

Trajetórias do rio Capivari: implicações de um impacto meteorítico na drenagem no reverso da Serra do Mar, São Paulo, Brasil¹

André Henrique Bezerra dos Santos - Universidade de São Paulo, Graduação (andresantos@usp.br)

Déborah de Oliveira - Universidade de São Paulo, Professora Doutora (debolive@usp.br)

Abstract

The Capivari river, located between the crater of Colônia and the scarp of Serra do Mar, at the south side of São Paulo municipality, has changed its course several times since the area has been hit by a meteoritic impact in the Pliocene. From hypsometric and geologic maps analysis and observation of drainage patterns in the area, we propose that the formation of the impact crater might have induced a diversion in the trajectory of Capivari river towards Embu-Guaçu drainage basin. This westward diversion is suggested by the topographic continuity of a valley that is shared by both drainage basins in the present, but may have been cut by a continuous stream. The formation of concentric rings under the process of impact cratering and the formation of zones of weakness in rocks due to the impact would explain this diversion. In a later event, the trajectory of Capivari river may have been modified again, southeasterwards to the coast. This second diversion may be contemporary to the set of fluvial captures that follows the regression of the fault-line scarp of Serra do Mar.

Keywords: impact crater, fluvial capture, drainage basin, Serra do Mar

Resumo

O rio Capivari, localizado entre a Cratera de Colônia e a escarpa da Serra do Mar, na zona sul do município de São Paulo, alterou seu curso diversas vezes desde que a área foi atingida por um impacto meteorítico no Plioceno. A partir da análise de cartas hipsométrica e geológica e da observação dos padrões da rede de drenagem na região, nota-se que a formação dessa cratera de impacto teria provocado um desvio na trajetória do Capivari. Esse desvio para oeste é sugerido pela continuidade topográfica em um vale que hoje se encontra dividido entre as duas bacias, mas que deve ter sido escavado pela ação de um rio contínuo. A formação de anéis soerguidos sob processo de *impact cratering* e a formação de linhas de fraqueza devido ao impacto são apontadas como hipóteses para explicar este evento. Em um segundo momento, a trajetória do Capivari teria sido novamente modificada, desta vez para sudeste em direção ao litoral. Esse segundo desvio é relacionável ao conjunto de capturas fluviais que acompanha a regressão da escarpa da Serra do Mar para o interior do continente.

Palavras-chave: cratera de impacto; captura fluvial; bacia de drenagem; Serra do Mar

1. Introdução

A escarpa da Serra do Mar representa importante divisor de águas entre as bacias hidrográficas voltadas para o rio Paraná e as voltadas para o litoral. Parcela significativa desses últimos atravessa a escarpa ao longo de trechos encachoeirados, de alta energia, após coletarem águas de sub-bacias que se encontram no planalto. O rio Capivari, objeto deste estudo, encontra-se em situação semelhante. Suas cabeceiras se localizam no reverso da Serra

¹ Trabalho realizado a partir de Iniciação Científica financiada pelo Programa Ensinar com Pesquisa, da Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo.

do Mar e o sentido inicial de seu curso é para o interior do planalto. Após drenar uma área de aproximadamente 200 km², ao longo de um trajeto bastante irregular, o rio se volta para a escarpa e realiza sua travessia, alcançando em seguida a planície costeira, onde encontra o Ribeirão Branco, canal que desemboca na enseada de Itanhaém.

Capturas fluviais têm sido apontadas como as principais responsáveis por tais situações. Apesar de constituir um dos principais processos estruturadores de bacias de drenagem, as capturas fluviais têm recebido ainda pouca atenção por parte dos pesquisadores brasileiros. O recuo da escarpa da Serra do Mar ao longo do Cenozóico foi acompanhado do recuo dos divisores de água para o interior do planalto, implicando na incorporação de novas áreas de drenagem para as bacias litorâneas em detrimento das bacias do planalto.

Neste estudo parte-se da hipótese apontada por Ab'Sáber (1957) de que o Capivari dirigia-se para o interior e que passou a drenar para o litoral após ter sido capturado em algum momento do Plioceno ou posteriormente. O que se observa de singular neste caso em relação aos demais no reverso da Serra do Mar é a presença de uma provável cratera de impacto em uma posição na qual possivelmente se encontrava o antigo leito do rio. Trata-se da cratera de Colônia, provável cratera de impacto formada entre o Oligoceno a Plioceno, conforme Riccomini *et al.* (1991), que se encontra próxima da inflexão do Capivari.

Este trabalho tem como objetivo discutir a possível relação existente entre a gênese da Cratera de Colônia e as alterações do curso do rio Capivari. Ressalta-se a formação de um anel externo à cratera e de zonas de fraqueza como possíveis indutores do desvio do rio Capivari de seu curso original.

2. Referencial Teórico

A interpretação da geomorfologia da área analisada depende do entendimento de ao menos dois conceitos básicos: formação de crateras de impacto, ou *impact cratering*, e a ocorrência de capturas fluviais. Os impactos meteoríticos têm recebido crescente atenção por parte das geociências à medida que novas estruturas formadas por esse processo são reconhecidas. De acordo com o *Earth Impact Database* (2008), são reconhecidas 174 crateras de impacto na Terra. Na geomorfologia são poucas as referências a esses eventos. Thornbury (1956), ao tratar da classificação dos processos geomórficos em endógenos e exógenos, reconhece que impactos meteoríticos não se enquadram satisfatoriamente em ambas as categorias, classificando-os como processos extraterrestres.

Crateras de impacto constituem unidades morfoestruturais sem vínculo genético com o relevo do entorno e sua formação se processa por meio de deformações, falhamentos e metamorfismo no embasamento. Tais unidades morfoestruturais, uma vez formadas, são retrabalhadas pelos processos exógenos, com a degradação das partes mais elevadas e agradação nas mais rebaixadas, o que eventualmente leva a seu nivelamento topográfico.

O termo “astroblema” tem sido frequentemente utilizado para designar a cratera de Colônia, bem como grande parte das crateras de impacto conhecidas. Considera-se tal uso inadequado, uma vez que Dietz (1961) concebeu este conceito para descrever os grandes impactos esterilizadores da fase cósmica da Terra e também devido à implicação genética do termo, impróprio para a descrição de impactos ainda não confirmados.

Melosh (1989) menciona a existência de três estágios na formação de crateras de impacto. O estágio inicial, de “contato e compressão”, estende-se do primeiro contato do projétil com a superfície até a pulverização do projétil e dura menos de 1 segundo. O impacto causa compressão, aceleração e aquecimento do material atingido, com transferência de grande parte da energia cinética do meteorito para o alvo. Ocorre, nessa fase, a geração de uma onda de choque que excede largamente a resistência dos materiais envolvidos, os quais sofrem vaporização, fusão e formação de fraturas, da porção mais próxima à mais distante do local do impacto. No estágio de “escavação”, que se estende de segundos a minutos, há a ação do fluxo de escavação, que efetivamente abre a cratera. Nesse estágio, a onda de choque propaga-se para todas as direções no embasamento, seguida por uma onda de rarefação, que submete as rochas a baixíssimas pressões após terem passado por altíssimas pressões. O lançamento de detritos do local do impacto forma uma cortina de *ejecta*, que se deposita no entorno. Ao final deste estágio, forma-se uma “cratera transitória”, com diâmetro maior que a profundidade, descrita geometricamente como um parabolóide de revolução. Esta cratera transitória é modificada no “estágio de modificação”, no qual há a diferenciação entre crateras simples e complexas mediante colapso gravitacional. Enquanto as crateras simples possuem formato de “tigela”, as crateras complexas apresentam pico central, formadas pelo ricocheteamento do material litológico fluidizado pela ação do impacto.

A presença de estratificação ou de fraturas no substrato pode modificar a morfologia da cratera. Onde há uma camada de menor resistência sobre uma de maior resistência, como no caso de coberturas sedimentares sobre rochas cristalinas, o fluxo de escavação possui maior dificuldade de penetrar na camada subjacente, levando à formação de

uma cratera no interior de outra, conforme Melosh (1989). O quociente entre dimensões do anel externo e interno é tanto maior quanto menor a espessura do pacote sedimentar em relação à cratera. A subsequente ação erosiva pode ocasionar a formação de anéis concêntricos, com o entalhamento do patamar intermediário entre os dois por rios em padrão aproximadamente anelar, acompanhando zonas de fraqueza formadas no impacto. Já a presença de fraturas anteriores ao impacto pode induzir à formação de uma crista de formato aproximadamente poliédrico, como na cratera Barringer, no Arizona.

Outro fenômeno aqui abordado é o de capturas fluviais. Esses eventos são definidos pelo desvio de canais fluviais entre bacias hidrográficas, com a expansão de uma bacia em detrimento da outra. De acordo com Christofolletti (1981), são classificadas em capturas: por absorção, quando há captação de águas de um rio por outro adjacente devido ao alargamento do vale; por aplainamento lateral, quando o rio principal corta o interflúvio que o separa do tributário, causando o abandono de um trecho deste último; por transbordamento, quando um curso de água com elevada carga de sedimentos entulha seu leito e eleva-o a um nível superior aos dos colos mais baixos que separam seu vale dos adjacentes; subterrânea, em regiões cársticas; e por recuo de cabeceiras, quando dois rios se localizam em altitudes diferentes e os tributários do canal de menor altitude realizam erosão regressiva mais rapidamente que os do canal de maior altitude, capturando o curso d'água em nível mais alto. Este último é bastante comum em regiões como a Serra do Mar, onde ocorre progressiva regressão da escarpa acompanhada de capturas fluviais.

Small (1970) considera que são evidências de capturas fluviais: cotovelo de captura (inflexão formada no local da captura), vale exageradamente grande ou pequeno em relação ao curso fluvial em seu interior, vale seco (*wind gap*, em inglês, trecho do antigo vale, escavado por um rio contínuo, que passa a ser divisor de águas entre a bacia do canal decapitado e a do capturado), rupturas no perfil longitudinal dos rios envolvidos e similitude entre as cascalheiras do rio decapitado e do trecho capturado.

3. Procedimentos metodológicos

As hipóteses de trabalho foram estabelecidas a partir das contribuições de Ab'Sáber (1957), Oliveira (2003) e Oliveira & Queiroz (2007) e de Riccomini *et al.* (2004) para o conhecimento da geomorfologia, da drenagem e da geologia da região, bem como a contribuição de Melosh (1989) acerca dos mecanismos formadores de crateras de impacto.

A consulta a material cartográfico se fez necessária para a observação das possíveis inter-relações entre a dinâmica fluvial da área, a formação da Cratera de Colônia e a ação da neotectônica. Utilizou-se a base cartográfica do IBGE em escala 1:50.000, disponível na *Internet*, para a elaboração de carta hipsométrica da região que compreende as bacias hidrográficas do rio Capivari e do rio Embu-Guaçu, para a análise de traços no relevo que podem ser indicativos de trajetórias pretéritas do rio Capivari.

O uso de carta geológica também foi necessário para observação do condicionante estrutural do relevo e da drenagem, como a presença de falhas, fraturas e a distribuição de unidades litológicas. Tais dados geológicos foram inseridos na carta hipsométrica para facilitar a visualização desses condicionantes. Para evitar um “congestionamento” de dados na carta hipsométrica, apenas os rios principais foram inseridos.

4. Resultados

A bacia hidrográfica do rio Capivari estende-se por cerca de 200 km² em uma área de relevo dissecado no reverso da Serra do Mar, na região sul do município de São Paulo. Encontra-se na borda do Planalto Atlântico, unidade morfoescultural esculpida sobre rochas cristalinas pré-cambrianas geradas na orogenia brasiliana (Ross & Moroz, 1997). As litologias predominantes são gnaisses na área do Capivari e micaxistos no entorno e a norte da cratera, bem como coberturas sedimentares terciárias e quaternárias em ocorrências isoladas. Falhamentos de extensão regional formadas na orogenia e reativadas na tectônica cenozóica estendem-se pelo planalto, levando a lineamentos topográficos de direção predominante leste-nordeste. Oliveira (2003) destaca a importância da tectônica na gênese do relevo na região, responsável pela formação de patamares escalonados entre os quais se instalou a drenagem.

Tanto o rio Capivari quanto seus principais tributários apresentam evidências de controle estrutural: diversos canais possuem paralelismo e linearidade e são comuns inflexões em ângulos retos. Esse padrão é mais característico na porção norte da bacia. Na porção sul o controle estrutural é menos evidente, com padrão da drenagem mais dendritificado. Os topos dos morros baixos atingem de 820 a 840 metros na porção oeste e raramente ultrapassam 800 metros de altitude na porção leste da bacia hidrográfica do Capivari.

O alto curso do Capivari, de sentido sul-norte, localiza-se na porção oeste da bacia, enquanto que seu baixo curso, de sentido norte-sul, localiza-se na porção leste, o que justifica as diferenças observadas nos níveis dos topos dos morros. O médio curso do rio, no centro da

bacia, apresenta percurso bastante sinuoso com sentido geral oeste-leste. A trajetória do rio apresenta diversas inflexões em todo o percurso e a mais evidente marca a transição entre o alto e o médio curso, na qual há uma curva abrupta de aproximadamente 130° para a direita, com mudança de sentido de sul-norte para noroeste-sudeste.

Observa-se importante alteração na largura do vale do Capivari após esta inflexão, que se torna mais estreito. Enquanto que no alto curso o referido vale possui cerca de 40 metros de profundidade por 300 metros de largura, no médio curso a profundidade atinge 80 metros e a largura é raramente superior a 200 metros. Ao contrário do que normalmente se observa em bacias hidrográficas, o relevo desta bacia é mais dissecado a jusante que a montante, devido à presença da escarpa da Serra do Mar em seu trecho final e à erosão regressiva dos canais do sistema litorâneo para o interior.

Nota-se uma aparente continuidade pretérita do rio Capivari para norte da inflexão. Conforme se observa na Fig. 1, o vale do Capivari e o vale de um dos tributários do Embu-Guaçu parecem formar um único vale topograficamente contínuo. A drenagem no interior deste vale divide-se entre duas bacias hidrográficas: a bacia do Embu-Guaçu e a bacia do Capivari. A aparente continuidade do vale sugere que o mesmo teria sido gerado por um único rio e não pela ação simultânea da erosão regressiva em duas bacias em lados opostos do divisor de águas, o que seria muito improvável. O divisor de águas teria surgido posteriormente à formação do vale, em decorrência de um desvio no curso do Capivari.

Ressalta-se que tanto o alto curso do Capivari quanto o Embu-Guaçu possuem sentido predominante sul-norte, bem como grande parte dos principais rios da região. Considerando-se a região teria recoberta por sedimentos da Formação Resende à época do impacto, conforme Ab'Sáber (1957) e Riccomini *et al.* (2004), esses rios seriam “superimpostos”, desenvolvidos sobre os sedimentos mas que em seguida passaram a entalhar no cristalino. A não adaptação desses rios às estruturas e a presença de resquícios da bacia sedimentar na região sustentam a hipótese da superimposição dos rios da região.

Considerando-se a origem da cratera de Colônia por impacto meteorítico, conforme Riccomini *et al.* (1991), sua formação teria ocasionado modificações na drenagem da região em função de deformações na superfície e deposição de materiais de ejecta. Observa-se que a cratera posiciona-se a norte da inflexão do Capivari para sudeste. Visto que atualmente este rio apresenta traçado sul-norte até a referida inflexão, seu traçado possivelmente se estendia para norte no passado, indo de encontro com o rio Pinheiros, até a

ocasião do impacto. Ab'Sáber (1957), ao descrever a “anomalia” do Capivari, sugere que ela tenha sido provocada por um desvio ocorrido no Plioceno, embora não mencione qualquer tipo de relação genética com a cratera de Colônia. Essa idade também é sugerida para a formação da estrutura de impacto, que seria pliocênica a oligocênica (Riccomini *et al.*, 1991).

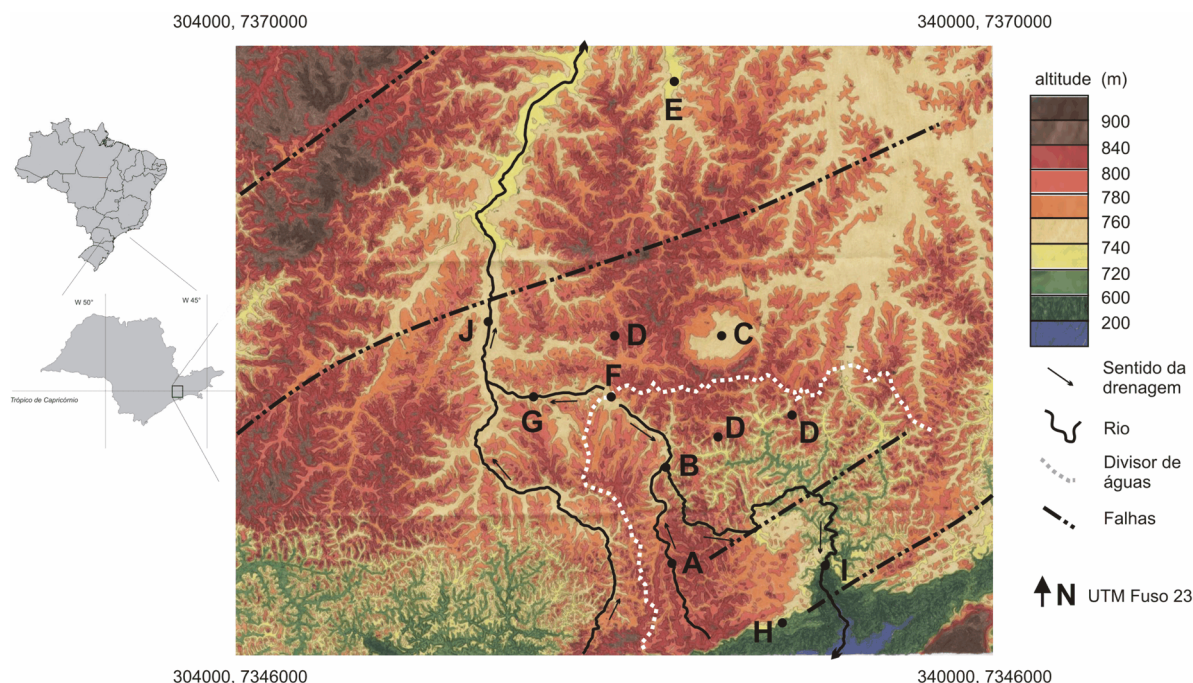


Fig. 1. Carta hipsométrica da região da cratera de Colônia e das bacias hidrográficas do rio Capivari e do rio Embu-Guaçu, a partir da base topográfica do IBGE em escala 1:50.000 disponível na Internet. Pontos no mapa: A: alto curso do rio Capivari, B: Inflexão do rio Capivari, C: cratera de Colônia, D: trechos remanescentes do anel externo da cratera de Colônia, E: possível trecho do vale do Capivari decapitado após o impacto, F: possível *wind gap* entre as bacias do Capivari e do Embu-Guaçu, G: tributário do Embu-Guaçu, H: Serra do Mar, I: baixo curso do rio Capivari, J: rio Embu-Guaçu. Dados sobre falhamentos extraídos da Carta Geológica de São Paulo em escala 1:50.000: Emplasa, 1984. Organização: Santos, André Henrique Bezerra, 2008.

A norte da cratera, na direção do alto Capivari, observa-se um vale aproximadamente retilíneo, de direção norte-sul, que possivelmente compunha seu trecho de jusante, quando o rio não havia sido ainda atingido pelo impacto. Após a formação da cratera, o vale teria sido fragmentado em duas unidades isoladas e a porção inferior teria perdido grande parte de seus tributários.

Constata-se então a possibilidade de que o impacto meteorítico seja uma das razões pelo desvio do rio Capivari de sua trajetória pretérita a uma outra que, no entanto, não

é a atual trajetória do rio. A aparente continuidade entre os vales do Capivari e do tributário do Embu-Guaçu é indício de que o impacto teria feito o curso do primeiro desviar-se para noroeste e não imediatamente para leste, no traçado hoje observado. É possível que após o impacto tenha sido formado um ambiente deposicional temporário devido ao represamento do rio, que posteriormente teria se integrado à bacia hidrográfica do Embu-Guaçu.

Uma das objeções que pode ser feita à idéia de uma relação genética entre a inflexão do Capivari e a formação da cratera de Colônia é o fato de que a crista da cratera encontra-se distante do local da inflexão em cerca de 4 km. No entanto, observa-se a presença de um segundo anel ao redor da cratera, atualmente muito fragmentado e erodido, mas que logo após o impacto teria amplitude topográfica suficiente para o represamento do alto curso do Capivari, conforme Santos & Oliveira (2008). O vale que conectaria o Alto Capivari ao Embu-Guaçu, atualmente dividido entre as bacias hidrográficas do Capivari e do Embu-Guaçu, é paralelo aos anéis concêntricos da cratera de Colônia e deve ter sido entalhado seguindo uma linha de fraqueza nas rochas gerada em decorrência do impacto.

As considerações de Melosh (1989) a respeito de crateras formadas sobre camadas de diferentes resistências são aplicáveis ao caso da cratera de Colônia. O fluxo de escavação responsável pela abertura da cratera após o impacto teria encontrado maior resistência nas rochas do embasamento cristalino que no pacote sedimentar sobrejacente, pertencente à bacia sedimentar de São Paulo, que se estendia sobre a região. Teria ocorrido, desta forma, a geração de uma cratera dentro de outra cratera, cujas dimensões são coerentes com o modelo proposto pelo autor: tendo-se em vista a pequena espessura do pacote sedimentar em relação à profundidade do impacto, há um anel externo razoavelmente grande em relação ao interno. No entanto, a maior dificuldade que emerge deste modelo, segundo o qual forma-se um patamar mais ou menos plano entre os dois anéis, é o fato de que a porção externa da crista tem declividades semelhantes à porção interna, mesmo levando-se em consideração a possibilidade de que os rios em padrão anelar entre os dois anéis tenham entalhado ao longo de linhas de fraqueza. Deste modo, os mecanismos pelos quais o anel externo se formou constitui questão ainda em aberto.

Tais fatos explicariam a presença de vale aparentemente contínuo, mas repartido entre as bacias do Embu-Guaçu e do Capivari, porém são insuficientes para explicar a atual inflexão do Capivari para leste. Sabe-se que no reverso da escarpa da Serra do Mar uma série de capturas fluviais acompanhou sua regressão em direção ao interior do continente,

conforme demonstrado por Oliveira (2003) e Oliveira & Queiroz Neto (2007). Considerando-se que o relevo da bacia estudada é mais dissecado na sua porção de jusante que na de montante, os rios da porção de jusante teriam sido capturados pela drenagem litorânea há mais tempo que os rios da porção de montante. Incorporados à bacia mais tardiamente, estes últimos possuem seus leitos menos entalhados.

O conjunto de capturas fluviais que se processa no reverso da escarpa da Serra do Mar deve ter atingido, desta maneira, o rio Capivari e modificado seu curso para um traçado mais semelhante ao atual, em direção ao litoral. Configura-se, então, um segundo desvio do curso do Capivari, que deixa de ser um tributário da bacia do Embu-Guaçu para se tornar um tributário da rede de drenagem litorânea. Assim, o divisor de águas formado dentro do vale no qual corria o Capivari constituiria um *wind gap*, desenvolvido em decorrência da captura fluvial. A inflexão do rio entre seu alto e médio curso, no qual o canal desvia-se para sudoeste seria, então, um cotovelo de captura. Neste trecho do vale, também ocorre forte ritmo de dissecação, em função do rebaixamento vertical do leito do rio de forte gradiente a jusante.

5. Conclusões

A partir do presente estudo, conclui-se que o rio Capivari possui história complexa, de sucessivas modificações em seu leito. Ao menos três fases podem ser delineadas: na primeira fase, o rio Capivari, desenvolvido sobre sedimentos da Formação Resende, teria trajetória no sentido sul-norte, conseqüente às camadas da bacia sedimentar; na segunda fase, o rio Capivari incorpora-se à bacia hidrográfica do rio Embu-Guaçu, devido ao desvio em sua trajetória gerado pelo impacto meteorítico formador da Cratera de Colônia; na terceira fase, o rio Capivari incorpora-se à drenagem litorânea em função das capturas fluviais que acompanharam a regressão da escarpa da Serra do Mar em direção ao continente.

Constata-se a influência que um impacto meteorítico pode exercer no desenvolvimento de uma bacia de drenagem. O Capivari é um exemplo de rio que tem seu curso desviado pela formação abrupta de um obstáculo, representado pela crista do anel externo à cratera. Simultaneamente, diversos outros canais teriam sido destruídos na região interna ao referido anel, levando à formação de um padrão de drenagem anelar, geneticamente vinculado ao impacto, com posterior dendritificação à medida que se processa erosão dos altos estruturais e reordenamentos na drenagem por capturas fluviais sucessivas.

6. Referências bibliográficas

Ab'Sáber, A.N. (1957) Geomorfologia do Sítio Urbano de São Paulo. São Paulo, 335 f. Tese (Doutoramento em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

Christofoletti, A. (1980) Geomorfologia Fluvial. Edgard Blücher, São Paulo, 2 ed.

Dietz, R.S. (1961) Astroblemes, *Scientific American*, 205 (8): 51-58.

Earth Impact Database (2008). Planetary and Space Science Center, Universidade de New Brunswick. Disponível em: <<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>>. Acesso 1 mai 2008.

Melosh, H.J. (1989) Impact cratering. Oxford University Press. 245 p.

Oliveira, D. (2003) A captura do Alto Rio Guaratuba: uma proposta metodológica para o estudo da evolução do relevo na Serra do Mar, Boracéia – SP. São Paulo, 105 f. Tese (Doutoramento em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo.

Oliveira, D.; Queiroz Neto, J.P. (2007) Evolução do relevo na Serra do Mar no Estado de São Paulo a partir de uma captura fluvial. *Geosp*, São Paulo, 22: 73-88.

Riccomini, C. ; Turcq, B. ; Martin, L. ; Moreira, M.Z. ; Lorscheitter, M.L. (1991) The Colônia Astrobleme, Brasil. *Revista IG*, São Paulo, 5 (1) : 87-94.

Riccomini, C. ; Sant'Anna, L.G. ; Ferrari, A.L. (2004) Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste Brasileiro. In : Mantesso-Neto, V. ; Bartorelli, A. ; Carneiro, C.D.R. ; Britno-Neves, B.B.B. *Geologia do Continente Sul-Americano : Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. Editora Beca, São Paulo : 383-405.

Ross, J.L.S. ; Moroz, I.C. (1997) Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo : IPT / Fapesp.

Santos, A.H.B.; Oliveira, D. (2008) Considerações a respeito da diferença leste-oeste e da possível existência de um segundo anel soerguido na cratera de Colônia, São Paulo, Brasil. Edição Especial da *Revista Geografia, Ensino & Pesquisa*, 12 (1): 4879-4894.

Small, R.J. (1977) *The study of landforms*. Cambridge University Press, 486 p.

Thornbury, W.D. (1956) *Principles of Geomorphology*. John Wiley & Sons, 618 p.