feições erosivas no campo foi realizada por meio de trenas em uma sequência de seções transversais ao talvegue, espaçadas de 5 m. Além da largura e comprimento do talvegue, mediu-se também os taludes e o fundo das feições (Figura 3). Salienta-se que a evolução temporal dessas duas feições já havia sido estudada no trabalho de PINHEIRO (2009), porém sem a correção geométrica das fotos. Na época as medidas foram realizadas sobre fotos escaneadas que haviam sido apenas georeferenciadas a partir de uma base planialtimétrica (1:10.000) e de uma ortofoto. Os resultados de ambos os trabalhos foram comparados com a finalidade de se avaliar os métodos utilizados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Morfologia do relevo e feições erosivas mapeadas na bacia do córrego Querosene

Os mapas morfológicos e de erosão de 1962 (Figura 4) e 2006 (Figura 5) da bacia do córrego Querosene ilustram algumas formas que podem ser mapeadas a partir de técnicas aerofotogramétricas digitais em fotografias aéreas de escala média. Em relação aos aspectos principais do relevo, foi possível identificar e representar graficamente desde a escarpa de cuesta e suas inúmeras cicatrizes de escorregamento até as rupturas decorrentes da ação fluvial e cornijas, que por suas dimensões reduzi-

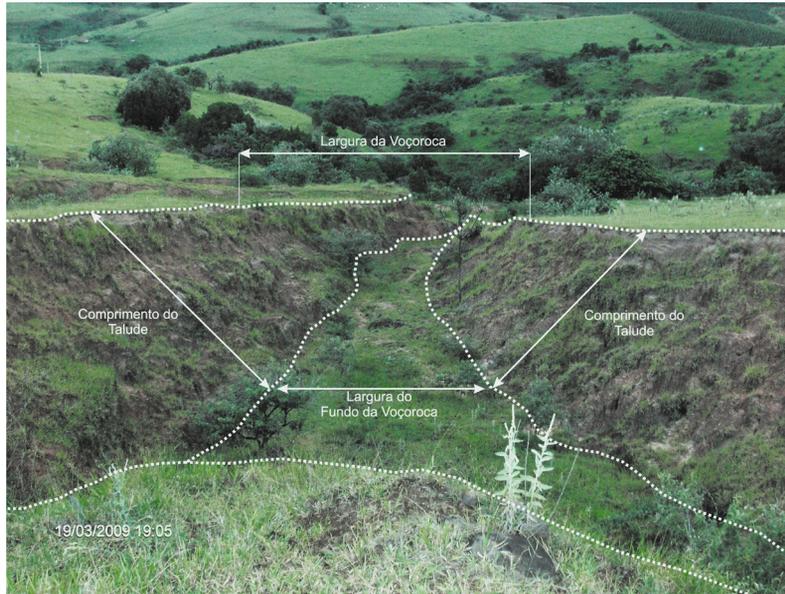


FIGURA 3 – Elementos morfométricos principais de uma voçoroca.

das, só puderam ser adequadamente fotointerpretadas devido ao recurso da visão estereoscópica. Também foram mapeadas a rede de drenagem e as variações nas formas dos vales, predominando formas em berço nas cabeceiras e nos canais temporários e vales em V nos trechos em que a incisão linear é mais evidente. No baixo curso do córrego Querosene foram mapeados os terraços fluviais principais, não sendo representados, em contrapartida, os depósitos restritos e as barras, devido às suas dimensões reduzidas.

Em relação às feições erosivas, que constituem a questão central do trabalho, foram mapeados sulcos, ravinas e voçorocas que apresentam dimensões que variam desde poucos metros a mais de um quilômetro de comprimento. Os sulcos apresentam-se como feições alongadas com profundidade reduzida (em geral, inferior a 1 m) e comprimento de até dezenas de metros, enquanto as ravinas atingem comprimento maior e profundidade eventualmente superior a 10 m, além de terem perfil em V e largura irregular (maior em sua porção central e mais estreita na cabeceira e no exutório dela). As voçorocas também apresentam forma alongada, porém com frequentes ramificações, comprimento variável de dezenas a centenas de metros, largura e profundidade não raramente maiores que 10 m, perfil em U e presença de água no talvegue.

Além dessas feições, foram mapeadas outras, que, em função de sua dimensão reduzida, são de difícil individualização nas fotos e representação nos mapas de erosão: linhas de pisoteio de gado

e terracetes. As primeiras apresentam forma alongada e comprimento que pode atingir até centenas de metros, mas sua largura e profundidade raramente excedem 30 cm. Os terracetes são degraus de abatimento associados ao pisoteio do gado e estão presentes nas vertentes e paredes de voçorocas, com amplitude que varia de centimétrica a métrica, não sendo representados de forma individual nos mapas por sua dimensão reduzida. Os terracetes foram representados por um símbolo único (t) nas áreas em que ocorrem.

Em 1962 (Figura 4) já havia uma série de formas erosivas lineares na área de estudo. Dos cerca de 447,4 ha da bacia, 12,43 ha (2,8%) apresentavam linhas de pisoteio e 17,05 ha (3,8%), sulcos. As linhas de pisoteio predominavam nos topos de interflúvios sobretudo ao norte, nordeste e leste da bacia, enquanto os sulcos concentravam-se a oeste, no sopé da escarpa e no topos de interflúvios do setor montante da bacia. Também foram registradas 8 ravinas e 4 voçorocas, situadas em cabeceiras de drenagem e próximas a topos de morros, com destaque para uma grande voçoroca com 1.080 m de comprimento, que se estendia desde o canal principal da bacia até as cabeceiras no interflúvio principal, a noroeste.

Comparando-se esses dados com a restituição do ano de 2006 (Figura 5), observa-se que houve um aumento da área afetada por linhas de pisoteio, que passaram a ocupar 29,54 ha (6,6%). Quanto aos sulcos, houve uma redução da área ocupada, passando de 17,05 ha (3,81%) para 10,54 ha

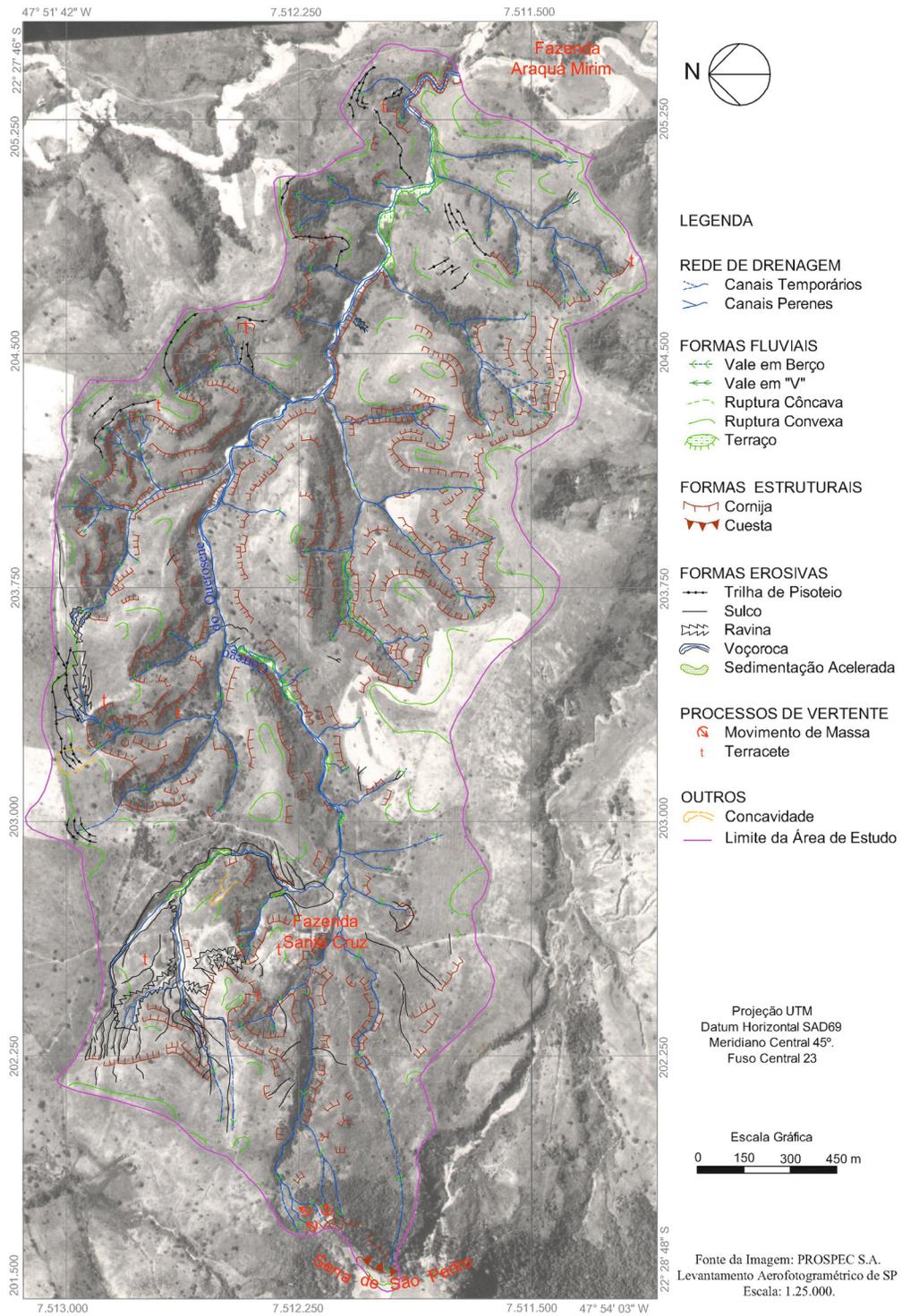


FIGURA 4 – Mapa morfológico e de feições erosivas – 1962, sobreposto à ortofoto obtida a partir dos estereopares.

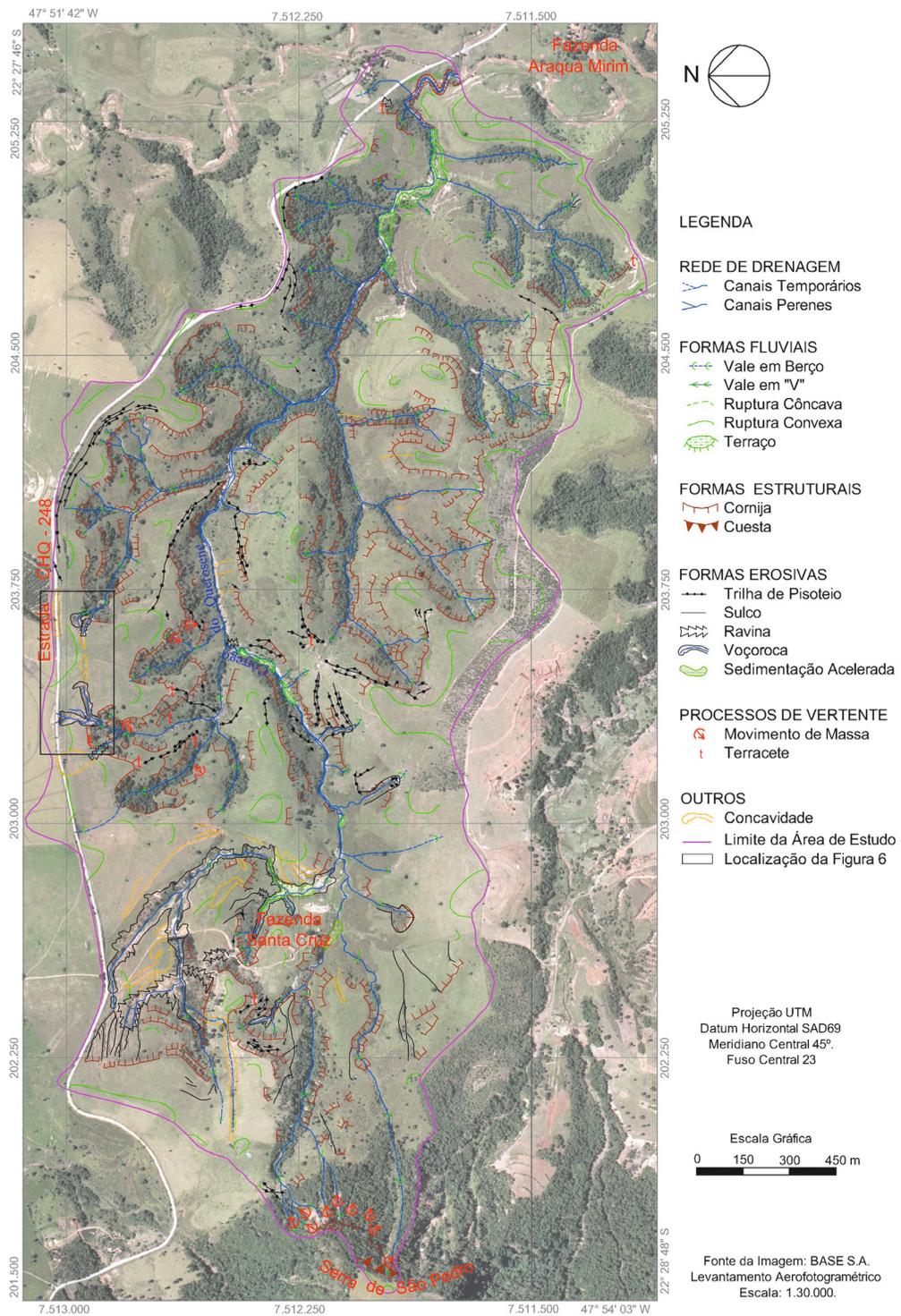


FIGURA 5 – Mapa morfológico e de feições erosivas – 2006, sobreposto à ortofoto obtida a partir dos estereopares.

(2,35%). Houve, ainda, um aumento significativo de ravinas e voçorocas: as ravinas passaram de 8 para 15 ocorrências, enquanto as voçorocas passaram de 2 para 8, o que coincide com o aumento das áreas de assoreamento no canal. Esse aumento no número de ravinas e voçorocas não pode ser relacionado diretamente ao uso da terra, porque este não apresentou mudanças significativas no período investigado. Porém, como destacado por PINHEIRO (2009), grande parte dessas feições erosivas lineares está em pastagens e pastos

sujos e apresentam inúmeras linhas de pisoteio e terracetes, que são elementos que potencializam a erosão. Ressalta-se que o gado também tem papel importante como agente geomorfológico, tal como preconizado por TRIMBLE & MENDEL (1995).

#### 4.2 Análise morfométrica temporal das feições erosivas lineares

Os resultados das medições das feições erosivas no período de 1962 a 2006 estão expostos nas tabelas 2 e 3.

TABELA 2 – Comprimento e área da ravina em 1962, 1978, 1995, 2006 e 2009 (medição de campo).

Ano	<i>Medidas extraídas de PINHEIRO (2009)</i>		<i>Medidas realizadas no presente trabalho</i>	
	<i>Comprimento do Talvegue (m)</i>	<i>Área Total (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Comprimento do Talvegue (m)</i>	<i>Área Total (m<sup>2</sup>)</i>
1962	45	251	48	344
1978	45	259	51	370
1995	65	611	62	633
2006	63	830	77	1041
2009	-	-	78,9	1087,5

TABELA 3 – Comprimento e área da voçoroca em 1962, 1978, 1995, 2006 e 2009 (medição de campo).

Ano	<i>Medidas extraídas de PINHEIRO (2009)</i>		<i>Medidas realizadas no presente trabalho</i>	
	<i>Comprimento do Talvegue (m)</i>	<i>Área Total (m<sup>2</sup>)</i>	<i>Comprimento do Talvegue (m)</i>	<i>Área Total (m<sup>2</sup>)</i>
1962	66	369	47	265
1978	66	353	60	592
1995	89	1520	82	1127
2006	103	1676	106	1891
2009	-	-	109,93	1999,39

Em 1962 a ravina investigada ainda era apenas um sulco e tinha 48 m de comprimento, atingindo a extensão de 77 m em 2006 (Figura 6). Entre 1962 e 1995 o aumento foi bastante lento (cerca de 0,19 m/ano entre 1962 e 1978 e 0,65 m/ano de 1979 a 1995), enquanto entre 1996 e 2006 o avanço foi mais acelerado: 1,25 m/ano. A média do período estudado (1962 a 2006) foi de 0,64 m/ano. Caso fosse mantida essa taxa, o comprimento do talvegue no ano de 2009 seria de 78,9 m, maior que o

valor registrado na medição realizada em campo nesse ano (75 m).

Em relação à área da ravina, verificou-se que ela mudou pouco de 1962 (344 m<sup>2</sup>) a 1978 (370 m<sup>2</sup>). De 1978 a 2006 houve um avanço mais acentuado, passando para 633 m<sup>2</sup> em 1995 e 1041 m<sup>2</sup> em 2006. Embora o comprimento do talvegue também tenha crescido bastante no período, o aumento da área da ravina foi maior. Isso ocorreu provavelmente devido à expansão lateral da ravina por con-

ta dos movimentos de massa. Com base no avanço anual médio da ravina entre 1962 e 2006, cerca de  $34 \text{ m}^2/\text{ano}$ , estimou-se que sua área em 2009 seria de  $1087,5 \text{ m}^2$ , bem acima do valor de  $942 \text{ m}^2$  verificado em campo.

Considerando que não houve mudança significativa do uso da terra no período de 1962 a 2006, a discrepância observada entre os valores de comprimento de talvegue e área previstos e medidos deve-se provavelmente a um aterro feito a montante da cabeceira da ravina entre 2006 e 2009, confirmado em campo, que não apenas diminuiu o comprimento e área da feição, como também alterou a sua dinâmica.

A voçoroca (Figura 6) media 47 m de comprimento em 1962 e atingiu 60 m em 1978. Nesse período o ritmo de avanço foi de  $0,81 \text{ m/ano}$  e se ampliou de 1979 a 1995 e de 1996 a 2006, quando as taxas foram de, respectivamente,  $1,29$  e  $2 \text{ m/ano}$ . De acordo com a taxa média de crescimento nesses três períodos ( $1,31 \text{ m/ano}$ ), seu comprimento estimado no ano de 2009 seria de  $109,93 \text{ m}$ , valor acima do verificado em campo ( $99 \text{ m}$ ). Quanto à sua área, também houve um aumento significativo de 1962 a 1978, passando de  $265 \text{ m}^2$  para  $592 \text{ m}^2$ , atingindo  $1127 \text{ m}^2$  em 1995. De 1996 a 2006 o ritmo de avanço se ampliou ( $63,67 \text{ m}^2/\text{ano}$ ). Seguindo o ritmo anual médio de ampliação da área, esta deveria atingir  $1999,39 \text{ m}^2$  em 2009, acima dos  $1753 \text{ m}^2$  verificados no campo. Tal como na ravina, isso pode ser em parte explicado pelo aterro feito com blocos de basalto na cabeceira da feição erosiva,

como forma de contenção da erosão, que ameaçava atingir a estrada a montante.

Embora as projeções das dimensões das feições erosivas não tenham se confirmado (Tabelas 2 e 3), provavelmente por conta dos aterros e obras de contenção, há outro elemento fundamental que poderia explicar essas divergências: o ritmo de evolução das feições erosivas não é homogêneo, mesmo em áreas sem intervenção antrópica. É comum que as formas erosivas lineares apresentem um aumento na taxa de crescimento no início de sua formação e uma redução na intensidade do processo à medida que se aproximam do estágio de estabilização, quando estão amplamente colonizadas pela vegetação.

Ao se comparar as dimensões da ravina e da voçoroca obtidas no trabalho de PINHEIRO (2009) e no presente estudo, verificou-se que os resultados são divergentes (Tabelas 2 e 3), em função das técnicas utilizadas. No trabalho de PINHEIRO (2009), as medidas foram realizadas sobre fotos digitais que haviam sido apenas georeferenciadas (1962, 1978 e 1995), sendo que somente as fotografias de 2006 foram de fato ortoretificadas. Essa técnica é largamente utilizada em várias pesquisas, porém não consegue dirimir o problema da geometria das fotos, o que não ocorre na técnica empregada no presente estudo.

A precisão dos produtos gerados foi confirmada pela verificação do padrão de exatidão cartográfica das ortofotos dos quatro momentos investigados (Tabela 4): nível A (o mais preciso)



FIGURA 6 – Esquema sobre a ortofoto do ano de 2006, mostrando os limites (linha vermelha) da ravina (à direita) e da voçoroca (à esquerda), a linha do talvegue (linha preta) e as seções transversais onde foram feitas as medidas das larguras (linhas azuis). A linha verde corresponde a um braço da voçoroca que não foi medido.

para as ortofotos dos anos de 1962, 1978 e 2006 e nível B para a ortofoto de 1995. Esses resultados são compatíveis com os apresentados no estudo de DANIEL (2012), que numa comparação da qualidade geométrica de uma imagem georefe-

renciada e de uma ortofoto, verificou que a segunda atinge o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) de nível A, enquanto a primeira alcança apenas o nível C, reduzindo bastante a confiabilidade das medições.

TABELA 4 – Dados estatísticos da avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfica das ortofotos.

Parâmetros Avaliados		1962		1978	
		E	N	E	N
Análise de Tendência	Média Disc. (m)	-1,938266667	0,156533333	-3,136466667	4,828533333
	Variância (m <sup>2</sup> )	35,99274721	27,29951827	30,35435041	20,00687541
	Desv. Pad. (m)	5,99939557	5,224894091	5,509478234	4,472904583
	tx (amostral)	1,251271804	0,11603125	2,204833679	4,180913954
	tx(tabelado)	1,761310136	1,761310136	1,761310136	1,761310136
	Resultado	Sem tendência	Sem tendência	Com tendência	Com tendência
Análise de Precisão	Erro Padrão	7,5	7,5	10,5	10,5
	sig <sub>x</sub>	5,303300859	5,303300859	7,424621202	7,424621202
	Qui-quad. (Calc)	17,91638972	13,58909354	7,709041374	5,081111215
	Qui-quad. (Tab.)	21,06414421	21,06414421	21,06414421	21,06414421
	Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
Padrão de Exatidão Cartográfica		PEC A (1:25.000)		PEC A (1:35.000)	
Parâmetros Avaliados		1995		2006	
		E	N	E	N
Análise de Tendência	Média Disc. (m)	4,642	0,229533333	4,642	0,229533333
	Variância (m <sup>2</sup> )	59,104561	25,23422755	59,104561	25,23422755
	Desv. Pad. (m)	7,687949076	5,023368148	7,687949076	5,023368148
	tx (amostral)	2,33851558	0,176968669	2,33851558	0,176968669
	tx(tabelado)	1,761310136	1,761310136	1,761310136	1,761310136
	Resultado	Com tendência	Sem tendência	Com tendência	Sem tendência
Análise de Precisão	Erro Padrão	12,5	12,5	9	9
	sig <sub>x</sub>	8,838834765	8,838834765	6,363961031	6,363961031
	Qui-quad. (Calc)	10,59153733	4,521973577	20,43120627	8,722942857
	Qui-quad. (Tab.)	21,06414421	21,06414421	21,06414421	21,06414421
	Resultado	Aprovado	Aprovado	Aprovado	Aprovado
Padrão de Exatidão Cartográfica		PEC B (1:25.000)		PEC A (1:30.000)	

Em relação aos dados do PEC mencionados na tabela 4, salienta-se que embora as ortofotos de 1978 e 2006 apresentem tendências de desvios na planimetria, estes estão dentro do tolerável para o PEC nível A. No caso da ortofoto de 1995, é provável que o maior nível de erro, que redundou no PEC nível B, tenha sido consequência de uma série de problemas encontrados nas fotos originais, como a baixa resolução, a presença de sombras e a pouca nitidez das marcas fiduciais.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo apresentou as potencialidades de utilização da aerofotogrametria digital nos estudos da erosão, bem como para o mapeamento morfológico. Os usos principais vão desde o mapeamento de detalhe das formas erosivas até a restituição e medição das feições. As vantagens desta técnica sobre aquelas tradicionais analógicas ou digitais baseadas exclusivamente no georeferenciamento das fotos são a maior precisão dos produtos. Esta técnica pode ser aplicada inclusive em fotografias de aerolevantamentos mais antigos, os quais passaram a ser menos usados com o advento dos sensores orbitais, mas que ainda são importantes para estudos de análise temporal dos processos geomorfológicos.

O ritmo de expansão das feições erosivas determinado pelas medições realizadas entre os anos de 1962 e 2006 permitiu estimar suas dimensões no ano de 2009; no entanto, as previsões não se concretizaram, provavelmente em função das intervenções antrópicas que promoveram mudanças na dinâmica dos processos erosivos.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam aqui um sincero agradecimento aos revisores da revista pelas ótimas sugestões e críticas construtivas recebidas na etapa de avaliação do manuscrito.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M.; BARBOSA, O. 1953. Geologia das quadrículas de Piracicaba e Rio Claro – Estado de São Paulo. *Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia*, 143: 1-96.
- BERGSMA, E. 1974. Soil erosion sequences on aerial photographs. *The ITC Journal*, 3: 342-376.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. 1993. Conservação do solo. Ícone, São Paulo, 356 p.
- BIGARELLA, J.J. 2003. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. UFSC, Florianópolis, v.3, 552 p.
- BIGARELLA, J.J.; MAZUCHOWSKI, J.Z. 1985. Visão integrada da problemática da erosão. In: ABGE, SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSIÃO, 3, Maringá, Livro guia, 322 p.
- BUZATO, E. 2000. Distribuição atual e tipos de ferricretes nas Serras de São Pedro e Itaqueri (SP) e sua relação com o relevo. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 122 p.
- CAPELLARI, B. 1996. Estudo das áreas de risco à erosão em São Pedro, SP. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Trabalho de Graduação Individual, 74 p.
- CARPI JUNIOR, S. 1996. Técnicas Cartográficas Aplicadas à Dinâmica da Bacia do Araquá – SP. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 188 p.
- CASTRO, S.S.; SALOMÃO, F.X.T. 2000. Compartimentação morfopedológica e sua aplicação: considerações metodológicas. *Geosp*, 7: 27-36.
- DABA, S., RIEGER, W.; STRAUSS, P. 2003. Assessment of gully erosion in eastern Ethiopia using photogrammetric techniques. *Catena*, 50: 273-291.
- DANIEL, E. 2012. Análise do papel da morfologia e do uso do solo na gênese e na distribuição das feições erosivas, na bacia do córrego Espreado, São Pedro (SP). Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 183 p.
- DANIEL, E.; VIEIRA, B.C. 2015. A evolução das feições erosivas da bacia do Córrego

- Espraiado, São Pedro (SP). *Boletim Goiano de Geografia*, 35(2): 339-358.
- DIAS FERREIRA, R.P. 1997. Solos e Morfogênese em São Pedro. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 157 p.
- FURQUIM, S.A.C. 2002. Interações entre modelado e solo no transecto Espraiado, São Pedro, SP. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 146 p.
- FURQUIM, S.A.C.; COLTRINARI, L.; DIAS FERREIRA, R.P.; CASTRO, S.S.; PUGLIESE, G.R. 2013. Lamellae formation processes in tropical soils in southeastern Brazil. *Catena*, 107: 15-25.
- GARCÍA, A. J.; GUTIÉRREZ, A. G.; CONTADOR, F. L.; SCHNABEL, S. 2011. Availability and characteristics of the historical and recent aerial photographs and orthophotographs in Spain for the analysis of rill and gully erosion. *Landform Analysis*, 17: 51-55.
- GUERRA, A.J.T. 1994. Processos erosivos nas encostas. In: A.J.T Guerra & S.B. Cunha (Org.) Geomorfologia, Uma atualização de bases e conceitos. Rio de Janeiro. Bertrand Brasil, 458 p.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS; DAE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. 1990. Controle de Erosão. São Paulo, 2ª ed., 92 p.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. 1995. Mapa de Erosão do Estado de São Paulo, escala 1:1.000.000. São Paulo, 1ª ed., Convênio IPT-DAEE.
- KAISER, A.; NEUGIRG, F.; ROCK, G.; MÜLLER, C.; HAAS, F.; RIES, J.; SCHMIDT, J. 2014. Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motion. *Remote Sensing*, 6: 7050-7080.
- LADEIRA, F.S.B. 2001. Paleossolos silicificados na Serra de Itaquari-Itirapina/SP: subsídios para a reconstituição paleoambiental. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 362 p.
- MARTINEZ-CASASNOVAS, J.A. 2003. A spatial information technology approach for the mapping and quantification of gully erosion. *Catena*, 50: 293-308.
- MELO, M.S. 1995. A Formação Rio Claro e depósitos associados: sedimentação neocenozoica na Depressão Periférica Paulista. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 144 p.
- MELO, M.S.; COIMBRA, A.M.; CUCHIERATO, G. 1997. Fácies sedimentares da Formação Rio Claro, Neocenozoico da Depressão Periférica Paulista. *Revista do Instituto Geológico*, 18(1/2): 49-63.
- MERCHANT, D.C. 1982. Spatial Accuracy Standards for Large Scale Line Maps. *Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping*, 1: 222-231.
- MODENESI, M.C.; JORDÃO, S. 1992. A erosão acelerada em Caçapava - SP. São Paulo: Instituto Geológico, 31 p. (Boletim, 9).
- OLIVEIRA, A.M.S. 1994. Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatórios. Exemplo do reservatório de Capivara, rio Paranapanema, SP/PR. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 211 p.
- OLIVEIRA, M.A. 1996. Inventário histórico das formas de erosão linear em São Pedro, SP. Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Trabalho de Graduação Individual.
- OLIVEIRA, J.B.; PRADO, H. 1984. Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadricula de São Carlos II (Memorial Descritivo). Campinas: Instituto Agrônomo, 133 p. (Boletim Técnico, 98).
- OLIVEIRA, J.B.; PRADO, H. 1989. Carta pedológica semi-detalhada do Estado de São Paulo – Folha Piracicaba, escala 1:100.000.

- IAC – Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas/ IGC – Instituto Geográfico e Cartográfico, São Paulo.
- PAULO, J.R. 2005. Avaliação de Áreas de Riscos Geológicos na Bacia de Vargem das Flores, Município de Contagem e Betim - MG. *Solos e Rochas*, 28(2): 205-219.
- PINHEIRO, M.R. 2009. Técnicas Cartográficas e Aerofotogramétricas para o Estudo da Erosão: Alta bacia do ribeirão Araquá - São Pedro e Charqueada / SP. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 186 p.
- PINHEIRO, M. R. 2014. Estudo morfotectônico da região da Serra de São Pedro e do Baixo Piracicaba/SP. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 286 p.
- PINHEIRO, M.R.; QUEIROZ NETO, J.P. 2014. Reflexões sobre a gênese da Serra Geral e da Depressão Periférica Paulista: o exemplo da região da Serra de São Pedro e do baixo Piracicaba, SP. *Revista do Instituto Geológico*, 35(1): 47-59.
- PINHEIRO, M.R.; QUEIROZ NETO, J.P. 2015. Neotectônica e evolução do relevo da região da Serra de São Pedro e do baixo Piracicaba / Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 16: 593-613.
- PINHEIRO, M.R.; QUEIROZ NETO, J.P. 2016. Geomorphology of the São Pedro ridge and Lower Piracicaba River region, southeastern Brazil. *Journal of Maps*, 12 (Suppl. 1):1-10.
- POLITANO, W.; CORSINI, P.C.; PELÁ, L.A.; AMARAL, C. 1983. Caracterização por fotointerpretação da erosão acelerada do Município de Taquaritinga, SP. *Científica*, 11(1): 113-119.
- QUEIROZ NETO, J.P.; CHRISTOFOLETTI, A. 1968. A. Ação do escoamento superficial das águas pluviais na serra de Santana – SP. *Boletim Paulista de Geografia*, 45: 59-71.
- QUEIROZ NETO, J.P.; JOURNAUX, A. 1978. Carta geomorfológica de São Pedro, SP, Escala 1:50.000. Convênio Laboratório de Sedimentologia e Pedologia do Departamento de Geografia/FFLCH/USP / Centre de Géomorphologie du CNRS – CAEN.
- RENNE, P.R.; ERNESTO, M.; PACCA, I.G.; COE, R.S.; GLEN, J.M.; PRÉVOT, M.; PERRIN, M. 1992. The age of Paraná flood volcanism, rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous boundary. *Science*, 258: 975-979.
- ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. 1997. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, Escala 1:500.000. FFLCH/USP e IPT/FAPESP, Mapas e Relatório.
- SALOMÃO, F.X.T. 1994. Processos erosivos lineares em Bauru (SP): regionalização cartográfica aplicada ao controle preventivo urbano-rural. Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 200 p.
- SANCHEZ, M.C.; MENDES, I.A.; FREITAS, M.I.C.; LORENZON FILHO, A.V. 1986-1987. Monitoramento de forma de erosão acelerada no córrego tucunzinho, no município de São Pedro (SP-BR). *Boletim de Geografia Teórica*, 16(31-34): 276-284.
- SANTORO, J. 1991. Fenômenos erosivos acelerados na região de São Pedro-SP. Estudo da fenomenologia, com ênfase geotécnica. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro, Dissertação de Mestrado, 140 p.
- SCHERER, C.M.S. 1998. Análise Estratigráfica e Litológica da Formação Botucatu (Eocretáceo da Bacia do Paraná) no Rio Grande do Sul. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado, 230 p.
- SETZER, J. 1966. Atlas Climático e Ecológico do Estado de São Paulo. Comissão Interestadual da Bacia Paraná-Uruguaí, 61 p.
- SOBREIRA, F.G.; CARNEIRO, C.A.; OLIVEIRA, M.V. 1998. Erosões de Cachoeira do Campo, Ouro Preto: análise da evolução por fotografias aéreas. In: ABGE, SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSÃO, 6, Presidente Prudente, *Anais*, CD-ROM, Arquivo ABGE 20.

- THIEDE, D.S.; VASCONCELOS, P.M. 2010. Paraná flood basalts: rapid extrusion hypothesis confirmed by new  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  results. *Geology*, 38(8): 747-750.
- TRICART, J.; KILIAN, J. 1979. L'écogeographie et l'aménagement du milieu naturel. Editora François Maspero, Paris, 325 p.
- TRIMBLE, S.W.; MENDEL, A.C. 1995. The cow as a geomorphic agent: A critical review. *Geomorphology*, 13: 233-253.
- VANDEKERCKHOVE, L.; POESEN, J.; GOVERS, G. 2003. Medium-term gully headcut retreat rates in Southeast Spain determined from aerial photographs and ground measurements. *Catena*, 50: 329-352.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. USDA, Agriculture Research Service, Washington D.C, 58 p. (Agricultural Handbook, 735).

*Endereço dos autores:*

Marcos Roberto Pinheiro – Laboratório de Pedologia, Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, Avenida Prof. Lineu Prestes, 338, CEP 05508-080, Caixa Postal 72042, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* m3279574@usp.br

Igor André Cubateli Redivo – Departamento de Informações Ambientais – DIA, Coordenadoria de Planejamento Ambiental – CPLA, Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, Avenida Professor Frederico Hermann Junior, 345, CEP 05459-900, São Paulo, SP, Brasil. *E-mail:* igor@ambiente.sp.gov.br

*Artigo submetido em 19 de setembro de 2016, aceito em 10 de outubro de 2016.*