FEIÇÕES GEOMORFOLÓGICAS DO ASTROBLEMA CERRO DO JARAU - RS BRASIL

Diego Dal Pozzolo dos Santos[1], Greisi Aline de Azeredo[2], Rafael Zini Ouriques[3], Waterloo Pereira Filho[4]

[1, 2, 3, 4]Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) - Departamento de Geociências – Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), Av. Roraima nº 1000, Cidade Universitária, Bairro Camobi, Santa Maria - RS, CEP: 97105-900.
[1]psdiego@hotmail.com.br; [2]azeredo.gre@gmail.com; [3]rafaziniouriques@gmail.com; [4]waterloopf@gmail.com.

RESUMO

As crateras de impacto são formações geológicas criadas pelo impacto de, asteroides ou cometas contra a superfície de planetas ou satélites. Este estudo foca na geomorfologia do astroblema Cerro do Jarau. Três variáveis foram analisadas: índice de circularidade, declividade e orientação das vertentes. Os dados foram coletados e processados a partir dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) do sensor ASTER do satélite TERRA. Resultados mostraram um alto índice de circularidade (0,94) e variações de declividade, especialmente ao redor do pico central. As análises indicam que a diferença de altimetria do pico central com a borda externa pode ser explicada por resistência geológica e atividade tectônica. Estes dados são cruciais para entender as dinâmicas que moldaram a estrutura e contribuem para o conhecimento dos processos de formação e alteração das crateras de impacto.

Palavras-chave — Cerro do Jarau, Cratera de Impacto, Índice de Circularidade, Declividade, Aspecto.

ABSTRACT

Impact craters are geological formations resulting from asteroid, or comet collisions with planetary surfaces. This study focuses on the geomorphology of the Cerro do Jarau astrobleme, analyzing three aspects: circularity index, slope, and aspect. High-resolution from TERRA satellite sensor ASTER Digital Elevation Models (DEMs) were used for data collection and processing. Results show a high circularity index (0.94) and slope variations, especially around the central peak. Analyses suggest that the altimetry difference between the central peak and the outer rim can be explained by geological resistance and tectonic activity. These data are crucial for understanding the dynamics shaping the structure and contribute to the knowledge of impact crater formation and alteration processes.

Key words — *Cerro do Jarau, Impact Crater, Circularity Index, Slope, Aspect.*

1. INTRODUÇÃO

Os astroblemas são feições geológicas resultantes do impacto de planetesimais (asteroides ou cometas) contra superfícies planetarias. Estudos planetários demonstram que não apenas a Lua, mas todos os corpos sólidos do nosso Sistema Solar, passaram por um intenso bombardeio durante sua história [1]. Esses eventos deixaram cicatrizes na superfície de vários corpos celestes, manifestando-se em crateras de diferentes dimensões, como observado na Lua, Marte, Vênus e Mercúrio. Na Terra há muitos exemplos de crateras de impactos, tais como, a de *Vargeão* no Brasil com 12 km de diâmetro, a *Lonar* na Índia com 1,83 km de diâmetro, a *Wolfe Creek* na Austrália com 0,88 km de diâmetro e a *Chicxulub* no México com 150 km de diâmetro [1].

O impacto de um meteorito (fragmento de um planetesimal) é um processo geológico relativamente simples: um grande objeto atinge outro de maior porte a uma velocidade extremamente alta, liberando uma quantidade imensa de energia localmente. Essa simplicidade dos impactos e das crateras resultantes permite uma modelagem física direta, apoiada por extensos ensaios laboratoriais e estudos geológicos [2].

Apesar dos impactos ocorridos na Terra oriundos de meteoritos, especialmente nas fases iniciais de sua formação, o registro dessas crateras não foi preservado devido à dinâmica ativa intensa da superfície terrestre. Os processos de erosão, sedimentação, atividade vulcânica, tectônica e antrópica, como a mineração têm modificado muitas dessas estruturas ao longo do tempo [3].

Neste contexto, o presente artigo teve como objetivo descrever a geomorfologia do astroblema Cerro do Jarau, no município de Quaraí, RS. O foco da análise englobou três aspectos geomorfológicos: índice de circularidade (*Circularity Index* - CI), declividade e orientação das vertentes (aspecto) no interior da estrutura. A análise dessas características permitirá uma compreensão mais detalhada da formação e evolução desta estrutura de impacto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área

A área de estudo representada pelo Cerro do Jarau está localizada no município de Quaraí, no Estado do Rio Grande do Sul (RS), próximo à fronteira com o Uruguai. Situado a

632 km de Porto Alegre, com acesso pelas rodovias BR-290 e BR-293, o Cerro encontra-se a 122 km de Uruguaiana e 126 km de Alegrete (Figura1).

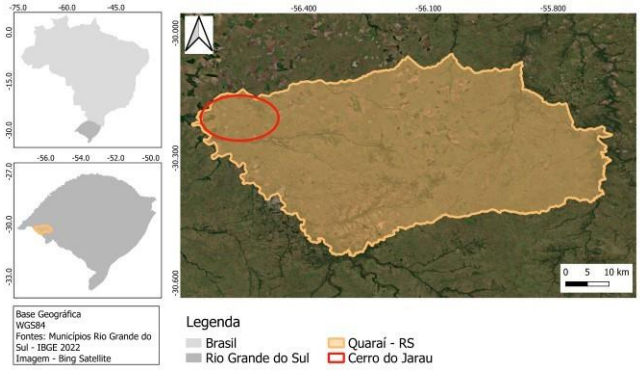

Figura 1. Mapa de Localização

Geomorfologicamente, a área em estudo apresenta superfícies de aplainamento e aplanadas, compondo a Unidade Geomorfológica do Planalto da Campanha e do Planalto de Uruguaiana. Uma característica relevante da região é o escalonamento de níveis topográficos, resultado da ruptura de declives, evidenciando-se como um traço marcante do relevo local. Adicionalmente, há registros de erosões nas áreas de contato com os derrames vulcânicos, que expõem morros testemunhos compostos por arenitos de formações geológicas anteriores aos derrames [3]. O relevo predominante é plano, com uma leve inclinação em direção ao oeste, seguindo em direção ao rio Uruguai. Essa configuração resulta em uma superfície elevada que constitui o interflúvio entre as bacias hidrográficas dos rios Quaraí, ao sul, e Ibicuí, ao norte.

O Cerro do Jarau destaca-se por sua forma semicircular com cristas alongadas e uma altitude média de 240 metros (Figura 2). Além disso, a área é caracterizada por uma bacia central, complementada por feições radiais associadas ao curso do Arroio Nhanduvaí, condições que tornam o relevo da região único e de grande interesse geomorfológico [3].

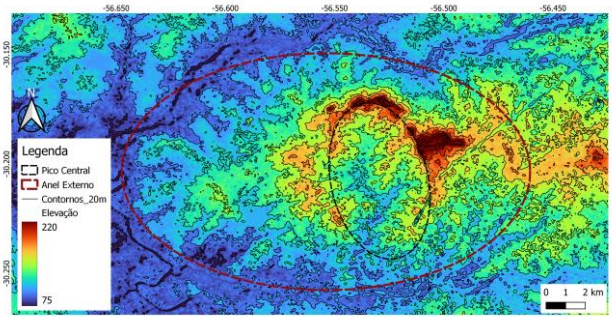

Figura 2. Mapa Altimétrico

Não há um consenso sobre a delimitação da borda externa da cratera pela ausência de feições claras [5], porém a literatura sugere inferências por meio da direção do mergulho das camadas [6] e linhas de falha [12]. Além disso, a drenagem radial possui um forte controle estrutural. A estrutura elíptica da cratera apresenta cerca de 18 km de comprimento na direção Leste-Oeste (L-O) e 12 km de largura na direção Norte-Sul (N-S). A área central elevada é composta por dois núcleos circulares, constituídos por rochas sedimentares do Jurássico Superior, envoltas por lavas basálticas da Formação Torres, do Cretáceo Inferior [4]. O núcleo principal se destaca devido às cristas arqueadas de arenitos eólicos, ricos em quartzo, pertencentes à Formação Botucatu, que delimitam o limite externo da estrutura [5]. A porção central rebaixada é formada por arenitos arcoseanos alterados da Formação Guará, caracterizados por uma composição dominada por quartzo, com feldspatos subordinados, classificados como sublitarenitos e quartzo- arenitos [4].

Estudos petrográficos indicam que a proveniência detrítica dos arenitos provém de áreas cratônicas e de reciclagem orogênica. O contato entre as rochas vulcânicas e os arenitos, quando exposto, é marcado por falhas e zonas de fraturamento, e na porção leste da estrutura, a formação de peperitos é observada [4]. A erosão pós-impacto ocorreu em dois períodos principais, entre 100-80 Maa e 65-22 Maa, entretanto, o piso da cratera e suas características concêntricas e de fraturamento radial permaneceram preservadas [6].

2.2 Astroblemas e a configuração da paisagem

As bordas das crateras de impacto são geralmente elevadas em relação ao relevo adjacente e podem ser utilizadas como um indicador da extensão da degradação ou modificação suportada pela estrutura ao longo do tempo [7]. Estas bordas são frequentemente alteradas por processos geológicos e meteoríticos. No caso da Lua, por exemplo, os impactos de meteoritos próximos são os principais agentes de modificação das feições.

Um estudo realizado em crateras terrestres [8] indicou que a erosão das bordas e a remoção da camada ejetada contribuem para o rebaixamento das bordas e o consequente preenchimento e aplainamento do interior da cratera. Este processo é intensificado pela ação fluvial e aluvial, embora a erosão eólica também desempenhe um papel importante em determinados ambientes.

No contexto de Marte, ressalta-se que o ambiente atual, predominantemente árido e desértico, favorece a ação erosiva dos ventos, enquanto as crateras permanecem hidrologicamente inativas [8]. No entanto, os processos periglaciais, como a sublimação do gelo superficial, também ocorrem em menor escala. Imagens de alta resolução recentes revelaram a presença de vales fluviais, o que sugere eventos esporádicos de derretimento de gelo devido a impactos de meteoritos, que também contribuem para a modificação das bordas das crateras em Marte [8].

2.3 Aquisição e processamento dos dados

Os astroblemas podem ser analisados com o uso de Modelos Digitais de Elevação (MDEs). Para este estudo, foi utilizado o MDE ASTER GDEM 2 (*Global Digital Elevation Model Version 2*), obtido pelo sensor ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Radiometer*). O modelo, com resolução espacial de 30m/*pixel* e datum WGS-84, foi obtido no *site Earth Explorer*. A partir deste MDE, foram gerados mapas de declividade e orientação de vertentes, com as áreas mensuradas pela ferramenta *est*) e *Density Slice* no *software* ENVI 5.0.

2.4 Parâmetros analisados

Os parâmetros morfométricos específicos, como declividade interna do astroblema e o CI da borda da cratera, seguiram os critérios definidos por [7]. A declividade foi considerada para toda a área interna da cratera, e foi dividida em seis classes de inclinação (em graus): <=2º, 2-5º, 5-15º, 15-25º, 25-35º e >35º. Destaca-se que há uma maior instabilidade nas vertentes íngremes e estabilidade em áreas planas.

O CI é uma métrica geométrica que descreve o quão próximo uma figura bidimensional se aproxima de um círculo perfeito. Para estruturas geológicas, como os astroblemas, este índice é importante para caracterizar a forma da borda da cratera de impacto. Assim, o CI foi determinado a partir da relação da área com o perímetro da cratera, conforme a seguinte equação [9]:

$$CI = \frac{4\pi A}{P^2}$$

Onde:
- **A** é a área da cratera de impacto;
- **P** é o perímetro da cratera de impacto.

O valor do CI varia entre 0 e 1, em que 1 indica uma forma perfeitamente circular. Na medida que seu valor diminui, a forma da estrutura se distancia da circularidade ideal, aproximando-se de formatos mais alongados ou irregulares. Este conceito de circularidade não deve ser confundido com o de arredondamento, no qual descreve o grau de suavização das bordas e o número de ângulos presentes em uma figura.

O CI refere-se exclusivamente ao contorno geral da estrutura [9]. Neste sentido, foi realizada uma comparação do anel externo com o pico central do astroblema do Cerro do Jarau. A orientação de vertentes (aspecto) foi analisada conforme as direções sugeridas por [10]: Norte (N), Nordeste (NE), Leste (L), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SO), Oeste (O) e Noroeste (NO).

3. RESULTADOS

A partir da metodologia adotada verificou-se que a cratera possui área total de 169,51 Km^2 e um perímetro de 47,57 Km (Figura 3). O CI obtido foi de 0,94, no qual se aproxima a um valor de circularidade alto, acima de 0,88 conforme [9]. Embora a forma seja ovalada (elíptica), ainda pode ter uma alta circularidade se a diferença entre os eixos maior e menor não for tão grande. Por exemplo, muitas crateras lunares como Messier são elípticas devido ao impacto oblíquo, mas mantêm alta circularidade devido a pequena variação na relação entre os eixos[16]. O pico central apresenta uma elipse com um raio maior de 4 km e um raio menor de 2,15 km. Além disso, seu perímetro é de 19,75 km e sua área de 26,99 km², que resulta em uma circularidade de 0,86, considerada mediana [9].

Quanto ao mapa de declividades (Figura 3), a maior parte do fundo da cratera, cerca de 56,32% ou 95,48 Km^2, apresenta declividade média a forte (5º-15º). Esta classe de declividade está sujeita a processos erosivos, por movimentos de massa, escorregamentos e *creep* que causa a formação de ravinas. As declividades mais altas (25-35º e >35º) estão localizadas ao Norte e Leste do pico central, bastante pronunciado.

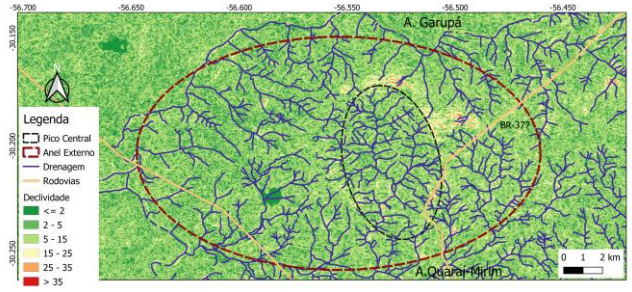

Figura 3. Mapa de Declividades

A orientação de vertentes (Figura 4) mostra a direção regional do mergulho das camadas e afloramentos, o que nos ajuda a compreender a simetria e o contexto da estrutura. Assim, observa-se o predominío das direções S com 16,83% (28,54 Km^2), N representado por 16,32% (27,67 Km^2) e NE com 12,76% (21,63 Km^2).Nota-se um padrão geral radial centrífugo, com algumas areas de treliça no extremo Norte da imagem.

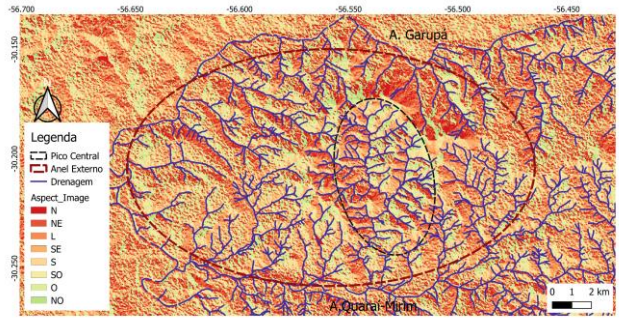

Figura 4. Mapa de Orientação de Vertentes

4. DISCUSSÃO

A análise do CI do anel externo do Cerro do Jarau (0,94) sugere que a cratera possui uma forma circular quase perfeita. Este alto valor de circularidade indica que a estrutura da cratera se manteve relativamente intacta, apesar dos processos erosivos que atuaram na região. O pico central da cratera (circularidade mediana de 0,86) revela que, embora a estrutura principal seja bem preservada, o núcleo central foi mais afetado por processos erosivos e tectônicos. A forma circular bem definida é consistente com outras crateras de impacto. Isso indica que a cratera do Cerro do Jarau teve modificações mínimas em comparação com outros astroblemas, estes que podem ter formas mais irregulares devido à degradação. Porém, em relação a altimetria e as declividades a situação é inversa, em que a região do pico central é mais preservada.

A diferença na altimetria entre o pico central e o anel da borda externa do Cerro do Jarau, apesar de o pico ser menos circular, pode ser explicada por vários fatores geológicos e processos pós-impacto como: a formação inicial do impacto [11]; erosão diferencial [12]; composição geológica [13]; atividade tectônica e vulcânica [14]; e sedimentação pós-impacto [15].

A teoria que melhor se encaixa para explicar o motivo da altimetria do pico central do Cerro do Jarau, que está mais preservada, apesar de sua menor circularidade, aparenta ser a atividade tectônica e vulcânica, que também coincide com os estudos recentes realizados em simulações e análises isotópicas [14]. Entre as razões elencadas estão: resistência geológica de rochas possivelmente com a presença de intrusões magmáticas que elevaram o terreno e aumentaram sua dureza; o histórico regional de atividade tectonica, que pode ter gerado elevações diferenciais devido a falhas e fraturas que sustentaram a altimetria do pico central; e processos pós-impacto que reforçaram a elevação por compactação e consolidação do pico central.

5. CONCLUSÕES

O trabalho seguiu uma abordagem geomorfológica para o astroblema Cerro do Jarau. A diferença da morfometria horizontal interna e externa foi o ponto de destaque. A borda externa com maior circularidade e verticalmente mais baixa topograficamente apresenta menor preservação horizontal. O pico central, embora com menor circularidade, apresenta maior preservação altimétrica.

Este astroblema pode ser melhor investigado a partir de técnicas atuais com maior detalhamento, como o LIDAR, que permitiria uma modelagem e visualização mais precisa. Além disso, o impacto das atividades antrópicas, como a mineração e a agricultura na preservação e modificação das estruturas do astroblema devem ser considerados, bem como sua comparação com crateras de impacto na Terra e em Marte.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS – 23/2551-0001947-7), do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ Nº311977/2022-7/403696/2023-2), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e do Laboratório de Geotecnologias (LABGEOTEC).

7. REFERÊNCIAS

[1] E. Flamini, M. Di Martino and A. Coletta. *Enciclopedic Atlas of Terrestrial Impact Craters*. Springer, New York, 2019.

[2] B. M. French and C. koeberl. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why. *Earth-Science Reviews*, v. 98: pp. 1-2, 2010.

[3] J. P. Sánchez. *Mapeamento geológico-estrutural do astroblema de cerro do Jarau-RS Brasil*.Tese de Doutorado. Rio Claro, UNESP, 2014.

[4] R. P. Philipp, S.B.A. Rolin and C.A Sommer. A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, Quaraí, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40: pp. 468-483, 2010.

[5] A. R. Jelinek and C. A. Sommer. *Contribuições à Geologia do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Compasso. Porto Alegre 2021.

[6] A. P. Crósta, F. S. Lourenço and G. H. Priebe. Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul: A possible new impact structure in southern Brazil. *Geological Society of America Special Papers*, v. 465: pp.173-190, 2010.

[7] S. Vijayan, K. Vani and S. Sanjeevi. Topographical analysis of lunar impact craters using SELENE images. *Advances in Space Research*, v. 52: pp. 1221-1236, 2013.

[8] G. Komatsu, P. S. Kumar, K. Goto, Y. Sekine, C. Giri and T. Matsui. Drainage systems of Lonar Crater, India: Contributions to Lonar Lake hydrology and crater degradation. *Planetary and Space Science*, v. 95: pp. 45-55, 2014.

[9] L. B. Ronca and J. W. Salisbury. Lunar history as suggested by the circularity index of lunar craters. *Icarus*, v. 5: pp. 130-138, 1966.

[10] W. Gaida, J. A. Gross and T. T. Rodrigues. Avaliação da topografia do Parque Estadual do Turvo, RS, utilizando o modelo digital de elevação Aster-GDEM versão 2. In: *26º Congresso Brasileiro de Cartografia*, Gramado. 2014.

[11] W. U. Reimold, P. Crosta, M. Hasch, A. Kowitz, N. Hauser, J. P. Sanchez, L. S. A. Simões, G. J. Oliveira and P. T. Zaag. Shock deformation confirms the impact origin for the Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul, Brazil, structure. *Meteoritics & Planetary Science*, v. 54: pp. 2384–2397, 2019.

[12] J. P. Sanches, L. S. A. Simões and L. E. B. Martins. Estratigrafia e estrutura do Cerro do Jarau: nova proposta, *Brazilian Journal of Geology*, v. 44: pp. 265-276, 2014.

[13] A. P. Crósta, W. U. Reimold and M. A. Vasconcelos. Cerro do Jarau and São Miguel do Tapuio: Two newly confirmed, large impact structures in Brazil. In: *50th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston. 2019.

[14] D. D. Garcia, E. P. Leite, M. A. Vasconcelos, E. Christou and A. P. Crósta. Distribution of gamma-ray elements in Cerro do Jarau impact structure and a proposal of geothermal modeling, *Annals of the Brazilian Academy of Sciences*, v. 96: 2024.

[15] A. P. Crósta. *Crateras de impacto meteoríticas no Brasil*. In: Maatsura, O.T. (Org.). História da Astronomia no Brasil. v.1. Cepe, Recife, 2014.

[16] X.-Z. Luo, M.-H. Zhu, M. Ding. Ejecta pattern of oblique impacts on the Moon from numerical simulations. Journal of Geophysical Research: Planets, 127, e2022JE00733, 2022.