

# Parte 3

## Crateras de impacto meteorítico no Brasil

Alvaro Penteado Crósta (IG/Unicamp)

Todos os corpos planetários sólidos do sistema solar, tais como a Lua, Marte, Vênus, asteroides e núcleos cometários exibem crateras em suas superfícies. Com a evolução das ciências planetárias no século passado, o processo de formação dessas crateras por colisão com corpos vindos do espaço foi sendo elucidado. Ao contrário dos demais corpos planetários sólidos, a Terra não tem muitas crateras na sua superfície por ser um Planeta geologicamente muito ativo, o que faz com que elas sejam obliteradas. Aqui será apresentada história das concepções sobre a formação das crateras na Terra, dos estudos do processo de formação de crateras meteoríticas, das suas feições geológicas características, da sua distribuição geográfica e temporal, da variedade morfológica e de tamanho, da relação com ocorrências de extinção da vida no nosso Planeta e do desenvolvimento dessas pesquisas no Brasil.

## Considerações iniciais

As crateras da Lua ficaram conhecidas desde as primeiras observações astronômicas de Galileu Galilei usando uma luneta. Ele publicou seus primeiros esboços dessas crateras em seu livro *Sidereus Nuncius* (“O Mensageiro das Estrelas”) em 1610, mas não chegou a debater a sua origem. Nos séculos seguintes muitos astrônomos expressaram a opinião de que essas crateras eram decorrentes de fenômenos vulcânicos, possivelmente com base no que se conhecia sobre os processos geológicos que ocorriam na Terra.

O primeiro cientista a levantar a hipótese da origem meteorítica<sup>1</sup> das depressões lunares foi o físico britânico Robert Hooke (1635-1703), que chegou a produzir em laboratório feições semelhantes às crateras deixando cair objetos sobre lama. Todavia a concepção reinante na época (e errônea) era de que o espaço interplanetário era completamente vazio, o que fez com que Hooke abandonasse essa hipótese.

No início do século 19 ocorreu um fato que mudou por completo essa concepção. Na tarde de 26 de abril de 1803, milhares de fragmentos de **meteoritos** caíram sobre a cidade de *L'Aigle*, no norte da França. O fenômeno despertou o interesse da Academia Francesa de Ciências, que enviou o jovem astrônomo Jean-Baptiste Biot (1744-1862) para investigá-lo. O relatório de Biot mostrou claramente que se tratava de material extraterrestre e foi o marco inicial da ciência da meteorítica.

Não obstante, a maioria dos astrônomos e geólogos da época permaneceu presa à teoria da origem vulcânica das crateras, fosse na Lua ou na Terra, embora houvesse alguns que propusessem a origem por impacto meteorítico, como Franz Gruithuisen (1774-1852) e Grove Karl Gilbert (1843-1918). Certamente contribuiu para isso a prevalência da escola “uniformitarista” do pensamento geológico fundada pelos “pais da geologia” James Hutton (1726-1797) e Charles Lyell (1787-1875). Segundo essa escola, processos endógenos lentos causavam de forma gradual todas as mudanças no registro geológico. O lema dos uniformitaristas era: “o presente é a chave para entender o passado”. Fenômenos raros que não pudessem ser diretamente observados na escala cronológica dos seres humanos, não eram considerados. Ora, os impactos meteoríticos de grandes dimensões são eventos extremamente raros e espaçados no tempo geológico, contrariando assim os princípios do uniformitarismo. Isso explicaria o motivo pelo qual os adeptos dessa escola, que constituíam a maioria dos cientistas daquela época, opunham-se à origem meteorítica das crateras.

---

<sup>1</sup> Crateras de origem meteorítica são causadas pela queda de corpos vindos do espaço. Ver **meteorito**.

## Origem meteorítica

Uma mudança começou a ocorrer a partir da descoberta de uma cratera no Arizona, EUA, que logo chamou a atenção de Grove Gilbert, geólogo chefe do *U. S. Geological Survey*, pelo fato de que grande quantidade de fragmentos meteoríticos metálicos ocorria na região ao redor da cratera. Assim mesmo, muitos pesquisadores acreditavam que essa associação espacial da cratera com os fragmentos meteoríticos fosse aleatória já que, dentro da cratera, eles não foram encontrados. Para eles, tratava-se então de mais uma feição de origem vulcânica, possivelmente formada pela ejeção explosiva de gases, uma vez que não havia rochas vulcânicas na cratera.

Foi então que o engenheiro de minas Daniel M. Barringer (1860-1929), acreditando que se tratava realmente de cratera meteorítica, e que a parte principal do **meteorito** estivesse enterrada debaixo do fundo da cratera, adquiriu toda a área. Ele iniciou projeto de perfuração e exploração em seu interior, com o objetivo de localizar e extrair os metais raros que são encontrados nos **meteoritos** metálicos, tais como níquel, cobalto e elementos do grupo da platina. No período de 1903 a 1929, ano em que morreu, Barringer procurou em vão pelo grande **meteorito** que acreditava estar enterrado no local. Contudo, ele achou algo interessante abaixo do fundo da cratera: **brechas** compostas por fragmentos das rochas que existiam no local, porém extremamente deformadas, assim como partículas muito pequenas ricas em ferro e níquel. Embora tivesse sido um fracasso do ponto de vista econômico, os trabalhos de Barringer forneceram o primeiro estudo detalhado de uma cratera meteorítica terrestre, que foi por ele batizada de *Meteor Crater*.

Na mesma época outros cientistas trabalhando isoladamente vinham realizando pesquisas sobre os efeitos de choque em rochas a velocidades muito altas (chamadas de “hipervelocidades”), tipicamente acima de 3 km/s. **Meteoroides** viajam pelo espaço a essas velocidades e, quando colidem contra outros corpos sólidos, causam explosões e liberação de grandes quantidades de energia. Os resultados dessas pesquisas mostraram que, para um impacto que tivesse formado a *Meteor Crater*, o **meteorito** teria tamanho 10 a 20 vezes menor que a cratera e seria completamente destruído pela explosão resultante do choque com a Terra. Com isso mostrou-se que não havia incompatibilidade entre a origem meteorítica da *Meteor Crater* e a ausência de grande quantidade de material meteorítico e de um **meteorito** enterrado abaixo do fundo da cratera.

Barringer teve grande dificuldade para aceitar esses resultados, pois mostravam que todo seu esforço de mais de uma década e meia e a fortuna

dispendida na busca dos metais raros na *Meteor Crater* não tinha respaldo científico. Logo após aceitar os argumentos científicos, morreu de ataque cardíaco. A parte feliz dessa história é que os seus descendentes, tendo herdado a propriedade com a cratera, abriram-na à visita pública e construíram um lucrativo museu, atualmente visitado por centenas de milhares de pessoas a cada ano. Parte da renda desse empreendimento é destinada pela família Barringer a financiar pesquisas científicas sobre crateras meteoríticas e a premiar cientistas que se destacam nessa área.

Com a evolução mais intensa das ciências planetárias a partir de meados do século passado, o processo de formação de crateras pelo impacto de corpos meteoríticos foi sendo progressivamente elucidado. Além disso, a partir de meados da década de 1960 as primeiras missões espaciais de exploração do sistema solar e também as pesquisas geológicas em crateras terrestres revelaram que as crateras meteoríticas constituem fenômeno universal no sistema solar. Crateras dos mais variados tamanhos dominam as paisagens de todos os planetas do sistema solar com superfície sólida, bem como de suas luas. Descobriu-se também que elas recobrem as superfícies de corpos menores, como **asteroides** e cometas. Podemos afirmar que as crateras de impacto meteorítico constituem a feição morfológica mais frequente em todos os corpos planetários sólidos. Todas as crateras da Lua, bem como muitas das crateras de Marte, Vênus e Mercúrio têm origem meteorítica. Contudo, como veremos, no nosso Planeta, as crateras não são comuns. Talvez por isso a importância dos impactos meteoríticos na Terra ainda é uma ideia que está sendo gradualmente aceita. Para isso têm ajudado as observações diretas de impacto, como a colisão do cometa Shoemaker-Levy 9 contra Júpiter em julho de 1994, a queda de um **meteorito** de 3 t perto de Carancas, Peru, em setembro de 2007, formando cratera com 14 m de diâmetro e a explosão atmosférica de um **meteoróide** de 9 mil t em Chelyabinsk, Rússia, em fevereiro de 2013, todas amplamente documentadas pela imprensa.

## Crateras meteoríticas na Terra

Com a aceitação da origem meteorítica das crateras ficou estabelecido que a Terra teria certamente passado por processos de impacto, com a mesma frequência e intensidade dos demais corpos planetários sólidos do sistema solar. Como explicar então a escassez de crateras meteoríticas na superfície da Terra?

A partir da segunda metade do século 20, com a evolução da **teoria da deriva continental** e a descoberta do processo conhecido por **tectônica de**

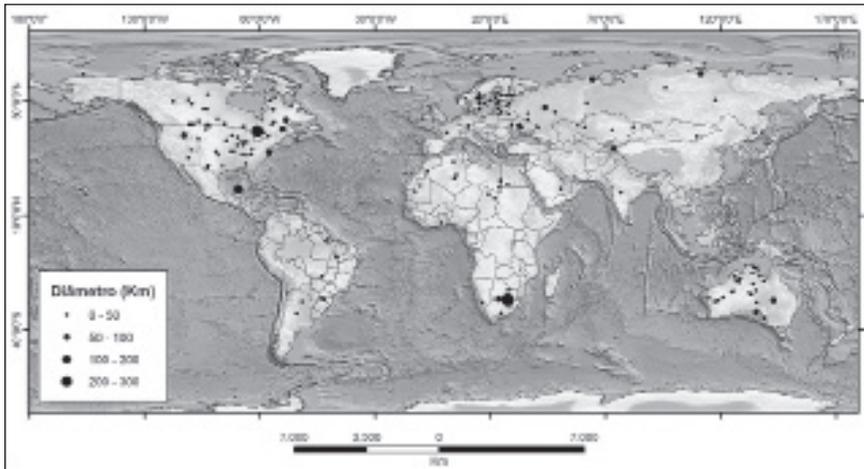
**placas**, passou-se a ter uma visão mais realista do papel dos processos geológicos e atmosféricos da Terra no decorrer do tempo geológico, em alterar e até mesmo apagar por completo as crateras por erosão, sedimentação e movimentação das placas tectônicas. Além disso, a maior parte da superfície da Terra é coberta por oceanos, o que também contribui para que o número de crateras terrestres visíveis seja menor. Contrastando com isso, a Lua manteve o registro praticamente intacto perfeito de suas crateras por não ter passado, nos últimos três bilhões de anos, por nenhum processo endógeno que pudesse alterar sua superfície.

Embora a maioria das grandes crateras formadas nos primórdios do tempo geológico, e também as crateras mais antigas já tenham sido eliminadas total ou parcialmente da paisagem terrestre, são conhecidas atualmente cerca de 180 crateras meteoríticas em nosso Planeta, a maioria em diferentes estágios erosivos<sup>2</sup>, outras soterradas em bacias sedimentares ou até mesmo debaixo de oceanos. O registro atualizado dessas crateras pode ser consultado no *Earth Impact Database* (<http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/index.html>).

A distribuição espacial das crateras de impacto meteorítico na superfície da Terra é bastante irregular, havendo incidência maior na América do Norte, Europa e Austrália (Figura 1). No Brasil são conhecidas poucas estruturas desse tipo, principalmente quando se leva em conta sua extensa dimensão territorial e a relativa estabilidade geológica de seus terrenos. O motivo dessa escassez, que também ajuda a explicar o número relativamente baixo de crateras em algumas regiões do mundo como o Brasil, é que os critérios geológicos utilizados para reconhecê-las e diferenciá-las de outras estruturas são relativamente desconhecidos. A essa dificuldade vêm se juntar o grau relativamente baixo de conhecimento geológico de muitas regiões da Terra e a ausência de levantamentos geológicos específicos para identificação de estruturas de impacto.

---

<sup>2</sup> O termo “cratera de impacto” é utilizado para designar crateras relativamente mais jovens e que não foram ainda modificadas significativamente por processos geológicos, ao passo que “estrutura de impacto” é usado para designar o resultado atual do que se observa após uma cratera ter sido modificada, decorrido muito tempo após sua formação. Existe ainda o termo “astroblema” (do grego, *astron blema*, que significa “cicatriz causada por estrela”), cunhado por Dietz (1961) e usado para designar crateras em estágios erosivos mais avançados, mas ainda visíveis.

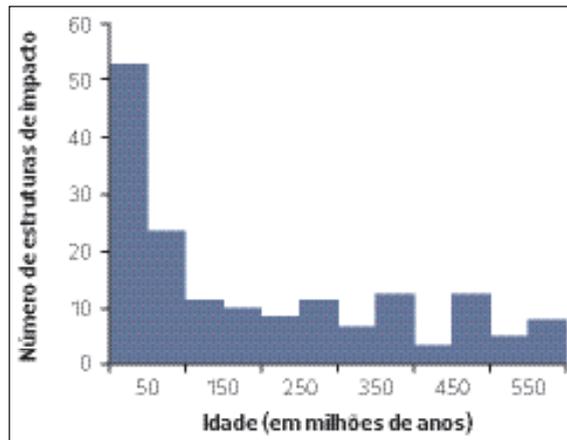


**Figura 1.** Distribuição das crateras de impacto na Terra

Com relação às dimensões, as crateras terrestres podem ter desde alguns metros até algumas centenas de quilômetros de diâmetro. Muitas vezes é difícil estabelecer o verdadeiro diâmetro devido à remoção dos registros morfológicos pela erosão. Crateras com diâmetros abaixo de 20 km tendem a ser obliteradas mais rapidamente por processos erosivos ou sedimentares, o que causa viés no registro terrestre quando comparado com o registro de outros corpos planetários.

A distribuição temporal das crateras terrestres é significativamente afetada pelo fato de o registro ser bastante incompleto, aliado à relativa escassez de datações isotópicas. Para que uma cratera possa ter sua idade de formação definida com precisão, é necessário analisar, utilizando métodos geocronológicos isotópicos, fragmentos de rochas fundidos pelo impacto. Mas apenas 10% das rochas afetadas por impacto em uma cratera são submetidas a pressões de choque suficientes para permitir a fusão, sendo que a maior parte fica nas formações geológicas superiores ou na parte externa das crateras, as primeiras a serem removidas por processos erosivos. Por causa da dificuldade em encontrar material apropriado para datações isotópicas, a maioria das crateras têm idade máxima estimada com base na idade das rochas mais jovens afetadas pelo impacto. Portanto, o registro cronológico das crateras terrestres é bastante impreciso.

A distribuição das crateras terrestres por idade durante os últimos 600 Ma (Ma = milhão de anos) é mostrada na Figura 2. Mais de 60% das crateras são mais jovens do que 200 Ma, o que evidencia um viés do registro favorável às crateras mais jovens.



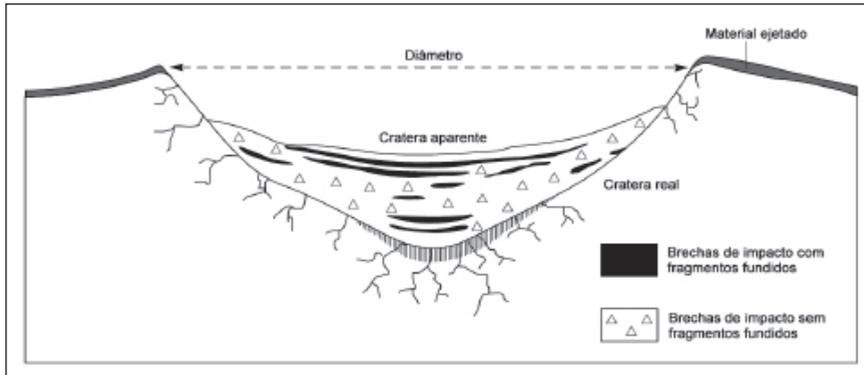
**Figura 2.** Frequência de estruturas de impacto terrestres nos últimos 600 Ma, agrupadas por idade em intervalos de 50 Ma. Observa-se que a maioria delas é relativamente jovem (< 200 Ma). Adaptada de Grieve, 2006

A estimativa da taxa de formação de crateras terrestres com diâmetro  $\geq 20$  km nos últimos 120 Ma feita por Grieve e Shoemaker (1994) é de que, a cada Ma aproximadamente, de uma a cinco crateras de impacto com diâmetro  $\geq 20$  km são formadas na Terra, resultantes da colisão de corpos celestes com dimensões entre 1 e 2 km. Essa estimativa é baseada tanto no número de crateras conhecidas com essas características de dimensões e idades, como também em observações astronômicas dos NEOs (*Near Earth Objects*). Contudo, as incertezas associadas a essa estimativa são bastante elevadas (cerca de 50%), devido ao registro incompleto das estruturas de impacto terrestres e insuficiência de dados para modelagens estatísticas mais precisas.

## Morfologia e tipos de crateras

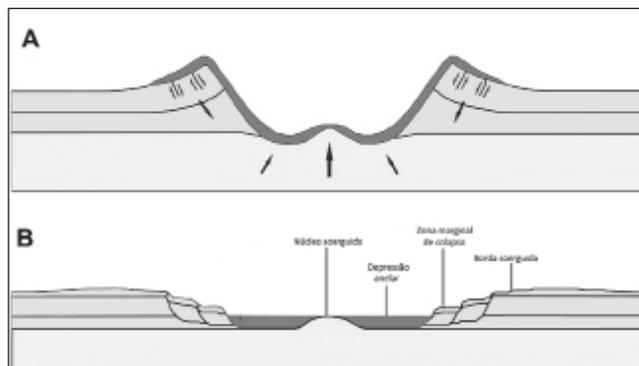
As crateras terrestres de impacto são classificadas, de acordo com a morfologia original, em dois tipos principais. O primeiro reúne as crateras do tipo simples, que são depressões em forma de bacia com diâmetro variando entre 2 a 4 km (Figura 3). Logo após a formação de uma cratera do tipo simples ocorre o colapso das paredes marginais para dentro da cavidade, seguido da deposição, em seu interior, de fragmentos de rocha ejetados para o alto pela força do impacto. O material depositado no interior da cratera é composto por mistura de fragmentos de rocha, que podem ou não apresentar deforma-

ção por impacto, com fragmentos de rocha fundida. As crateras simples preservadas possuem profundidade aparente de aproximadamente 1/3 de seu diâmetro (French, 1998).



**Figura 3.** Cratera do tipo simples em estágio pré-erosional. Adaptada de French, 1998

As crateras terrestres do tipo complexo possuem diâmetros geralmente acima de 2 km quando formadas em rochas sedimentares e de 4 km em rochas ígneas e metamórficas. A morfologia é caracterizada pela presença de uma região central elevada, denominada núcleo soerguido, no qual geralmente estão expostas rochas oriundas de camadas mais profundas; uma depressão anelar circundando essa região soerguida e uma zona marginal de colapso de blocos e, finalmente, uma borda circular soerguida (Figura 4. Grieve, 1991). As crateras complexas possuem profundidade aparente de 1/5 a 1/6 de seu diâmetro e aquelas em estado bastante avançado de erosão podem ter apenas o núcleo soerguido ainda identificável.



**Figura 4.** Cratera do tipo complexa: (A) estágio pré-erosional; (B) estágio erosional intermediário

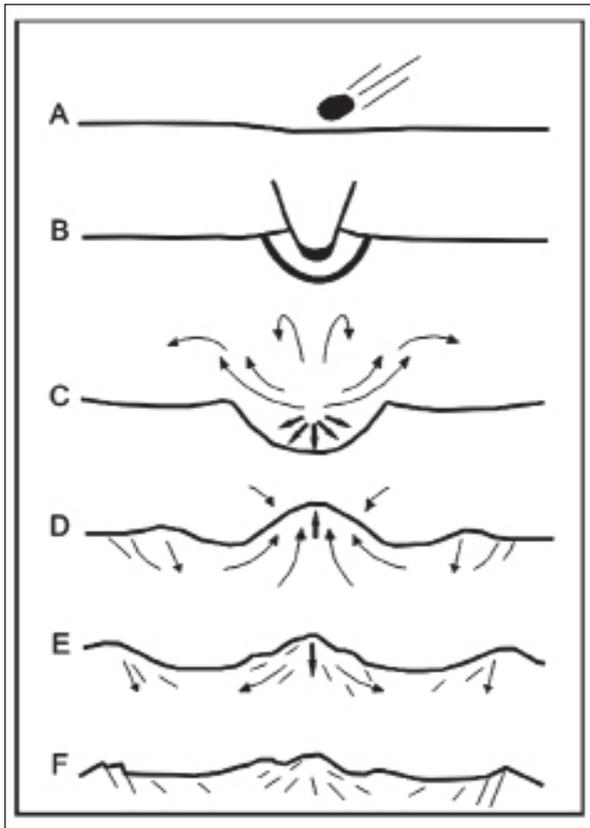
## Processos geológicos na formação das crateras

As crateras de impacto são produtos da colisão de corpos celestes que penetram na atmosfera terrestre com pequena ou nenhuma desaceleração, chegando ao solo praticamente com a mesma velocidade com que viajam pelo espaço. Essa velocidade é de aproximadamente 11 km/s que, combinada com a grande massa desses corpos, resulta numa energia cinética extremamente elevada. De fato, a quantidade de energia envolvida é tão elevada que torna impossível reproduzir esse tipo de fenômeno em laboratório. O conhecimento sobre esses fenômenos advém na maior parte de estudos indiretos (Grieve, 2006).

Apenas para dar ideia da ordem de grandeza da energia liberada, um **asteroide** com 1,7 km de diâmetro, ao se chocar contra a Terra formaria cratera com 40 km de diâmetro e liberaria, instantaneamente e em um único local, a mesma quantidade de energia liberada anualmente por toda a Terra pelo conjunto de atividades sísmicas, vulcânicas e de fluxo de calor. Essa foi a energia liberada na formação da maior estrutura de impacto da América do Sul, o Domo de Araguainha (ver adiante).

No impacto, toda energia cinética é transformada em ondas de choque de altíssima pressão, que se espalham pelas rochas-alvo em velocidades de vários quilômetros por segundo. Um grande volume de rochas-alvo é fragmentado, deformado, comprimido, derretido e até mesmo vaporizado em questão de segundos.

A formação de cratera simples passa por três estágios: contato/compressão, escavação e modificação (Gault *et al.*, 1968). Numa cratera complexa, Melosh (1989) caracterizou seis estágios ilustrados na Figura 5.



**Figura 5.** Estágios de formação de uma cratera complexa: (A) aproximação do corpo extraterrestre; (B) impacto, evaporação do projétil e formação da cratera transitória; (C) compressão e escavação; (D) formação do núcleo soerguido; (E) colapso gravitacional do núcleo central e da borda; (F) forma final (Melosh, 1989; Dressler and Reimold, 2001)

O estágio inicial de formação da cratera dura apenas poucos segundos. Mas o estágio final de modificação, por meio do qual a cratera evolui morfológicamente para sua configuração final, dura tipicamente minutos, mas dura mais para crateras maiores (Melosh, 1989; Dressler and Reimold, 2001). Estima-se que a duração para a formação de cratera com 100 km de diâmetro não ultrapasse uma hora (French, 1998).

## Feições geológicas indicativas

A feição mais sugestiva da existência de cratera meteorítica são as estruturas circulares observáveis na superfície que, por sua vez, constituem formas anômalas na superfície terrestre. Contudo, nem sempre a existência de estrutura circular na superfície pode ser indicativa de cratera meteorítica. Há diversos tipos de

fenômenos geológicos que também podem resultar na formação de estruturas circulares. Além disso, crateras meteoríticas em estágios mais avançados de erosão tendem a perder essa característica morfológica circular na superfície. Portanto, podem existir estruturas de impacto meteorítico muito erodidas que não estão mais associadas a feições circulares, mas que assim mesmo podem ser reconhecidas por meio de feições de deformação permanente registradas nas rochas que se encontravam abaixo da superfície, e que podem ter sido expostas pela erosão. Por fim, há também crateras meteoríticas que se encontram soterradas por baixo de camadas sedimentares depositadas após a formação das mesmas e que, portanto, não podem ser observadas por métodos diretos.

French e Koeberl (2010) recomendam os seguintes passos para a identificação de possíveis novas crateras meteoríticas:

- detecção da estrutura: pode ser feita por estudos geológicos de campo, interpretação de fotografias aéreas e/ou imagens orbitais de sensoriamento remoto, levantamentos geofísicos e sondagens;
- identificação de feições diretamente associadas ao evento de impacto, tais como anomalias geoquímicas de elementos químicos presentes em **meteoritos**, porém mais raros na crosta terrestre (níquel, irídio, ósmio etc.), presença de **microtectitos** decorrentes da fusão das rochas pelo impacto, presença de **brechas de impacto** (rochas constituídas por fragmentos das rochas pré-existentes), **cones de estilhacamento** (*shatter cones*), **feições planares** microscópicas de deformação em cristais de quartzo e de outros minerais e minerais formados em ambientes de alta pressão, tais como a coesita e a estishovita.

Geralmente as crateras meteoríticas terrestres são identificadas a partir da combinação de vários métodos científicos, que vão desde a análise de imagens de sensoriamento remoto e de dados geofísicos, até a análise de rochas em microscópios e a análise da composição química. Somente após a identificação segura dessas feições geológicas é possível registrar a descoberta de nova cratera meteorítica.

## Relação com extinção da vida na Terra

A associação entre impactos meteoríticos e eventos de extinções biológicas foi, por algum tempo, cercada de controvérsia. A hipótese proposta por Alvarez *et al.* (1980), de que o grande evento de extinção ocorrido no limite entre o Cretáceo e o Paleogeno (limite K-Pg), há cerca de 65 Ma, teria sido causado por impacto de grandes dimensões, rapidamente motivou intenso debate sobre

o tema. A conclusão desses autores baseou-se na descoberta de uma delgada camada sedimentar enriquecida em irídio próxima à cidade de Gubbio, na Itália. A camada, encontrada posteriormente em dezenas de diferentes locais do Planeta na mesma posição cronoestratigráfica, situa-se exatamente no limite K-Pg e a ela também estavam associadas feições de deformação por choque, tais como a presença de **feições planares de deformação (PDFs)** em quartzo, **microtectitos** e estishovita. Isso os levou a associar o irídio anômalo (que seria proveniente do **meteorito**) e as feições de choque à existência de grande estrutura de impacto e à provável causa da extinção da vida. Somente 11 anos após a publicação do artigo de Alvarez e colaboradores foi encontrada cratera de impacto com as características de idade e a dimensão capaz de resultar em evento de extinção em massa de escala global. Graças a levantamentos sísmicos para exploração de petróleo na região do Golfo do México, foi descoberta a cratera de Chicxulub, com 170 km de diâmetro (Hildebrand *et al.*, 1991). Trata-se de estrutura submersa formada sobre rochas carbonáticas e posteriormente preenchida por carbonatos plataformais com mais de 1 km de espessura. Datações de material fundido extraído de testemunhos de sondagem forneceram idade em torno de 64,9 Ma para o evento.

No primeiro momento, a controvérsia sobre a relação da estrutura com o evento de extinção, que eliminou os grandes répteis e outras formas de vida da Terra, girou em torno do fato de que essa não teria sido uma extinção rápida, mas sim gradual e com duração da ordem de várias centenas a poucos milhões de anos. Na hipótese de ter ocorrido extinção gradual, um evento catastrófico de consequências de curto prazo, como aqueles associados a grandes impactos, não poderia ter sido a causa. Em seguida, o debate girou em torno das consequências de um impacto dessa magnitude para o meio ambiente e, portanto, para a vida terrestre. Em ambos, todas as objeções ao impacto como causador do evento de extinção acabaram por ser eliminadas por meio de estudos comparativos e em escala dos efeitos e consequências dos impactos de grande magnitude. Atualmente, a rejeição à chamada “Teoria Alvarez” foi praticamente superada (Schulte *et al.*, 2010).

Sabe-se hoje que extinções biológicas associadas a eventos de impacto possuem duas causas, uma direta e outra indireta. A causa direta é relacionada aos efeitos diretos e imediatos decorrentes do impacto, tais como ondas de choque, de calor e de vento, atividade sísmica, queda de fragmentos e até mesmo soterramento pelos materiais ejetados da cratera. Esses efeitos certamente afetarão todas as formas de vida que habitem áreas relativamente próximas do local do impacto, mas não seriam por si só suficientes para causar eventos globais de extinção. A causa indireta está relacionada a vários tipos de alterações ambientais causadas

pelo impacto, que ocorrerão por período de tempo após o mesmo, causando mudanças rápidas e letais nos habitats da fauna e da flora, com duração mais longa do que aquela em que os organismos podem ficar dormentes (Kring, 2003).

Evidências de alguns outros eventos de extinção em massa e sua possível relação com impactos meteoríticos continuam a despertar o interesse de pesquisadores em todo o mundo. Um desses eventos é o que ocorreu no limite entre o Eoceno e o Oligoceno, há cerca de 35 Ma, para o qual têm sido encontradas evidências de feições de choque (tais como **microtectitos**) em camadas cronocorrelatas. Nesse caso, as duas estruturas de impacto potencialmente causadoras são as de Popigai, Rússia, e a Baía de Chesapeake, EUA<sup>3</sup>, ambas com 90 km de diâmetro. Outro evento de extinção cuja relação com impacto tem sido investigada é o do limite Permo-Triássico (limite P-T), há cerca de 250 Ma. Trata-se do maior evento de extinção de vida ocorrido na Terra, no qual se estima que mais de 90 % das espécies vegetais tenham sido eliminadas. Contudo, não foi ainda identificada nenhuma estrutura de impacto de grandes dimensões na Terra e que tenha exatamente essa idade.

## Crateras meteoríticas no Brasil

Não há, no Brasil, programa sistemático de pesquisas voltadas para o estudo de crateras meteoríticas, como já ocorreu em outros países, como o Canadá e a Rússia. O que há são iniciativas individuais de pesquisadores ou de pequenos grupos que se interessam por essas estruturas, ou então daqueles que, por acaso, em atividades de mapeamento, depararam-se com feições circulares com características associáveis às crateras meteoríticas.

O autor deste texto vem estudando as crateras brasileiras desde o fim da década de 1970, quando desenvolveu estudos pioneiros no Domo de Araguainha, como parte de sua dissertação de mestrado realizada no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Posteriormente, já vinculado ao Instituto de Geociências (IG) da Unicamp, vem desenvolvendo pesquisas de forma mais sistemática nesse tema, em conjunto com alunos de graduação e de pós-graduação e em colaboração com outros grupos de pesquisa no Brasil e no exterior. Os resultados dessas pesquisas levaram à descoberta e/ou caracterização do conjunto de crateras meteoríticas conhecidas atualmente no Brasil. Pesquisadores de outras instituições brasileiras, como a Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Universidade Federal

---

<sup>3</sup> Na costa atlântica entre MD e VA.

do Ceará (UFC) e Universidade de Brasília (UnB), têm ocasionalmente desenvolvido estudos nesse tema.

O território brasileiro possui, até o presente, sete crateras com origem meteorítica comprovada (Crósta, 2012; Crósta and Vasconcelos, 2013), apresentadas na Tabela 1 e Figura 6. Todas elas estão em bacias sedimentares e encontram-se expostas em superfície, em diferentes estágios de erosão. Existem várias outras estruturas cuja possível origem é meteorítica, mas que ainda não dispõem de evidências comprobatórias. Entre estas, destaca-se a estrutura circular de Colônia, no município de São Paulo.

Nome	UF	Latitude	Longitude	Diâmetro (km)
Domo de Araguainha	MT/GO	16° 49' S	52° 59' W	40,0
Domo de Vargeão	SC	26° 49' S	52° 10' W	12,4
Riachão	MA	07° 43' S	46° 39' W	4,50
Serra da Cangalha	TO	08° 05' S	46° 52' W	12,0
Vista Alegre	PR	25° 57' S	52° 42' W	9,5
Cerro Jarau	RS	30° 12' S	56° 32' W	13,0
Santa Marta	PI	10° 10' S	45° 14' W	10,0
Colônia	SP	23° 52' S	46° 42' W	3,6

**Tabela 1.** Estruturas de impacto no Brasil (as latitudes e longitudes se referem ao ponto central das estruturas). A estrutura de Colônia não tem ainda sua origem por impacto meteorítico comprovada.



**Figura 6.** Localização das crateras meteoríticas brasileiras

## Domo de Araguainha

O Domo de Araguainha, com 40 km de diâmetro, constitui a maior estrutura de impacto da América do Sul, além de ser também a mais conhecida e antiga entre as que ocorrem em território brasileiro. Ele se formou sobre rochas sedimentares de idade paleozoica da Bacia do Paraná e sobre rochas cristalinas de seu embasamento. É cortado ao meio pelo rio Araguaia, que faz a divisa entre os estados de GO e MT. Foi observado pela primeira vez no início da década de 1970 a partir da descoberta de enorme estrutura circular nas primeiras imagens orbitais de sensoriamento remoto obtidas pelo satélite Landsat (Dietz and French, 1973). A comprovação da origem por impacto meteorítico se deve a Crósta *et al.* (1981) e, desde então, essa cratera tem sido estudada por diversos pesquisadores.

Trata-se de cratera do tipo complexa, com núcleo central soerguido com 7 km de diâmetro, onde se encontram expostas rochas graníticas do embasamento cristalino. Estima-se que essas rochas graníticas expostas no centro da estrutura tenham sido soerguidas de uma profundidade superior a 2,5 km.

O evento de impacto que formou essa cratera foi datado por métodos isotópicos em 247 Ma por Tohver *et al.* (2012) e a longa exposição desde então ocasionou erosão relativamente profunda da estrutura. Nela são encontrados diversos exemplos das feições de deformação por choque características de crateras meteoríticas, como **brechas de impacto**, **cones de estilhaçamento**, **feições planares** microscópicas e **microtectitos**.

## Serra da Cangalha

A cratera de Serra da Cangalha tem 13 km de diâmetro e foi formada em rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba, no Estado do TO, perto da cidade de Campos Lindos. Trata-se de cratera do tipo complexa, com núcleo central soerguido com 3 km de diâmetro, o qual forma a notável feição geomorfológica que dá o nome à cratera (Figura 7). Esse nome foi inspirado pelas camadas sedimentares que, em decorrência da deformação causada pelo impacto, formam feições que lembram as antigas cangalhas utilizadas no transporte de cargas em mulas.



**Figura 7.** Vista aérea do núcleo central da estrutura de impacto de Serra da Cangalha (Foto: Andréa Bartorelli)

A primeira referência a essa cratera foi feita no mesmo artigo de Dietz e French (1973), que a observaram juntamente com o Domo de Araguainha em imagens do satélite Landsat. Estudos recentes realizados pelo grupo da Unicamp que estuda crateras meteoríticas, coordenado pelo autor, vêm revelando informações geológicas importantes sobre essa estrutura, inclusive com a descoberta de feições características de deformação por choque, tais como **brechas de impacto**, **cones de estilçamento** e **feições planares** microscópicas (Kenkmann *et al.*, 2011; Vasconcelos *et al.*, 2012b). Da mesma forma, estudos geofísicos têm revelado importantes aspectos da Serra da Cangalha em superfície e também em subsuperfície (Vasconcelos *et al.*, 2010; Vasconcelos *et al.*, 2012a). Contudo, ainda não foi possível determinar a idade dessa cratera.

## Riachão

A cratera de Riachão tem diâmetro relativamente pequeno de 4,2 km e está localizada no Estado do MA, perto da cidade homônima e a apenas 40 km da Serra da Cangalha. É uma cratera complexa com núcleo central soerguido com forma ligeiramente elíptica.

A primeira referência a essa estrutura foi feita por astronautas da missão tripulada Apollo-Soyuz na década de 1970, que a avistaram e fotografaram en-

quanto estavam registrando imagens da Serra da Cangalha. McHone (1986) apresentou os resultados de estudos de campo realizados no local, sem ter conseguido identificar evidências seguras de sua natureza meteorítica.

As evidências que levaram à comprovação da origem de Riachão surgiram recentemente, a partir de estudos realizados pelo grupo da Unicamp, e incluem a identificação de **feições planares** microscópicas **de deformação** por choque (Maziviero, 2012; Maziviero *et al.*, 2012). A cratera aparenta estar profundamente erodida, o que dificulta a identificação de feições macroscópicas de choque, tais como os **cones de estilhaçamento**.

### Vargeão

A cratera do Domo de Vargeão tem diâmetro de 12,4 km e está localizada no oeste de Santa Catarina. Em seu interior encontra-se a cidade que dá o nome à cratera, que foi formada em rochas vulcânicas da formação Serra Geral e em arenitos de camadas situadas abaixo desta, que foram soerguidas pelo impacto em cerca de 1 km, pertencentes à formação Botucatu (conhecida por conter o Aquífero Guarani nas regiões sudeste e sul do Brasil), na Bacia do Paraná. A estrutura é do tipo complexa e o seu núcleo central soerguido, embora não muito evidenciado pela topografia, tem 3 km de diâmetro.

A estrutura circular marcante foi inicialmente reconhecida por Paiva Filho *et al.* (1978) que a atribuíram a um evento de natureza ígnea. Sua origem por impacto meteorítico foi apontada por Crósta (1987) a partir da identificação de **brechas de impacto**. Essas **brechas** ocorrem de maneira extensiva em todo o interior da cratera. Mais recentemente foram reconhecidos vários tipos de feições de deformação por impacto nessas rochas, incluindo **cones de estilhaçamento** em basaltos e em arenitos, e **feições** microscópicas **de deformação** por choque (Crósta *et al.*, 2012a). Kazzuo-Vieira *et al.* (2009) realizaram estudos geofísicos que permitiram caracterizar esta cratera em subsuperfície por meio do uso do método sísmico. Esse método utiliza ondas sísmicas produzidas artificialmente, que se propagam pelas rochas e geram informações utilizadas para estudar as camadas e estruturas geológicas situadas abaixo da superfície.

### Vista Alegre

A cratera de Vista Alegre também se formou em rochas vulcânicas da formação Serra Geral na bacia do Paraná. Ela tem diâmetro de 9,5 km e está situada no município de Coronel Vivida no sudoeste do PR. Supõe-se que seja

cratera do tipo complexa, pois em seu interior há arenitos provavelmente da formação Botucatu, indicando a existência de núcleo soerguido que não é evidenciado pela topografia.

Vista Alegre foi descoberta em 2003 a partir da observação de imagens de satélite e de estudos de campo realizados pelo grupo da Unicamp (Crósta *et al.*, 2004), que identificaram **brechas de impacto**. Análises posteriores dessas **brechas** levaram à identificação de vários tipos de deformação por impacto meteorítico, descritas por Crósta *et al.* (2010a). Resultados preliminares de análises isotópicas indicaram idade aproximada de 115 Ma para a formação dessa cratera (Crósta *et al.*, 2012b).

### Cerro Jarau

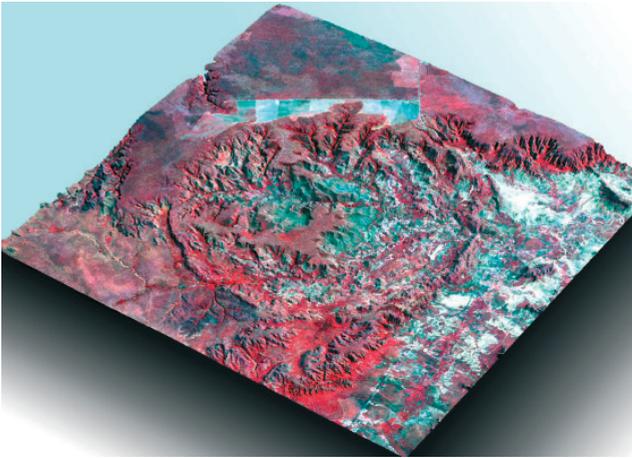
A estrutura de Cerro Jarau está localizada no município de Quaraí, RS, próxima à divisa com o Uruguai. Ela é composta por conjunto de elevações topográficas em forma de semicírculo, bastante destacada na topografia suave que caracteriza os pampas gaúchos. As elevações são constituídas por arenitos, circundados por rochas vulcânicas de composição basáltica da bacia do Paraná. Portanto, sua configuração geológica é bastante semelhante às das crateras de Vista Alegre (PR) e Vargeão (SC), provavelmente envolvendo as mesmas unidades geológicas (arenitos da Formação Botucatu e basaltos da Formação Serra Geral).

O diâmetro da estrutura não pode ser estabelecido com segurança, pois suas bordas não se encontram preservadas como no caso de Vista Alegre e Vargeão. Estima-se que tenha entre 10 e 13 km. As elevações formadas por arenito que dão o nome à estrutura representam o núcleo soerguido central, de formato alongado na direção norte-sul, com eixo maior de cerca de 6 km.

Resultados preliminares do estudo dessa estrutura realizado por Crósta *et al.* (2010b) indicam a ocorrência de **brechas de impacto** nos basaltos e de **feições de deformação** por choque. A análise detalhada das características geológicas e deformacionais de Cerro Jarau encontra-se em desenvolvimento.

### Santa Marta

Essa cratera constitui a mais recente descoberta realizada pelo grupo da Unicamp no Brasil (Uchôa *et al.*, 2013; Oliveira *et al.*, 2014). Ela está situada na bacia do Parnaíba, da mesma forma que as crateras de Serra da Cangalha e Riachão, no município de Corrente, PI. Seu diâmetro é de cerca de 10 km e possui núcleo central soerguido com cerca de 2,5 km de diâmetro (Figura 8).



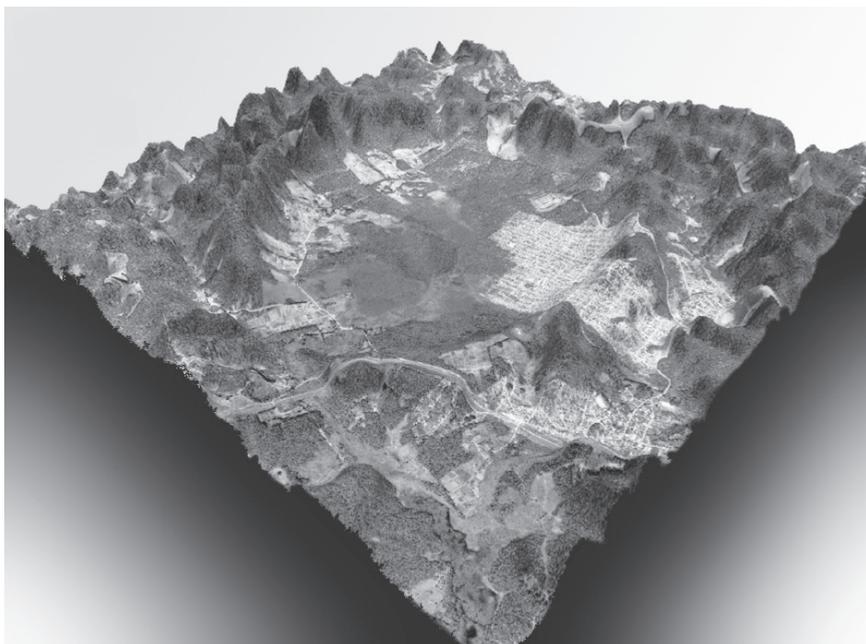
**Figura 8.** Vista em perspectiva da cratera de Santa Marta, PI, a partir da combinação de imagens orbital do sensor Aster com modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*). A imagem acima foi gerada a partir de **bandas** espectrais situadas na região do visível e do infravermelho e mostra a vegetação na cor vermelha

Sua recente confirmação como cratera meteorítica se deu por meio do reconhecimento de **brechas de impacto** e de **feições de deformação** por choque que incluem **cones de estilhaçamento** e **feições planares de deformação**, relatados por Uchôa *et al.* (2013) e Oliveira *et al.* (2014).

## Colônia

A estrutura de Colônia encontra-se no município de São Paulo, SP, mais precisamente no distrito de Parelheiros, próximo à Serra do Mar. Trata-se de depressão circular com 3,6 km de diâmetro formada em rochas metamórficas, com borda externa que se eleva mais de 100 m acima do seu interior (Figura 9).

Ela é conhecida desde a década de 1960 e até hoje sua origem por impacto meteorítico não pode ser cientificamente comprovada, ainda que não tenham sido encontradas evidências de outros tipos de fenômenos geológicos que pudessem formar essa depressão. O motivo é que ela é preenchida por sedimentos inconsolidados, o que impede o acesso a possíveis **brechas de impacto** contendo feições de choque, que estariam no fundo da depressão, abaixo dos sedimentos.



**Figura 9.** Vista em perspectiva da estrutura de Colônia (SP) a partir de imagem do satélite Ikonos combinada com modelo digital de elevação SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*)

Apesar de não existirem evidências diretas da origem meteorítica, há dados indiretos, obtidos por métodos geofísicos, que dão sustentação a essa hipótese, conforme relatado por Riccomini *et al.* (2011). Contudo, a confirmação dessa origem está ainda na pendência de trabalhos de perfuração que atravessem as camadas sedimentares e atinjam o fundo da depressão, provendo assim amostras de rocha nas quais será possível analisar a eventual presença de feições de deformação por choque meteorítico.

## Considerações finais

As crateras meteoríticas são importantes presentes da natureza para estudos científicos relacionados à evolução do nosso Planeta e das formas de vida que nele habitam ou habitaram no passado. Possuem também enorme potencial de difusão e promoção das ciências em geral.

O conhecimento das estruturas de impacto brasileiras encontra-se em estágio menos desenvolvido em relação às suas congêneres do hemisfério nor-

te, Austrália e África do Sul. Até mesmo o número atual de crateras brasileiras, sete no total, é bastante aquém do que se poderia esperar de território de dimensões continentais e das características e idades dos terrenos geológicos do nosso país. Ainda restam por esclarecer diversos aspectos relativos à gênese, características, estruturas e idades de várias das estruturas de impacto brasileiras descritas acima. Com o natural avanço desses estudos, espera-se que nos próximos anos seja possível aumentar o número de crateras meteoríticas em nosso país.

Espera-se também que possam ser utilizadas como verdadeiros “museus a céu aberto” para o ensino de ciências, incluindo a geologia e a astronomia. Em outros países como Estados Unidos e Alemanha, existem museus e programas de difusão da ciência relacionados, respectivamente, às crateras *Meteor Crater* (Arizona) e Ries (Bavária).

No Brasil já existem iniciativas recentes de difusão do conhecimento e de aproveitamento geoturístico relacionadas às estruturas de impacto do Domo de Araguainha, MT e GO, Vargeão, SC, e Vista Alegre, PR. O Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) está estudando a criação de unidades de conservação para a preservação do Domo de Araguainha.

## Referências

Alvarez, L. W.; Alvarez, W.; Asaro, F. and Michel, H. V. (1980), Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction, *Science*, 208,1095 — 1108.

Crósta, A. P. (1987), Impact structures in Brazil, in J. Pohl (Ed.) *Research in Terrestrial Impact Structures*, 30-38, Wiesbaden: Vieweg.

Crósta, A. P. (2012), “Estruturas de impacto e astroblemas brasileiros” in Y. Hasui, C. D. R. Carneiro, F. F. M. de Almeida e A. Bartorelli (Eds.) *Geologia do Brasil*, 673-708, São Paulo: Beca.

Crósta, A. P.; Gaspar, J. C. e Candia, M. A. F. (1981), “Feições de metamorfismo de impacto no Domo de Araguainha”, *Revista Brasileira de Geociências*, 11, 139-146.

Crósta, A. P.; Jourdan, F. and Koeberl, K. (2012b),  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  dating of the Vista Alegre impact crater, Brazil, CD-ROM 34<sup>th</sup> *International Geological Congress*, Brisbane, Austrália.

Crósta, A. P.; Kazzuo-Vieira, C.; Pitarello, L.; Koeberl, C. and Kenkmann, T. (2012a), Geology and impact features of Vargeão Dome, southern Brazil, *Meteoritics & Planetary Science*, 47,51-71.

Crósta, A. P.; Kazzuo-Vieira, C. and Schrank, A. (2004), Vista Alegre: a newly discovered impact crater in Southern Brazil, *Meteoritics & Planetary Science*, 39 (Supplement), A-28.

Crósta, A. P.; Koeberl, C.; Furuie, R. A. and Kazzuo-Vieira, C., (2010a), Vista Alegre, southern Brazil: a new impact structure in the Paraná flood basalts, *Meteoritics & Planetary Science*, 45,181-194.

Crósta, A. P.; Lourenço, F. S. and Priebe, G. H. (2010b), Cerro Jarau, Rio Grande do Sul: a possible new impact structure in southern Brazil in R. L. Gibson and W. U. Reimold (Eds.), *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV*, 173-190, Boulder: The Geological Society of America Special Paper SPE-465.

Crósta, A. P. and Vasconcelos, M. A. R. (2013), Update on the current knowledge of the Brazilian impact craters, CD-ROM 44<sup>th</sup> Lunar and Planetary Science Conference, Abstract #1318, The Woodlands, Texas.

Dietz, R. S. (1961), Astroblemes, *Scientific American*, 205, 50-58.

Dietz, R. S. and French, B. (1973), Two probable astroblemes in Brazil, *Nature*, 244, 561-562.

Dressler, B. D. and Reimold, W. U. (2001), Terrestrial impact melt rocks and glasses, *Earth Science Reviews*, 56, 205-284.

French, B. M. (1998), *Traces of Catastrophe: a Handbook of Shock-metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures*, Houston: Lunar and Planetary Institute.

French, B. M. and Koeberl, C. (2010), The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why, *Earth-Science Reviews*, 98, 123 — 170.

Gault D. E., Quaide W. L. and Oberbeck, V. R. (1968), Impact cratering mechanics and structures in B. M. French, N. M. Short (Eds.), *Shock Metamorphism of Natural Materials*, Baltimore: Mono Book, 87 — 99.

Grieve, R. A. F. (1991), Terrestrial impact: the record in the rocks, *Meteoritics*, 26,175 — 194.

Grieve, R. A. F. (2006), *Impact structures in Canada*. St. John's: Geological Association of Canada.

Grieve, R. A. F. and Shoemaker, E. (1994), The record of past impacts on Earth in T. Gehrels (ed.), *Hazards Due to Comets and Asteroids*, Tucson: Univ. of Arizona.

Hildebrand, A. R.; Penfield, G. T.; Kring, D. A.; Pilkington, M.; Camargo-Zanoguera, A.; Jacobsen, S. B. and Boynton, W. V. (1991), Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico, *Geology*, 19, 867 — 871.

Kazzuo-Vieira, C.; Crósta, A. P.; Gamboa, F. e Tygel, M. (2009), “Caracterização geofísica da estrutura de impacto do Domo de Vargeão, Brasil”, *Revista Brasileira de Geofísica*, 27, 375-388.

Kenkmann, T.; Vasconcelos, M. A. R.; Crósta, A. P. and Reimold, W. U. (2011), The complex impact structure Serra da Cangalha, Tocantins State, Brazil, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, 875-889.

Kring, D. A. (2003), Environmental consequences of impact cratering events as a function of ambient conditions on Earth, *Astrobiology*, 3, 133-152.

McHone, J. F.Jr. (1986), Terrestrial impact structures: their detection and verification with two new examples from Brasil, *Ph.D. thesis*, Urbana-Champaign: University of Illinois.

Maziviero, M. V. (2012), “Caracterização geológica da estrutura de impacto de Riachão (MA)”, *Dissertação de mestrado*, Campinas: Instituto de Geociências, Unicamp.

Maziviero, M. V.; Vasconcelos, M. A. R.; Góes, A. M.; Crósta, A. P. and Reimold, U. W. (2012), The Riachão Ring Impact Structure, Northeastern Brazil: Re-Evaluation of its Stratigraphy and Evidence for Impact, CD-ROM, 43<sup>rd</sup> Lunar and Planetary Science Conference, Abstract #1511, The Woodlands, Texas.

Melosh, H. J. (1989), *Impact Cratering: A Geologic Process*, New York: Oxford University Press.

Oliveira, G. J. G.; Vasconcelos, M. A. R.; Crósta, A. P.; Reimold, W. U.; Góes, A. M.; Kowitz, A. (2014), Shatter cones and planar deformation features confirm Santa Marta in Piauí State, Brazil, as an impact structure, *Meteoritics & Planetary Science*, 49, 1915-1928.

Paiva Filho, A.; Andrade, C. A. V. de e Scheibe, L. F. (1978), “Uma janela estratigráfica no oeste de Santa Catarina: o Domo de Vargeão”, *Anais do 30º Congresso Brasileiro de Geologia*, Sociedade Brasileira de Geologia, 408-412.

Riccomini, C.; Crósta, A. P.; Prado, R. L.; Ledru, M. P.; Turq, B. J.; Sant’Anna, L. G.; Ferrari, J. A. and Reimold, W. U. (2011), The Colônia structure, São Paulo, Brazil, *Meteoritics & Planetary Science*, 46, 1630-1639.

Schulte, P.; Alegret, L.; Arenillas, I.; ... Vajda, V.; Whalen, M. T. and Willumsen, Pi S. (2010), The Chicxulub asteroid impact and mass extinction at the Cretaceous-Paleogene boundary, *Science*, 327, 1214-1218.

Tohver, E.; Lana, C.; Cawood, P. A.; Fletcher, I. R.; Jourdan, F.; Sherlock, S.; Rasmussen, B.; Trindade, R. I. F.; Yokoyama, E.; Souza Filho, C. R.; Marangoni, Y. (2012), Geochronological constraints on the age of a Permo-Triassic impact event: U-Pb and Ar-40/Ar-39 results for the 40 km Araguainha structure of central Brazil, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 86, 214-227.

Uchôa, E. B.; Vasconcelos, M. A. R. and Crósta, A. P. (2013), Santa Marta crater: macroscopic and petrographic evidences of a new confirmed impact structure in NE Brazil, CD-ROM 44<sup>th</sup> *Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #1316, The Woodlands, Texas.

Vasconcelos, M. A. R.; Crósta, A. P. and Molina, E. C. (2010), Geophysical characteristics of four possible impact structures in the Parnaíba Basin, Brazil: Comparisons and implications in R. L. Gibson and W. U. Reimold (Eds.), *Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV*, 201-218, Boulder: The Geological Society of America Special Paper SPE465.

Vasconcelos, M. A. R.; Leite, E. P. and Crósta, A. P. (2012a), Contributions of gamma-ray spectrometry to terrestrial impact crater studies: the example of Serra da Cangalha, northeastern Brazil, *Geophysical Research Letters*, 39, L04306, 1-7.

Vasconcelos, M. A. R.; Wünnemann, K.; Crósta, A. P.; Molina, E. C.; Reimold, W. U. and Yokoyama, E. (2012b), Insights into the morphology of the Serra da Cangalha impact structure from geophysical modeling, *Meteoritics & Planetary Science* 47, 1659-1670.