

A ANÁLISE DA PAISAGEM NA ESTRUTURA DE IMPACTO DO CERRO DO JARAU (RS), COM O USO DE VANT

Pedro Massochin Medeiros

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, RS, Brasil
E-mail: pedro.medeiros@ufrgs.br

Rafael da Rocha Ribeiro

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, RS, Brasil
E-mail: r.ribeiro@ufrgs.br

Norberto Dani

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, RS, Brasil
E-mail: norberto.dani@ufrgs.br

Nelson Amoretti Lisboa

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Porto Alegre, RS, Brasil
E-mail: nelamorettilisboa@gmail.com

RESUMO

As crateras originadas por impactos de meteoritos são formações raras presentes no relevo terrestre. A estrutura de impacto do Cerro do Jarau (Latitude: 30°12'00" S e Longitude: 56°32'10" O), no município de Quaraí (RS), é uma cratera de impacto por um corpo celeste que se apresenta em forma circular com um diâmetro de aproximadamente 14 km, diferenciando-se das feições morfológicas do seu entorno. O presente trabalho realizou um levantamento aerofotogramétrico com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) com o objetivo de elaborar um Modelo Digital de Superfície (MDS) e um ortomosaico de dois transectos, um no sentido norte-sul e outro no sentido leste-oeste, com dimensões de aproximadamente 12 km de comprimento por 300 metros de largura. Através da obtenção do MDS com resolução espacial de 0,25 m/pixel e do ortomosaico com resolução espacial de 0,10 m/pixel foi possível interpretar a geomorfologia e a geologia da área de estudo, identificando feições de relevo como morros, morrotes e corpos d'água com padrão radial centrípeto, que distinguem o Cerro do Jarau da paisagem do entorno.

Palavras-chave: Crateras de impacto. Modelo digital de superfície. Levantamento aerofotogramétrico.

LANDSCAPE ANALYSIS IN THE IMPACT STRUCTURE OF CERRO DO JARAU USING UAV

ABSTRACT

Craters formed by meteorite impacts are rare formations on the Earth's surface. The impact structure of Cerro do Jarau, (Latitude: 30°12'05" S and Longitude: 56°32'12" W), municipality of Quaraí (state of Rio Grande do Sul), is an impact crater formed by a celestial body, the structure has a circular shape with a diameter of approximately 14 km, which shows to be different from surrounding morphological features. The present study carried out an aerophotogrammetric survey using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) to develop a Digital Surface Model (DSM), and an orthomosaic of two transects, one in the north-south direction, and the other in the east-west direction, with approximately 12 km in length, and 300 m in width. The DSM with a spatial resolution of 0.25 m / pixel and the orthomosaic with a spatial resolution of 0.10 m / pixel allowed us to detect and analyze the morphology/geology of the study area, identifying surface features such as hills, small hills and water bodies with centripetal radial pattern, which distinguish Cerro do Jarau area from the surrounding landscape.

Keywords: Impact crater. Digital Surface Model. Aerophotogrammetric survey.

INTRODUÇÃO

Os impactos de corpos celestes são reconhecidos como o principal processo de modificação da superfície dos planetas rochosos no sistema solar (KOEBERL, 2001). Esses eventos, ocorridos ao longo da história geológica do planeta Terra, foram fundamentais para a origem e a evolução da vida (ALVAREZ *et al.*, 1980).

Estudos de crateras de impacto em outros planetas e na lua indicam que há 3,9 Ga ocorreu elevada quantidade de impactos de grandes magnitudes, sendo esses responsáveis pelo suprimento de grandes quantidades de elementos químicos incorporados aos corpos planetários. No planeta Terra, esses impactos ocorridos em seus primórdios foram importantes e possivelmente implicaram nos seguintes acontecimentos: introdução de elementos químicos essenciais à vida na atmosfera do planeta; modificação do relevo; processos de extinção e surgimento de espécies, e surgimento de núcleos continentais e protoplacas tectônicas (FRENCH, 1998; 2004).

O reconhecimento da importância de estudar estruturas de impacto deve-se, principalmente, ao registro geológico deste fenômeno na crosta terrestre. A frequência de ocorrência no passado e as consequências para as formas de vida do planeta também reforçam essa importância (GRIEVE; MASAITIS, 1994). Deste modo, analisar a paisagem de uma estrutura de impacto por corpo celeste é uma tarefa importante para o entendimento das características geomorfológicas e geológicas que uma estrutura resultante do choque de um corpo celeste com a superfície apresenta. As formas do relevo possuem particularidades nessas estruturas, diferenciando-se do seu entorno. Além disso, a estrutura geológica das unidades litoestratigráficas podem fornecer informações importantes sobre a formação dessa paisagem (LISBOA *et al.*, 1987; CRÓSTA *et al.*, 2010).

Uma alternativa para analisar e interpretar a paisagem de uma cratera de impacto pode ser pela realização de um levantamento aerofotogramétrico com Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). Trata-se da tomada de fotografias aéreas de alta resolução com sobreposição lateral e longitudinal superior a 50%, possibilitando a geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) e ortomosaicos, que são produtos cartográficos onde é possível fotointerpretar feições geomorfológicas e geológicas da paisagem. Além disso, em áreas extensas onde o levantamento aerofotogramétrico com VANT torna-se demorado e dispendioso, uma alternativa é realizar o levantamento em transectos. Conforme Ab'Saber (2006, 2010), estes podem ser considerados perfis topográficos, utilizados para a compreensão das características da paisagem.

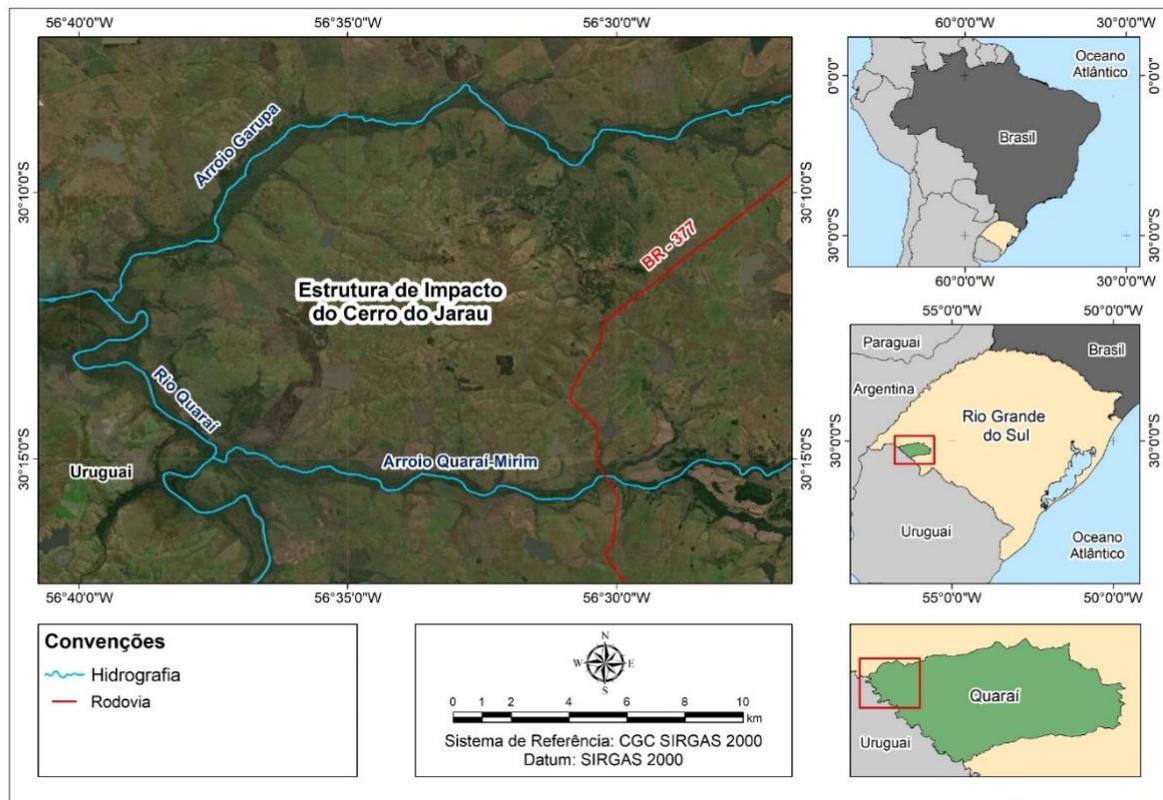
Deste modo, este trabalho tem como objetivo realizar uma interpretação da paisagem resultante na estrutura de impacto do Cerro do Jarau por meio de levantamento aerofotogramétrico com VANT em dois transectos, um no sentido norte-sul e o outro no sentido leste-oeste. Nestes transectos, com dimensões de 12 km de comprimento por 300 m de largura, foram tomadas fotografias aéreas para geração de um MDS e de um ortomosaico, onde os aspectos geomorfológicos da paisagem e geológicos desta estrutura serão fotointerpretados.

Área de estudo

A estrutura originária por impacto de corpo celeste localiza-se no Cerro do Jarau, município de Quaraí, região sudoeste do estado do Rio Grande do Sul, próximo à fronteira com o Uruguai (Figura 1). Seus limites externos estão marcados pelo arroio Garupa ao norte, arroio Quaraí-Mirim ao sul, rio Quaraí ao oeste e a rodovia BR 377 a leste.

A estrutura apresenta a morfologia mais próxima de uma cratera do tipo complexa com diâmetro externo de aproximadamente 14 km. O núcleo da estrutura está soerguido com cristas preservadas ao leste e ao norte formando um semicírculo, seu diâmetro é de cerca de 7 km.

Figura 1 - Localização da estrutura de impacto do Cerro do Jarau



Fonte: IBGE, 2015. Elaboração: Os autores, 2019.

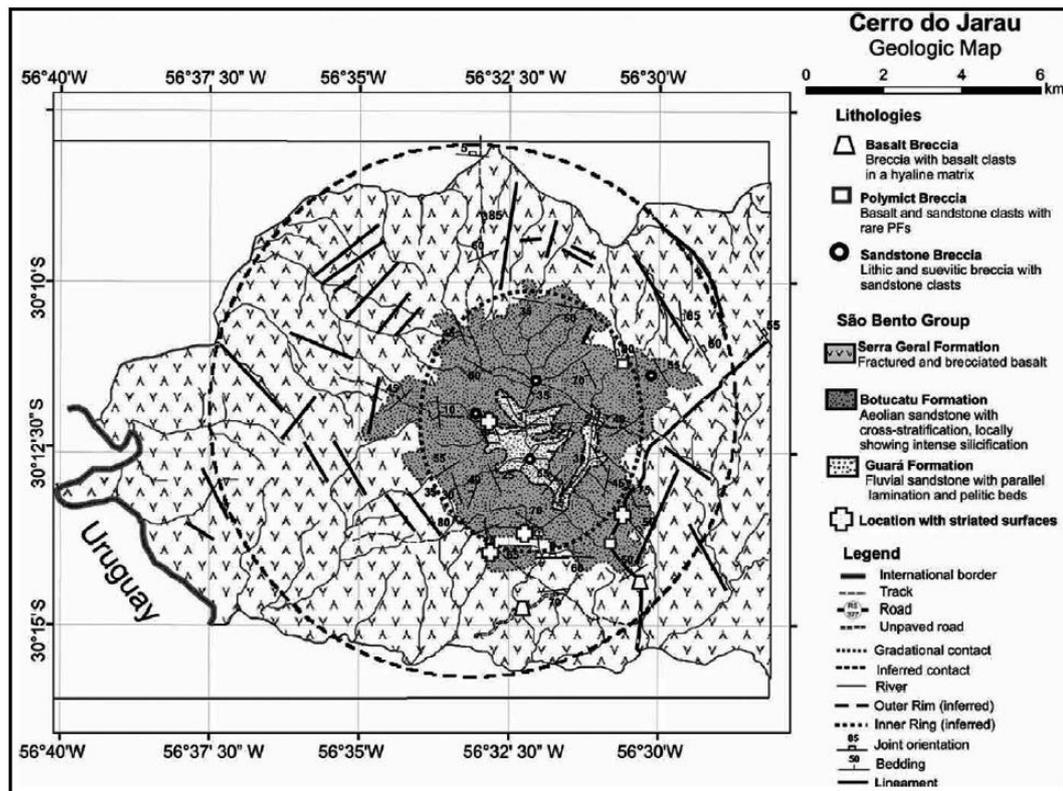
A estrutura de impacto do Cerro do Jarau foi identificada pela primeira vez por Grehs (1969) que observou anomalias circulares no padrão das redes de drenagens e na morfologia das rochas basálticas através da interpretação de fotografias aéreas. Segundo o autor, essas anomalias eram um domo estrutural formado por movimentos tectônicos. Moreira *et al.* (1980) e Horbach (1986), através da utilização de imagens de radar do Projeto RADAMBRASIL, evidenciaram a estrutura dômica da cratera e que as rochas ígneas vulcânicas da Formação Serra Geral do local aparentavam soerguimento por movimentos tectônicos.

Interpretações de fotografias aéreas e imagens de radar por Schuck e Lisboa (1987) identificaram uma estrutura dômica nas cabeceiras do arroio Garupa e uma menor denominada Estrutura Falhada Anelar do Jarau. Lisboa *et al.* (1987) ressaltaram que o Cerro do Jarau pode representar um astroblema, ou seja, uma estrutura de impacto por corpo celeste. Além disso, os autores destacaram a origem desta estrutura circular a partir da diferenciação morfológica, litológica, estrutural e pela ação do tempo.

Crosta *et al.* (2010) e Philipp *et al.* (2010) discutem a estrutura circular do Cerro do Jarau como um possível astroblema. Em seus estudos dos aspectos geológicos e do metamorfismo foram determinadas feições petrográficas, cones de estilhaçamento, feições planares de deformação (PDF), brechas de impacto e mineralógicas nos grãos de quartzo do arenito da Formação Botucatu, sendo estas evidências características de impacto por corpo celeste.

No contexto geológico local da estrutura de impacto do Cerro do Jarau, trabalhos anteriores de Lisboa *et al.* (1987) e Philipp *et al.* (2010) identificaram através de imagens de satélite, fotografias aéreas, trabalhos de campo e análises laboratoriais, rochas sedimentares de idade jurássica da Formação Botucatu cobertas por derrames basálticos de idade mesozoica da Formação Serra Geral. Entretanto, outros autores como IBGE (1986), Lourenço (2007) e Crósta *et al.* (2010) reconhecem na área de estudo três unidades litoestratigráficas, com o acréscimo da Formação Guará. Deste modo, as três unidades estão mapeadas com a Formação Guará no centro, seguida pela Formação Botucatu e Serra Geral (Figura 2).

Figura 2 - Mapa geológico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau



Fonte: LOURENÇO, 2007.

Os arenitos fluviais, caracterizados na Formação Guará, afloram na região central da estrutura de impacto do Cerro do Jarau, próximo aos principais cursos d'água da bacia do arroio Nhanduvaí. Segundo Crósta *et al.* (2010), esses arenitos apresentam granulização fina a média, com cores que variam entre branco e róseo, apresentando laminação paralela, característica de ambiente fluvial.

Circundando a Formação Guará, encontram-se os arenitos de origem eólica da Formação Botucatu, presentes, principalmente, no núcleo soerguido da estrutura de impacto. Estes apresentam granulometria fina a média com a predominância de grãos foscos com forma arredondada a subarredondada. Em relação à coloração, apresenta cor esbranquiçada, cinza clara e rosada com textura arenosa. Nas cristas elevadas na borda do núcleo soerguido, os arenitos apresentam estratificação cruzada, elevado grau de fraturamento com disposição irregular e espaçamento centimétrico (PHILIPP *et al.*, 2010).

Os basaltos da Formação Serra Geral, terceira unidade litoestratigráfica presente no Cerro do Jarau, circundam os arenitos da Formação Botucatu, ocupando cerca de 70% da superfície da área de estudo. Os picos da atividade vulcânica que originaram a Formação Serra Geral ocorreram entre 135 e 133 Ma (GOMES; VASCONCELLOS, 2021). Além disso, as rochas desta formação apresentam coloração castanho escura a preta, variando para castanho avermelhado-alaranjado quando alterados (PHILIPP *et al.*, 2010).

Em relação aos aspectos geomorfológicos, a estrutura de impacto do Cerro do Jarau está inserida na unidade geomorfológica da *Cuesta do Haedo*, região caracterizada por apresentar uma morfologia plana, subhorizontizada, com colinas pluriconvexas, denominadas localmente por coxilhas (MÜLLER FILHO, 1970). Entretanto, o relevo da estrutura de impacto é marcado pela presença de núcleo soerguido, cristas elevadas ao norte e ao leste em formato de semicírculo e cursos d'água de padrão radial centripeto. Estes aspectos evidenciam que as feições presentes no Cerro do Jarau contradizem com a morfologia do entorno, indicando que sua formação é resultante do impacto por um corpo celeste (PHILIPP *et al.*, 2010).

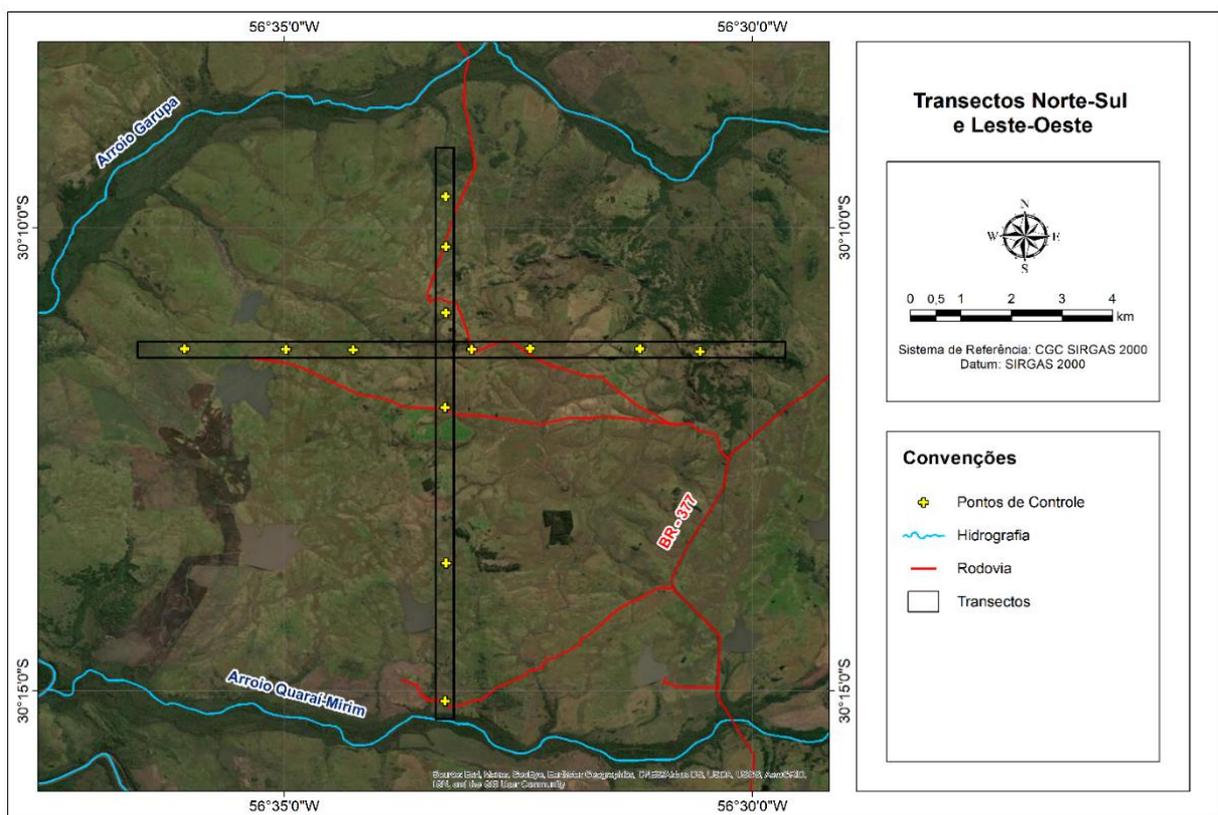
Em termos da formação da cratera de impacto, o Cerro do Jarau pode ser descrita como uma cratera de impacto complexa que, segundo French (1998), é caracterizada pela presença de núcleo soerguido e acrescida de uma depressão em formato de anel no entorno com diâmetro que varia de 4 a centenas de quilômetros.

METODOLOGIA

Levantamento de campo

Através de imagens de satélite disponíveis no *software* Google Earth foram delimitados dois transectos (um no sentido norte-sul e outro no sentido leste-oeste) em áreas importantes da estrutura de impacto, para possibilitar a fotointerpretação geomorfológica e geológica através do MDS e do ortomosaico (Figura 3). Além disso, foi levado em consideração na escolha dos dois transectos o trabalho de inversão gravimétrica 3D realizado por Giacomini (2015) no Cerro do Jarau, pois nestes mesmos locais o autor traçou perfis para interpretar as unidades litológicas em superfície e subsuperfície em seu modelo tridimensional de anomalias gravimétricas, informações que foram comparadas com os resultados deste trabalho.

Figura 3 - Transectos e pontos de controle planejados para o levantamento aerofotogramétrico com VANT



Elaboração: Os autores, 2019.

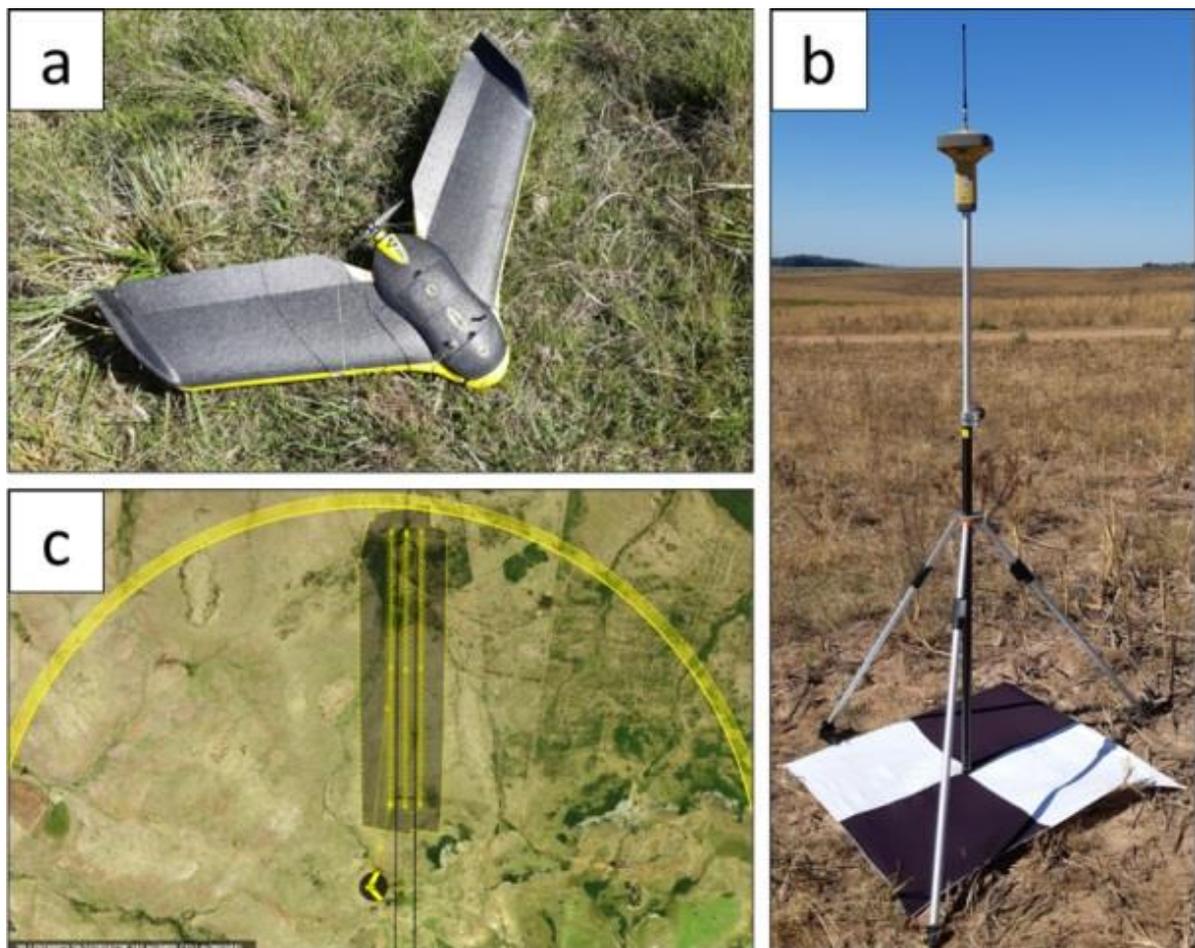
Os levantamentos aerofotogramétricos dos dois transectos na estrutura de impacto do Cerro do Jarau foram realizados com o VANT SenseFly eBee nos dias 13 e 14 de abril de 2019 (Figura 4a). Este equipamento de asa fixa permitiu a obtenção de fotografias aéreas com a câmera Sony DSC WX 220, equipada com sensor RGB de 18,2 megapixels, focal nominal de 4 mm e resolução espacial de 4896 x 3672 pixels.

Para elevar a precisão do levantamento aerofotogramétrico e possibilitar referenciá-lo a um sistema de coordenadas de maior precisão que o de navegação do VANT, foram alocados e rastreados 15 pontos

de controle pelos receptores GNSS Topcon GR-3 (Figura 4b). Através do método de posicionamento relativo estático, a ocupação dos pontos pelos receptores GNSS aconteceu aos pares tornando possível a obtenção das coordenadas destes através do processamento e ajustamento das linhas de base entre eles. Após o processamento dos pontos de controle para obtenção das coordenadas corrigidas no Datum SIRGAS 2000 e projeção UTM Fuso 21 Sul, as altitudes obtidas foram compatibilizadas com o sistema altimétrico brasileiro através da transformação das altitudes elipsoidais obtidas pelos rastreadores GNSS em altitudes ortométricas com o auxílio da ferramenta Processamento Ponto Preciso (PPP) disponibilizada online pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os planos de voo para o levantamento aerofotogramétrico foram elaborados no *software* Emotion 2 (Figura 4c). Estes dividiram cada transecto em seis setores de voo para que a qualidade do levantamento e a resolução a ser atingida, denominada de GSD (Ground Control Points), pudessem ser controladas. O GSD equivale ao tamanho em centímetros do pixel na imagem correspondente ao valor do pixel no terreno, como a área dos transectos apresenta grande variação altimétrica, os voos foram realizados em alturas diferentes em cada setor buscando obter um GSD de 7,5 cm por pixel. Além disso, foram utilizadas sobreposições longitudinal de 85% e lateral de 65% para garantir a possibilidade de estereoscopia e, posteriormente, a elaboração do MDS. Cada voo durou entre decolagem e aterrissagem em torno de 30 minutos e foram registradas no total 1.339 fotografias aéreas. Ao fim de cada voo as fotografias passaram pelo procedimento denominado de *geotagging* no *software* Emotion 2, que consiste em associar as coordenadas e orientações obtidas pelos sistemas inerciais e GNSS do VANT às fotografias aéreas registradas.

Figura 4 - Levantamento com o VANT: a) VANT SenseFly eBee, b) receptor GNSS Topcon GR-3, c) plano de voo realizado no software Emotion 2



Elaboração: Os autores, 2019.

Processamento dos dados levantados

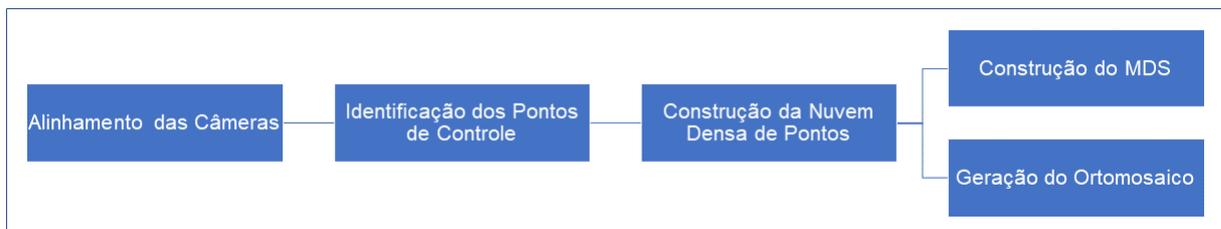
O processamento do levantamento aerofotogramétrico foi realizado no *software* Agisoft Metashape Pro (Figura 5). Na primeira etapa do processamento foram carregadas as 1.339 fotografias no *software* e realizado o procedimento de alinhamento das fotografias, no qual o *software* procura pontos homólogos nas imagens para combiná-los, determinando a posição da câmera em cada fotografia.

Com as fotografias alinhadas, foram inseridos os pontos de controles. Neste momento, foi realizada a identificação manual destes nos alvos fotografados e presentes nas fotografias aéreas. Para cada ponto de controle selecionado, o *software* mostra todas as possíveis fotografias em que ele pode estar presente. Este procedimento de marcação dos pontos de controle é importante para que o MDS possa ser georreferenciado.

Após os 15 pontos de controle serem alocados e identificados nas suas corretas posições nas fotografias, foi realizado o procedimento de construção da nuvem densa de pontos. Esta etapa consiste em gerar uma nuvem de pontos a partir das posições calculadas para as câmeras, fotografias e pontos de controle. Este procedimento foi realizado no *software* na qualidade alta, produzindo para a área de estudos um total de 741.049.182 pontos.

Através da nuvem densa de pontos, foram construídos o MDS e o ortomosaico, obtidos a partir da ortorretificação das fotografias originais. Além disso, procedimentos de filtragem e classificação da nuvem densa de pontos foram realizados para preenchimento de falhas e remoção de parte da vegetação.

Figura 5 - Fluxograma das etapas do processamento das fotografias aéreas



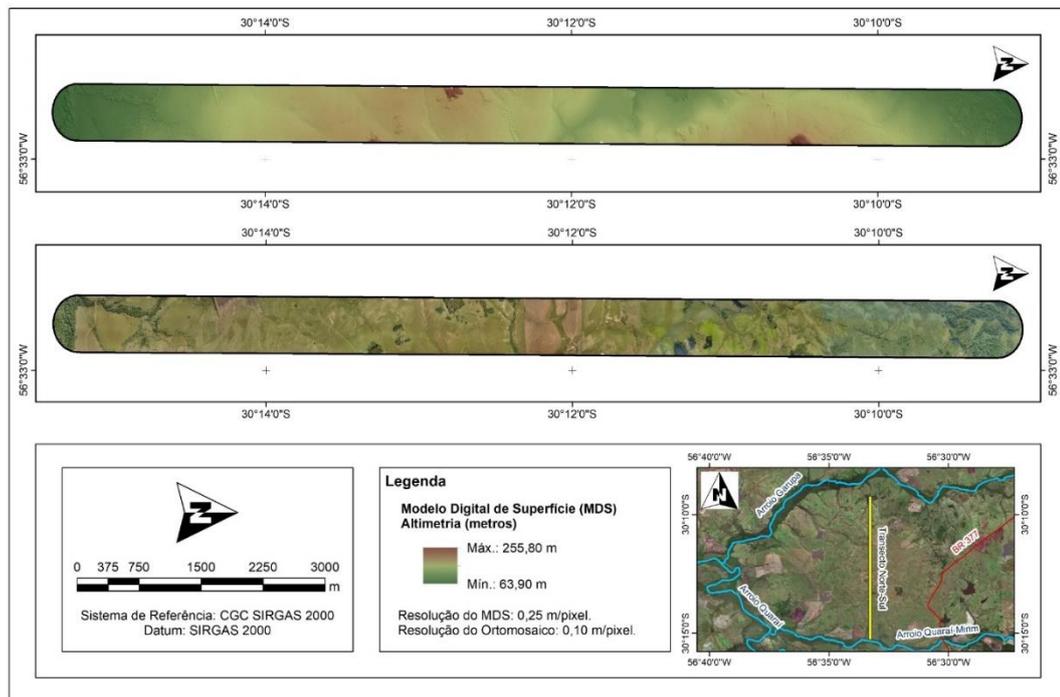
Elaboração: Os autores, 2019.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O MDS e o ortomosaico do transecto norte-sul (Figura 6) e leste-oeste (Figura 7), resultantes do levantamento aerofotogramétrico, possuem aproximadamente 12 km de comprimento por 300 m de largura. Os MDS's apresentam resolução de 0,25 m/pixel. Estes foram representados com a técnica de relevo sombreado para melhor visualização da altimetria. Os ortomosaicos apresentam GSD de 0,1 m/pixel onde é possível fotointerpretar as feições geomorfológicas e geológicas existentes na área com precisão através deste produto de alta resolução espacial.

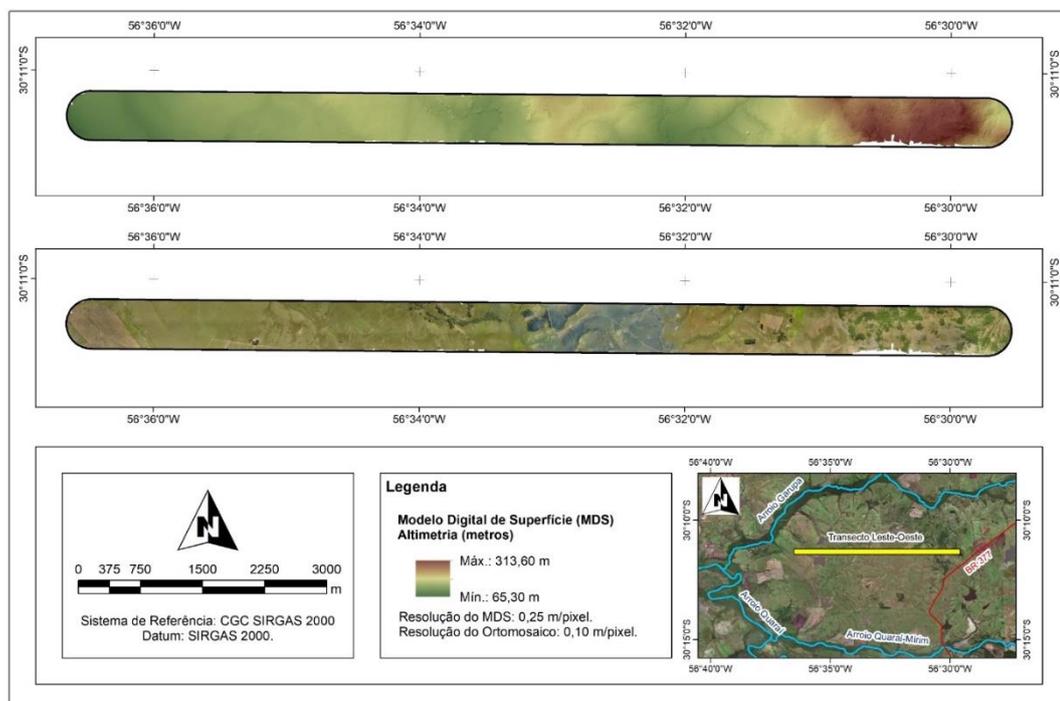
Para verificar a qualidade do projeto foi realizada uma análise da acurácia posicional. O *software* Agisoft Metashape Pro gera um relatório com as informações do processamento onde é possível obter os erros de posicionamento e os valores estatísticos dos erros através do *Root-Mean-Square Error* (RMSE). A acurácia posicional obtida após o processamento de todos os pontos de controle foi de 9,4 cm para o erro planimétrico e 4,6 para o erro altimétrico, resultando um erro total de 10,5 cm. Nos levantamentos executados foram obtidos um GSD (*Ground Control Points*) de 7,5 cm/pixel. Deste modo, é possível verificar a qualidade do levantamento e se ele é considerado aceito, verificando se o valor máximo para o erro planimétrico é menor 1,5 x GSD e para o altimétrico menor de 3 x GSD, portanto para um GSD 7,5 cm/pixel os valores desse projeto são considerados aceitos.

Figura 6 - Modelo digital de superfície (superior) e ortomosaico (inferior) do transecto norte-sul



Elaboração: Os autores, 2019.

Figura 7 - Modelo digital de superfície (superior) e ortomosaico (inferior) do transecto leste-oeste



Elaboração: Os autores, 2019.

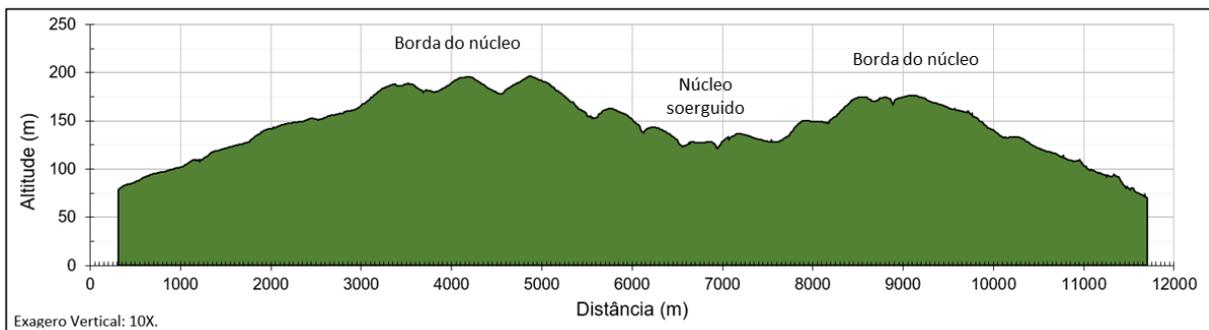
Fotointerpretação dos aspectos geomorfológicos

Através dos dados obtidos no MDS, verifica-se que no transecto norte-sul a altitude varia em sua amplitude entre 63,9 m e 255,8 m. No transecto leste-oeste, a variação da altitude ocorre entre 65,3 m e 313,6 m. No

nordeste do núcleo soerguido da estrutura de impacto são verificadas as maiores altitudes nas cristas originadas no impacto do corpo celeste, sendo essas visualizadas no transecto leste-oeste.

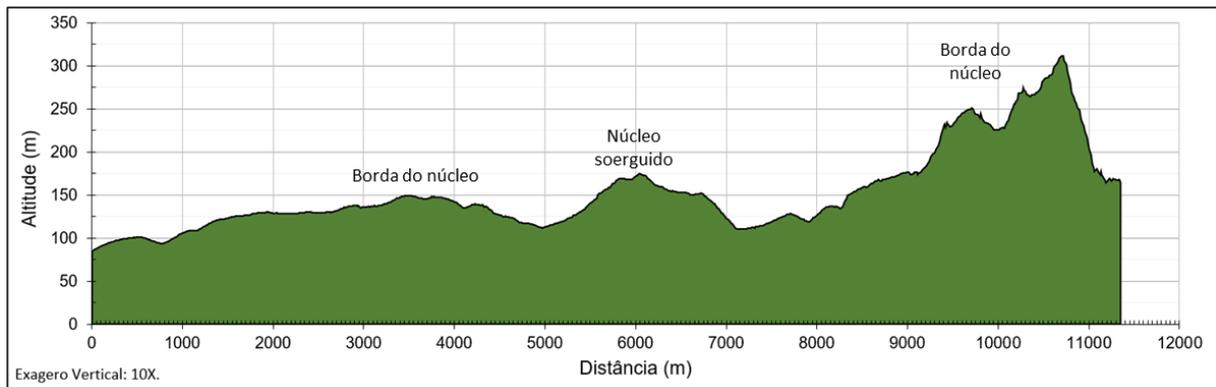
Nos perfis altimétricos longitudinais elaborados com base nos MDS's e expostos nas Figuras 8 e 9, é possível observar algumas características morfológicas da estrutura que corroboram para a feição ser uma cratera de impacto. No perfil norte-sul (Figura 8), observa-se o núcleo da estrutura soerguido e as bordas com altitude superior, características de uma cratera de impacto complexa. No perfil leste-oeste (Figura 9) é possível verificar o núcleo soerguido, as cristas elevadas a leste, local onde ocorrem as maiores altitudes no Cerro do Jarau, superiores a 300 m. Entretanto, em direção ao oeste, a altitude da borda do núcleo da estrutura é menor em relação ao núcleo, evidenciando uma situação peculiar da estrutura de impacto do Cerro do Jarau.

Figura 8 - Perfil altimétrico com exagero vertical de 10 vezes do transecto norte-sul



Elaboração: Os autores, 2019.

Figura 9 - Perfil altimétrico com exagero vertical de 10 vezes do transecto leste-oeste



Elaboração: Os autores, 2019.

As formas de relevo mais comuns na área de estudo são as colinas, conhecidas na região por coxilhas. Elas apresentam altitudes baixas com declives suaves e vales pouco profundos, atribuindo à paisagem um aspecto ondulado a plano. As cristas de arenito preservadas ao leste e ao norte do núcleo da estrutura de impacto em formato de semicírculo são classificadas como morros ou morrotes de acordo com a sua amplitude altimétrica. Os morros ocorrem quando a amplitude ultrapassa a 100 m e são encontrados na porção nordeste da borda do núcleo (Figura 10e). Já os morrotes, com amplitude entre 20 m e 100 m, estão presentes em direção ao norte (Figura 10b).

A estrutura de impacto apresenta seu núcleo soerguido com cristas preservadas ao leste e ao norte da estrutura em formato de semicírculo (Figura 10g). Nas partes sul (Figura 10h) e norte (Figura 10f) da estrutura, são identificadas características típicas da *Cuesta do Haedo*, relevo aplainado, com a presença de colinas pluriconvexas. Este aspecto evidencia que as feições presentes no Cerro do Jarau contradizem com a morfologia do entorno.

Em relação à hidrografia presente na estrutura, identificamos cursos d'água de primeira e segunda ordem (Figuras 10a e 10c). Estes possuem um padrão radial centrípeto, que reforça a evidência da área representar um astroblema. Os córregos existentes no interior da estrutura formam a bacia hidrográfica do Arroio Nhanduvaí (Figura 10a) que segue o seu curso em direção ao sul, sendo tributário do arroio Quarai-Mirim (Figura 10d).

Figura 10 - Aspectos geomorfológicos da estrutura de impacto do Cerro do Jara



Elaboração: Os autores, 2019.

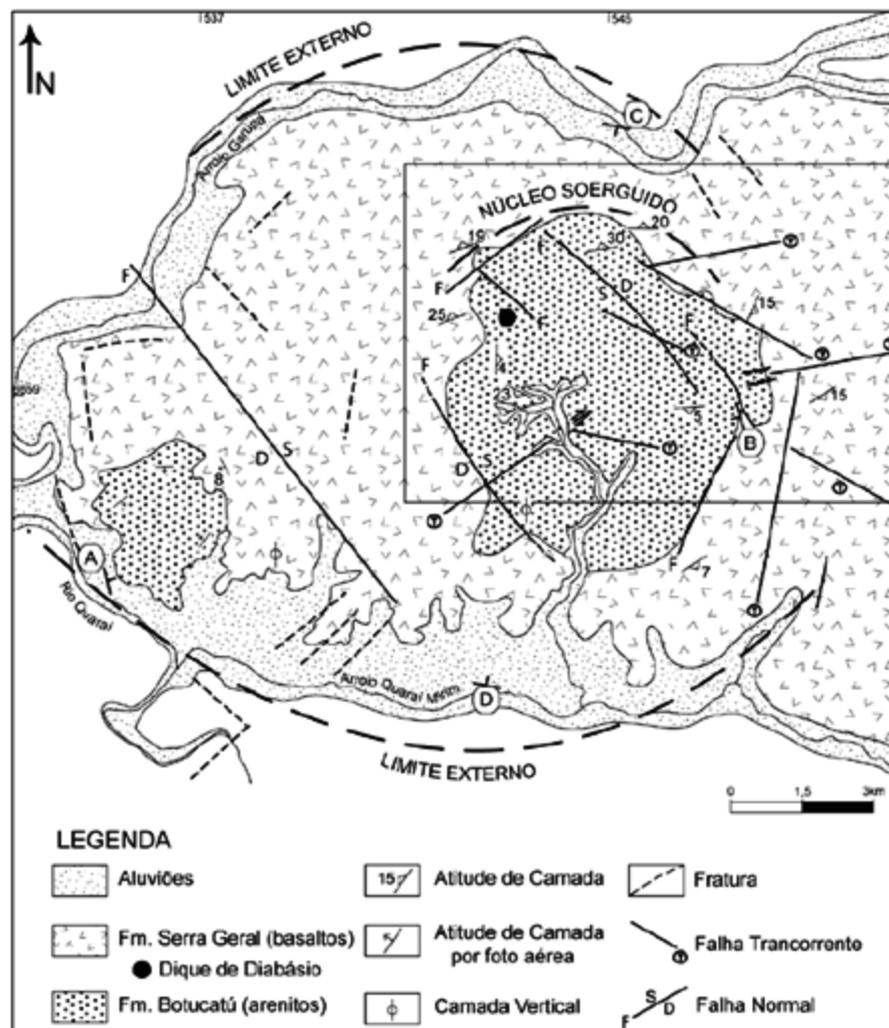
Fotointerpretação das unidades litoestratigráficas

Através da interpretação visual dos ortomosaicos, do trabalho de campo, e do mapa geológico proposto por Phillip *et al.* (2010) apresentado na Figura 11, foram identificados afloramentos de arenito da Formação Botucatu nas cristas elevadas ao norte e nordeste da estrutura (Figuras 12f e 12g). Nas cristas elevadas da região leste do núcleo, local das maiores altitudes, ocorrem maior presença de afloramentos de arenito da Formação Botucatu (Figuras 12d e 12e). Nas bordas sul e oeste (Figura 12c) do núcleo soerguido da estrutura de impacto, também tem a presença de afloramentos, porém estão em menor número e quantidade em relação aos presentes nas cristas elevadas ao norte e nordeste. Os arenitos da Formação Botucatu existentes da área dos transectos apresentam elevado grau de fraturamento, com disposição

irregular. Além disso, foi possível verificar através do trabalho de campo outras características como a estratificação cruzada, com os afloramentos sendo compostos por blocos de diversos tamanhos.

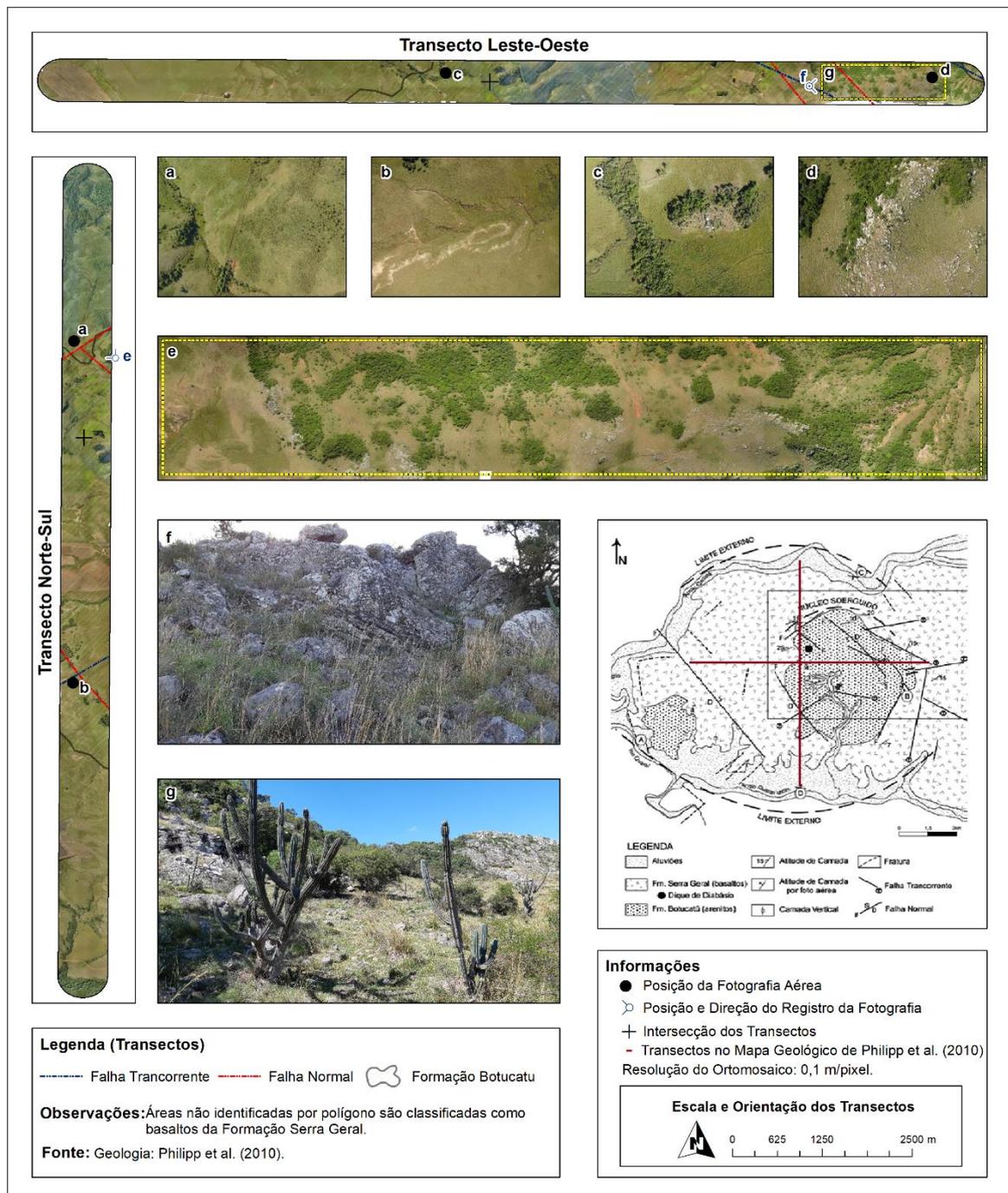
As falhas e fraturas identificadas por Philipp *et al.* (2010) na estrutura de impacto podem ser observadas nos ortomosaicos e MDS's através de lineamentos. No local da delimitação de uma falha transcorrente e uma falha normal no transecto norte-sul (Figura 12b), pode-se visualizar a quebra de relevo em padrões retilíneos que caracterizam um lineamento negativo. No setor norte (Figura 12a), onde são identificadas duas falhas normais, também é possível visualizar lineamentos negativos que auxiliam na identificação destas falhas.

Figura 11 - Mapa geológico da estrutura de impacto do Cerro do Jarau, proposto por Philipp *et al.* (2010)



Fonte: Philipp *et al.* (2010).

Figura 12 - Interpretação geológica da estrutura de impacto



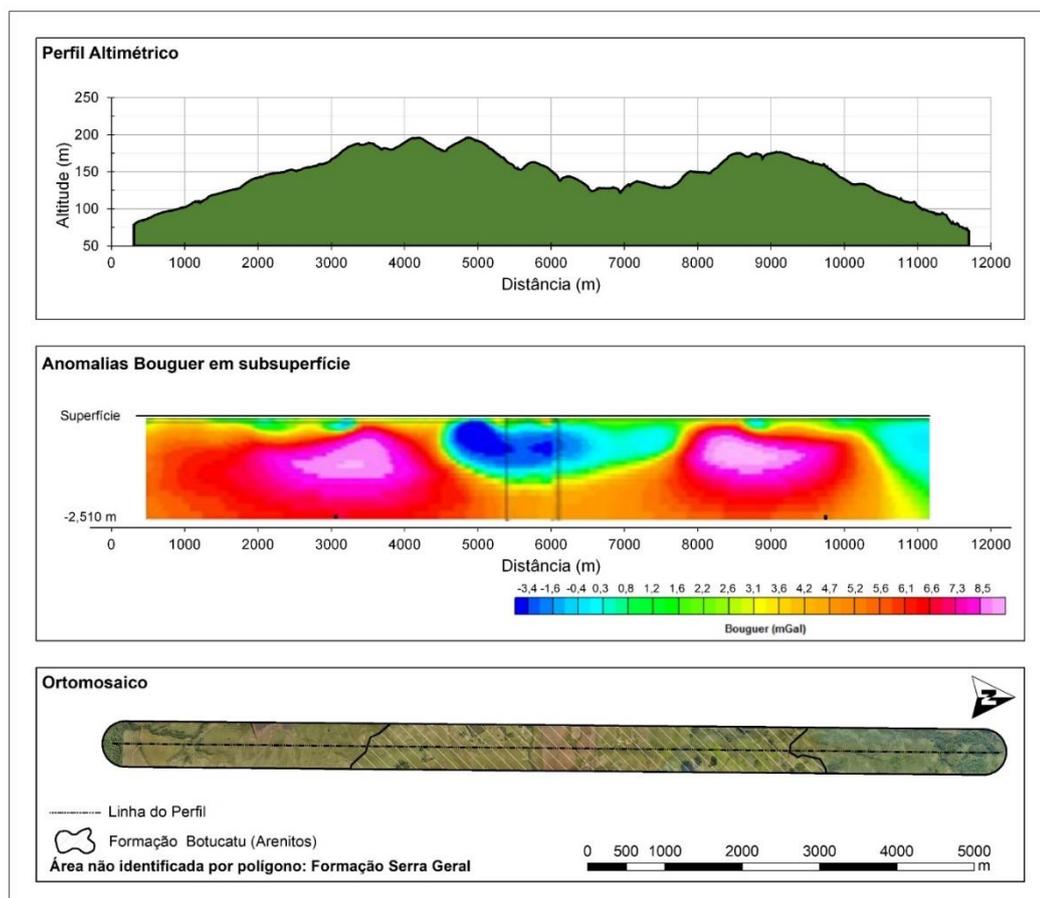
Elaboração: Os autores, 2019.

Comparando dados de anomalia Bouguer de Giacomini (2015) da estrutura de impacto do Cerro do Jarau com os perfis altimétricos e ortomosaicos obtidos no levantamento aerofotogramétrico, nota-se que no transecto norte-sul (Figura 13) há a tendência de anomalia positiva entre 0,8 e 2,6 mGal na área do arenito da Formação Botucatu (brechas de impacto), caracterizada pelas bordas no núcleo soerguido no perfil altimétrico da estrutura de impacto. No núcleo da estrutura, as anomalias são menores que 0,8 mGal. Nos limites sul e norte do perfil, verifica-se aumento da anomalia Bouguer, sendo presente nestes locais em superfície os basaltos da Formação Serra Geral. Fazendo uma analogia com as cristas de arenito do setor norte, interpretam-se essas anomalias como brechas de impacto que estão em superfície no norte e

possivelmente soterradas ao sul. No transecto leste-oeste (Figura 14), verificam-se anomalias positivas entre 0,8 e 2,6 mGal nas bordas do núcleo soerguido. Entretanto, alta anomalia, com valores superiores a 8,5 mGal, é percebida no início da elevação das cristas localizadas no nordeste da estrutura, local onde há grande presença de afloramentos de arenitos. Nas altitudes maiores, a anomalia Bouguer retorna aos valores encontrados nas bordas do núcleo. Além disso, no setor oeste do transecto também ocorre alta anomalia na borda da Formação Botucatu com a Formação Serra Geral.

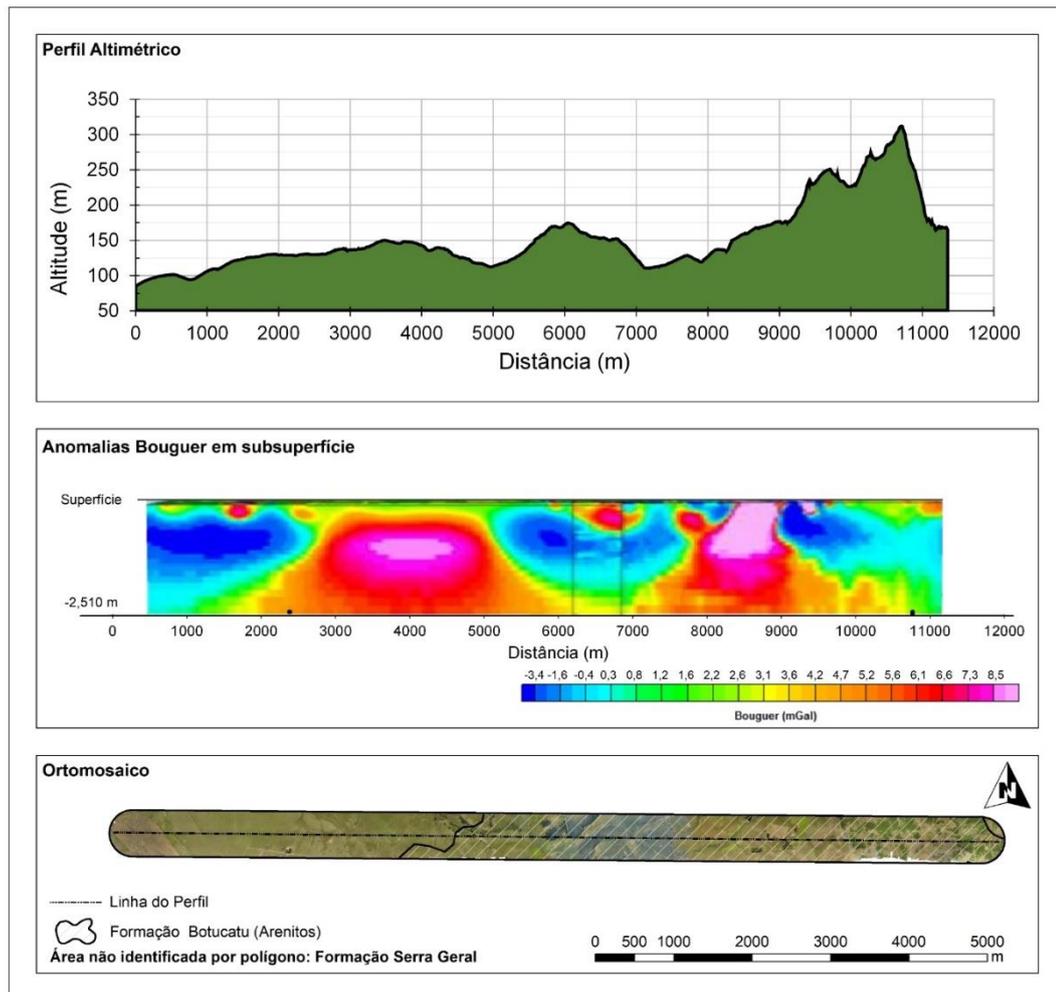
Os dados dos MDS do transecto norte-sul e leste-oeste da estrutura de impacto indicam que as bordas do núcleo soerguido apresentam maiores altitudes ao norte e leste em relação ao sul e oeste da estrutura. Entretanto, os dados de anomalia Bouguer mostram valores positivos entorno do núcleo soerguido. Com isso, a hipótese é que o conjunto de falhas favoreceu o soerguimento dos blocos de arenito ao norte/leste da estrutura. Já ao sul/oeste ocorreu o rebaixamento de outro bloco, que ainda estaria preservado, não visível em superfície. Desta maneira, a anomalia Bouguer é positiva e semelhante nas bordas do núcleo soerguido por provavelmente existir a mesma composição litológica, os arenitos com os basaltos comprimidos ao seu lado.

Figura 13 - Perfil altimétrico, anomalia Bouguer proposta por Giacomini (2015) e ortomosaico do transecto norte-sul



Elaboração: Os autores, 2019.

Figura 14 - Perfil altimétrico, anomalia Bouguer proposta por Giacomini (2015) e ortomosaico do transecto leste-oeste



Elaboração: Os autores, 2019.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação à geologia, a fotointerpretação visual dos ortomosaicos permitiu a identificação de diversos afloramentos de arenitos da Formação Botucatu e lineamentos negativos em locais onde foram delimitadas falhas normais e transcorrentes por Phillip *et al.* (2010). Desta maneira, um produto como este permite melhor identificação de feições presentes na área de estudo, pois a resolução de 0,10 m/pixel do ortomosaico faz com que grande parte das feições presentes na área sejam visíveis com qualidade, auxiliando na melhor delimitação e entendimento dos limites entre as unidades litológicas.

Além disso, foi possível identificar nas bordas do núcleo soerguido ao norte e leste, altitudes maiores em relação a oeste e sul, sendo esta evidência uma contribuição para a hipótese de que através do conjunto de falhas existentes houve o soerguimento do setor norte/leste e um rebaixamento ao sul/oeste. Os dados de anomalia Bouguer reforçam esta hipótese, pois os valores positivos em torno do núcleo indicam a continuidade da estrutura, sendo que ao sul e oeste os arenitos não estão visíveis em superfície.

Desta maneira, analisar a paisagem com a fotointerpretação geomorfológica e geológica através de levantamentos aerofotogramétricos com VANT é uma alternativa que proporciona dados de qualidade a um custo menor que os tradicionais levantamentos com aeronaves. Além disso, esse tipo de levantamento enriquece a coleta de dados de qualidade em relação aos levantamentos tradicionais de topografia.

Com isso, estudos morfológicos e geológicos com auxílio do VANT são uma alternativa para as pesquisas em geociências, pois esses equipamentos possuem câmeras de alta precisão, GNSS e sistemas inerciais

para navegação automática que facilitam a tarefa de executar aerolevantamentos, obtendo produtos como MDS e ortomosaicos de alta resolução espacial.

REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N. Domínios morfoclimáticos e províncias fitogeográficas do Brasil. **Revista Orientação**, Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo (IGEOG/USP), n. 3, p. 45-48, 1967.
- AB'SÁBER, A. N. Faixas de transição e contacto: a transição entre domínios de vegetação é marcada por feições híbridas. **Scientific American Brasil**, São Paulo, n. 54, 2006.
- AB'SÁBER, A. N. Transectos: Sua Importância Didática, Científica e Cultural. In: MODENESI-GAUTTIERI, *et al.* (orgs.). **A obra de Aziz Nacib Ab'Sáber**. São Paulo: Beca. 2010.
- ALVAREZ, W.; ALVAREZ, L. W.; ASARO, F.; MICHEL, H. V. Extraterrestrial Cause for the Cretaceous - Tertiary Extinction. **Science**, v. 208, p. 1095-1108, 1980.
<https://doi.org/10.1126/science.208.4448.1095>
- CRÓSTA, A. P.; LOURENÇO, F. S.; PRIEBE, G. H. Cerro Jarau, Rio Grande do Sul: a Possible New Impact Structure in Southern Brazil. In: GIBSON, R. L.; REIMOLD, W. U. (org.). Large Meteorite Impacts and Planetary Evolution IV. **The Geological Society of America Special Paper**, v. 465, p. 173-90, 2010. [https://doi.org/10.1130/2010.2465\(12\)](https://doi.org/10.1130/2010.2465(12))
- FRENCH, B. M. **Traces of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures**. LPI Contribution n° 954, Lunar and Planetary Institute, Houston, 1998. 120 p.
- FRENCH, B. M. The Importance of Being Cratered: The New role of Meteorite Impact as a Normal Geological Process. **Meteoritics & Planetary Science**, v. 39, n. 2, p. 169-197, 2004.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2004.tb00335.x>
- GIACOMINI, B. B. Inversão Gravimétrica 3D da Estrutura do Cerro do Jarau (RS). **Dissertação** (Mestrado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas. 2015. 66p.
- GOMES, A. S.; VASCONCELOS, P. M. Geochronology of the Paraná-Etendeka large igneous province. **Earth-Science Reviews**, v. 220, 103716, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103716>
- GREHS, S.A. Aspectos Geológicos e Geomorfológicos do Cerro do Jarau, Rio Grande do Sul. In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 23., **Anais [...]**, p. 265-272. 1969.
- GRIEVE, R. A. F.; MASAITIS, V. L. The Economic Potential of Terrestrial Impact Craters. **International Geology Review**, v. 36, n. 2, p. 105-151, 1994.
<https://doi.org/10.1080/00206819409465452>
- HORBACH, R.; KUCK, L.; MARIMON, R. G.; MOREIRA, H. L.; FUCK, G. F.; MOREIRA, M. L. D.; MARIMON, M. P. C.; PIRES, J. L.; VIVIAN D.; MARINHO D.; TEIXEIRA, W. **Folha SH.22 Porto Alegre e parte das folhas SH.21 Uruguaiana e SI.22 Lagoa Mirim**. Geologia, IBGE, Levantamento de Recursos Naturais, v. 33, p. 29-312, 1986.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento de Recursos Naturais**. v. 33. Folha SH. 22 Porto Alegre e parte das Folhas SH. 21 Uruguaiana e SI. 22 Lagoa Mirim: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. 796 p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Malhas Territoriais 2015**. Malhas Municipais, 2015. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_municipais/municipio_2015/Brasil/BR/. Acesso: 30 mar. 2024.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Serviço online para pós-processamento de dados GNSS**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html>. Acesso em: 10 fev. 2024.

- KAZZUO-VIEIRA, C.; CROSTA, A. P.; GAMBOA, F. e TYGEL, M. Caracterização geofísica da estrutura de impacto do domo de Vargeão, Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 27, n. 3, p. 375-388, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2009000300006>
- KOEBERL, C. Craters on the Moon from Galileo to Wegener: a Short History of the Impact Hypothesis, and Implications for the Study of Terrestrial Impact Craters. **Earth, Moon and Planets**, v. 85-86, p. 209-224, 2001. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0800-6_19
- LISBOA N. A.; OLIVEIRA M. T. G.; SCHUCK M. T. G. O.; TRAMONTINA, H. C. Reconhecimento geológico da região do Jarau, Quaraí, RS. In: SBG, SIMPÓSIO SUL BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 3, **Atas [...]**, p. 1:319-332. 1987.
- LOURENÇO, F. S. **Caracterização Geológica da Possível Estrutura de Impacto do Cerro do Jarau - Região oeste do Estado do Rio Grande do Sul. 2007.** 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2007.
- MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana Sul-Occidental. **Tese** (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1997. 255p.
- MORGAN, J. L.; GERGEL, S. E.; COOPS, N. C. Aerial photography: a rapidly evolving tool for ecological management. **BioScience**, v. 60, n. 1, p. 47-59, 2010. <https://doi.org/10.1525/bio.2010.60.1.9>
- MOREIRA, H. L.; FREITAS, P. R. S.; NUNES, A. B. Geologia da estrutura de colapso do Jarau. In: SBG, CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, n. 31, **Anais [...]**, v. 5, p. 2684-2690, 1980.
- PHILIPP, R. P.; ROLIM, S. B. A.; SOMMER, C. A.; SOUZA FILHO, C. R.; LISBOA, N. A. A estrutura de impacto do Cerro do Jarau, Quaraí, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 4, p. 468-483, 2010. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010404468483>
- SCHUCK M. T. G. O.; LISBOA N. A. Identificação de padrões estruturais no Grupo São Bento, Quaraí, RS, através de imagens orbitais e suborbitais. **Revista Pesquisas**, n. 20, p. 5-24, 1987. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.21669>

Recebido em: 09/10/2023

Aceito para publicação em: 03/04/2024