ANÁLISE COMPARATIVA DA EXTRAÇÃO AUTOMATIZADA DE DOLINAS A PARTIR DE
MODELOS DIGITAIS DE TERRENOSilvio Takashi HIRUMA
José Antonio FERRARI

RESUMO

As cartas topográficas de semidetalhe e detalhe (escalas 1:50.000 e 1:10.000) não representam adequadamente a complexidade da rede de drenagem e das feições morfológicas de áreas cársticas. O presente trabalho avalia a extração automatizada de dolinas, feições morfológicas típicas do carste poligonal, a partir de modelos digitais de terreno gerados de pares estereoscópicos de fotografias aéreas na escala 1:25.000 e de dados do sensor SRTM (Shuttle Radar Topography Mission/NASA) com resolução de 30 e 90 m. A área de estudo corresponde aos planaltos cársticos do Vale do Rio Ribeira de Iguape, sul do Estado de São Paulo, que compreende remanescentes importantes da Mata Atlântica e rico patrimônio espeleológico. O modelo digital de terreno obtido a partir de fotografias aéreas foi gerado pelo programa Geomatica (Módulo Ortho-Engine), utilizando parâmetros de calibração interna de câmera e pontos de controle extraídos de cartas topográficas nas escalas 1:50.000 e 1:10.000 e de GPS (Sistema de Posicionamento Global). A extração automatizada das dolinas dos modelos derivados de fotografias aéreas e dos dados SRTM foi feita em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Baseado na análise morfométrica das dolinas, os resultados foram comparados com cartas topográficas nas escalas 1:10.000 e 1:50.000 e fotointerpretação convencional. Os modelos gerados com o programa Geomatica e SRTM de 30 m de resolução detectaram várias dolinas não representadas nas cartas topográficas e no modelo SRTM de 90 m de resolução. Desse modo, quanto maior a resolução do modelo, maior a sensibilidade do método para a extração de dolinas. Comparando-se os parâmetros de área e perímetro das dolinas, os valores obtidos pelo Geomatica ficaram muito próximos aos do fotointerpretado. A utilização dos diferentes modelos mostrou-se uma importante ferramenta, que pode auxiliar nos trabalhos de fotointerpretação convencional, principalmente em regiões onde inexistem informações cartográficas de detalhe.

Palavras-chave: modelo digital de terreno, carste, dolinas, Rio Betari, Vale do Rio Ribeira de Iguape.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF AUTOMATED EXTRACTION OF DOLINES FROM DIGITAL TERRAIN MODELS. Topographic maps at semi-detailed and detailed scales (1:50,000 and 1:10,000) do not adequately represent the complexity of the drainage network and the morphological features of karstic areas. This paper evaluates the automated extraction of dolines, typical morphological features of polygonal karst, from digital terrain models generated from stereopairs of aerial photographs at the 1:25,000 scale and from SRTM (Shuttle Radar Topography Mission/NASA) sensor data with resolution of 30 and 90 m. The study area corresponds to the karst plateaus of the Ribeira do Iguape River Valley, southern São Paulo state, which contains important remnants of the Atlantic Forest and a rich speleological heritage. The digital terrain model obtained from aerial photographs was generated by the software Geomatica (Module OrthoEngine), using parameters of the internal calibration of the camera and control points extracted from topographic maps at scales of 1:10,000 and 1:50,000, and

by GPS (Global Positioning System). Automated extraction of dolines from the models generated from aerial photographs and SRTM data was made in a GIS (Geographic Information System) environment. Based on morphometric analysis, the results were compared with topographical maps at 1:10,000 and 1:50,000 and with conventional photointerpretation. The models generated by Geomatica and SRTM (30 m resolution) detected several dolines not represented in the topographic maps nor in the SRTM (90 m resolution) model, similar to the results of conventional photointerpretation. Thus, the higher the resolution, the more sensitive the method is for extracting the dolines. Comparing the area and perimeter of the dolines, the values obtained by the Geomatica software were very close to those for photointerpretation. The use of different models thus represents an important tool that can help in conventional photointerpretation, especially in regions where there is not detailed cartographic information.

Keywords: digital terrain model, karst, dolines, Betari River, Ribeira de Iguape River Valley.

1 INTRODUÇÃO

Nas regiões úmidas temperadas ou tropicais as dolinas podem, algumas vezes, ocupar todo o espaço disponível da superfície carbonática. A topografia assemelha-se a uma caixa de ovos, onde os divisores separam dolinas adjacentes e formam uma malha de polígonos irregulares. WILLIAMS (1971, 1972), em seus trabalhos realizados em Papua Nova Guiné, foi o primeiro a descrever este tipo de paisagem, que denominou de carste poligonal (FORD & WILLIAMS 2007).

No Brasil, estudos desenvolvidos por KARMANN (1994), FERRARI *et al.* (1998) e HIRUMA *et al.* (2007) apresentam mapeamentos e análises morfométricas do carste poligonal das faixas carbonáticas das bacias dos rios Ribeira de Iguape e Paranapanema.

A complexidade da rede hidrográfica (presença de rios efêmeros e vales cegos) e das feições morfológicas de um carste poligonal (dolinas e sumidouros) (Figura 1) não é representada de forma adequada em cartas topográficas de semidetalhe (1:50.000) ou de detalhe (1:10.000), com exceção das dolinas de grandes dimensões e amplitudes altimétricas. A imperfeição destes documentos não permite uma caracterização adequada da superfície cárstica e, conseqüentemente, do seu padrão de recarga hidrológica. Para contornar essa deficiência das cartas topográficas, a delimitação das dolinas é obtida por fotointerpretação convencional, o que exige uma especial atenção do fotointérprete. Ressalta-se, ainda, que o mapeamento dessas feições depende da escala de trabalho, ou seja, quanto maior a escala de observação, maior será o número de feições mapeadas; em campo, por exemplo, é possível identificar feições métricas não distinguíveis em fotografias aéreas.

Os avanços geotecnológicos têm facilitado o acesso a modelos digitais de terreno com diferentes resoluções espaciais e a algoritmos que automatizam a extração das feições hidrológicas. Modelos digitais do sensor SRTM (Shuttle Radar Topography Mission/NASA), com resoluções espaciais de 30

FIGURA 1 – Feições cársticas de superfície comumente não representadas em cartas topográficas. A) Dolina. A seta indica ponto de absorção de água (sumidouro). B) Rio efêmero em área cárstica.

e 90 m, disponibilizados em nível mundial pelo USGS Eros Data Center, vêm sendo utilizados em estudos geomorfológicos e morfométricos regionais (HIRUMA & RICCOMINI 1999, GROHMANN 2004, GROHMANN *et al.* 2007, entre outros). Por outro lado, modelos digitais de terreno derivados de imagens LiDAR (cf. CHANG *et al.* 2005, CUNNINGHAM *et al.* 2006) e de pares estereoscópicos IKONOS (TOMÁS *et al.* 2009) e RADARSAT-1 (PARADELLA *et al.* 2003), que possuem melhor resolução espacial, podem ser utilizados em estudos geomorfológicos de maior detalhe.

O presente trabalho avalia a extração auto-

matizada de dolinas de modelos digitais de terreno obtidos de estereopares de fotografias aéreas analógicas na escala 1:25.000 (Levantamento aerofotogramétrico da Secretaria da Agricultura/TERRAFOTO, 1972), com resolução espacial inferior a 1 m, e de dados do sensor SRTM, com resoluções de 30 e 90 m. Os resultados foram comparados com mapas de dolinas cartografadas nas folhas topográficas 1:50.000 e 1:10.000 e fotointerpretadas na escala 1:25.000.

A área escolhida para a geração dos modelos está situada nos planaltos cársticos do Rio Betari, margem esquerda do Rio Ribeira de Iguaçu (SP) (Figura 2), em grande parte inserida nos

FIGURA 2 – Mapa hipsométrico do Vale do Rio Betari, com destaque para as faixas de rochas carbonáticas. Abaixo, vista do Vale do Rio Betari, caracterizado pelas vertentes íngremes e densa cobertura vegetal da Mata Atlântica. Coordenadas UTM (SAD 69), zona 22J, Meridiano Central 51°.

limites do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR). Essa área abriga remanescentes importantes da Mata Atlântica e rico patrimônio espeleológico (KARMANN & SANCHEZ 1979, KARMANN & FERRARI 2002). Do ponto de vista geomorfológico, a região insere-se na Serrania do Ribeira (Província Costeira), caracterizada por um relevo serrano profundamente dissecado, em função do nível de base regional dado pelo mar (PONÇANO *et al.* 1981).

O relevo sobre as rochas carbonáticas é caracterizado pela presença do carste poligonal; o escoamento superficial de caráter autóctone e alóctone é absorvido por sumidouros localizados, respectivamente, nos fundos de dolinas e vales cegos. As amplitudes topográficas dessas dolinas podem chegar até centenas de metros no PETAR e contrastam com as demais áreas cársticas do Brasil.

O mapeamento de detalhe das feições cársticas de superfície é essencial para o melhor entendimento da dinâmica hidrológica dos sistemas cársticos e subsidia diretamente o planejamento do uso e ocupação do solo e a proteção de cavernas e dos recursos hídricos subterrâneos dessas áreas.

2 MÉTODOS

O modelo digital de terreno derivado dos estereopares de fotografias aéreas foi gerado pelo programa Geomatica 10.3.2 (PCI Geomatics), módulo OrthoEngine (fotografias aéreas), utilizando os parâmetros de calibração internos da câmera e pontos de controle obtidos a partir de documentos cartográficos e medidas com um aparelho de GPS (Sistema de Posicionamento Global), marca Garmin eTrex Vista.

A área de estudo é recoberta por 39 fotografias aéreas (Figura 3) na escala 1:25.000 (Secretaria da Agricultura do Estado de São Paulo, 1972), que foram escanizadas com resolução de 600 dpi e importadas no programa Geomatica para inserção dos parâmetros de calibração interna da câmera fotográfica. O equipamento utilizado no levantamento foi uma WILD RC8, com distância focal de 152,32 mm. Por se tratar de um levantamento aerofotogramétrico da década de 70, não foi possível recuperar os dados referentes a coordenadas de marcas fiduciais. No entanto, o programa Geomatica permite estimar o sistema de referência a partir das distâncias das marcas fiduciais (PCI GEOMATICS ENTERPRISES INC. 2005).

A correlação entre as coordenadas do terreno (x, y, elevação) e a fotografia aérea (linhas, pixels) foi estabelecida por pontos de controle (*ground*

control points) selecionados nas cartas topográficas de escala 1:10.000 do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo - IGC (ano 1982), o melhor produto cartográfico existente para a região. Considerando que a porção norte da área não é recoberta por esse levantamento cartográfico, utilizou-se pontos extraídos de cartas topográficas na escala 1:50.000 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE) e medidas de posição com um aparelho GPS. Ressalta-se a dificuldade para se obter pontos de controle confiáveis, em virtude da densa cobertura vegetal e das escassas vias de acesso. Procurou-se selecionar pontos de controle em diferentes altitudes e bem distribuídos nas fotografias aéreas (Figuras 3, 4); e, quando possível, também nas áreas de sobreposição das faixas de sobrevoos. Pontos de ligação (*tie points* – x, y) foram selecionados para refinar o modelo (Figuras 3, 4). Pontos de controle e de ligação com valores de resíduo altos foram descartados (Tabela 1) com a finalidade de refinar o modelo.

TABELA 1 – Sumário dos valores de resíduos para as 39 fotografias aéreas (RMS, em metros).

	Pontos de controle	Pontos de ligação
X RMS	12,67	15,60
Y RMS	1,36	1,63
Total	414	326

O modelo digital de terreno com resolução espacial de 10 m foi elaborado a partir de pares de imagens epipolares, que correspondem a estereopares reprojetados com a mesma orientação – nesse caso, feições coincidentes nas imagens aparecem ao longo de um mesmo eixo X (PCI GEOMATICS ENTERPRISES INC. 2005). Artefatos (pixels com valores incorretos) presentes no modelo foram excluídos; após essa edição preliminar o modelo foi reinterpolado.

Finalizada a elaboração do modelo efetuou-se a extração automatizada das dolinas em ambiente SIG com o programa ArcGIS (Figura 5). O mesmo procedimento foi utilizado para extração das dolinas nos modelos digitais de terreno do sensor SRTM com resoluções de 90 m e 30 m. Esses modelos são disponibilizados pelo USGS (United States Geological Survey) / NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) / NASA (National Aeronautics and Space Administration) no *site* <http://earthexplorer.usgs.gov> (USGS Earth Resources Observations and Science Center, Sioux Falls, South Dakota).

FIGURA 3 – Articulação das fotografias aéreas e das faixas de sobrevôo na área de estudo com distribuição dos pontos de controle (em azul) e de ligação (em vermelho). Coordenadas UTM (SAD 69), zona 22J, Meridiano Central 51°.

A aferição dos resultados baseou-se no mapa de dolinas obtido por fotointerpretação convencional, utilizando-se o mesmo levantamento aerofotogramétrico na escala 1:25.000. Esse procedimento ainda é o mais eficaz para estudos geomorfológicos do carste. Ressalta-se, no entanto, que há um grau de subjetividade inerente à interpretação do cartógrafo, principalmente em áreas de densa cobertura vegetal, como o PETAR.

Os resultados gerados pelos diferentes modelos foram comparados a partir da análise de parâmetros morfométricos (área, perímetro, amplitude topográfica e declividade) das dolinas e correlações espaciais dos mapas em SIG. As dolinas representadas nas cartas topográficas 1:50.000 (IBGE) e 1:10.000 (IGC) foram delimitadas manualmente, com base na análise da rede de drenagem e da topografia. Trabalhos de campo permitiram aferir somente parte das dolinas mapeadas, em virtude das dificuldades de acesso nas áreas de densa cobertura vegetal e de alta declividade.

Um setor da região carbonática denominada Areias (Figuras 2, 7), na margem direita do Rio

FIGURA 4 – Distribuição dos pontos de controle (em azul) e de ligação (em vermelho) em uma fotografia aérea (escala 1:25.000).

FIGURA 5 – Etapas para extração automatizada de dolinas do modelo digital do terreno com o programa ArcGIS. (A) Modelo digital de terreno gerado pelo programa Geomatica. (B) Geração do mapa de direção de fluxo de escoamento (*flow direction*). (C) A partir do mapa anterior, obteve-se a imagem *raster* das dolinas. (D) Por último, realizou-se a vetorização das dolinas. Coordenadas UTM (SAD 69), zona 22J, Meridiano Central 51°.

Betari, que apresenta alta densidade de dolinas e sumidouros, foi selecionado como área-teste para comparação dos resultados.

3 RESULTADOS

O modelo digital de terreno com resolução espacial de 10 m, derivado das fotografias aéreas na escala 1:25.000 (Figura 6), apresenta alguns artefatos (pixels com valores incorretos), principalmente nas zonas de transição das faixas de sobrevôo. Isso foi causado, provavelmente, pela imprecisão na escolha de pontos de controle nas áreas com densa cobertura vegetal e alta declividade. Durante a edição do modelo procurou-se minimizar tais problemas, selecionando as áreas

de sobreposição dos estereopares com menor quantidade de artefatos.

A figura 7 e a tabela 2 ilustram, respectivamente, os mapas de dolinas e os parâmetros morfométricos do setor escolhido da área carbonática Areias, extraídos a partir das diferentes fontes.

Observa-se que quanto maior a resolução do modelo, maior a sensibilidade para a extração de dolinas (Tabela 2). Considerando área e perímetro, os valores obtidos pelo modelo Geomatica ficam muito próximos àqueles da fotointerpretação.

A inspeção visual dos mosaicos da figura 7 sugere que o resultado da extração automatizada no modelo SRTM - 90 m apresenta padrão próximo às delimitações de dolinas nas cartas topográficas 1:10.000 e 1:50.000, ao passo que as extrações ob-

tidas no SRTM - 30 m e no modelo Geomatica apresentam padrão similar àquele da fotointerpretação convencional. A análise de agrupamento, baseada no número de dolinas e nos parâmetros “área” e “perímetro” (Tabela 2), confirma a inspeção visual. O dendrograma de agrupamento, considerando o vizinho mais próximo e a distância euclidiana média padronizada (Figura 8), separa claramente os dois grupos.

O primeiro grupo (parte superior do dendrograma) é composto pelo conjunto de dolinas extraído por fotointerpretação e dos modelos Geomatica e SRTM - 30 m, com maior similaridade entre os dois primeiros. Os modelos Geomatica e o SRTM - 30 m identificaram várias dolinas não representadas nos mapas topográficos e no modelo SRTM - 90 m; no caso específico do primeiro, os resultados quase se equiparam àqueles da fotointerpretação convencional (Figura 7, Tabela 2). Em ambos os casos foi possível identificar dolinas com menores área e amplitude topográfica.

O segundo grupo (parte inferior do dendrograma) é composto pelo conjunto de dolinas obti-

dos nas cartas 1:50.000, 1:10.000 e SRTM - 90 m, com maior similaridade entre os dois últimos. Nesse caso, em geral, apenas as dolinas com maiores área e amplitude topográfica estão representadas (Tabela 2). De modo geral, o dendrograma mostra que os elementos do grupo 2 são mais similares que os elementos do grupo 1.

Uma vez que os conjuntos de dolinas obtidos pelo SRTM - 30 m e Geomatica apresentaram maior similaridade com a fotointerpretação convencional, os três mapas foram analisados para avaliar o grau de correlação espacial. O valor do coeficiente de correlação (R) é uma estimativa do grau de superposição dos polígonos (dolinas) das diferentes fontes. Para esse procedimento, foram geradas imagens dos mapas, cujos valores dos pixels correspondiam à área ou ao perímetro das dolinas. A correlação foi limitada a uma área de intersecção das envoltórias dos conjuntos de polígonos extraídos das diferentes fontes. Os resultados mostram que as dolinas extraídas pelo Geomatica são as que apresentam maior associação com as dolinas fotointerpretadas (Tabela 3).

TABELA 2 – Parâmetros morfométricos das dolinas de um setor da área carbonática Areias, extraídos a partir das diferentes fontes.

Parâmetros morfométricos	Método/Fonte					
	Fotointerpretação	Cartas Topográficas		Extração automatizada a partir de MDT		
		1:50.000 (IBGE)	1:10.000 (IGC)	SRTM (90 m)	SRTM (30 m)	Geomatica (10 m)
Área média (km ²)	0,071	0,371	0,316	0,559	0,125	0,087
Área máxima (km ²)	1,071	0,756	1,022	2,110	0,782	0,784
Área mínima (km ²)	0,004	0,109	0,064	0,056	0,010	0,005
Perímetro médio (km)	0,974	2,659	2,337	2,910	1,399	1,166
Perímetro máximo (km)	5,027	3,969	5,024	6,097	4,191	4,565
Perímetro mínimo (km)	0,261	1,441	0,934	1,002	0,478	0,310
Amplitude topográfica média (m)	-	130,180	122,460	121,115	89,840	81,240
Amplitude topográfica máxima (m)	-	187,190	189,880	292,830	336,630	328,830
Amplitude topográfica mínima (m)	-	84,560	65,400	22,460	8,710	9,910
Declividade média (graus)	-	14,690	17,380	9,740	13,420	15,320
Número de dolinas	141	12	16	16	82	125

FIGURA 6 – Modelo digital de terreno gerado pelo programa Geomatica com resolução de 10 m, utilizando fotografias aéreas na escala 1:25.000 (visualização no programa Surfer). Em destaque, um setor da área carbonática Areias, caracterizada por elevada densidade de dolinas e sumidouros, mapeados por fotointerpretação e trabalhos de campo. Coordenadas UTM (SAD 69), zona 22J, Meridiano Central 51°.

TABELA 3 – Correlação espacial entre as dolinas fotointerpretadas e as extraídas a partir do modelo Geomatica e SRTM - 30 m.

	Coeficiente de correlação (R)	
	Geomatica área	SRTM - 30 m área
Fotointerpretação área	77%	71%
	Coeficiente de correlação (R)	
	Geomatica perímetro	SRTM - 30 m perímetro
Fotointerpretação perímetro	80%	75%

Ressalta-se, no entanto, que o processo de extração automatizada identificou dolinas falsas em áreas não-carbonáticas, principalmente em vales encaixados e com densa cobertura vegetal, como, por exemplo, ao longo do Rio Betari. É possível eliminar essas inconsistências, aplicando ferramentas de SIG para correção hidrológica. No entanto, isso não pode ser realizado de forma generalizada, uma vez que esse procedimento pode interferir na delimitação de dolinas de baixa amplitude topográfica em áreas de relevo mais plano.

FIGURA 7 – Mapas de dolinas de um setor da área carbonática Areias, gerados a partir das diferentes fontes. (A) Carta topográfica 1: 50.000 (IBGE), (B) Carta topográfica 1: 10.000 (IGC), (C) Modelo digital de terreno SRTM - 90 m, (D) Modelo digital de terreno SRTM - 30 m, (E) Fotointerpretação convencional na escala 1:25.000, (F) Modelo digital de terreno gerado a partir de fotografias aéreas na escala 1: 25.000 no programa Geomatica. De fundo nas imagens, ortofoto do projeto Mapeia SP. Coordenadas UTM (SAD 69), zona 22J, Meridiano Central 51°.

FIGURA 8 – Dendrograma de agrupamento considerando o vizinho mais próximo e a distância euclidiana média padronizada dos conjuntos de dolinas obtidos a partir das diferentes fontes. Variáveis consideradas: número de dolinas; áreas média, mínima e máxima; perímetros médio, mínimo e máximo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a presente análise, verifica-se que a fotointerpretação convencional em escala de detalhe ainda é essencial para estudos dessa natureza. No entanto, os resultados obtidos pelo programa Geomatica e pelo modelo SRTM - 30 m são promissores e podem refinar a fotointerpretação, indicando alvos para checagem em trabalhos de campo. O modelo SRTM - 90 m mostrou-se um produto adequado para estudos de caráter regional. Os modelos Geomatica e SRTM - 30 m identificaram várias dolinas não representadas nos mapas topográficos, muitas vezes equiparando-se aos resultados da fotointerpretação convencional.

Essas ferramentas mostram-se muito importantes em áreas carentes de informação cartográfica de detalhe, ou, para casos específicos, como o estudo do carste.

5 AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo Auxílio à Pesquisa (Processo 09/05115-5). Ao Instituto Geográfico e Carto-

gráfico pela cessão das cartas topográficas, escala 1:10.000, em formato digital. À Threetek pelo auxílio nas discussões técnicas. Aos relatores da Revista, pelas sugestões apresentadas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHANG, K.; TABOADA, A.; CHAN, Y. 2005. Geological and morphological study of the Jiufengershan landslide triggered by the Chi-Chi Taiwan earthquake. *Geomorphology*, 71(3-4): 293-309.
- CUNNINGHAM, D.; GREBBY, S.; TANSEY, K.; GOSAR, A.; KASTELIC, V. 2006. Application of airborne LiDAR to mapping seismogenic faults in forested mountainous terrain, southeastern Alps, Slovenia. *Geophysical Research Letters*, 33(20): L20308.
- FERRARI, J.A.; HIRUMA, S.T.; KARMANN, I. 1998. Caracterização morfométrica de uma superfície cárstica do Vale do Ribeira, São Paulo (Núcleo Caboclos - PETAR). *Revista do Instituto Geológico*, 19 (1/2): 9-17.

- FORD, D.; WILLIAMS, P.W. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. Wiley, Chichester, 576 p.
- GROHMANN, C.H. 2004. Morphometric analysis in Geographic Information Systems: applications of free software GRASS and R. *Computers & Geosciences*, 30(9-10): 1055-1067.
- GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; ALVES, F.M. 2007. SRTM-based morphotectonic analysis of the Poços de Caldas Alkaline Massif, southeastern Brazil. *Computers & Geosciences*, 33: 10-19.
- HIRUMA, S.T.; RICCOMINI, C. 1999. Análise morfométrica em neotectônica: o exemplo do Planalto de Campos do Jordão, SP. *Revista do Instituto Geológico*, 20(1-2): 5-19.
- HIRUMA, S.T.; FERRARI, J.A.; AMARAL, R.; HONORIO, R.F. 2007. Mapeamento e caracterização de feições cársticas de superfície na Faixa Itaiacoca nas regiões de Nova Campina e Bom Sucesso de Itararé, SP/PR. *Revista do Instituto Geológico*, 27-28 (1/2): 1-12.
- KARMANN, I. 1994. Evolução e dinâmica atual do sistema cárstico do alto vale do rio Ribeira de Iguape, sudeste do Estado de São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 228 p.
- KARMANN, I.; FERRARI, J.A. 2002. Carste e cavernas do Parque Estadual Turístico do Alto Ribeira (PETAR), SP: Sistemas de cavernas com paisagens subterrâneas únicas. In: C. Schobbenhaus, D.A. Campos, E.T. Queiroz, M. Winge, M.L.C. Berbert-Born (ed.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, DNPM/SIGEP, p. 401-414.
- KARMANN, I.; SANCHEZ, L.E. 1979. Distribuição das rochas carbonáticas e províncias espeleológicas do Brasil. *Espeleotema*, 13:105-167.
- PARADELLA, W.R.; CECARELLI, I.C.F.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C.G.; COTTINI, C.P.; OKIDA, R. 2003. Produção de carta topográfica por estereoscopia de alta resolução do RADARSAT-1 integrada com dados TM-LANDSAT 5: uma avaliação para terrenos planos na Floresta Nacional de Tapajós (PA). *Revista Brasileira de Geociências*, 33(2 - suplemento): 99-110.
- PCI GEOMATICS ENTERPRISES INC 2005. Geomatica 10. OrthoEngine® User Guide. PCI Geomatics Enterprises Inc., Richmond Hill, Ontario, Canada, 172 p.
- PONÇANO, W.L., CARNEIRO, C.D.R., BISTRICHI, C.A., ALMEIDA, F.F.M., PRANDINI, F.L. 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 2 v. (Monografias).
- TOMÁS, L.R.; OLIVEIRA, C.G.; FONSECA, L.M.G.; ALMEIDA, C.M. 2009. Avaliação da acurácia de modelos digitais de superfícies gerados a partir de um estereopar de imagens IKONOS. In: INPE, SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14, Natal, *Anais*, 1897-1903.
- WILLIAMS, P.W. 1971. Illustrating morphometric analysis of karst with examples from New Guinea. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge*, 15: 40-61.
- WILLIAMS, P.W. 1972. Morphometric analysis of polygonal karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin*, 83: 761-796.

Endereço dos autores:

Silvio Takashi Hiruma e José Antonio Ferrari – Instituto Geológico, Secretaria de Estado de Meio Ambiente/SP, Rua Joaquim Távora, 822, Vila Mariana, CEP: 04015-011, São Paulo, SP, Brasil. E-mails: sthiruma@gmail.com, ferrari.ig2@gmail.com.

Artigo submetido em 15 de março de 2015, aceito em 21 de maio de 2015.