

Modelagem fotogramétrica de sítios arqueológicos e geração de produtos cartográficos: suporte à pesquisa e divulgação do patrimônio cultural de Serranópolis, Goiás, Brasil

Photogrammetric modeling of archaeological sites and generation of cartographic products: support for research and dissemination of the cultural heritage of Serranópolis, Goiás, Brazil

Paulo Rodrigo Simões^I  | Edilson Teixeira de Souza^{II}  | Luis Augusto Koenig Veiga^I  | Marcio Schmidt^{III} 

^IUniversidade Federal do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil

^{II}Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiânia, Goiás, Brasil

^{III}Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

Resumo: O uso das geotecnologias nas pesquisas arqueológicas oferece benefícios como a representação mais fidedigna de um bem cultural, o acesso a ferramentas analíticas e a recursos cartográficos e meios para o divulgação de resultados. No entanto, impõe desafios, como a necessidade de recursos financeiros, capacitação, integração com métodos tradicionais e padronização de procedimentos. Com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento e a divulgação de aplicações de geotecnologias na Arqueologia, este artigo apresenta métodos de levantamento e produtos gerados no projeto de registro digital de sítios arqueológicos de Serranópolis, Goiás, proposto pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional. Para tanto, descreve o uso de geotecnologias para tratamento de dados espaciais e suas aplicações no registro digital e na divulgação dos modelos 3D. São destacadas as vantagens do uso da fotogrametria na documentação arqueológica para a criação de mapas a partir de modelos 3D e produtos cartográficos. São apresentadas a classificação espectral SAM para a segmentação de grafismos, extração de informações métricas. Conclui-se que essas tecnologias, em especial a fotogrametria, apresentam potencial para auxiliar na documentação, na análise, bem como no suporte à divulgação do patrimônio cultural, contribuindo para a democratização do seu acesso e sua preservação.

Palavras-chave: Fotogrametria. CAD. SIG. Arqueologia. Sensoriamento remoto. Modelagem 3D.

Abstract: The use of geotechnologies in archaeological research offers several benefits, including more realistic representations of cultural assets, analytical tools, cartographic resources, and means for sharing data and disseminating results. However, it also presents challenges, such as the need for financial resources, training, integration with traditional methods, and standardization of procedures. With the aim of contributing to the development and dissemination of geotechnological applications in archaeology, this article presents the survey methods and products generated in the digital photogrammetric recording project of archaeological sites in Serranópolis, GO, proposed by IPHAN. This article describes the use of geotechnologies for processing spatial data and their applications in the digital recording and dissemination of 3D models. It emphasizes the advantages of using terrestrial photogrammetry in documenting archaeological sites for creating maps from 3D models and cartographic products. The SAM spectral classification for pigment segmentation, the extraction of metric information, and a method for disseminating the models are also presented. The article concludes that these technologies, especially terrestrial photogrammetry, have the potential in documentation, analysis, decision support, and dissemination of cultural heritage, thereby contributing to the democratization of access and preservation.

Keywords: Photogrammetry. CAD. SIG. Archaeology. Remote sensing. 3D modelling.

Simões, P. R., Souza, E. T., Veiga, L. A. K., & Schmidt, M. (2025). Modelagem fotogramétrica de sítios arqueológicos e geração de produtos cartográficos: suporte à pesquisa e divulgação do patrimônio cultural de Serranópolis, Goiás, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 20(3), e20230121. doi: 10.1590/2178-2547-BGOELDI-2023-0121.

Autor para correspondência: Paulo Rodrigo Simões. Universidade Federal do Paraná. Avenida Coronel Francisco Heráclito dos Santos, 210, Campus Politécnico. Curitiba, PR, Brasil (prsimo@uol.com.br).

Recebido em 10/01/2024

Aprovado em 26/06/2024

Responsabilidade editorial: Fernando Almeida de Almeida



INTRODUÇÃO

Historicamente, a Arqueologia tem se servido de métodos de levantamento analíticos e cronológicos com precisão para a representação cartográfica dos sítios, bem como de análises estatísticas, arqueométricas e datações de vestígios. Essa condição se impõe uma vez que a construção do conhecimento algumas vezes se faz a partir da desconstrução do registro arqueológico, notadamente em procedimentos interventivos. A documentação gráfica e cartográfica de um sítio arqueológico é imprescindível no estabelecimento de políticas de conservação do patrimônio arqueológico, podendo ser utilizada também para sua divulgação e valorização, em diversas mídias, para públicos diversos.

Nas últimas décadas, novos métodos de levantamento de superfícies surgiram, como a varredura a laser terrestre, e outros foram aprimorados, como o caso da fotogrametria terrestre, resultando em representações tridimensionais detalhadas, com milhões de pontos, as quais são hoje denominadas de nuvens de pontos. A partir delas, é possível uma modelagem geométrica dos objetos ou locais de interesse. Os métodos geofísicos passaram a fornecer uma variedade de técnicas não invasivas para mapear e investigar artefatos e estruturas em sub-superfície, podendo orientar os arqueólogos na tomada de decisões sobre onde concentrar seus esforços de pesquisa, fornecendo uma visão mais abrangente do sítio arqueológico e ajudando a entender sua organização espacial. Através dos sistemas de informação geográfica (SIG) foi possível gerar bases de dados cartográficos que, aliados a dados cadastrais, podem fornecer mapas preditivos, além de análises espaciais e estatísticas. Através das plantas topográficas, são representadas a localização, os limites e as características morfológicas dos sítios, a distribuição espacial dos vestígios e os limites das camadas, permitindo uma análise tridimensional a partir de representações bidimensionais em formato analógico. Destaca-se também a fotografia enquanto um dos mais importantes e eficientes métodos de registro visual da arte rupestre (Okuyama et al., 2014), o

que tem permitido diversas possibilidades de manipulação em ambiente digital, visando à extração de informação qualitativa ou quantitativa numa perspectiva multitemporal.

O compartilhamento desses produtos digitais gerados pelos métodos de levantamento via internet, especialmente os modelos 3D, tem permitido a exploração e a análise do sítio arqueológico em um ambiente virtual. Esses modelos podem ser manipulados de forma interativa, contribuindo para a visualização de diferentes ângulos e a execução de mensurações sobre o modelo com precisão dependente da técnica de coleta de dados e métodos de interpolação, mas que podem ser melhores que o milímetro. Contribui, ainda, para a democratização do acesso ao patrimônio cultural através de experiências educacionais sensoriais, incluindo o uso de dispositivo de realidade virtual, podendo vir a ser um fator de promoção de sua preservação.

No entanto, deve-se considerar que a adoção de novas tecnologias impõe novos desafios (Zarankin et al., 2022), como a necessidade de capacitação e formação de recursos humanos, custos de equipamentos e operacionais, na integração com os métodos tradicionais, na padronização e interoperacionalidade de dados, além de questões éticas e legais. Devem considerar também limitações dos modelos 3D enquanto representações virtuais, entendidos como recortes parciais da realidade, segundo perspectivas subjetivas.

Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados do projeto de registro digital, por meio de modelagem fotogramétrica e geração de produtos cartográficos, dos sítios arqueológicos Gruta das Araras, Gruta do Paredão e Gruta do Diogo, contribuindo para a difusão dos recursos geotecnológicos e a divulgação do patrimônio cultural material. Os levantamentos fotogramétricos voltados para a geração de produtos 3D foram realizados em atendimento a uma das condicionantes para a anuência da licença prévia do empreendimento Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Taboca da Atiaia Renováveis, conforme o



Ofício nº 1110/2021/COTEC IPHAN-GO/IPHAN-GO-IPHAN, processo nº 01516.000432/2020-25, de 16/12/2021. Nesse ofício, são apresentados os sítios a serem imageados, bem como solicitados esclarecimentos técnicos sobre as vantagens e as desvantagens dos métodos indicados – varredura a *laser* e a fotogrametria. Entre os aspectos considerados, destacam-se: melhor definição/zoom das texturas das pinturas rupestres; melhor modelagem em 3D; maior facilitação na armazenagem dos dados; maior facilitação na socialização dos dados; melhor possibilidade de criação de museu virtual; menor distorção angular e de distância das imagens; e maior potencial em reconstituição de cenas e imagens.

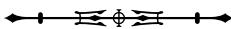
Os questionamentos foram respondidos na forma de um plano de trabalho, aprovado pelo Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) em 06 de setembro de 2022, sendo a Portaria nº 55, publicada em 19 de setembro de 2022 (IPHAN, 2022). De forma a ampliar o escopo da demanda inicial de modelagem 3D dos sítios, foi proposta a geração de produtos cartográficos que viessem a contribuir em futuras pesquisas, em atividades de educação patrimonial, na conservação, divulgação e promoção dos sítios.

O plano de trabalho foi executado a partir de levantamentos de campo, realizados em novembro de 2022, visando à representação da morfologia dos abrigos em modelos 3D georreferenciados segundo os sistemas UTM SIRGAS 2000 e Fuso 22S, além da reprodução em resolução milimétrica dos painéis rupestres e do compartilhamento dos modelos 3D junto às partes interessadas, bem como da disponibilização em repositório *online* para divulgação junto ao público. Os arquivos digitais dos produtos gerados foram enviados ao IPHAN juntamente a um relatório de atividades, sendo aprovados segundo o Parecer Técnico nº 57/2023 - IPHAN-GO/COTEC IPHAN-GO/IPHAN, de 22 de agosto de 2023. O pós-processamento dos dados e a geração dos produtos foram feitos com o suporte do Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia (GEENG), do Programa de

Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Utilizando-se de métodos de levantamento e tratamento de dados espaciais, como o *Global Navigation Satellite System* (GNSS), o sensoriamento remoto (SR), o sistema de informações geográficas (SIG) e o *Computer Aided Design* (CAD) sobre os produtos cartográficos gerados e os modelos 3D, foram realizados estudos preliminares voltados às análises espaciais, à classificação espectral e à representação gráfica 3D. Na Gruta do Diogo I, foram realizadas análises espaciais da composição sedimentar do piso, mensurações e vetorizações de gravuras a partir dos modelos 3D. Na Gruta das Araras, foi aplicado o método *Spectral Angle Mapper* (SAM) na classificação dos pixels com pigmento ocre-vermelho do painel principal. Trata-se de um algoritmo que quantifica a similaridade espectral entre a assinatura do pixel a ser classificado e a assinatura de uma classe de referência a partir da comparação dos ângulos dos seus espectros, tratados como vetores em um espaço n-dimensional.

Ressalta-se a importância do registro digital tridimensional do patrimônio arqueológico, com destaque para os levantamentos fotogramétricos, em função de custos relativamente menores, alto nível de detalhamento, qualidade visual, precisão posicional e geométrica, podendo ser realizado numa perspectiva multitemporal, visando ao monitoramento das condições de conservação dos painéis rupestres. Ainda que a varredura a *laser* seja um método que permita uma captura rápida, ela apresenta desvantagens, como o alto custo operacional e, principalmente, o espaçamento entre os pontos da nuvem. Dependendo da distância entre o dispositivo de varredura e as gravuras ou pinturas rupestres, pode haver limitações na resolução dos detalhes capturados, vindo a afetar a precisão e a qualidade das reproduções digitais. No entanto, somente a qualificação profissional nessa área garantirá a qualidade dos produtos gerados, assim como uma diversidade de abordagens analíticas e formatos de divulgação, seguindo uma tendência mundial.



MÉTODOS DE LEVANTAMENTO E TRATAMENTO DE DADOS GEOESPACIAIS

FOTOGRAFETRIA

Na Arqueologia brasileira, a fotogrametria tem se tornado uma ferramenta amplamente utilizada para a documentação, a análise e a divulgação do patrimônio arqueológico, proporcionando uma abordagem não invasiva para o estudo de sítios, estruturas e artefatos. Trata-se de uma forma precisa, detalhada e virtualmente manipulável de registrar e analisar sítios arqueológicos, uma alternativa aos métodos tradicionais, como a fotografia, os decalques ou os moldes (Kipnis et al., 2013).

A fotogrametria terrestre pode ser utilizada para reconstruir digitalmente estruturas arqueológicas em 3D, utilizando-se de câmeras fotográficas diversas, sejam elas compactas, de ação, *Digital Single-Lens Reflex* (DSLR), *mirrorless*, de pequeno formato ou mesmo de *smartphones*. Essas reconstruções virtuais auxiliam na visualização e na interpretação dos elementos arquitetônicos e das técnicas construtivas utilizadas no passado (Lopez et al., 2003). Aplicada na criação de modelos 3D de artefatos arqueológicos, como cerâmicas, ferramentas, objetos de metal, entre outros, a fotogrametria permite que os pesquisadores examinem os artefatos em detalhes, sem a necessidade de manipulá-los diretamente, o que é especialmente importante para a preservação dessas peças. Além disso, os modelos 3D podem ser arquivados e compartilhados digitalmente, permitindo que as informações sejam preservadas para pesquisas futuras e divulgadas para o público em geral (Magalhães et al., 2018), incluindo as interações com o suporte de dispositivo de realidade aumentada (Gonçalves et al., 2021).

Existem várias etapas envolvidas no processo de fotogrametria terrestre para a criação de modelos 3D. Primeiro, é capturada uma série de imagens (fotografias) do objeto ou do sítio arqueológico a partir de diferentes ângulos e posições da câmera, sempre tomando o cuidado de sobreposição entre as imagens, preferencialmente

maior do que 50%. Em seguida, essas imagens são processadas usando software especializado que analisa a sobreposição das imagens e calcula a posição relativa de cada foto no espaço tridimensional. Com base nesses cálculos, o software reconstrói o objeto ou o sítio arqueológico através da determinação de uma nuvem de pontos que posteriormente será modelada de forma a obter-se a amostra em formato 3D.

A fotogrametria terrestre, juntamente com outras tecnologias digitais, tem transformado a maneira como a Arqueologia brasileira coleta, analisa e compartilha informações sobre seu patrimônio cultural. Essas ferramentas têm proporcionado aos pesquisadores uma visão mais abrangente e detalhada do passado, contribuindo para uma melhor compreensão das culturas antigas que habitaram o Brasil e para a preservação desse valioso patrimônio para as futuras gerações. Além disso, o uso da fotogrametria tem estimulado a colaboração entre arqueólogos, geólogos, especialistas em tecnologia e outras disciplinas, promovendo a interdisciplinaridade e enriquecendo os estudos arqueológicos no país. Esses modelos 3D podem servir como uma referência que registra as condições atuais do sítio e de painéis rupestres (Lima & Landa, 2021), facilitando as comparações futuras e o monitoramento de possíveis mudanças, destacando-se os custos reduzidos e menor tempo necessário em campo para o registro do bem arqueológico (Duarte, 2004).

Levantamentos fotogramétricos podem ser utilizados na documentação de sítios arqueológicos, nos quais os modelos 3D permitem aos pesquisadores o registro preciso e detalhado da topografia, da distribuição dos artefatos e dos limites de camadas e estruturas, vindo a substituir o método topográfico convencional (Thomas & Kennedy, 2016). Esses modelos digitais podem ser usados para estudos posteriores e para preservar a configuração original do sítio, tanto quanto para registrar cada etapa de um processo de escavação. Muitos desses modelos 3D de artefatos arqueológicos podem ser impressos por tecnologia aditiva, em que cada camada de material se



sobrepõe à anterior para se construir o objeto desejado, vindo a materializar réplicas (Fleming et al., 2017), visando à melhoria da acessibilidade. A impressão de modelos 3D pode vir a contribuir na preservação de crânios pré-históricos, ao permitir o manuseio de réplicas de estruturas ósseas frágeis (Moraes et al., 2022). Pode contribuir também com a recomposição de acervos e para fins didáticos, como ocorrido com o Museu Nacional (Cavalcanti, 2019).

Além dos modelos tridimensionais, a fotogrametria terrestre permite a geração de anáglifos, que são imagens estereoscópicas, formadas pela sobreposição de duas imagens ligeiramente deslocadas, uma em cada olho, para criar uma ilusão tridimensional quando vista com óculos apropriados. Esses óculos têm geralmente lentes de cores vermelha e azul ou verde que filtram as imagens correspondentes para cada olho, permitindo que o cérebro combine as duas imagens e perceba a profundidade.

DESENHO ASSISTIDO POR COMPUTADOR

O CAD é uma ferramenta que permite criar desenhos técnicos precisos e detalhados em formato digital, o que traz inúmeras vantagens para os arqueólogos na documentação e na análise do patrimônio arqueológico do Brasil.

As aplicações na arqueologia são diversas, com destaque para o registro e a documentação de sítios arqueológicos, sendo utilizado para: criação de mapas detalhados dos sítios a partir de levantamentos topográficos, apresentando a localização e a distribuição de artefatos e estruturas, os quais permitem uma visualização organizada das informações coletadas em campo; desenhos técnicos precisos de artefatos e estruturas, incluindo elementos arquitetônicos; reconstituição de sítios e paisagens arqueológicas a partir de dados coletados em escavações e levantamentos de campo; análise e interpretação de dados, permitindo a realização de análises espaciais e mensurações de distâncias, ângulos, áreas e volumes; documentação de intervenções de restauração e conservação de artefatos e estruturas, além do compartilhamento e da divulgação de

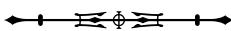
dados a partir de representações visuais de alta qualidade e nível de detalhamento em publicações acadêmicas, exposições, websites e outras mídias, tornando as descobertas arqueológicas mais acessíveis ao público em geral.

Na busca de opções aos softwares proprietários, visando a maior acessibilidade por meio de softwares livres, Albuquerque (2013) apresenta o SOLArque Linux, um sistema operacional gratuito e de interface intuitiva, que pode ser utilizado por estudantes de arqueologia e arqueólogos profissionais, e destaca softwares livres alternativos de ambiente CAD. M. Oliveira (2008) apresenta uma sequência metodológica de operações para os levantamentos cadastrais de precisão, sendo o CAD indicado para a realização de desenhos finais. Já Ladwig et al. (2019) destacam a importância do CAD na organização de dados topográficos na elaboração de mapas temáticos em ambiente SIG, voltados à gestão de sítios arqueológicos guarani no município de Araranguá, Santa Catarina.

SENSORIAMENTO REMOTO

As imagens de sensoriamento remoto desempenham um papel importante no suporte à pesquisa arqueológica brasileira. Essa tecnologia envolve a coleta de informações sobre a superfície da Terra sem a necessidade de contato direto, usando sensores a bordo de aeronaves ou satélites.

Várias técnicas de processamento digital de imagens (PDI) de sensoriamento remoto podem ser utilizadas na geração de produtos, incluindo as composições coloridas em cor real ou falsa-cor, índices de vegetação, classificações espectrais, análises por principais componentes e realces. Fotografias aéreas obtidas por aeronaves tripuladas ou drones são utilizadas na geração de imagens de alta resolução e modelos de elevação de áreas específicas para documentar sítios arqueológicos em detalhe. O *Light Detection and Ranging* (LIDAR) é uma tecnologia que utiliza pulsos de laser para criar modelos tridimensionais de superfícies terrestres, sendo eficaz na detecção de estruturas arqueológicas que podem estar ocultas sob a vegetação ou o solo. Modelos digitais de elevação gerados por levantamentos



topográficos de detalhe ajudam a criar representações cartográficas precisas de sítios arqueológicos, enquanto os realizados por aerolevantamentos ou orbitais são utilizados na caracterização geomorfológica de um ambiente natural. Séries temporais de imagens de satélite ou fotografias aéreas podem ser usadas para monitorar mudanças ao longo do tempo na paisagem em que se insere um sítio arqueológico, incluindo o desmatamento, a urbanização e a mineração, permitindo a implementação de medidas de conservação. A escolha dos produtos de sensoriamento remoto depende das necessidades específicas de cada projeto arqueológico, do ambiente em que o sítio está localizado e das tecnologias e recursos humanos disponíveis.

A partir da fotointerpretação analógica de aerolevantamentos na baía de Guaraqueçaba, no Paraná, Parellada (1989) procedeu com a identificação de sambaquis, atingindo uma eficácia de 70%. A importância do sensoriamento remoto e do SIG enquanto suporte nas prospecções em sítios amazônicos é destacada por Fonseca (2013). O processamento digital de imagens multiespectrais do LANDSAT-5 TM deu suporte a discussões sobre mudanças ambientais a partir da identificação de paleocanais em uma porção do rio Bonito, estado de Goiás. Silva et al. (2013) argumentam que os vestígios hidrológicos delimitados na pesquisa são importante fonte de dados para a paleogeografia. Chagas (2017) analisou a ocupação humana na bacia hidrográfica do rio Carnaúba através da relação espacial dos sítios arqueológicos com a paisagem, a partir de dados de sensoriamento remoto.

Além do registro da cobertura do solo, o sensoriamento remoto pode ser também aplicado na documentação rupestre. Uma das técnicas de processamento digital de imagens mais utilizadas na análise de painéis se baseia nas transformações de cores pela técnica do realce por decorrelação, que consiste em aplicar uma transformada, de Karhunen-Loeve, às cores da imagem, sendo uma operação matemática que converte um conjunto de dados de um espaço de representação para outro, com o objetivo de destacar informações que

não são facilmente perceptíveis na forma original. Uma vez decorrelacionadas, todo o espaço de cores é preenchido e, finalmente, uma transformação inversa é aplicada para mapear as cores, retornando a uma aproximação do original (Harman, 2006). Sua utilização se faz pelo DStretch, que funciona como um *plug-in* do software livre ImageJ ou na forma de um aplicativo para Android ou Apple. Trata-se de uma ferramenta de processamento de imagem desenvolvida por Jon Harman e amplamente utilizada na Arqueologia para melhorar a visibilidade e a análise de pinturas rupestres sem contato direto (Quesada, 2010; Le Quellec et al., 2013, 2015; Fritz et al., 2016; Guedes, 2016; Quesada & Harman, 2019). Em termos operacionais, é relativamente simples, podendo ser aplicado a fotografias ou mosaicos de ortofotos. A imagem pode ser realçada por várias paletas de cores, de forma a evidenciar pigmentos, permitindo aos pesquisadores analisar e interpretar detalhes que anteriormente não eram visíveis. Por ser utilizado no realce de cores, os melhores resultados são obtidos para os painéis de pinturas, mais do que para gravuras.

SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

Os SIG são ambientes utilizados para capturar, armazenar, editar, analisar e visualizar dados espaciais a partir de arquivos em formatos raster, vetoriais ou tabulares, incluindo a visualização em 3D em diversas escalas de trabalho. Por permitir a integração de dados geoespaciais, como mapas, imagens de satélite e informações de GNSS com dados arqueológicos, a visualização de informações ocorre em um contexto geográfico, possibilitando identificar padrões espaciais e relacionar sítios arqueológicos a características ambientais e culturais. A disponibilidade de dados espaciais *online* gratuitos, além de softwares livres, tem contribuído para a sua difusão, permitindo o armazenamento seguro e eficiente de informações arqueológicas, incluindo registros de escavações, fotografias, notas de campo e documentos relacionados. Isso facilita a organização, o



acesso e a recuperação de dados, reduzindo o risco de perda de informações importantes e a colaboração entre arqueólogos de diferentes locais e instituições.

Os SIG permitem a realização de análises espaciais avançadas, como a modelagem de distribuição de artefatos, a análise de padrões de assentamento e o estudo da relação entre sítios arqueológicos e fatores geográficos, podendo revelar padrões de ocupação e informações sobre como as sociedades se relacionavam com o ambiente. Com a criação de mapas interativos e visualizações de dados através dos recursos de *webmapping*, a comunicação dos resultados da pesquisa se faz de forma mais eficaz para o público em geral, podendo contribuir para o envolvimento da comunidade na conscientização sobre o patrimônio arqueológico. Por fim, as análises de dados geoespaciais podem ser usadas para apoiar a tomada de decisões, ajudando na priorização de sítios para conservação e na gestão do patrimônio cultural.

No Brasil, vários trabalhos vêm sendo realizados com o auxílio desta ferramenta nas últimas décadas. Morais (2007) propõe reflexões acerca da arqueologia da paisagem enquanto instrumento de gestão do patrimônio arqueológico utilizando o SIG. A detecção de áreas com potencial arqueológico e a interpretação de sítios, e de suas relações ambientais com uso de SIG, foi analisada por Infantini (2015). Amaral e Havre (2017) analisaram a mobilidade de grupos da tradição tupi-guarani na Chapada do Araripe, Pernambuco, indicando contextos diferentes nas áreas fluviais e da chapada. O potencial informativo do Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos (CNSA) disponibilizado pelo IPHAN foi o tema das análises espaciais de Fragomeni e Bonfanti (2017) para a região do Planalto Meridional do Rio Grande do Sul. A relação entre sítios pré-coloniais do estado de Minas Gerais e elementos da paisagem foi analisada por Hissa e Isnardis (2022), que geraram métricas básicas, apresentadas na forma de gráficos e mapas temáticos. Em relação à gestão do patrimônio cultural, Ferreira et al. (2011) analisaram os recursos de geoprocessamento para o planejamento e

a gestão do patrimônio cultural dos municípios de Porto Seguro e Cabralia, Bahia. Já Guimarães et al. (2018) relacionam a Arqueologia e o Turismo, utilizando o SIG enquanto ferramenta analítica, com dados do Brasil e de outros países. A utilização do SIG na geração de mapas preditivos vem sendo explorada por diversos autores, como Kipnis (1997), J. Oliveira et al. (2005), Perez et al. (2018), Fonseca (2018) e Merencio (2020).

ÁREA DE ESTUDO

O contexto arqueológico da região de Serranópolis, estado de Goiás, está associado a grupos de caçadores-coletores do início do Holoceno e a grupos de agricultores ceramistas que ocuparam os abrigos rochosos em arenitos das formações Botucatu e Bauru, bem como basaltos da formação Serra Geral, de ampla distribuição a sul e oeste de Serranópolis (FUNATURA, 1999, conforme citado em Lopes, 2011).

A paisagem é dominada por

. . . formas de relevo convexas e tabulares, com diferentes ordens de grandes e de aprofundamentos de drenagens, pertencentes ao domínio do Planalto Setentrional da Bacia Sedimentar do Paraná. A hipsometria encontra-se na faixa de 600 a 800 metros de altura, podendo, em alguns casos, atingir altitudes em torno de 1.000 metros (Schmitz et al., 2004).

Os abrigos rochosos de Serranópolis encontram-se distribuídos desde a parte alta da chapada até as duas margens do rio Verde.

O solo é predominantemente arenoso, excetuando as áreas elevadas próximas às chapadas, onde é originário do basalto. O clima é subsumido, possuindo duas estações bem definidas e segue as características do cerrado (Melo, 2012).

A Gruta das Araras localiza-se nas coordenadas UTM 22K 0394345E, 7960330N e 629 m de altitude, a Gruta do Paredão localiza-se nas coordenadas 22K 395050E, 7960869N 666 m de altitude e a Gruta do Diogo I localiza-se nas coordenadas 22K 0390054E, 7984900N e 607 m de altitude, *datum* SIRGAS 2000 (Figura 1).



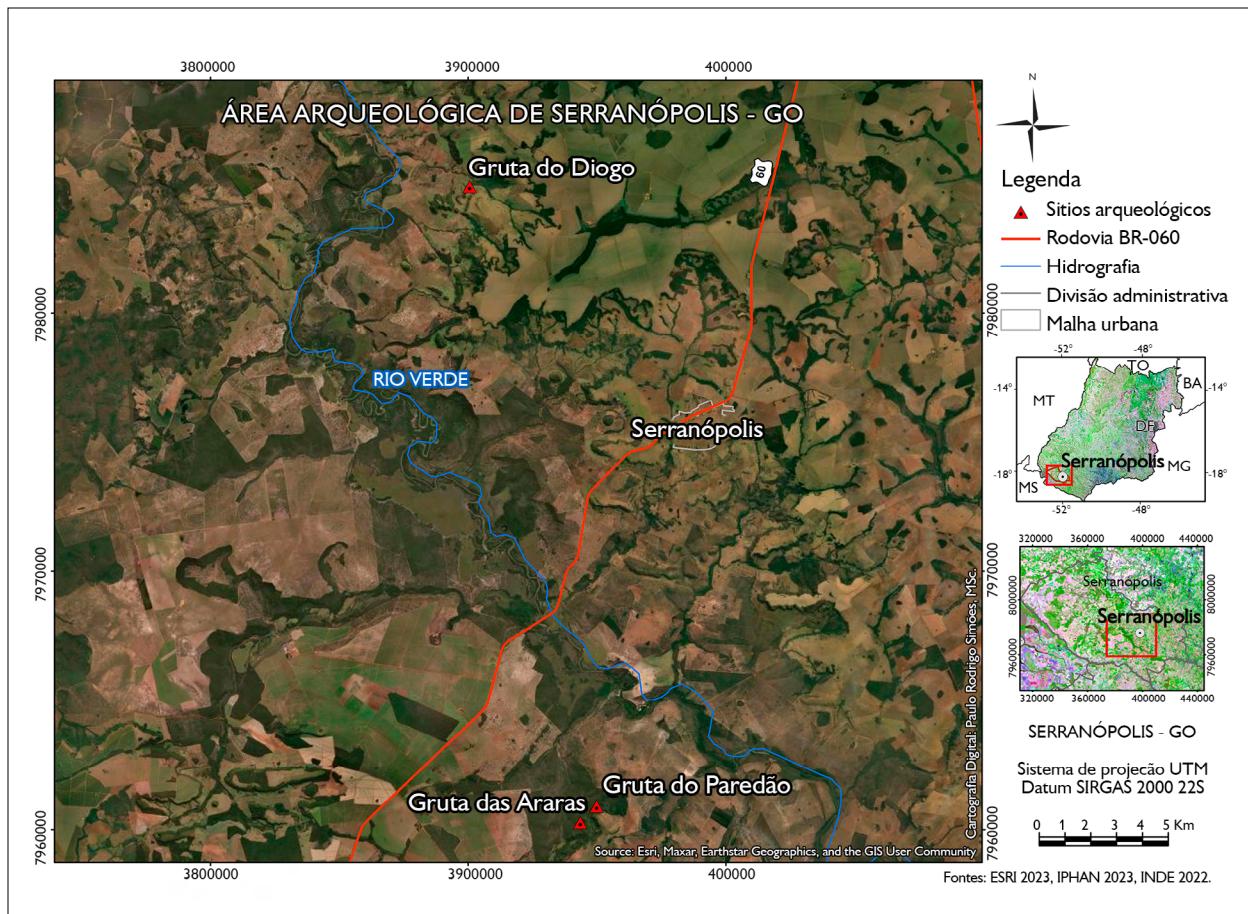


Figura 1. Localização dos sítios GO-JA.01, GO-JA.03 e GO-JA.04, Serranópolis, Goiás. Fontes: adaptado de Esri (2025), IPHAN (2023) e INDE (2022). Mapa: elaborado pelos autores (2023).

Apesar de algumas iniciativas conservacionistas, como a Reserva Santuário de Vida Silvestre Pousada das Araras, com 175 ha, a região sofre pressões das atividades antrópicas, que ocasionam a diminuição significativa do potencial científico (Rubin et al., 2016). Os sítios Gruta das Araras (GO-JA.03) e Gruta do Paredão (GO-JA.04) destacam-se entre os demais por possuírem grande quantidade de registros rupestres, sendo os mais visitados da reserva. O primeiro apresenta o maior número de registros gráficos da região. Trata-se de um abrigo muito aberto, com oitenta metros de extensão e profundidade entre seis a quatorze metros. Já a Gruta do Paredão é composta por duas partes:

... o abrigo A (formado por uma pequena aba de pouco espaço que contém poucas gravuras) e o abrigo B (este possui mais de cem metros de extensão, vinte metros de profundidade e grande quantidade de gravuras e pinturas). É o maior de todos os sítios de Serranópolis, tendo sido, no entanto, pouco habitado (Melo, 2012, p. 58).

A Gruta do Diogo I (GO JA.01) encontra-se no mesmo contexto geológico, sendo um abrigo de grandes proporções, com 64 m de largura na entrada, 27 m de profundidade e 34 m de altura, onde foi encontrado o mais antigo remanescente humano da América do Sul (Rubin et al., 2020). Possui rico acervo de pinturas e gravuras rupestres. Nos horizontes mais antigos desses abrigos (GO-JA-03; GO-JA-03A; GO-JA-04; GO-JA-25;

GO-JA-26; GO-JA-27; GO-JA-28 e GO-JA-100), com cerca de 11.000 anos AP, foi identificada uma cultura lítica associada à Tradição Itaparica, onde se destacam os instrumentos do tipo raspadores plano-convexos.

A conservação dos painéis tem sido motivo de preocupação, em função de processos de intemperismo, agravados pelo desmatamento, pela pecuária e pela exploração de recursos hídricos. Para Rubin et al. (2017, p. 38),

. . . medidas mitigadoras sugeridas incluem o isolamento das áreas de contribuição e a estabilização dos processos erosivos, por meio da captação das águas de escoamento superficial e subsuperficial e da contenção da ação erosiva de cursos d'água, na base dos taludes e nas ravinas, além de monitoramentos sistemáticos [com o objetivo de produzir dados primários e analíticos e propor medidas de proteção].

MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos foram iniciados com os levantamentos bibliográficos, cadastrais e iconográficos, para a caracterização dos sítios, além da constituição de uma base de dados espaciais em ambiente SIG, para a identificação das localizações e o acesso à especificação dos recursos necessários para a execução da tarefa.

As características dos sítios levantadas permitiram a proposição de um plano de trabalho submetido e validado pelo IPHAN, considerando o levantamento fotogramétrico terrestre dos sítios e dos painéis rupestres enquanto método mais adequado do que a varredura por *laser* terrestre, por gerar uma malha composta por uma rede irregular de triângulos, com textura fotográfica com melhor qualidade visual.

Os trabalhos de campo foram realizados entre 22 e 26 de novembro de 2022, primeiramente na Gruta do Diogo I e, depois, na Gruta das Araras e na Gruta do Paredão, seguindo a mesma sequência de procedimentos. As atividades se iniciaram pelo posicionamento dos sítios, com GNSS de navegação *Garmin Map 64*, sistema UTM e *datum* SIRGAS 2000, fuso 22S e precisão de 3 m, e pelo reconhecimento dos sítios quando a morfologia, distribuição dos painéis rupestres e avaliação das condições de iluminação

natural. Seguiu-se com o levantamento fotográfico, com câmera Nikon P900, visando a modelagem dos sítios, primeiramente os abrigos, recobrindo toda a extensão de paredes, tetos e pisos, e, depois, os painéis rupestres em detalhe. Foi adotada uma sobreposição mínima de 50% entre pares de fotos, sendo estas tomadas de vários pontos, perpendiculares e oblíquas, de forma a evitar oclusões. A distância entre a câmera e o plano imageado variou entre 2 a 15 m para os sítios arqueológicos e de cerca entre 0,5 a 2 m para os painéis rupestres.

Nos levantamentos dos abrigos, foram utilizados alvos codificados, impressos em papel, formato A5, distribuídos ao longo das paredes, sendo as medidas das distâncias entre eles tomadas com trena a *laser* Lomvum, usadas como escalas, além de um par de alvos alinhados com o norte magnético para o georreferenciamento e a declinação, obtida com bússola Brunton. Para os painéis rupestres, foi utilizada uma escala rígida, com 50 cm de comprimento. Os levantamentos fotográficos dos três sítios e os detalhamentos de painéis e blocos resultaram em um total de 9.569 fotos.

Seguiu-se com o pós-processamento das fotografias digitais no *software* Agisoft Metashape 1.8.4 (Figura 2), em um *desktop* com sistema operacional Windows 10, processador Intel (R) Core (TM) i9-10900KF e CPU de 3.70GHz, 128 GB de memória RAM, placa de vídeo NVidia Geforce GTX 1660 e SSD de 480 Gb. Esse *software*, amplamente utilizado em levantamentos fotogramétricos, foi utilizado na geração dos modelos tridimensionais dos abrigos e dos painéis, dos mosaicos de ortofotos e dos modelos digitais de superfície dos painéis rupestres e dos blocos gravados. Para tanto, seguiu-se o fluxo de trabalho do *software*, iniciando-se com a avaliação da qualidade das fotos, o alinhamento, o reconhecimento automático dos alvos codificados, a inserção das distâncias e coordenadas UTM e de máscaras, bem como a otimização do alinhamento. O processamento das fotografias digitais considerou os parâmetros de calibração da lente da câmera previamente obtidos a partir de procedimento próprio do *software* Agisoft Metashape, sendo os coeficientes k1, k2, k3



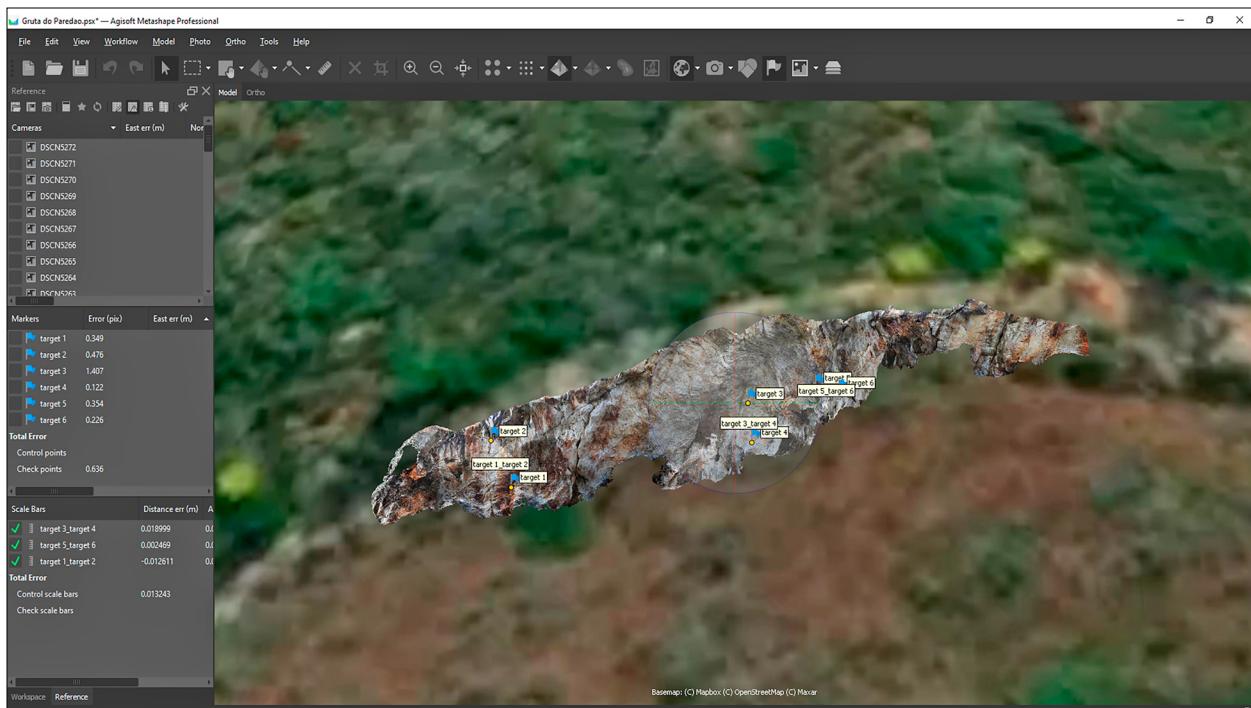


Figura 2. Interface do Agisoft Metashape com a projeção dos modelos 3D da Gruta do Paredão sobre imagem de satélite. Fonte: elaborado pelos autores (2023).

referentes às distorções radiais e os coeficientes p_1 e p_2 , às tangenciais, utilizados na fórmula de correção.

Na sequência, foram geradas as nuvens de pontos, as malhas e as texturas, sendo que os modelos gerados foram exportados em formato OBJ e em outros formatos texturizados, como o DAE, FBX e PDF3D. Visando a publicação dos modelos em repositório na internet, foi feita a simplificação deles e a exportação em formato GLB, com tamanho máximo de 100 Mb, limite imposto pela página Sketchfab (Simões, 2023a), num total de 50 modelos 3D. Foram gerados, também no software Agisoft Metashape 1.8.4, mosaicos de ortofotos e modelos digitais de superfície em alta resolução espacial de todos os painéis rupestres e dos blocos gravados.

Adicionalmente, foram gerados um mosaico de ortofotos e um modelo digital de superfície do piso da Gruta do Diogo I (Figura 6). O mesmo software foi utilizado na produção de vídeos em formato AVI de anaglifos de

curta duração (Figura 3), em formato JPG. As características geométricas e a precisão dos modelos, os procedimentos adotados e os parâmetros de calibração da câmera podem ser avaliados através dos relatórios de processamentos emitidos para cada modelo, em formato PDF.

Procedimentos voltados à extração e à edição vetoriais dos modelos fotogramétricos da Gruta do Diogo I, em ambiente CAD, foram realizados nos softwares 3D Reshaper e AutoCAD 2019, seguindo os fluxos de trabalho propostos por Thomas e Kennedy (2016), para sítios arqueológicos, e por Simões (2019) e Simões et al. (2022a), para cavernas e minas históricas subterrâneas, enquanto mapeamento por modelos 3D alternativo à topografia convencional. Para tanto, foram definidos vários planos de representação do abrigo, como os limites 2D e 3D do piso e os cortes transversais de paredes e teto, de onde foram extraídos os contornos de forma automática. A partir do modelo 3D do piso, foram extraídas curvas de nível com equidistância de 10 cm.

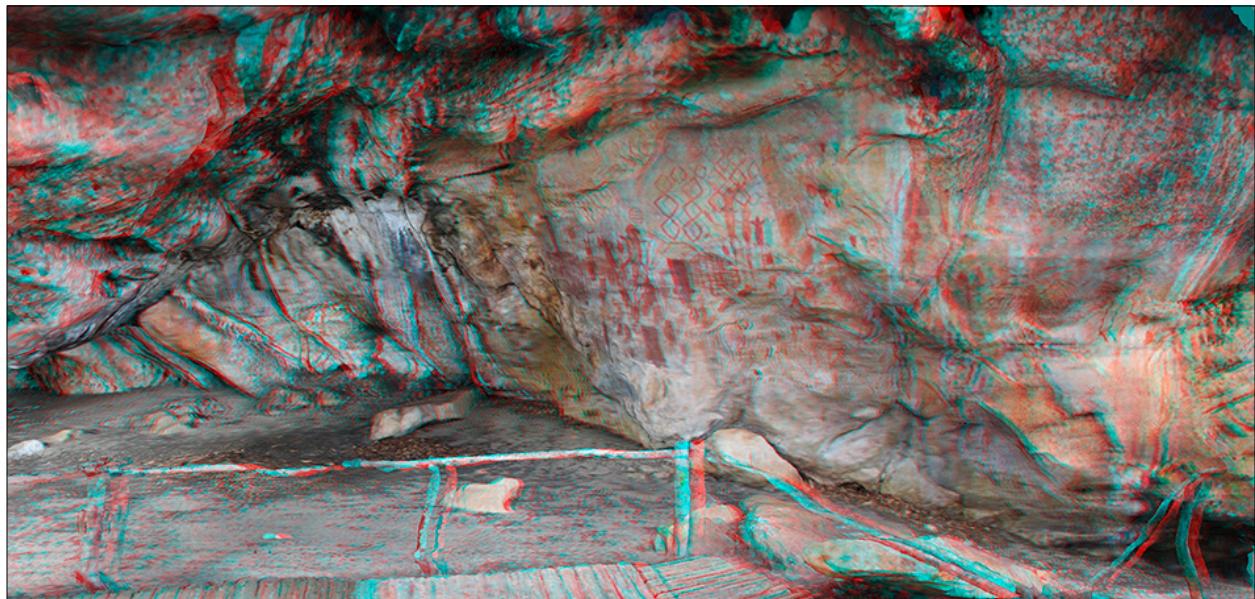


Figura 3. Exemplo de anaglifo do painel principal da Gruta das Araras. Fonte: elaborado pelos autores (2023).

Os vetores extraídos foram inseridos no AutoCAD 2019 e o arquivo resultante em formato DXF foi carregado na página Sketchfab (Simões, 2023b). A extração vetorial foi aplicada também ao painel 2 da Gruta do Diogo I, a qual serviu para a mensuração dos diâmetros e das profundidades das suas cúpulas (Figura 4), ainda a serem validadas em campo.

A partir dos mosaicos de ortofotos gerados na etapa de pós-processamento, foram aplicadas duas técnicas de processamento digital de imagens de sensoriamento remoto visando a extração de informação espacial. A primeira técnica se refere à classificação espectral do tipo *Spectral Angle Mapper* (SAM), utilizada no agrupamento de pixels, com base em suas assinaturas espectrais. Esse procedimento foi realizado no software ENVI 5.4, que comparou as assinaturas espectrais dos pixels da imagem com as do conjunto de pixels das regiões de interesse, ou *Region of Interest* (ROI), e classificou os que se enquadram nesse referencial (Figura 10). Foram feitos testes com vários limiares da diferença dos vetores dos ângulos, além do valor padrão 1.0 rad, sendo que o melhor resultado foi de 0.7 rad. O resultado, um decalque digital, foi armazenado em formatos raster e vetor. O segundo procedimento foi a aplicação do realce

por decorrelação aos mosaicos de ortofotos dos painéis com pinturas, com o software ImageJ e o plugin DStretch (Figura 5). Foram aplicadas várias palhetas que ressaltam os diferentes pigmentos e salvos os mosaicos que apresentaram melhor resultado visual na discriminação. Esse procedimento foi replicado aos mosaicos de ortofotos de todos os painéis, e os arquivos foram salvos em formato JPG.

No ambiente SIG, foi feita a integração de produtos cartográficos, como o mosaico de ortofotos, o modelo digital de superfície e as curvas de nível da Gruta do Diogo I juntar na mesma linha, sendo utilizado o software ArcMap 10.8. A partir desses dados, foi realizada uma análise espacial da distribuição dos blocos no piso do abrigo e a delimitação dos depósitos cláusticos, segundo sua granulometria. Para isso, foram vetorizados 814 blocos e áreas de afloramentos de rocha e oito áreas de concentração de blocos de pequenas dimensões sobre o mosaico de ortofotos do piso (Figura 6).

A partir de análise visual sobre modelo digital de elevação do painel 26 da Gruta do Diogo I, com sombreamento sintético, foi possível traçar os comprimentos das gravuras lineares e das que se assemelham a pés



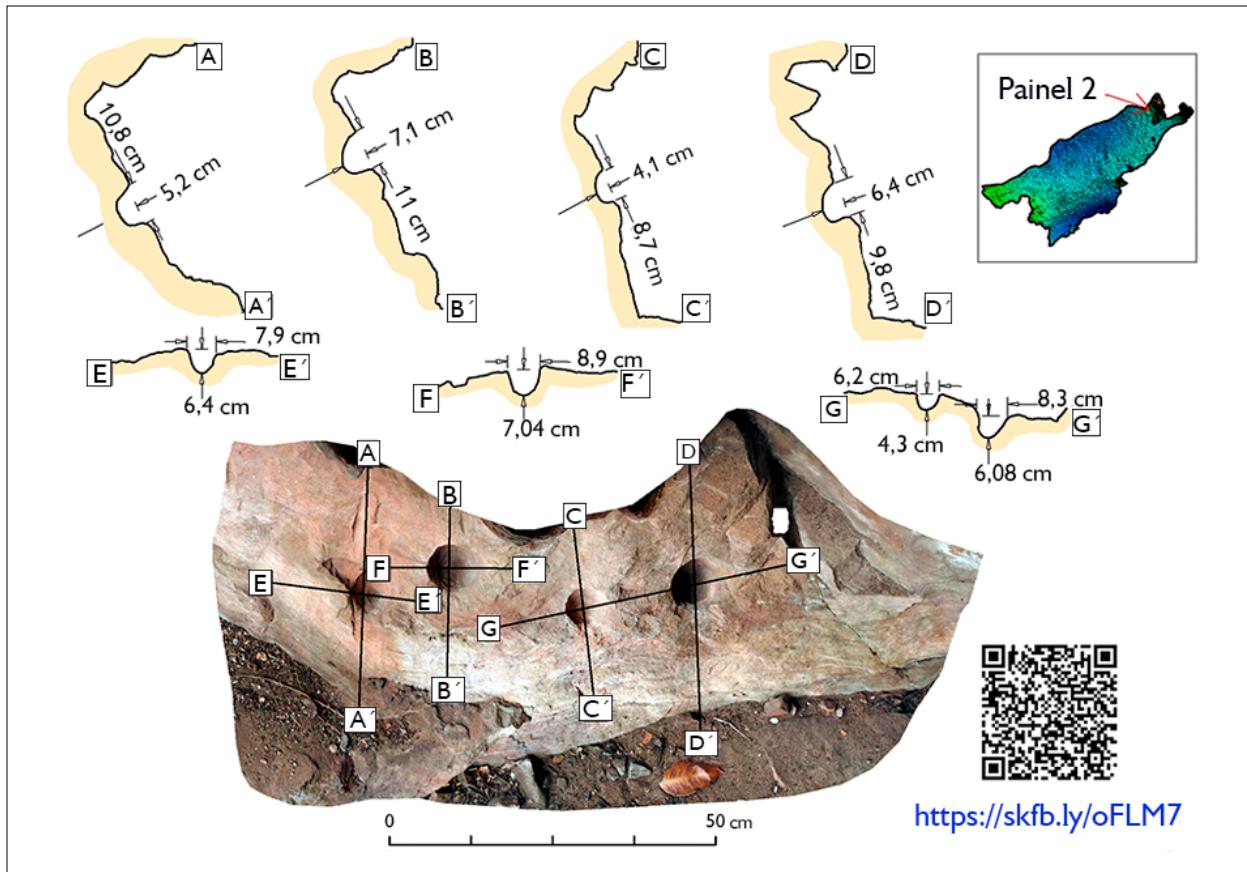


Figura 4. Extrações vetoriais de perfis topográficos para a mensuração dos diâmetros e profundidades das cúpulas do painel 2 da Gruta do Diogo I. Fonte: Simões (2022b).

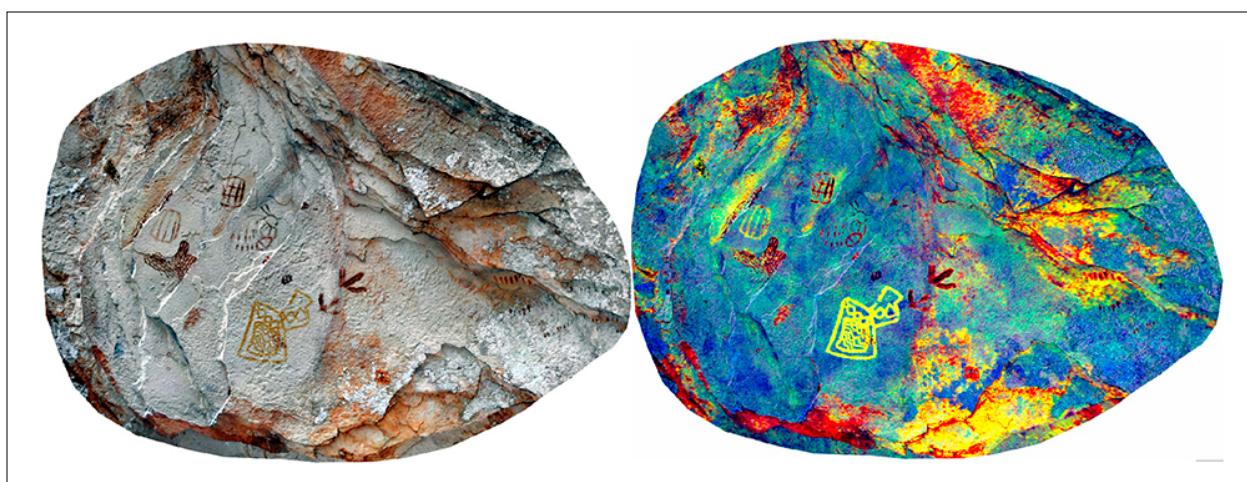


Figura 5. Aplicação do realce por decorrelação através do software DStretch, paleta LDS, ao mosaico de ortofotos do painel 7, da Gruta do Paredão. Fonte: elaborado pelos autores (2023).

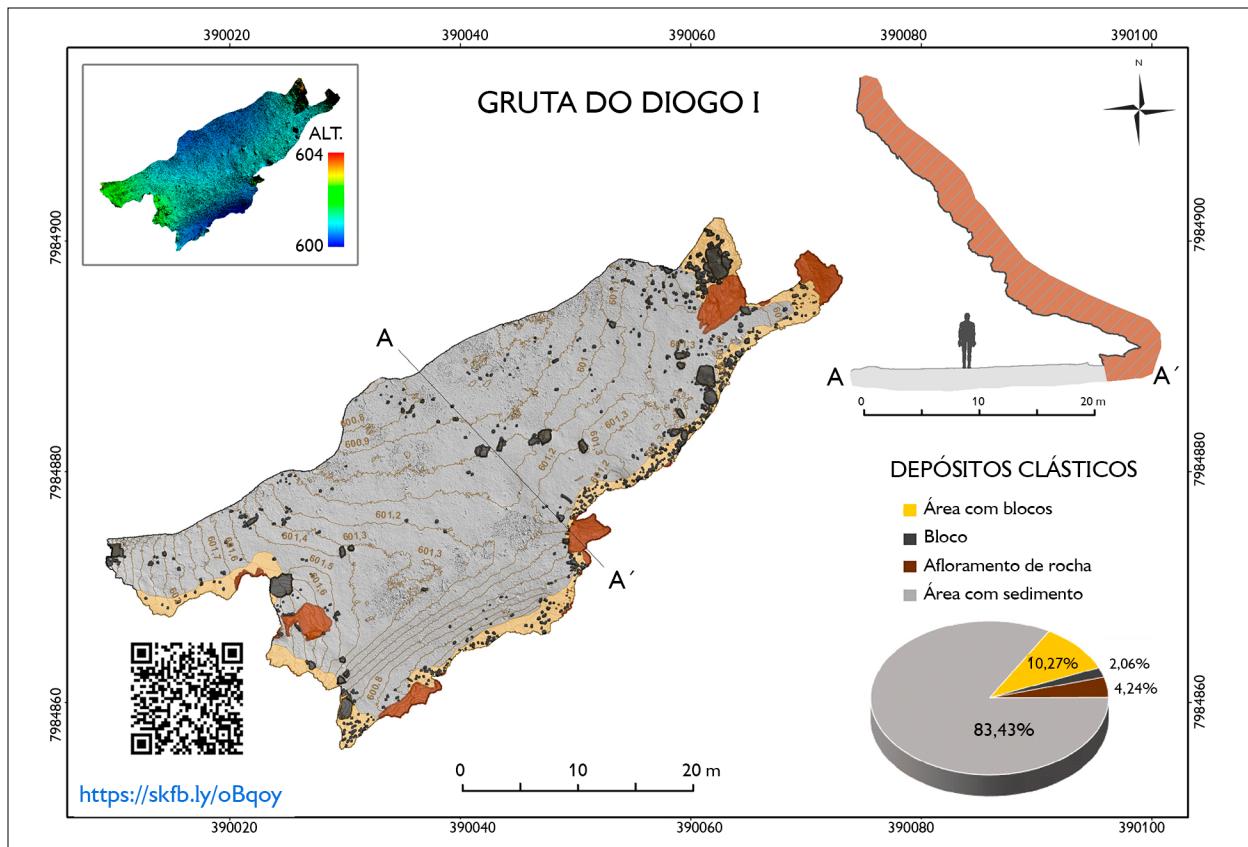


Figura 6. Classificação e quantificação dos depósitos clásticos vetorizados sobre mosaico de ortofotos do piso da Gruta do Diogo I. Fonte: Simões (2022c).

humanos, como pode ser visto na Figura 8. A base de dados geográficos em ambiente SIG serviu também para a geração de figuras e de mapas em escalas definidas, para impressão em A5, A3 e A1, voltada à ilustração de artigo científico e fornecimento de mapas de campo, sendo responsável pela integração dos dados espaciais (Figura 7). Por fim, foram geradas as panorâmicas 360° a partir das fotografias tomadas com apoio de tripé, com a câmera Samsung NX Mini, e do software *Image Composite Editor* (ICE), sendo as imagens resultantes publicadas no site Panoe (Gruta das Araras, 2023a; Gruta do Paredão, 2023; Gruta do Diogo I, 2023).

RESULTADOS

Os levantamentos fotogramétricos resultaram em três modelos dos sítios, um modelo do piso e mais 39 modelos

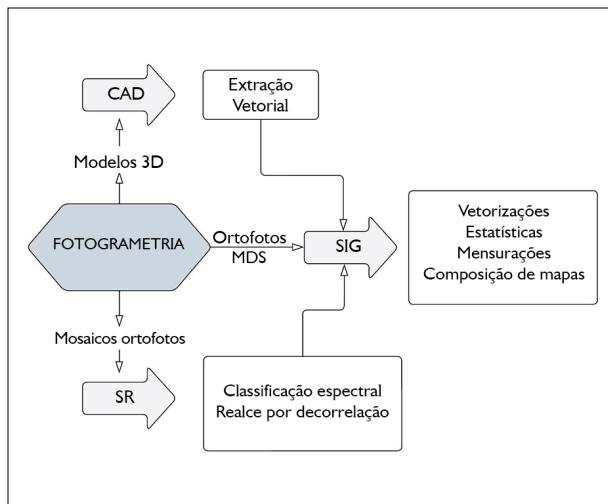


Figura 7. Fluxograma dos métodos, produtos cartográficos e tratamento de dados espaciais. Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

em maior detalhe dos painéis rupestres, todos disponíveis *online*, tendo atendido à demanda inicial do IPHAN.

Os erros médios quadráticos (*Root Mean Square - RMS*) dos modelos dos abrigos e painéis foram obtidos com o suporte dos alvos codificados e das escamas, calculados pelo *software* e apresentados na forma de relatório de pós-processamento, sendo de 4 mm para a Gruta das Araras, 1,3 mm para a Gruta do Paredão e 7 mm para a Gruta do Diogo I (Tabela 1). Assume-se que os erros médios dos modelos dos painéis da Gruta das Araras são equivalentes aos do modelo do sítio (4 mm) por ter sido utilizado o mesmo conjunto de fotos, apenas reprocessado em maior resolução. Os painéis da Gruta do Paredão variaram de 0,5 mm a 3 mm e os da Gruta do Diogo I, de 0,07 mm a 1,7 cm.

Produtos cartográficos foram consolidados por meio dos modelos 3D dos sítios e dos painéis. A partir de 26 painéis rupestres com pinturas e gravuras e dos blocos gravados da Gruta do Diogo I, seis da Gruta das Araras e sete da Gruta do Paredão, foram gerados mosaicos de ortofotos com GSD¹, variando entre 0,5 a 1 mm/px. Apenas a Gruta do Diogo I teve o mosaico de ortofotos do seu piso gerado, apresentando um GSD de 1 mm/px. Modelos digitais de elevação foram gerados para todos os painéis, com GSD variando entre 0,2 mm a 5 mm, que aumentam em função da área. O modelo digital de elevação gerado para o piso da Gruta do Diogo I apresentou um GSD de 5 mm.

Tabela 1. Características geométricas dos modelos dos sítios: fotos alinhadas e total de fotos (fotos), número de pontos de ligação (*tie points*), número de pontos da nuvem (*cloud points*), número de triângulos da malha (faces), tamanho do modelo em formato OBJ (tamanho), precisão do modelo (RMS) e resolução espacial (*Ground Sample Distance - GSD*) do modelo 3D e do modelo digital de elevação da Gruta do Diogo I.

Sítio	Fotos	<i>Tie points</i>	<i>Cloud points</i>	Faces	Tamanho	RMS	GSD
Gruta das Araras	1451/1462	13.121.915	285.408.345	7.718.773	865 Mb	4 mm	0,6 mm
Gruta do Paredão	1163/1200	11.449.596	119.165.298	22.137.364	2,01 Gb	1,3 cm	1 mm
Gruta do Diogo I	1965/2052	21.674.429	137.093.623	10.958.998	1,39 Gb	7 mm	1 mm/5 mm

¹ O GSD refere-se à resolução espacial de uma imagem, ou seja, à distância no terreno, representada por um único pixel na imagem.

A inserção do modelo 3D da Gruta do Diogo I em ambiente CAD permitiu a extração vetorial automática dos contornos dos limites do piso, da parede e do teto, representados em planta baixa e cortes transversais, além das curvas de nível com equidistância de 10 cm. A área do piso em planta da Gruta do Diogo I foi calculada em 1.054,39 m², a largura foi de 73,7 m, a profundidade máxima foi de 29,75 m e a altura do teto ao centro do abrigo foi de 21,73 m (Figura 9).

Os modelos digitais de superfície foram utilizados em ambiente CAD para as mensurações de diâmetros e profundidades de cúpulas do painel 2 (Figura 4) e de comprimentos (2 cm a 26 cm) e de direções de gravuras lineares predominantemente verticais (Figura 8) do painel 26 da Gruta do Diogo I. As gravuras semelhantes a pés humanos também podem ter área, perímetro, largura, altura e profundidade facilmente calculadas.

Em ambiente SIG, a vetorização manual dos blocos do piso da Gruta do Diogo I permitiu a classificação da cobertura sedimentar segundo sua granulometria, tanto quanto a obtenção do comprimento destes, sendo calculadas as áreas desses polígonos, que variaram de 5 cm² a 12,5 m² (Figura 6).

A utilização do processamento digital de imagens de sensoriamento remoto, com classificação espectral do tipo SAM, aplicada ao mosaico de ortofotos do painel principal da Gruta das Araras, resultou na segmentação dos pigmentos ocre-vermelho do suporte rochoso de forma eficiente (Figura 10). A aplicação das diversas paletas de



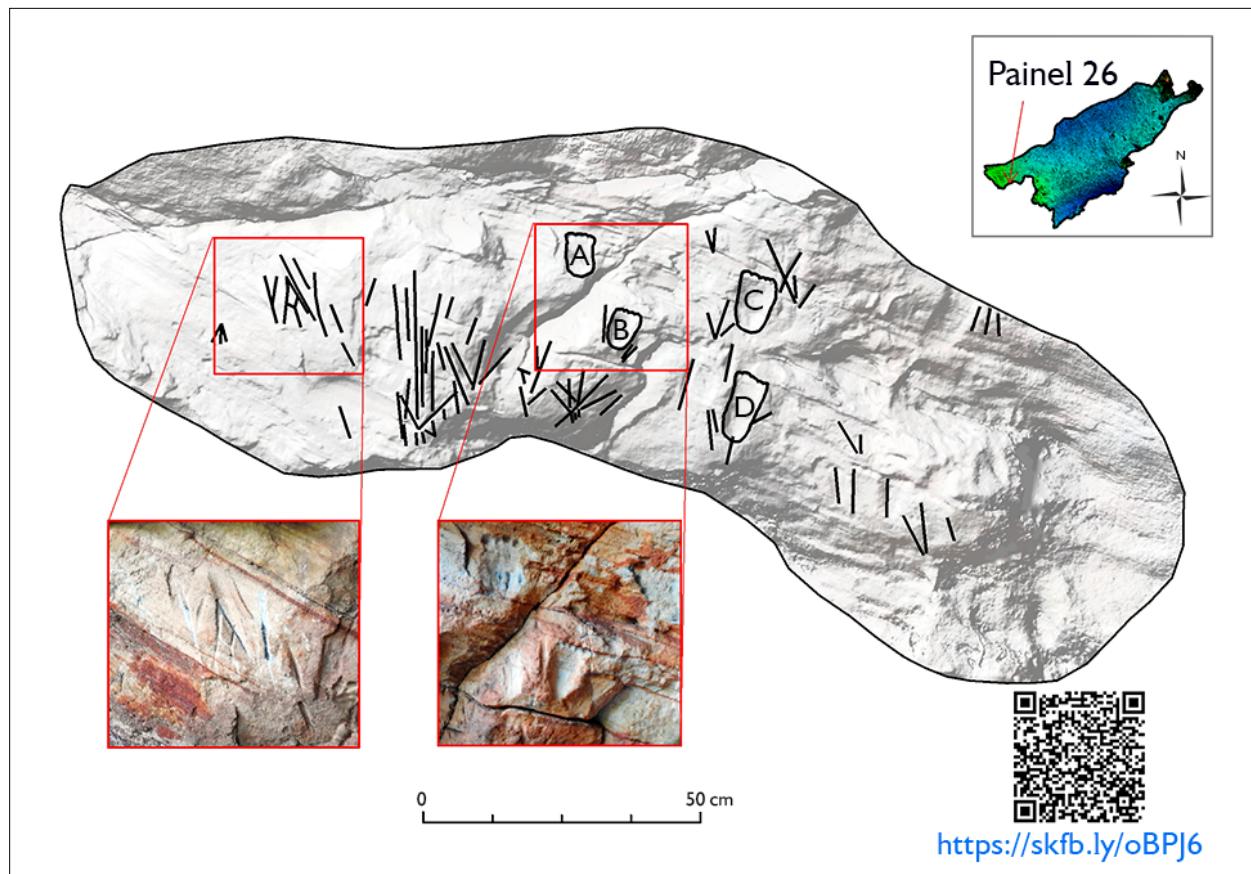


Figura 8. Vetorização de gravuras lineares e dos 'pés humanos' destacados nos pontos A, B, C e D. Fonte: Simões (2022d).

cores no realce por decorrelação já vem sendo utilizada de forma intensiva, sendo que os dados produzidos apenas corroboram a eficiência da técnica.

Foram geradas animações em anáglifo, em formato AVI, dos três sítios arqueológicos e na forma de figuras para todos os painéis rupestres com pinturas e gravuras, de um painel com grafismo e da placa comemorativa, de forma a facilitar a visualização em 3D em tela ou impressa, utilizando-se os óculos apropriados.

Os levantamentos fotográficos em locais visualmente atrativos dos sítios realizados com o suporte de tripé para a câmera resultaram em visitas virtuais panorâmicas em 360° (Figura 11), estando todas três disponíveis *online*, sendo de fácil acesso e manipulação em PC, laptop ou dispositivo celular móvel.

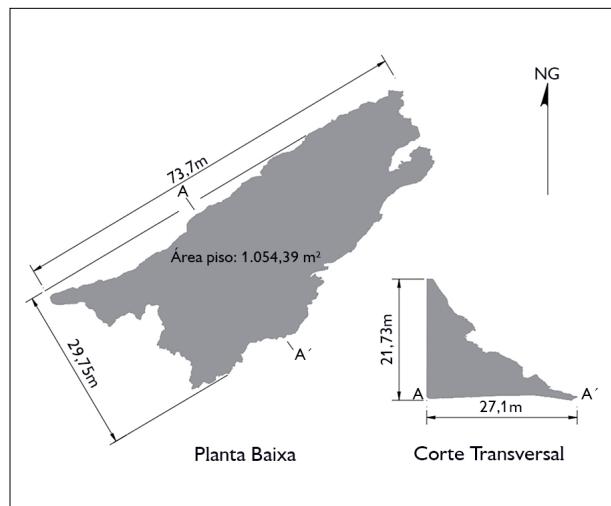


Figura 9. Obtenção das dimensões de áreas, largura, profundidade e altura do teto da Gruta do Diogo I. Fonte: elaborado pelos autores (2023).



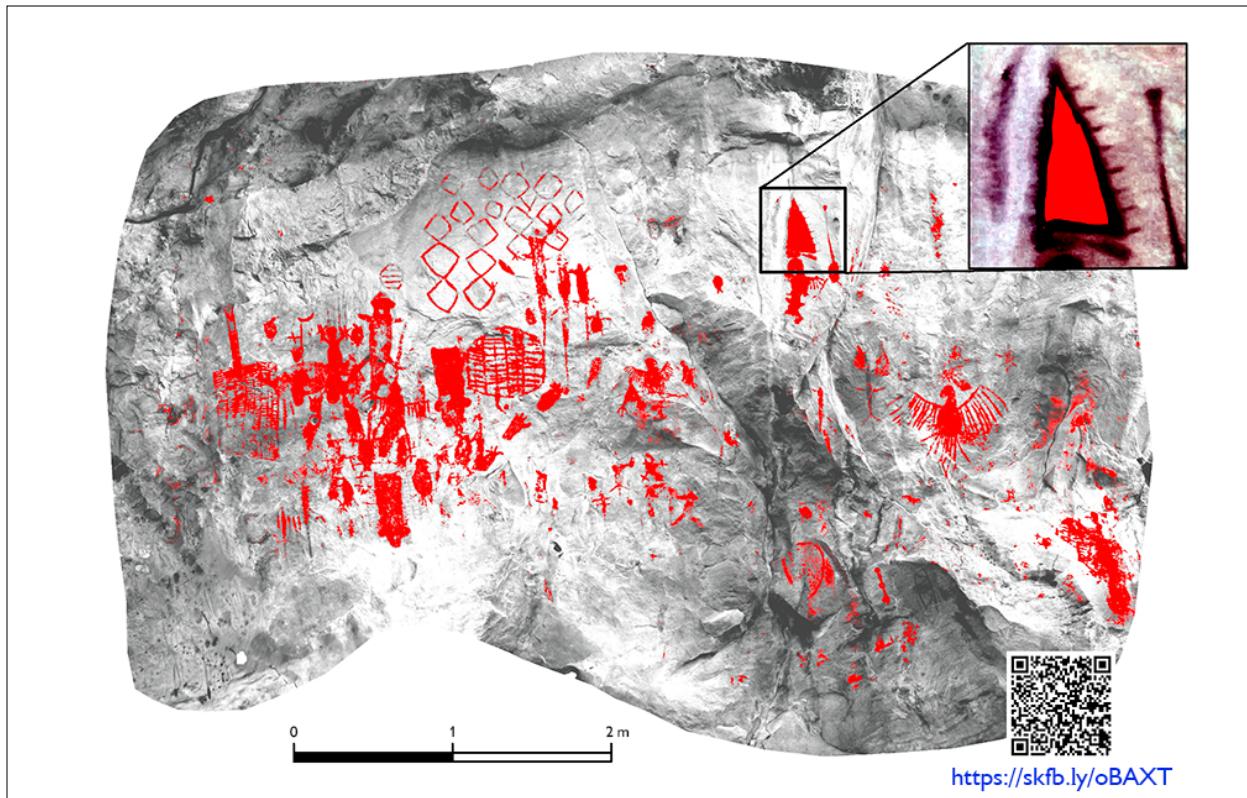


Figura 10. Extração dos pixels do pigmento vermelho do painel principal da Gruta das Araras a partir da técnica SAM. O quadro no alto, à direita, refere-se a um dos locais onde houve a delimitação de regiões de interesse ou ROI. Fonte: Simões (2022e).



Figura 11. Panorâmica em 360° da Gruta das Araras. Fonte: Gruta das Araras (2023b).

CONCLUSÕES

Além de ter atingido os objetivos referentes à demanda inicial do IPHAN, que previa a virtualização dos três sítios citados e a geração de modelos 3D, o projeto foi estendido para a modelagem de todos os painéis rupestres e geração de produtos cartográficos para suporte à pesquisa arqueológica. Aproveitando-se do material produzido, alguns procedimentos foram realizados visando testar os mosaicos de ortofotos, modelos de superfície e modelos 3D na extração de informação espacial. Alguns dos procedimentos adotados são ainda pouco usuais, como a classificação SAM, o mapeamento por modelos 3D e o compartilhamento e a disponibilização *online* dos resultados. Tais exercícios demonstraram seu potencial de utilização no processo de documentação de um sítio arqueológico do tipo abrigo sob rocha, nas fases de planejamento, execução, análise e divulgação, sendo uma contribuição ao desenvolvimento e à difusão de métodos de levantamento e apresentação de resultados, como preconizado por M. Oliveira (2008), resultando no suporte a análises, fundamentação de hipóteses e ilustração de modelos explicativos. O uso da fotogrametria abre a possibilidade de análises, em uma perspectiva temporal, da avaliação do estado de conservação de painéis rupestres e do registro do processo de escavação de um sítio.

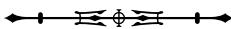
Considerando que existem limitações de várias naturezas em todos os métodos de levantamento que se utilizam de dispositivos tecnológicos, a escolha de um método dependerá do que será analisado, de equipamentos disponíveis, bem como de recursos financeiros e humanos, sendo que a síntese de algumas das geotecnologias aplicáveis, como o CAD, o sensoriamento remoto, o SIG, a fotogrametria terrestre, poderão contribuir nessa escolha.

As vantagens no uso da fotogrametria terrestre sobre a varredura a laser terrestre referem-se à geração de modelos de alta resolução espacial com textura fotográfica em sistema RGB, pelo custo relativamente menor, por não necessitar

de equipamentos onerosos. Os modelos fotogramétricos podem vir a ser utilizados em óculos de realidade virtual, propiciando novas formas de interação com o público, além de anáglifos e hologramas, contribuindo para a democratização do acesso aos bens culturais em meio digital. No entanto, sua adoção deve considerar outras variáveis, como a capacidade de processamento, a necessidade de licenciamento de *software*, o volume de dados, o acesso à internet de alta velocidade e a curva de aprendizado específica para esse método.

Os valores apresentados para o GSD demonstram um nível de detalhamento capaz de discriminar os diversos elementos de interesse, mesmo os de pequenas dimensões. Já o RMS atesta a precisão dos mosaicos de ortofotos, modelos de superfície e modelos 3D gerados. No entanto, a variação dos valores dos erros médios quadráticos dos modelos dos painéis parece indicar a necessidade de maior atenção para um melhor posicionamento da escala, tanto quanto a diminuição do seu comprimento e espessura (0,5 m e 1 cm). As características geométricas e a precisão dos modelos, os procedimentos adotados e os parâmetros de calibração da câmera podem ser avaliados através dos relatórios de processamentos emitidos para cada modelo, em formato PDF, o que permite avaliar a qualidade dos produtos gerados.

Ainda que a técnica de classificação espectral SAM tenha sido desenvolvida para imagens multiespectrais, o experimento se mostrou satisfatório, ainda que não tenha se estendido para os outros pigmentos em outros painéis, sendo uma técnica adequada para a segmentação de grafismos rupestres do suporte rochoso, apresentando resultados fidedignos, pois pode ser aplicada simultaneamente a diferentes pigmentos e utilizada enquanto método alternativo na elaboração de decalques digitais. A aplicação de diversas paletas de cores no realce por decorrelação em todos os painéis com pinturas poderá vir a dar suporte a futuras pesquisas e servir de referência em um programa de monitoramento das condições de conservação dos painéis rupestres.



Em ambiente CAD, destaca-se a capacidade de obtenção de informações espaciais dos modelos 3D em laboratório, como no caso das mensurações das cúpulas e das gravuras lineares. Os mosaicos de ortofotos e os modelos de elevação podem ser utilizados enquanto suporte para a análise visual, vetorizações e mensurações dos grafismos, na obtenção de altimetrias, declividades, comprimentos, ângulos e extração de curvas de nível. Esses procedimentos permitiram a representação topográfica da Gruta do Diogo I, a partir da extração vetorial do modelo 3D, consistindo num método alternativo à topografia convencional.

Já o ambiente SIG permitiu a constituição de uma base de dados geográficos e a realização de análises básicas, como a classificação temática da sedimentação do piso da Gruta do Diogo I, gerando uma representação cartográfica da distribuição espacial de blocos enquanto suporte à análise de padrões de utilização do espaço do abrigo.

A difusão do uso de geotecnologias na pesquisa arqueológica tem trazido benefícios, ao permitir um registro mais preciso do patrimônio cultural, análises mais aprofundadas e novas formas de representação gráfica, compartilhamento e divulgação. Nesse contexto, destaca-se o potencial da fotogrametria terrestre, por permitir a geração de modelos tridimensionais e produtos cartográficos, dos quais é possível extrair informações métricas e radiométricas, abrindo novas possibilidades de interação em ambiente virtual e análises visuais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Atiaia Renováveis S.A. pelo apoio financeiro que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa; à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudos; ao Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN) pelo reconhecimento da importância do registro digital de sítios arqueológicos; e ao Laboratório de Geodésia Aplicada à Engenharia - GEENG pelo suporte técnico no processamento e análise dos dados espaciais.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, C. C. X. (2013). *Sistemas Computacionais em Arqueologia: SOLArque Linux, uma distribuição linux para a arqueologia* [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Vale do São Francisco]. https://www.academia.edu/27581995/SISTEMAS_COMPUTACIONAIS_EM_ARQUEOLOGIA_SOLArque_Linux_uma_distribui%C3%A7%C3%A3o_linux_para_a_arqueologia
- Amaral, A. M., & Havre, G. van (2017). Acessibilidade dos Sítios de Grupos da Tradição Tupiguarani na Chapada do Araripe-Pe: O uso das ferramentas SIG no estudo da mobilidade pré-histórica. *Revista de Arqueologia*, 30(1), 56–72. <https://revista.sabnet.org/ojs/index.php/sab/article/view/502>
- Cavalcanti, M. R. B. (2019). *Patrimônio Virtual: a reconstrução em 3D e a apresentação do patrimônio cultural* [Dissertação de mestrado, Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional]. <http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Marina%20Russell%2003-08-2020.pdf>
- Chagas, J. N. (2017). *Arqueologia Espacial no Seridó Potiguar: análise e interpretação arqueológica do território na bacia hidrográfica do rio Carnaúba* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco]. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32229>
- Duarte, A. A. M. (2004). *A fotogrametria a curta distância como uma ferramenta de documentação das inscrições rupestres: estudo de caso sítio arqueológico Santinho Norte I-SC* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina]. <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/87683>
- Esri. (2025). *World Imagery* [mapa digital]. Esri. <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a96a7f08febac2a9>
- Ferreira, F. C., Leite, D. V. B., Moura, A. C. M., Oliveira, L. F., Queiroz, G. C., & Tofani, F. P. (2011). O papel do geoprocessamento na preservação do patrimônio cultural nacional nos municípios de Porto Seguro e Santa Cruz Cabrália, Bahia: procedimentos e desafios. In *Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR*, Sociedade Brasileira de Sensoriamento Remoto, Curitiba. <http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/marte/2011/07.14.19.17/doc/p1143.pdf>
- Fleming, M. I. D., Abreu, T. B. A., Bastos, M. T., Martire, A. S., & Gregori, A. M. (2017). A importância das novas tecnologias para a Arqueologia e suas possibilidades de uso. *A impressão 3D e os projetos do LARP Vestígios - Revista Latino-Americana de Arqueologia Histórica*, 11(1), 56–79. <https://periodicos.ufmg.br/index.php/vestigios/article/view/11796>
- Fonseca, J. A. A. (2013). Levantamento regional na arqueologia amazônica: o uso de sistema de informação geográfica e sensoriamento remoto. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 8(3), 675–690. <https://doi.org/10.1590/S1981-81222013000300012>



- Fonseca, J. A. A. (2018). Padrões de distribuição espacial e modelos preditivos: os sítios arqueológicos no baixo curso dos rios Nhamundá e Trombetas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 13(2), 353–376. <https://doi.org/10.1590/1981.81222018000200006>
- Fragomeni, L. P. M., & Bonfanti, T. (2017). O potencial informativo dos dados do Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos através do uso de sistemas de informações geográficas. *Revista Semina*, 16(2), 1-18. <https://ojs.ufp.br/index.php/ph/article/view/8186>
- Fritz, C., Willis, M. D., & Tosello, G. (2016). Reconstructing Paleolithic cave art: The example of Marsoulas Cave (France). *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 910–916. <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.05.012>
- Fundação Pró-Natureza (FUNATURA). (1999). *Plano de manejo reserva natural Pousada das Araras*. FUNATURA.
- Gonçalves, P. H., Lima, F. X. R. F., Marques, S. Y. P., & Soster, S. S. (2021). Fotogrametria do Patrimônio: da documentação à realidade aumentada. *Revista Jatobá*, 3, e72071. <https://doi.org/10.54686/revjat.v3i.72071>
- Gruta das Araras. (2023a, 16 de setembro). Panoe. <https://tour.panoe.com/gruta-das-araras-1/63f6482d5833d733cefc7149>
- Gruta das Araras. (2023b, 14 de outubro). Panoe. <https://tour.panoe.com/gruta-das-araras-1/63f6482d5833d733cefc7149>
- Gruta do Paredão. (2023, 16 de setembro). Panoe. <https://tour.panoe.com/gruta-do-paredao/63f64ac9b554e0609fd17fb6>
- Gruta do Diogo. (2023, 16 de setembro). Panoe. <https://tour.panoe.com/gruta-do-diogo-i/63f64c035833d7351efc7179>
- Guedes, C. (2016). Aplicação da ferramenta de aprimoramento de imagens DStretch® em sítios rupestres: uma releitura do sítio Bom Nome IV (Pão de Açúcar, AL). *Revista de Fontes*, 3(5), 31–45. <https://doi.org/10.34024/fontes.2016.v3.9160>
- Guimarães, G. M., Anjos, F. A., Farias, D. S. E., & Arnold, M. (2018). Gestão do patrimônio arqueológico e desenvolvimento turístico: ações e propostas. *Revista Brasileira de Pesquisa em Turismo*, 12(3), 47–80. <https://www.scielo.br/j/rbtur/a/6H3zbm8gy9qxvLQ3jBxJPrs/?format=pdf&lang=pt>
- Harman, J. (2006). Using Decorrelation Stretch to Enhance Rock Art Images. *American Rock Art Research Association Annual Meeting*, p. 4. <https://www.dstretch.com/AlgorithmDescription.html>
- Hissa, S. B. V., & Isnardis, A. (2022). Panorama de sítios arqueológicos pré-coloniais em Minas Gerais: mapeamento em Sistema de Informação Geográfica e métricas básicas. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Ciências Humanas*, 17(3), e20210103. <https://doi.org/10.1590/2178-2547-BGOELDI-2021-0103>
- Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). (2022). *Catálogo de metadados e camadas geoespaciais* [recurso eletrônico]. Ministério da Gestão e da Inovação em Serviços Públicos. <https://www.inde.gov.br>
- Infantini, L. (2015). Sistemas de Informação Geográficos (SIG) em Arqueologia. *Revista Arqueologia Pública*, 9(3), 114-121. https://www.researchgate.net/publication/322946863_Sistemas_de_Informacao_Geograficos SIG_em_Arqueologia
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). (2022, 16 de setembro). Portaria nº 55, de 16 de setembro de 2022. Expõe permissões, autorizações e renovações para execução de projetos e programas de pesquisas arqueológicas. *Diário Oficial da União*, (178), 226-229. <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/servlet/INPDFViewer?jornal=515&pagina=226&data=19/09/2022&captchafield=firstAccess>
- Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional (IPHAN). (2023). *Cadastro Nacional de Sítios Arqueológicos – CNSA* [base de dados geoespacial]. IPHAN. <https://sicg.iphan.gov.br/sicg/login>
- Kipnis, R. (1997). O uso de modelos preditivos para diagnosticar recursos arqueológicos em áreas a serem afetadas por empreendimentos de impacto ambiental. In S. B. Caldarelli (Org.), *Atas do Simpósio sobre Política Nacional do Meio Ambiente e Patrimônio Cultural: Repercussões dos Dez Anos da Resolução CONAMA nº 001/86 sobre a Pesquisa e a Gestão dos Recursos Culturais no Brasil*, Universidade Católica de Goiás. Goiânia. <https://silo.tips/download/o-uso-de-modelos-preditivos-para-diagnosticar-recursos-archeologicos-em-areas-a>
- Kipnis, R., Santos, H. B. C., Tizuka, M. M., Almeida, M. J. G. T., & Corga, M. P. A. S. (2013). Aplicação das tecnologias de modelagem 3D conjugada às técnicas tradicionais para o registro das gravuras rupestres do rio Madeira, Rondônia, Brasil. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 8(3), 605–619. <https://doi.org/10.1590/S1981-81222013000300008>
- Ladwig, N. I., Souza, A. S. de, Campos, J. B., Santos, M. C. P., Pavei, D. D., Manenti, V. D., & Henkes, J. A. (2019). O geoprocessamento na gestão de sítios arqueológicos Guarani no município de Araranguá - SC - Brasil. *Revista de Gestão Sustentabilidade Ambiental*, 8(2), 402-427. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e22019402-427>
- Le Quellec, J.-L., Harman, J., Defrasne, C., & Duquesnoy, F. (2013). DStretch® et l'amélioration des images numériques: applications à l'archéologie des images rupestres. *Les Cahiers de l'AARS*, 16, 177–198. [https://shs.hal.science/halshs-00935630/file/DStretch_et_l_amelioration_des_images_nu%20\(1\).pdf](https://shs.hal.science/halshs-00935630/file/DStretch_et_l_amelioration_des_images_nu%20(1).pdf)
- Le Quellec, J.-L., Duquesnoy, F., & Defrasne, C. (2015). Digital image enhancement with DStretch®: Is complexity always necessary for efficiency? *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2(2–3), 55–67. <http://dx.doi.org/10.1016/j.daach.2015.01.003>



- Lima, T. C. F., & Landa, B. S. (2021). Fotogrametria na arte rupestre do sítio Templo dos Pilares, Alcinópolis/MS. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, 37, 149–163. <https://doi.org/10.11606/issn.2448-1750.revmae.2021.188129>
- Lopes, R. M. (2011). *Análise Topo e Microclimática da RPPN - Pousada Das Araras Serranópolis-GO* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás]. https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/180/o/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Regina_Maria.pdf
- Lopez, B. N., Andrade, J., Araki, H., & Centeno, J. S. (2003). Uma metodologia para mapeamento tridimensional de sítios históricos usando técnicas de fotogrametria de baixo custo. In *Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas*, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. https://docs.ufpr.br/~centeno/publications/download/2003/bruno_cbcg_T018.pdf
- Magalhães, A. J. F., Berredo, A. L., & Gaspar, M. (2018). De volta ao passado: a aplicação da fotogrametria para registro arqueológico 3D. *Revista de Arqueologia*, 31(1), 185–207. <https://doi.org/10.24885/sab.v3i1.519>
- Melo, P. O. B. (2012). *Resignificando Identidades Culturais: a relação da comunidade de Serranópolis com as imagens rupestres da Pousada das Araras* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia]. https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/459/o/2012_Pollyanna_de_Oliveira_Brito_Melo.pdf
- Merencio, F. T. (2020). A modelagem preditiva na Arqueologia: um olhar crítico a partir do estudo de caso no território Xetá. *Cadernos do Lepaarrq*, 17(33), 25–45. <https://doi.org/10.15210/lepaarrq.v17i33.18011>
- Moraes, M. A., Goes, P. B. B., Souto Maior, P. M., & Silva, S. F. S. M. (2022). Digitalização e Impressão 3D de Crânios Pré-Históricos. *Revista Noctua – Arqueologia e Patrimônio*, 1(7), 79–92. <https://doi.org/10.26892/noctua.v1i7p79-92>
- Morais, J. L. (2007). Arqueologia da paisagem como instrumento de gestão no licenciamento ambiental. *eGesta*, 3(4), 97–115. <https://www.unisantos.br/mestrado/gestao/egesta/artigos/133.pdf>
- Okuyama, A. Y., Assis, N. P. D., Kestering, C., & Oliveira, A. S. N. (2014). A fotografia nos procedimentos de documentação visual da arte rupestre. *Rupestre Web*. <http://www.rupestreweb.info/fotografiaarterupestre.html>
- Oliveira, J. F., Bartolomucci, R., & Rodríguez, A. C. M. (2005). Geoprocessamento e análises espaciais aplicados à Arqueologia. In *Anais do X Encontro de Geógrafos da América Latina*, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Oliveira, M. M. (2008). *A documentação como Ferramenta de Preservação da Memória. Cadastro, Fotografia, Fotogrametria e Arqueologia* (Cadernos Técnicos, 7). IPHAN; Programa Monumenta. [http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/CadTec7_DocumentacaoComoFerramenta_m\(2\).pdf](http://portal.iphan.gov.br/uploads/publicacao/CadTec7_DocumentacaoComoFerramenta_m(2).pdf)
- Parellada, C. I. (1989). Identificação de Sambaquis Através de Análise Fotointerpretativa na Baía de Guarapeçaba - PR. *Boletim de Geografia*, 7(1), 97–103. <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/BolGeogr/article/view/13508>
- Perez, G. C., Afonso, M. C., & Mota, L. T. (2018). Métodos de análise espacial para sítios arqueológicos: um modelo preditivo para o Estado de São Paulo. *Cadernos do Lepaarrq*, 15(30), 98–120. <https://doi.org/10.15210/lepaarrq.v15i30.13746>
- Quesada, E. (2010). Aplicación DStretch del software Image-J. Avance de resultados en el Arte Rupestre de la Región de Murcia. *Cuadernos de Arte Rupestre*, 5, 14–47. https://www.researchgate.net/publication/282077461_Aplicacion_Dstretch_del_software_Image-J_Avance_de_resultados_en_el_Arte_Rupestre_de_la_Región_de_Murcia.
- Quesada, E., & Harman, J. (2019). A step further in rock art digital enhancements. DStretch on Gigapixel imaging. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 13, 1–11, https://www.researchgate.net/publication/335686100_A_step_further_in_rock_art_digital_enhancements_DStretch_on_Gigapixel_imaging
- Rubin, J. C. R., Silva, R. T., & Barberi, M. (2016). Consideraciones al respecto del contexto arqueológico: Serranópolis, Goiás (Brasil). In J. C. J. López, C. S. Sánchez, B. V. Canllés, F. A. Arellano, & A. G. González (Eds.), *El poblamiento temprano en América* (Serie Prehistoria em América, 6, pp. 320–328). Museo del Desierto. <https://www.researchgate.net/publication/326922635>
- Rubin, J. C. R., Lorenzo, F. J. C., Silva, R. T., & Correa, D. S. (2017). Efeitos da erosão em sítios arqueológicos no estado de Goiás: casos de Serranópolis e Palestina de Goiás. *CLIO – Arqueológica*, 32(1), 37–67. <https://doi.org/10.20891/clio.V32N1p37-67>
- Rubin, J. C. R., Viana, S. A., Silva, R. T., Barberi, M., Resende, F. E. C. P., Ribeiro-Freitas, J. E., Souza, M. G., & Ribeiro, E. V. (2020). Cazadores-recolectores y el paisaje en Serranópolis, Goiás, Brasil. *Boletín de Arqueología PUCP*, (29), 129–158. <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/boletinearqueologia/article/download/24776/23555/>
- Schmitz, P. I., Rosa, A. O., & Bitencourt, A. L. V. (2004). Arqueologia nos Cerrados do Brasil Central - Serranópolis III. *Pesquisas-Antropologia*, (60). <https://www.anchietano.unisinos.br/publicacoes/antropologia/volumes/060.pdf>
- Silva, A. H. C. V., Peña, A. P., Lima, F. R., & Lopes, J. L. O. (2013, abril). Contribuição das imagens orbitais do sensor TM-LANDSAT-5 para identificação e interpretação de paleocanais e sítios arqueológicos. In *Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*, Sociedade Brasileira de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu. <http://marte2.sid.inpe.br/cdp/inpe.br/marte2/2013/05.28.23.16.38/doc/p0307.pdf>



- Simões, P. R. (2019). Levantamento fotogramétrico e modelagem 3D aplicados à cartografia espeleológica e à espeleometria da Gruta dos Fugitivos, Parque Estadual do Ibitipoca - MG. *Revista Espeleologia Digital*, (2), 58–66. [https://see.ufop.br/sites/default/files/revista_espeleologia_digital_no2_1_0.pdf?m=1652375400](https://see.ufop.br/sites/default/files/see/files/revista_espeleologia_digital_no2_1_0.pdf?m=1652375400)
- Simões, P. R., Veiga, L. A., & Schmidt, M. A. R. (2022a). Automação de Processos no Mapeamento Espeleológico 3D de Cavidades a Partir de Modelos Fotogramétricos de Cavidades Subterrâneas em Minas Gerais, Brasil. *Revista Brasileira de Espeleologia*, 1(1), 90–119. <https://revistaelectronica.icmbio.gov.br/index.php/rebe/article/view/2319>
- Simões, P. R. (2022b, 21 de dezembro). *Gruta do Diogo I – Cúpulas* [Modelo 3D]. Sketchfab. <https://sketchfab.com/3d-models/gruta-do-diogo-i-cupulas-63fd0c8100b04674a3c1d1ab8821da9d>
- Simões, P. R. (2022c, 8 de dezembro). *Gruta do Diogo I* [Modelo 3D]. Sketchfab. <https://sketchfab.com/3d-models/gruta-do-diogo-i-b534e2a0f1a04273abab1793d4829612>
- Simões, P. R. (2022d, 23 de dezembro). *Gruta do Diogo I – Painel 26* [Modelo 3D]. Sketchfab. <https://sketchfab.com/3d-models/gruta-do-diogo-i-painel-26-b2d43b22b3a644cd96550e297364f323>
- Simões, P. R. (2022e, 12 de dezembro). *Gruta das Araras – Painel 6* [Modelo 3D]. Sketchfab. <https://sketchfab.com/3d-models/gruta-das-araras-painel-6-7ccd116ace1f42e0957d8877e336f9d0>
- Simões, P. R. (2023a, 15 de setembro). *Serranopolis: 3D Models*. Sketchfab. <https://sketchfab.com/rollingdrone/collections/serranopolis-ee297c9de2da4fa2abb4b6b2d73caa0e>
- Simões, P. R. (2023b, 16 de setembro). *Gruta do Diogo I – Extração vetorial – Modelo 3D*. Sketchfab. <https://skfb.ly/oBGuK>
- Simões, P. R., Souza, E. T., Veiga, L. A. K., & Schmidt, M. (2025). *Dados de replicação para: Modelagem fotogramétrica de sítios arqueológicos e geração de produtos cartográficos: suporte à pesquisa e divulgação do patrimônio cultural de Serranópolis, Goiás, Brasil*. [SciELO Data]. <https://doi.org/10.48331/SCIELODATA.FXQGC0>
- Thomas, H., & Kennedy, M. A. (2016). A new methodology for accurate digital planning of archaeological sites without the aid of surveying equipment. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 10, 887–892. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jasrep.2016.06.006>
- Zarankin, A., Soares, F. C., Radicchi, G. A., & Brabo, A. (2022). 'Tecnologia apropriada': reflexões e desafios das novas metodologias 3D em Arqueologia e Conservação. O caso do projeto 'Paisagens em branco, arqueologia e antropologia antártica'. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 17(3), e20210090. <https://doi.org/10.1590/2178-2547-BGOELDI-2021-0090>

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

P. R. Simões contribuiu com conceituação, análise formal, investigação, metodologia, validação, visualização e escrita (rascunho original, revisão e edição); E. T. Souza com conceituação, aquisição de financiamento, administração de projeto e escrita (revisão e edição); L. A. K. Veiga com recursos, software, supervisão, validação e escrita (revisão e edição); e M. Schmidt com metodologia, supervisão, validação e escrita (revisão e edição).

DADOS DA PESQUISA

Os dados foram depositados no repositório SciELO Data e podem ser acessados em Simões et al. (2025).

PREPRINT

Não foi publicado em repositório de Preprint.

AVALIAÇÃO POR PARES

Avaliação duplo-cega, fechada.



