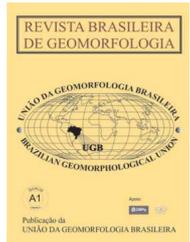


www.ugb.org.br  
ISSN 2236-5664

## Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 16, nº 4 (2015)



# A INFLUÊNCIA DE UMA ESTRUTURA DE IMPACTO NA MORFODINÂMICA DA BORDA MERIDIONAL DO PLANALTO PAULISTANO: O CASO DA CRATERA DE COLÔNIA, EM SÃO PAULO-SP

## THE INFLUENCE OF AN IMPACT STRUCTURE ON THE SOUTHERN EDGE OF THE PAULISTANO PLATEAU MORPHODYNAMICS: THE CASE OF COLÔNIA CRATER IN SÃO PAULO-SP

*Andre Henrique Bezerra dos Santos*

*Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo  
Avenida Prof. Lineu Prestes, 338, São Paulo, São Paulo, CEP: 05508-000, Brasil  
Email: andrehsantos@gmail.com*

*Déborah de Oliveira*

*Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo  
Avenida Prof. Lineu Prestes, 338, São Paulo, São Paulo, CEP: 05508-000, Brasil  
Email: debolive@usp.br*

### Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:  
20/02/2015  
Data de Aprovação:  
29/07/2015

### Palavras-chave:

Estrutura de Impacto;  
Condicionalismo Estrutural do Relevo; Evolução do Relevo.

### Keywords:

Impact Structure; Structural Conditioning of Relief; Relief Evolution.

### Resumo:

O trabalho tem como objetivo compreender a influência de uma estrutura de impacto pliocênica a oligocênica na morfodinâmica da borda meridional do Planalto Paulistano, em São Paulo (SP), onde se localiza a cratera de Colônia. Com 3,6 km de diâmetro e forte circularidade, a morfologia da cratera é singular na região, na qual predominam morros de topos convexos, esculpidos sobre o embasamento cristalino e sob climas predominantemente úmidos no Quaternário. Elaborou-se uma caracterização de elementos sugestivos de condicionamento geológico do relevo e da drenagem, por meio de fotointerpretação, trabalhos de campo e análises morfométricas de Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Concluiu-se que as deformações produzidas pelo impacto às rochas da região se estendem para além das bordas da cratera, refletindo no estabelecimento de uma rede de drenagem de padrão anelar em seu entorno, sobre as estruturas derivadas do impacto superpostas às estruturas regionais de direção predominante ENE. Além disso, a proeminente assimetria altimétrica de sua crista, mais elevada a SW que a NE, é interpretada como resultado da maior degradação do relevo a NE, conforme apontado a partir de dados geofísicos de seu embasamento.

### Abstract:

This article aims to understand the influence of a Pliocene to Oligocene impact structure in the morphodynamics of the southern edge of the Paulistano Plateau, in São Paulo (SP), where the Colonia crater is located. With a diameter of 3.6 km

and strong circularity, the crater morphology is unique in the region in which predominates hills of convex tops, carved on the crystalline basement under predominantly humid climates in the Quaternary. The methodology focuses on the characterization of suggestive elements of geological conditioning of relief and drainage through fieldwork and the use of image interpretation and morphometric analyzes of Digital Elevation Models (DEMs) techniques. The article concludes that the deformations resulted from the impact on the rocks of the region extends beyond the edges of the crater, reflecting in a settlement of an annular pattern of drainage network in its surroundings, on the structures derived from the overlapping impact of regional structures of direction predominantly ENE. Furthermore, the prominent altimetric asymmetry of its crest, which is higher in SW than in NE, is interpreted as a result of further degradation of the relief in NE, as indicated by geophysical data of its basement.

**Introdução**

Estruturas de impacto, ou “astroblemas” (DIETZ, 1963), correspondem a feições geológicas formadas por impacto de asteroide ou cometa contra uma superfície planetária. Já o termo “cratera de impacto” é aplicado à feição crateriforme derivada (GRIEVE, 1993). O *Earth Impact Database* (PASSC, 2014) reconhece a existência de 184 estruturas de impacto na Terra. No Brasil, Crósta (2013) enumera as estruturas de: Araguinha, Serra da Cangalha, Riachão, Vargeão, Vista Alegre, Cerro Jarau e Santa Marta como confirmadas, apresentando feições de metamorfismo de choque (FRENCH e KOEBERL, 2010).

A cratera de Colônia, localizada em São Paulo-SP (Figura 1) passou recentemente à condição de “confirmada”, após Velazquez *et al.* (2013) identificarem: 1) feições de deformação planar em cristais de quartzo, feldspato e mica, 2) textura granular em zircônio e 3) rochas com indícios de fusão por impacto em sondagens realizadas em seu pacote sedimentar. Estudos anteriores (KOLLERT *et al.*, 1961; RICCOMINI *et al.*, 1991) haviam considerado as hipóteses de: dissolução de calcário, interferência entre estruturas geológicas, intrusão magmática, cripto-explosão associada a kimberlito e escorregamento de grandes proporções, descartadas pelos últimos.

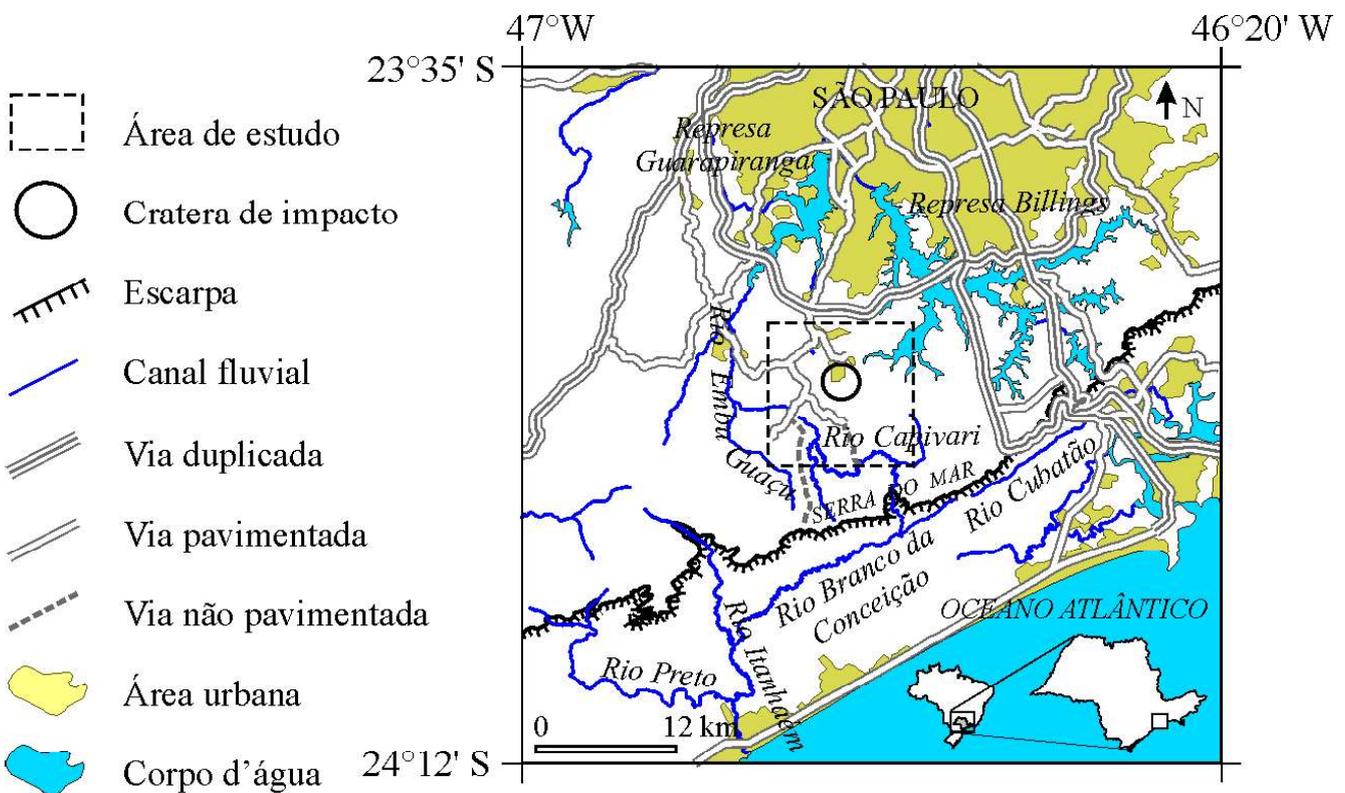


Figura 1 - Localização da área de estudo, com destaque para as feições geomorfológicas de interesse e vias de acesso.

Trata-se de uma depressão circular com fundo plano, de 3,6 km de diâmetro, circundada por morros de topos convexos, altas declividades, vales fortemente entalhados e densidade de drenagem média a alta pertencentes ao Planalto Paulistano (ROSS e MOROZ, 1997). Os mesmos são sustentados por metassedimentos e unidades graníticas proterozóicas do Complexo Embu, parcialmente recobertos por sedimentos terciários da Formação Resende e unidades aluviais quaternárias (RICCOMINI *et al.*, 2004). Sua idade ainda suscita dúvidas. Riccomini *et al.* (2011) estimam idade máxima de 36 Ma, com base nos sedimentos areno-argilosos da Formação Resende presentes em seu anel colinoso, e idade mínima de 5 Ma pelo grau de preservação da estrutura e pela compactação dos sedimentos em seu interior, cujos primeiros 7,8 m foram datados por Ledru *et al.* (2005).

A cerca de 12 km de distância para sul, encontra-se a Serra do Mar, cuja origem é atribuída a movimentações tectônicas ocorridas na Falha de Santos, mais a leste, com posterior recuo até alcançar a Falha de Cubatão, por erosão fluvial e costeira e por movimentos de massa (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998). O desenvolvimento da drenagem regional é, conforme Ab'Sáber (1957), posterior à sedimentação eocênica a oligocênica, predominando cursos consequentes de sentido sul-norte. No entanto, nas proximidades da Serra do Mar, onde não ocorrera a referida sedimentação, a drenagem estabeleceu-se diretamente sobre unidades cristalinas proterozóicas, seguindo lineamentos estruturais de direção predominante leste-nordeste.

Riccomini *et al.* (2004) resumem os indícios da atividade tectônica pós-pleiocênica, que consistem em: anomalias de drenagem, degraus e lineamentos topográficos. Tais movimentações tectônicas teriam induzido a ocorrência de rearranjos de drenagem na região, conforme estabelecido por Ab'Sáber (1957) e Oliveira e Queiroz Neto (2007).

A cratera de Colônia teve sua cobertura de *ejecta* completamente removida e sua borda soerguida está parcialmente erodida (RICCOMINI *et al.*, 1991). A maior elevação da borda da cratera a sudoeste, em comparação com o segmento nordeste, seria explicável pelos respectivos autores por uma suposta obliquidade do impacto, com projétil proveniente de nordeste.

Duas características geomorfológicas da cratera de Colônia e entorno suscitam questionamentos e são analisadas: 1) no entorno da cratera, há um conjunto de vales e cristas dispostos radial e concentricamente àquela; 2) o anel soerguido da cratera é assimétrico, com maior elevação a sudoeste que a nordeste. Constitui objetivo desta pesquisa fornecer evidências para se compreender

a origem desses fatos geomorfológicos. De forma mais ampla, busca-se contribuir para a discussão sobre como impactos meteoríticos influenciam no desenvolvimento das paisagens terrestres.

Considerando-se que as feições radiais e concêntricas que circundam a cratera não se ajustam às estruturas geradas pela tectônica regional, de direção geral leste-nordeste, sugere-se que o conjunto de feições deve-se à degradação de uma estrutura geológica de 9 km de diâmetro derivada do impacto, a qual transcende os limites da cratera de Colônia. Quanto à assimetria do anel soerguido, parte-se da hipótese de que ela se deve à maior intensidade da degradação da borda da cratera a nordeste que a sudoeste, supondo-se maior degradação erosiva nas redes de drenagem a nordeste.

### Referencial Teórico

O termo *impact cratering*, traduzido para o português como “craterização” (POMEROL *et al.*, 2013), tem sido utilizado para explicar os processos envolvidos na formação de feições estruturais de crateras de impacto desde Dence (1972), que as descreveu na cratera do Meteoro, no Arizona. A craterização é um conjunto de processos desencadeados a partir da colisão de um asteroide ou cometa em hipervelocidade (supersônico) com uma superfície planetária, envolvendo pressões de até centenas de gigapascals (GPa), com duração de segundos a minutos (FRENCH e KOEBERL, 2010). A colisão somente irá ocorrer se o corpo possuir massa e coesão suficientes para vencer a resistência atmosférica e manter a hipervelocidade em toda sua trajetória no interior da atmosfera (FRENCH, 1998).

Após a colisão, ocorre uma sequência rápida de eventos, produzindo ao final uma estrutura de impacto. Melosh (1989) agrupa esses eventos em três estágios: estágio de contato e compressão, estágio de escavação e estágio de modificação. No primeiro estágio, a energia cinética do projétil é transferida para o alvo e produzem-se ondas de choque. As mesmas propagam-se pelo alvo e, juntamente com ondas de rarefação, promovem a escavação do material rochoso e a formação de anéis soerguidos, os quais finalmente colapsam no último estágio, tendo-se em vista suas grandes declividades iniciais.

A intensidade do colapso gravitacional é proporcional ao tamanho da cratera formada e influencia em sua morfologia resultante. Em crateras menores (abaixo de 2 a 4 km na Terra), há o simples preenchimento da cavidade central por detritos da crista. Já nas maiores, o colapso é mais complexo, com ocorrência de terraceamento e falhamentos do embasamento na sua borda.

Essas diferenças dão origem aos dois tipos morfológicos básicos de crateras de impacto: simples e complexas, sendo as primeiras em forma de “tigela” e as últimas com picos centrais ou anéis concêntricos (DRESSLER e REIMOLD, 2001).

Durante o processo de craterização, é possível haver a formação de fraturas radiais e concêntricas no entorno da cratera. Jones (1977) produziu crateras experimentais no alúvio e descreveu fraturas que se formaram nas camadas superficiais do pacote aluvial. Kumar e Kring (2008) descreveram fraturas radiais e concêntricas formadas na borda da cratera do Meteoro, no Arizona, que se estendem para além da borda da cratera a até 1/3 de seu raio. Henkel *et al.* (2010) identificaram fraturas radiais e concêntricas no entorno da estrutura Tvaren, na Finlândia, a distâncias proporcionais.

### Morfologia Multi-anelar em Crateras de Impacto

Diversas crateras de impacto exibem morfologia multi-anelar, com vales e cristas concêntricas e uma depressão central circular. Melosh (1989), considerando as indefinições existentes a respeito da origem dessas estruturas, conclui que para este problema há aproximadamente tantas interpretações quanto investigadores. Levantam-se, a seguir, algumas das possíveis interpretações quanto à origem de estruturas de impacto com as referidas características.

- *Estratificação do alvo*: em áreas de embasamento lito-estrutural estratificado, a cratera deverá sofrer influência das propriedades físicas do acamamento em sua morfologia. Conforme Melosh (1989), a morfologia da cratera final depende da razão entre o diâmetro da crista da cratera  $D$  e a espessura da camada de menor resistência  $tL$ . Se a relação  $D/tL$  é menor que 4, a cratera não sofre influência da estratificação; de 4 a 7,5, forma-se um pequeno monte no centro da cratera, pois a escavação é barrada pela camada resistente; de 7,5 a 10, o fluxo de escavação alcança a camada resistente e produz seu fraturamento e uma superfície plana no centro; e se  $D/tL$  é maior que 10, uma pequena cratera interna se forma na camada resistente, levando a formação de duas crateras concêntricas, separadas por um terraço. À medida que o diâmetro da cratera aumenta para além dessa transição final, o terraço ocorre a elevações progressivamente maiores na parede interna da crista, tornando-se menos evidente. Como exemplo, a estrutura Tin Bider, na Argélia, produzida em formações argilosas e carbonáticas intercaladas, possui 6 km de diâmetro e exibe uma série de três cristas anelares (KOEBERL, 1994).

- *Pico anelar em crateras complexas*: trata-se de um anel contínuo ou semicontínuo de picos, completamente separado das paredes das bordas da cratera, topograficamente mais baixo que as bordas (KOMATSU *et al.*, 2006). Dois modelos concorrem para explicá-lo: colapso de pico central excessivamente soerguido, descrito pelo modelo hidrodinâmico (MELOSH, 1989); modificação e colapso de uma cavidade preenchida por material fundido, descrita pelo modelo da “Cavidade Fundida Aninhada” (tradução de “*nested melt-cavity*”), conforme Baker *et al.* (2011). A relação entre o diâmetro do pico anelar e o diâmetro da borda da cratera é universal em planetas telúricos, de tal modo que o primeiro corresponde a 50% do último (MELOSH, 1989). A cratera de Chicxulub, no México, constitui exemplo notável (ALVAREZ *et al.*, 1995). Não se conhecem estruturas de impacto terrestres menores que 25 km de diâmetro que tenham sofrido tal fenômeno (BAKER *et al.*, 2011).

- *Ejecta fluidificado*: o processo é documentado nas crateras de Marte e da Terra, sendo comum naquelas de diâmetros entre 5 e 15 km nas primeiras e em quaisquer diâmetros nas últimas, variação explicável pelos níveis contrastantes dos lençóis freáticos nos dois planetas, mais profundos no primeiro. Forma-se uma feição designada por “*rampart*”, que consiste em uma crista concêntrica baixa, formada por interrupção do fluxo de detritos lançados do centro do impacto devido à fricção provocada pelo aumento da área varrida (MELOSH, 1989). A morfologia resultante é irregular e diverge da forma circular dos anéis produzidos por soerguimento estrutural, devido aos obstáculos oferecidos pela superfície pré-impacto à movimentação do ejecta fluidificado (KOMATSU *et al.*, 2006). O fato de os depósitos de *ejecta* constituírem a primeira unidade da estrutura de impacto a ser removida pela erosão pós-impacto (DENCE, 1972) faz com que essa feição seja raramente encontrada em crateras de impacto terrestres. Um possível exemplo é a cratera Tsenker, na Mongólia (KOMATSU *et al.*, 2006).

- *Fluidificação de finos*: conforme o modelo do “fluido de Bingham” (JEONG, 2013), a baixas taxas de tensão, as argilas comportam-se como um fluido de alta viscosidade, a qual se reduz drasticamente sob altas taxas de tensão. As altas viscosidades sob baixas taxas de tensão são decorrentes da resistência das partículas em resposta às ligações microestruturais, as quais se rompem em altas tensões. Para Melosh, (1989), esse mecanismo explicaria algumas das feições multi-anelares encontradas em crateras de impacto em alvos ricos em argilas. A cratera Prairie Flat, de 86 m de diâmetro, produzida experimentalmente por detonação de TNT em

siltes e argilas saturadas (PRICE e COSGROVE, 1990) é constituída de múltiplos anéis, explicáveis conforme o modelo de Bingham.

### **Impactos Oblíquos**

Cometas e asteróides incidem em ângulos aleatórios sobre a Terra, sendo mais provável o ângulo de 45° em relação à superfície; no entanto, a maioria das crateras exibe forte circularidade (MELOSH, 1989). Gault e Wedekind (1978) demonstraram, em estudos experimentais, a manutenção da circularidade em ângulos de 90° a 30° em relação à superfície e que modificações ocorrem nos detalhes da morfologia: a zona de maior profundidade da cratera desloca-se para o sentido de proveniência do projétil e os depósitos de materiais ejetados do local do impacto distribuem-se de maneira assimétrica. Dados numéricos provenientes de simulações (COLLINS *et al.*, 2009) corroboram essa conclusão.

O lançamento de detritos, nas fases iniciais da craterização, tende a assumir direções preferenciais. Em ângulos inferiores a 60°, os depósitos de *ejecta* concentram-se preferencialmente no sentido oposto ao da incidência do projétil; ângulos inferiores a 45° são associados à formação de uma “zona proibida” no sentido do ingresso do projétil e ângulos inferiores a 20° levam ao desenvolvimento de uma nova “zona proibida” no sentido oposto ao do ingresso do projétil, atravessada por raias alongadas (MELOSH, 1989).

A análise da morfologia de uma cratera de impacto, por si só, não fornece diagnóstico do sentido de proveniência do projétil, pois assimetrias morfológicas também podem ser produzidas por processos de degradação da cratera de impacto ou a respostas contrastantes das unidades geológicas às pressões de choque (SCHULTZ e ANDERSON, 1996). Além disso, os depósitos detriticos lançados do alvo desaparecem rapidamente com a evolução geomorfológica das crateras (DENCE, 1972). Torna-se, portanto, mais seguro avaliar o sentido da proveniência do corpo impactante a partir da identificação do deslocamento da zona de maior profundidade em relação ao centro da estrutura, em vez de dados topográficos.

### **Materiais e Métodos**

A concretização dos objetivos da pesquisa se fez mediante emprego do raciocínio hipotético-dedutivo, tendo-se como pano de fundo as referências teóricas apresentadas. Formularam-se hipóteses que tentam explicar lacunas no conhecimento, seguidas da dedução de suas consequências e finalmente da comparação dos

fatos apreendidos pela observação com os fatos deduzidos a partir das hipóteses (KING, 1971). Buscou-se, na descrição sistemática dos elementos geomorfológicos da cratera de Colônia e entorno, coletar dados que permitissem corroborar ou refutar hipóteses geradas a partir dos modelos teóricos avaliados.

Para a análise do condicionamento estrutural e dinâmico sobre a rede de drenagem, adotou-se a proposta metodológica de Oliveira e Queiroz (2007), que consiste no uso de fotointerpretação, análise de campo e morfometria para a descrição de elementos indicativos desse condicionamento, como: lineamentos, gargantas, colos e escalonamento de níveis topográficos.

Utilizaram-se como materiais da pesquisa: 1) fotografias aéreas de escala 1:25.000 do aerolevante “Estado de São Paulo”, realizado em 1962 pela empresa “IA”, que conciliam boa resolução e pouca modificação do quadro físico pelo processo de urbanização; 2) estereoscópios de bolso e de espelho para fotointerpretação; 3) trado, enxadão, bússola e GPS para análises de campo; 4) MDEs derivados de cartas topográficas de escalas 1:10.000 (EMPLASA, 1980a) e 1:50.000 (IBGE, 1980), para elaboração de análises morfométricas; 5) carta geológica (EMPLASA, 1980b), para verificação da relação entre a topografia e o embasamento geológico; 6) produtos de estudos geofísicos, para comparação com dados topográficos e 7) *softwares* livres de geoprocessamento, para combinação dos dados e análises morfométricas.

No processo de fotointerpretação, identificaram-se: linhas de drenagem, terraços, colos e gargantas. Os dados foram digitalizados e incorporados ao Sistema de Informações Geográficas. O controle de campo, efetuado durante e após a fotointerpretação, procurou confirmar os elementos visuais descritos.

Os MDEs foram submetidos a análises morfométricas, tendo como produtos intermediários cartas hipsométricas, clinográficas e de sombreamento. A partir destes produtos, obtiveram-se: cartas de lineamentos topográficos, diagramas de roseta com frequências de lineamentos da drenagem e carta de canais orientados radial e paralelamente à borda da cratera.

Levantaram-se anomalias de drenagem, com base em dados de fotointerpretação e do MDE, para identificação de vales secos, inflexões abruptas nos cursos dos canais e mudanças bruscas de inclinação (*knickpoints*). A identificação dos *knickpoints* foi acompanhada da aplicação do Índice SL (grau de inclinação da encosta vs. comprimento da encosta), proposto por Hack (1973), a perfis longitudinais de rios de quarta ordem, conforme Horton (1945). Já os vales secos e as inflexões abruptas, indicativos de rearranjos de drenagem (BISHOP, 1995),

foram delimitados a partir da inspeção visual de fotografias aéreas. Por fim, elaboraram-se curvas e integrais hipsométricas, indicativas do potencial erosivo da drenagem (STRAHLER, 1952), para avaliar o condicionamento tectônico e lito-estrutural da drenagem.

### Desenvolvimento da Drenagem e do Relevo no Entorno da Cratera de Colônia

A formação da estrutura de impacto levou à completa destruição da drenagem precedente e desenvolvimento de uma nova drenagem adaptada às estruturas recém-formadas (fraturas, dobras, zonas de brechas de impacto). Sua influência produziu um conjunto de vales

e cristas orientados radial e paralelamente à cratera, por controle estrutural, estando os primeiros ocupados por linhas de drenagem, conforme observado nas cartas: hipsométrica (Figura 2a) e clinográfica (Figura 2b).

Esse conjunto de formas é aparentemente delimitado por um anel externo, a cerca de 3 km do anel principal, mais evidente a sul e a oeste, mas desgastado nas demais direções (Figuras 2c, 2d e 2e). Além dos limites desse anel, não se observam mais evidências de controle estrutural derivado do impacto. Nota-se que, dentre as unidades geológicas mapeadas, os sedimentos de idade terciária – presumivelmente deformados pelo impacto – acompanham a mesma tendência (Figura 2f).

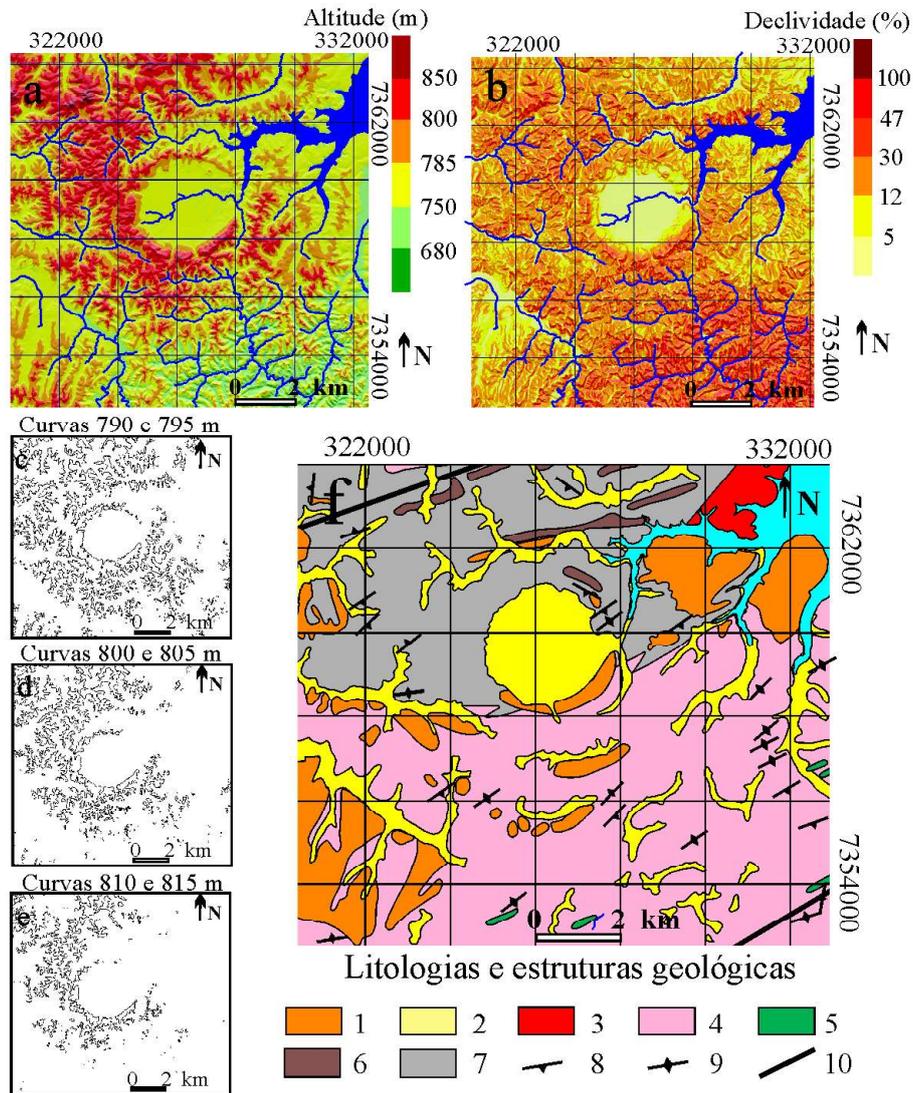


Figura 2 - Cartas: (a) hipsométrica sobreposta ao modelo sombreado, (b) clinográfica, (c) (d) (e) de curvas de nível selecionadas, (f) geológica. Legenda da carta geológica: 1 – sedimentos terciários; 2 – sedimentos quaternários; 3 – granitos e granodioritos; 4 – migmatitos e gnaisses; 5 – anfibolitos e metabasitos; 6 – dioritos; 7 – micaxistos; 8 – foliação com mergulho de 45° a 80°; 9 – foliação com mergulho de 80 a 90°; 10 – falha ou zona de falhas. Fonte: EMPLASA – Mapa topográfico – São Paulo-SP: Região Metropolitana, escala 1:10.000, 1980 (cartas a, b, c, d, e); EMPLASA – Carta geológica da região metropolitana de São Paulo, escala 1:50.000, 1980 (carta f).

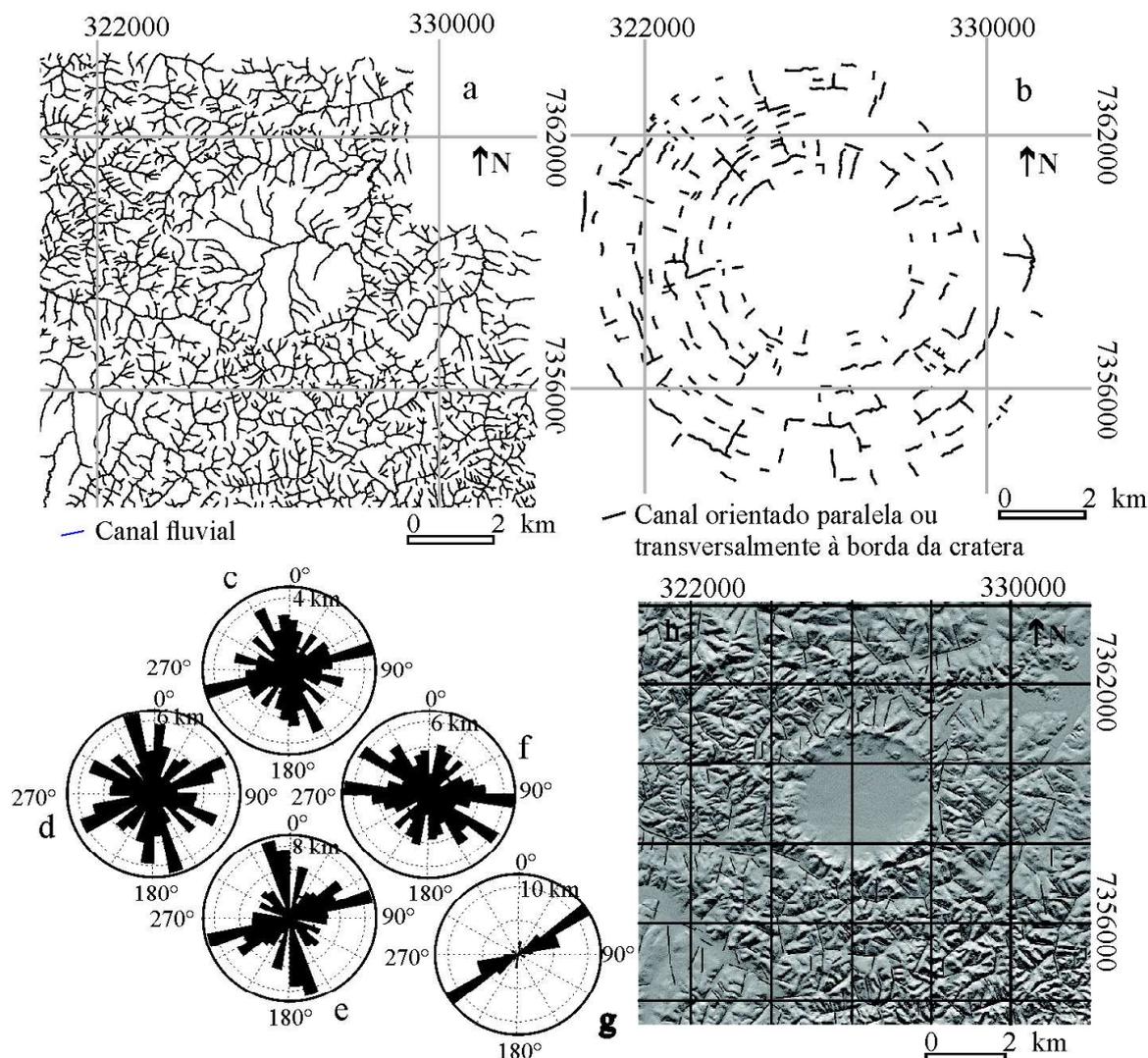


Figura 3 - Rede de drenagem da cratera de Colônia e entorno. (a) Canais fluviais perenes mapeados em fotointerpretação. (b) Canais orientados paralela ou transversalmente à borda da cratera. Frequências de orientações de lineamentos da drenagem do entorno da cratera de Colônia, da borda à distância de 3.000 m da mesma, (c) a norte, (d) oeste, (e) sul e (f) leste. (g) Frequências de orientações de lineamentos estruturais, conforme Figura 2f. (h) Lineamentos topográficos mapeados com base no MDE gerado a partir dos dados da EMPLASA – Mapa topográfico – São Paulo-SP: Região Metropolitana, escala 1:10.000, 1980.

A tendência à organização radial e concêntrica também é observada na disposição da rede de drenagem, de sugestivo padrão anelar dendritificado (Figuras 3a e 3b). As frequências de orientações dos lineamentos topográficos do entorno da cratera (Figura 3c), extraídas do mapa de relevo sombreado (Figura 3d) e as frequências de orientações dos lineamentos estruturais (Figura 3e) obtidos do mapa geológico (Figura 2f) sugerem interferência entre as estruturas geológicas regionais e as derivadas do impacto.

Perfis longitudinais dos rios que percorrem a área e seus respectivos índices SL evidenciam *knickpoints* em

50% das bacias analisadas (Figura 4a). Os *knickpoints* são mais frequentes à distância de 2 a 3 km da borda da cratera, tanto a norte quanto a sul (Figura 4a). Alguns, muito marcados (rios 11, 13 e 14a) seriam produzidos por movimentos tectônicos mais recentes ou maiores. A grande concentração de *knickpoints* a sul da estrutura, na bacia do rio Capivari, soma-se à presença de inflexões e vales secos (Figura 4a), o que é consistente com maior movimentação tectônica no local, embora também permita vinculação genética com a estrutura de impacto, com reativação de falhas no entorno do alvo durante sua gênese.

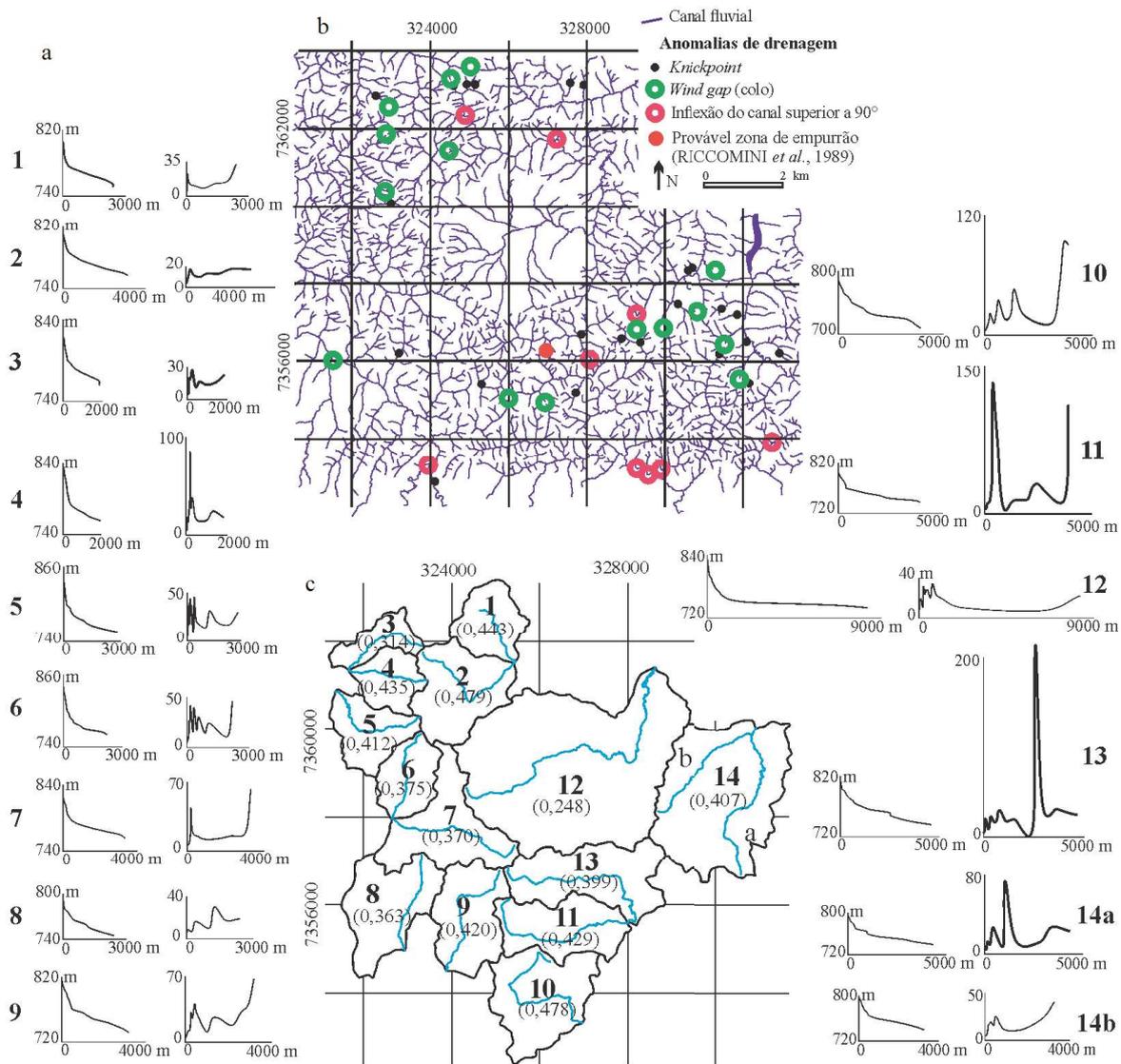


Figura 4 - (a) perfis longitudinais e índices SL de rios de 4ª ordem (Horton, 1945) das sub-bacias da cratera de Colônia e entorno (numerados de 1 a 14); (b) carta de anomalias de drenagem; (c) localização dos rios cujos perfis longitudinais são apresentados. A bacia número 14, única mapeada a leste da cratera, tem seus rios de 3ª ordem representados. Demais bacias a nordeste não foram incluídas por estarem parcialmente inundadas pelo lago da Represa Billings.

### Desenvolvimento da Drenagem e do Relevo no Interior da Cratera de Colônia

A morfologia atual da cratera de Colônia decorre das condições do impacto e da morfodinâmica pós-impacto. Relevante aspecto de sua morfologia é a assimetria altimétrica de seu anel soerguido, discutido nesta seção com base em dados geofísicos, geológicos e morfométricos.

Apresentam-se as dimensões originais estimadas e atuais da cratera de Colônia na Figura 5a, enquanto as possíveis direções de proveniência do corpo impactante

são exibidas nas Figuras 5b e 5c. Tendo-se em vista que dados topográficos são pouco confiáveis para se inferir proveniência de asteroides e cometas, avaliam-se dados de estudos magnetotelúricos e gravimétricos disponíveis (MOTTA e FLEXOR, 1991; MASERO e FONTES, 1991, 1992). Esses dados mostram deslocamento para sudeste da parte mais profunda do contato entre a cobertura de sedimentos e o embasamento da cratera (Figura 5c). Considerando-se que a parte mais profunda desloca-se para o sentido de proveniência do projétil (GAULT e WEDEKIND, 1978; COLLINS *et*

al., 2009), os dados favorecem a ideia de que o projétil deveria vir de sudeste e não de nordeste, dificultando a interpretação de Riccomini *et al.* (1991).

Dados de campo e o mapeamento geológico (EMPLASA, 1980b) mostram que diferenças litológicas também não explicam a assimetria. Nas bordas da estrutura de impacto predominam micaxistos diver-

sos, especialmente biotita-quartzo-muscovita-xistos e granada-biotita-xistos, ao passo que no segmento meridional ocorrem gnaisses graníticos e biotita-gnaisses migmatizados, subordinadamente miloníticos. Não há, portanto, uma diversidade litológica coincidente com a assimetria apontada: ela deveria ser norte-sul, se dependesse apenas desse fator.

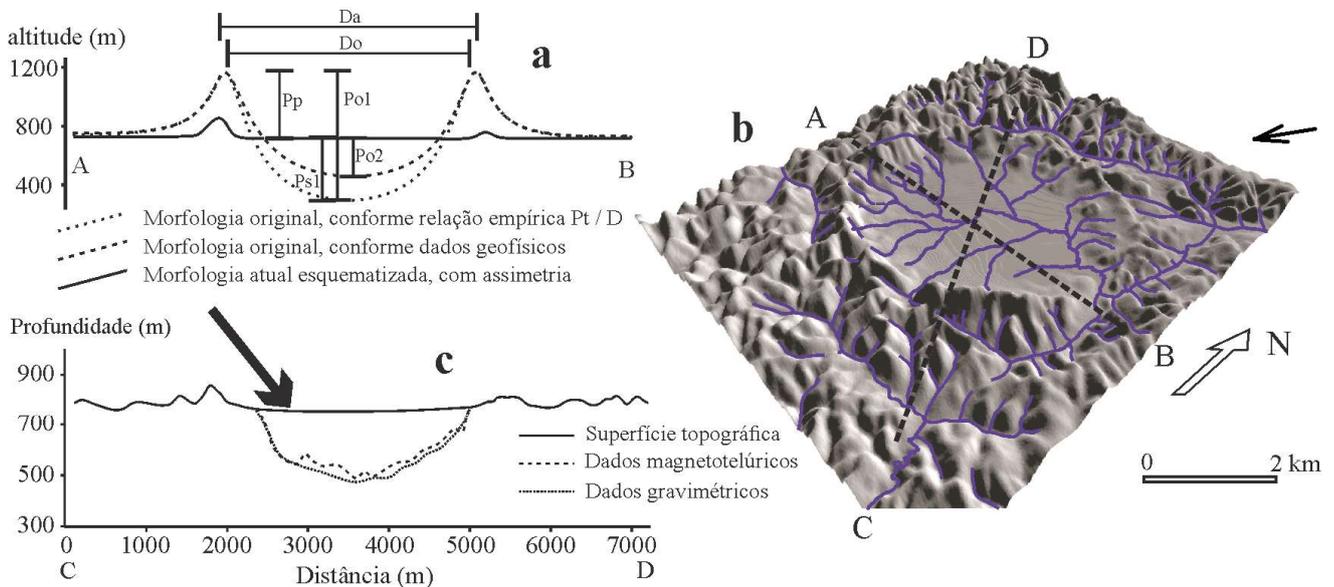


Figura 5 - Parâmetros morfométricos da cratera de Colônia e possíveis direções de proveniência do corpo impactante. Dimensões originais e atuais da cratera de Colônia (a) conforme relação empírica profundidade-diâmetro obtida por Grieve e Robertson (1979) e aplicada à cratera por Riccomini *et al.* (1991), acrescida de dados geofísicos de profundidade do pacote sedimentar apresentados por Riccomini *et al.* (2011) e topografia atual. Medidas no diagrama (a): Da (diâmetro atual) = 3.600 m; Do (diâmetro original) = ? (desconhecido); Pp (profundidade aparente) = 464 m; Po1 (profundidade original, conforme relação empírica Pt / D) = 900 m; Po2 (profundidade original, conforme dados geofísicos) = 280 m; Ps1 (profundidade original do pacote sedimentar, conforme relação empírica Pt / D) = 436 m. Modelo tridimensional da cratera de Colônia (b) acrescido da direção de proveniência do corpo impactante conforme Riccomini *et al.* (1991). Perfil topográfico da cratera de Colônia (c), acrescido de dados magnetotelúricos e gravimétricos apresentados por Riccomini *et al.* (2011). Direção inferida do projétil, pelos autores citados.

Contrastes no ritmo de erosão fluvial no entorno da cratera poderiam explicar a assimetria: para avaliar tais contrastes, é válido recorrer a perfis longitudinais, curvas hipsométricas e integrais hipsométricas das bacias hidrográficas da área. Os dois principais rios da região, o Embu-Guaçu e o Jurubatuba, este último parcialmente inundado pela Represa Billings, têm seus perfis longitudinais comparados na Figura 6a, juntamente com os de seus principais tributários. À altura da cratera de Colônia, os níveis do rio Jurubatuba e de seus tributários são mais baixos. As curvas e as integrais hipsométricas (Figura 6b) apontam para valor menor para a bacia do rio Jurubatuba (0,28) em relação ao do rio Embu-Guaçu

(0,31), indicando maior grau de degradação erosiva na primeira em relação à última.

O vale do rio Jurubatuba possui, em grande parte de sua extensão, direção coincidente com lineamentos estruturais de leste-nordeste, tendo se desenvolvido diretamente sobre o cristalino. Possivelmente, esse rio dispôs de mais tempo para a erosão que o Embu-Guaçu, visto que permaneceu no exterior da área de sedimentação neogênica. Além disso, há maior entrada atual de águas pluviais na bacia do rio Jurubatuba (Figura 6c), atribuída ao efeito orográfico produzido pela da Serra do Mar. Essa contribuição deve ter perdurado por todo o Quaternário, já que a posição da escarpa teria

tido praticamente estável neste período (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998).

O rebaixamento mais acelerado da borda da cratera a nordeste favoreceu o estabelecimento do exutório de sua drenagem neste segmento. Ledru *et al.* (2005), partindo de dados paleopalínológicos, obtêm a idade de aproximadamente 2.000 anos para

a camada mais superficial do pacote sedimentar. A partir daí, não teria havido deposição, mas erosão, o que se associa à abertura da drenagem da cratera para o exterior e consequente rebaixamento do nível de base, implicando no aumento do Índice SL no baixo curso do Ribeirão Vermelho da Cratera, que atravessa seu interior (Figura 4b – rio 12).

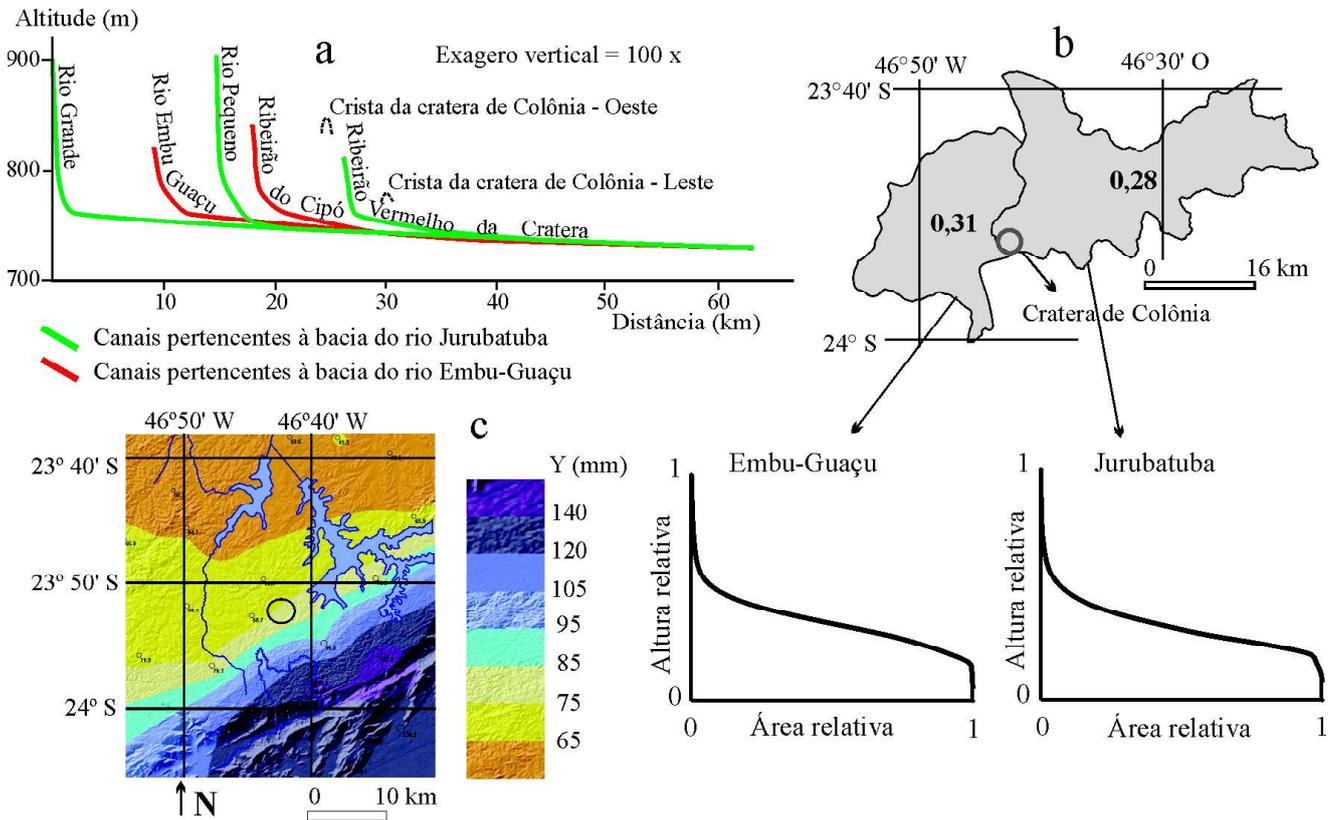


Figura 6 - (a) perfis longitudinais dos rios Embu-Guaçu, Jurubatuba e afluentes; (b) curvas e integrais hipsométricas das bacias dos rios Embu-Guaçu e Jurubatuba; (c) magnitude de evento pluviométrico (em mm) que tem intervalo de recorrência = 1 ano.

### Possíveis Mecanismos para a Origem dos Vales e Cristas Circundantes à Cratera de Colônia

Discute-se o surgimento de anéis concêntricos no entorno da cratera de Colônia, a partir dos mecanismos mencionados anteriormente. O primeiro mecanismo, a *formação de estruturas concêntricas a partir da escavação de um alvo estratificado*, seria plausível devido à ocorrência, na área, de sedimentos da Formação Resende, os quais se estendem na região de maneira mais contínua até o Plioceno (RICCOMINI *et al.*, 2004). No entanto, os testemunhos terciários na região são pouco espessos, inferiores a 50 m (VARGAS, 2002), impedindo a formação de cristas concêntricas por este mecanismo.

A *formação de estrutura complexa com morfologia de pico anelar* é ainda menos plausível, uma vez que o mecanismo: levaria à supressão de estruturas geológicas prévias, o que não se observa na área; não é documentado em crateras terrestres com diâmetro inferior a 25 km; e implicaria revisar o diâmetro da estrutura de impacto para aproximadamente 9 km, exigindo impacto de maior energia, com maiores consequências à geologia da região, como produção de extensas unidades ígneas.

O mecanismo da *formação de ejecta fluidificado* é, por sua vez, de difícil aplicação à cratera, tendo-se em vista: a completa remoção de sua cobertura de *ejecta* (RICCOMINI *et al.*, 1991), a forma pouco festonada dos anéis concêntricos à cratera e ao fato desse mecanismo

não explicar vales e cristas concêntricos intermediários.

Um dos mecanismos apontados é mais plausível que os demais: a *fluidificação de sedimentos finamente granulados*. As condições necessárias estão presentes na área: sondagens nos remanescentes sedimentares mostram forte presença da fração argilosa, com deposição em ambiente fluvial (VARGAS, 2002; RICCOMINI *et al.*, 2004). Pode-se supor a formação de uma drenagem anelar ajustada aos vales paralelos produzidos pelo mecanismo, a qual seria parcialmente preservada por superimposição em unidades lito-estruturais subjacentes.

Apesar da maior plausibilidade do último mecanismo apresentado, não estão disponíveis atualmente dados geofísicos que permitam sua corroboração. Os estudos geofísicos apresentados por Riccomini *et al.* (2011) trazem informações detalhadas a respeito do interior da cratera, mas não do entorno. A existência desses últimos será crucial para uma descrição mais detalhada da estrutura subjacente ao padrão de formas em questão, permitindo inferir qual tipo de desenvolvimento de anéis concêntricos ocorreu e se isto de fato ocorreu.

## Conclusões

A partir dos dados apresentados, sugere-se que a estrutura de impacto produziu efeitos na morfodinâmica local, os quais ultrapassam os limites da própria cratera de Colônia. A até 3 km de distância da borda da cratera, observam-se canais fluviais orientados radial e paralelamente à mesma, formando um padrão anelar dendritificado. Por outro lado, a presença de linhas de drenagem orientadas na direção leste-nordeste no interior desta área evidencia que o impacto meteorítico não foi capaz de obliterar as estruturas geológicas prévias. Deste modo, tanto as estruturas produzidas pelo impacto quanto as herdadas da tectônica pré-impacto exercem influência ao desenvolvimento da drenagem local. A presença de *knickpoints*, colos e inflexões abruptas de cursos, associadas a valores mais elevados de integrais hipsométricos, sugerem ainda influência de movimentos tectônicos pós-impacto.

A respeito da assimetria altimétrica presente na crista da cratera de Colônia, nota-se que não há um ajustamento satisfatório entre a morfologia superficial da cratera e a morfologia do embasamento cristalino sob a mesma, indicando que sua topografia atual não reflete a direção de proveniência do asteroide ou cometa que a produziu. Soma-se a isso o fato de que os sistemas

fluviais de leste, mais antigos e com maior entrada de águas pluviais que as de oeste, apresentaram, ao longo do tempo geológico maior efetividade na degradação erosiva da cratera. Com o recuo das cabeceiras de um dos tributários do rio Jurubatuba, o interior da cratera foi interceptado, estabelecendo-se aí um sistema de drenagem exorreico.

Dos possíveis mecanismos apresentados para o condicionamento do relevo do entorno da cratera – estratificação do alvo, pico anelar central, *ejecta* fluidificado, fluidificação de finos e fraturas radiais e concêntricas – considerou-se mais prudente a não admissão de qualquer uma das explicações como a mais correta, persistindo a necessidade de realização de estudos geofísicos mais aprofundados no entorno da cratera, como, por exemplo, estudos de estratigrafia sísmica.

## Agradecimentos

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de Mestrado concedida.

## Referências Bibliográficas

- AB' SÁBER, A. N. **Geomorfologia do Sítio Urbano de São Paulo**. São Paulo, 1957, 335f. Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras, Universidade de São Paulo.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 1, p. 135-150, 1998.
- ALVAREZ, W.; CLAEYS, P.; KIEFFER, S.W. Emplacement of Cretaceous-Tertiary boundary shocked quartz from Chicxulub crater, **Science**, v. 269, n. 5226, p. 930-935, 1995.
- BAKER, D. M. H.; HEAD, J. W.; FASSET, C. I.; KADIS, S. J.; SMITH, D. E.; ZUBER, M. T.; NEUMANN, G.A. The transition from complex crater to peak-ring basin on the Moon: New observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) instrument, **Icarus**, v. 214, n. 1, p. 377–393, 2011.
- BISHOP, P. Drainage rearrangement by river capture, beheading and diversion. **Progress in Physical Geography**, v. 19, n. 4, p. 449-473, 1995.
- CRÓSTA, A. P., VASCONCELOS, M. A. R. Update on the current knowledge of the Brazilian impact craters. In: CONFERÊNCIA DE CIÊNCIA LUNAR E PLANETÁRIA, 44, 2013, The Woodlands. **Anais**, 2013, The Woodlands: Lunar and

- Planetary Institute, p. 1318.
- COLLINS, G. S.; DAVISON, T.; ELBESHAUSEN, D.; WÜNNEMANN, K. Numerical simulations of oblique impacts: the effect of impact angle and target strength on crater shape. In: CONFERÊNCIA DE CIÊNCIA LUNAR E PLANETÁRIA, 40, 2009, The Woodlands. **Anais**, 2009, The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, p. 1620.
- DENCE, M. R. The nature and significance of terrestrial impact structures. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOLOGIA, 24, 1972, Montreal. **Anais**, 1972, Montreal: IGC, p. 77-89.
- DIETZ, R. S. Cryptoexplosion structures: a discussion. **American Journal of Science**, v. 261, n. 7, p.650-664, 1963.
- DRESSLER, B.O.; REIMOLD, W.U. Terrestrial impact melt rocks and glasses. **Earth-Science Reviews**, v. 56, n. 1, p. 205-284, 2001
- EMPLASA. **Mapa Topográfico da Região Metropolitana de São Paulo**. São Paulo: 1980a. 16 mapas, 81 cm x 58 cm. Escala 1:10.000.
- EMPLASA. **Carta geológica da Região Metropolitana da Grande São Paulo**. São Paulo: Emplasa, 1980b. 2 mapas, 81 cm x 58 cm. Escala 1:50.000.
- FRENCH, B. M. **Traces of Catastrophe**: a handbook of shock-metamorphic effects in terrestrial meteorite impact structures. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998
- FRENCH, B. M.; KOEBERL, C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. **Earth-Science Reviews**, v. 98, n. 1, p. 123-170, 2010.
- GAULT, D. E.; WEDEKIND, J. A. Experimental studies of oblique impact. In: CONFERÊNCIA DE CIÊNCIA LUNAR E PLANETÁRIA, 9, 1978, Nova York. **Anais**, 1978, Nova York: Pergamon, p. 3843-3875.
- GRIEVE, R. A. F. Impact craters: lessons from and for the Earth. **Vistas in Astronomy**, v. 36, n. 3, p. 203-230, 1993.
- GRIEVE, R. A. F.; ROBERTSON, P. B. The terrestrial cratering record: I. Current status of observations. **Icarus**, v. 38, n. 2, p. 212-229, 1979.
- HACK, J. T. Stream-Profile Analysis and Stream-Gradient Index. **Journal of Research of the U. S. Geological Survey**. v. 1. n. 4, p. 421-429, 1973.
- HENKEL, H.; EKNELIGODAB, T. C.; AAROC, S. The extent of impact induced fracturing from gravity modeling of the Granby and Tvären simple craters, **Tectonophysics**, v. 485, n. 1, p. 290-305, 2010.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.
- IBGE. **Mapeamento Topográfico do Brasil**. Rio de Janeiro: 1984. 2 mapas, 71 cm x 57 cm. Escala 1:50.000.
- JEONG, S. W. The viscosity of fine-grained sediments: A comparison of low- to medium-activity and high-activity clays. **Engineering Geology**, v. 154, n. 1, p. 1-5, 2013.
- KING, C.A.M. **Techniques in Geomorphology**, Londres: St. Martin's, 1971.
- KOEBERL, C. African meteorite impact craters: characteristics and geological importance. **Journal of African Sciences**, v. 18, n. 4, p. 263-295, 1994
- KOLLERT, R.; BJÖRNBERG, A.; DAVINO, A. Estudos preliminares de uma depressão circular na região de Colônia: Santo Amaro, São Paulo. **Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 10, n. 1, 1961.
- KOMATSU, G., OLSEN, J. W., ORMÖ, J., DIACHILLE, G., KRING, D. A., MATSUI, T. The Tsenkher structure in the Gobi-Altai, Mongolia: Geomorphological hints of an impact origin. **Geomorphology**, v. 74, n. 1, p. 164-180, 2006.
- KUMAR, P. S., KRING, D. A. Impact fracturing and structural modification of sedimentary rocks at Meteor Crater, Arizona. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. 9, p.1-17, 2008.
- LEDRU, M. P.; ROUSSEAU, D. D.; CRUZ JR., R. W.; RICCOMINI, C.; KARMANN, I.; MARTIN, L. Paleoclimate changes during the last 100,000 yr from a record in the Brazilian Atlantic rainforest region and interhemispheric comparison. **Quaternary Research** v. 64, n. 3, p. 444-450, 2005.
- MASERO, W. C. B.; FONTES, S. L. Audiomagnetotelluric investigation of the Colônia Depression, São Paulo – Brazil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2, 1991, Salvador. **Anais**, 1991, Salvador: SBG, p. 317-322.
- MASERO, W. C. B.; Fontes S. L. Geoelectrical studies of the Colônia impact structure, Santo Amaro, State of São Paulo – Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 10, n. 5, p. 25-41, 1992.
- MELOSH, H. J. **Impact cratering**: a geologic process. Nova York: Oxford University Press, 1989.

- MOTTA, U. S.; FLEXOR, J. M. Estudo gravimétrico da Depressão Circular de Colônia, São Paulo, Brasil. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 2, Salvador. **Anais**, 1991, Salvador: SBG, v.1, p.140-142.
- OLIVEIRA, D.; QUEIROZ NETO, J. P. Evolução do relevo na Serra do Mar no Estado de São Paulo a partir de uma captura fluvial. **Geosp**, São Paulo, n. 22, p. 73-88, 2007.
- PASSC – The Planetary and Space Science Center. **Earth Impact Database**. Disponível em: <<http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/>>. Acesso em 10 fev. 2014.
- POMEROL, C.; LAGABRIELLE, Y.; RENARD, M.; GUILLOT, S. **Princípios de Geologia: técnicas, modelos e teorias**. São Paulo: Bookman, 2013.
- PRICE, N.J.; COSGROVE, J.W. Diapirs and circular features. In: \_\_\_\_\_. **Analysis of geological structures**. Cambridge: Cambridge University Press, 2005
- RICCOMINI, C.; TURCQ, B.J.; MARTIN, L.; MOREIRA, M. Z.; LORSCHREITER, M. L. The Colônia Astrobleme, Brasil. **Revista IG**, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 87-94, 1991.
- RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste Brasileiro. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; BRITO-NEVES, C. D. R.; CARNEIRO, B. B. **Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, São Paulo: Beca, 2004, p. 383-405.
- RICCOMINI, C.; CRÓSTA, A. P.; PRADO, R. L.; LEDRU, M. P.; TURCQ, B. J.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, J. A.; REIMOLD, W. U. The Colônia structure, São Paulo, Brazil. **Meteoritics and Planetary Science**, v. 46, n. 11, p. 1630-1639, 2011.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**: Escala 1:500.000. São Paulo: IPT/Fapesp, 1997.
- SCHULTZ, P. H.; ANDERSON, R. R. Asymmetry of the Manson impact structure: Evidence for impact angle and direction. **Geological Society of America: Special Paper**, v. 302, n. 1, p. 397-417, 1996.
- STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, 1117-1142. 1952.
- VARGAS, M. **Os solos da cidade de São Paulo (histórico das pesquisas)**. São Paulo: ABGE, 2002.
- VELAZQUEZ, V. F.; RICCOMINI, C.; SOBRINHO, J. M. A.; PLETSCH, M. A. J. S.; SALLUN, A. E. M.; SALLUN FILHO, W.; HACHIRO, J. Evidence of shock metamorphism effects in allochthonous breccia deposits from the Colônia Crater, São Paulo, Brazil. **International Journal of Geosciences**, v. 4, n. 1A, p. 274-282, 2013.