

Estudo de Análogos de Reservatórios a Partir de Modelos Virtuais de Afloramento

Palavras-Chave: Modelos Virtuais de Afloramento, Afloramentos Análogos, Structure From Motion-Multiview Stereo

Autores(as):

Vinicius de Souza Brito, IG – UNICAMP

Prof^(a). Dr^(a). Diego Ducart (orientador), IG – UNICAMP

INTRODUÇÃO:

Os modelos de reservatórios vêm sendo utilizados pela indústria petrolífera como ferramenta para a visualização e compreensão de potenciais prospectos para exploração e produção de hidrocarbonetos (Pringle et al., 2001; 2006). Sintetizando as propriedades e características petrofísicas de estratos rochosos em subsuperfície, a modelagem a partir de perfis sísmicos e furos de sondagem se mostra com incertezas inerentes à escala e resolução dos dados utilizados, insuficientes para detalhar feições, geometrias e arquitetura dos corpos com precisão (Jones et al., 2011). Preenchendo o espaço de resolução deixado entre a escala sísmica, o estudo e uso de afloramentos análogos a reservatórios desempenham uma fonte de informações complementar e importante para a investigação de sistemas petrolíferos, utilizados para coleta e interpretação de dados estruturais e composicionais, refinando modelos e a compreensão da geologia em subsuperfície (Bryant et al., 2000; Hodgetts et al., 2004; 2013; Howell et al., 2014).

Paralelo ao aprimoramento e barateamento de ferramentas e técnicas de aquisição de dados espaciais, novos métodos digitais de coleta e visualização introduziram novos instrumentos e metodologias para a caracterização de afloramentos, como os afloramentos digitais, ou Modelos Virtuais de Afloramento (McCaffrey et al. 2005; Bellian et al. 2005). A aplicação dos afloramentos virtuais apontam algumas vantagens ao estudo de afloramentos, como a coleta de dados em áreas inacessíveis convencionalmente, a velocidade e capacidade de coleta de informações, a ampliação do espaço amostral e melhora na capacidade de interpretação e visualização do afloramento em 3D (Hodgetts, 2013).

Como forma de compreender sistemas petrolíferos e a relação de feições sedimentares em escala de afloramento no entendimento de estratos em subsuperfície, o presente estudo tem por objetivo a interpretação de um afloramento análogo a reservatórios a partir de um Modelo Virtual do Afloramento, processado através de uma fotogrametria digital com algoritmos *Structure From Motion-Multiview Stereo* (SfM-MVS), buscando a coleta e análise de dados estruturais e

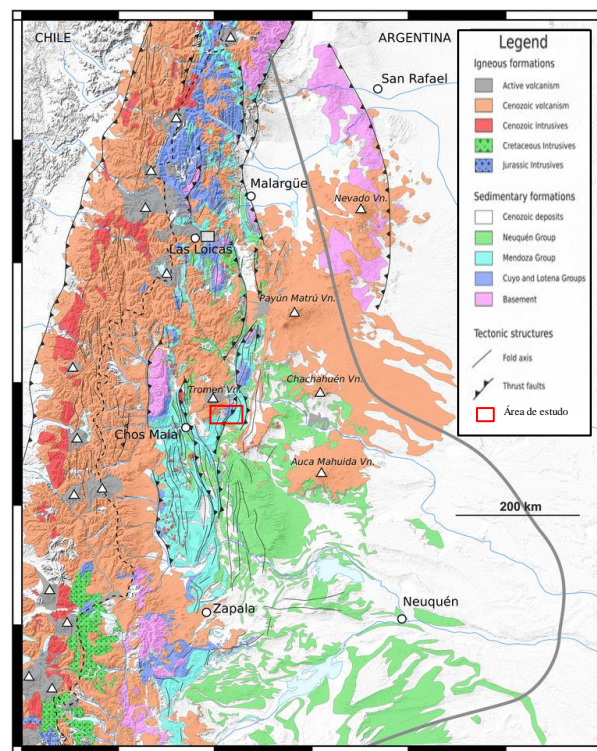


Figura 1. Mapa geológico simplificado da bacia de Neuquén.
Adaptado de Galland et al., 2019.

relações arquiteturais do afloramento. O trabalho é realizado com apoio da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e o fomento a pesquisa pelo Programa de Recursos Humanos em Exploração Petrolífera e Geologia de Reservatórios (PRH 19.1).

O afloramento estudado encontra-se na província de Neuquén, Argentina (Figura 1). Situado na região centro-oeste da bacia de Neuquén, uma bacia retroarco mesozoica de estratigrafia triássica-cenozoica disposta em cinturões dobrados e falhas de empurrão devido a compressão andina (Vergani et al., 1995), o afloramento encontra-se em rochas da formação Vaca Muerta, pertencentes ao Grupo Mendonza de transição Jurássica-Cretácea, composta de folhelhos betuminosos, margas e calcários formados em base de rampa carbonática (Legarella & Uliana, 1996), hospedando importantes rochas fontes de produção de hidrocarbonetos, concretizando alvos para exploração petrolífera na região (Villar et al., 2018; Legarreta et al., 2004).

METODOLOGIA:

Através do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), foram levantadas fotografias do afloramento objeto deste estudo, gerando o dataset utilizado para a construção do Modelo Virtual de Afloramento (MVA). Para o processamento do banco de dados foram utilizados os softwares Agisoft Metashape Pro Edition 2.0 (Agisoft, 2023) e CloudCompare v2.14.4 (CC) (CloudCompare, 2023), sendo este primeiro responsável pela aplicação da técnica fotogramétrica de Structure From Motion-Multiview Stereo (SfM-MVS), composta por algoritmos combinados de visão computacional e estereoscopia, flexibilizando a construção de objetos 3D (Carrivick et al., 2016) e tornando-se uma das principais ferramentas para a construção de MVAs (Marques et al., 2020).

Baseando-se no fluxo conceituado da técnica SfM-MVS (Westoby et al., 2012), e revisões metodológicas de manuseio e controle das etapas e erros durante o processamento do afloramento virtual (James et al., 2012; 2017; U.S. Geological Survey, 2021), foi desenvolvido um fluxo de processamento buscando a minimização de ruídos e deformações nos dados, bem como a otimização do dataset facilitando sua manipulação para posterior coleta e interpretação do modelo (Figura 2).

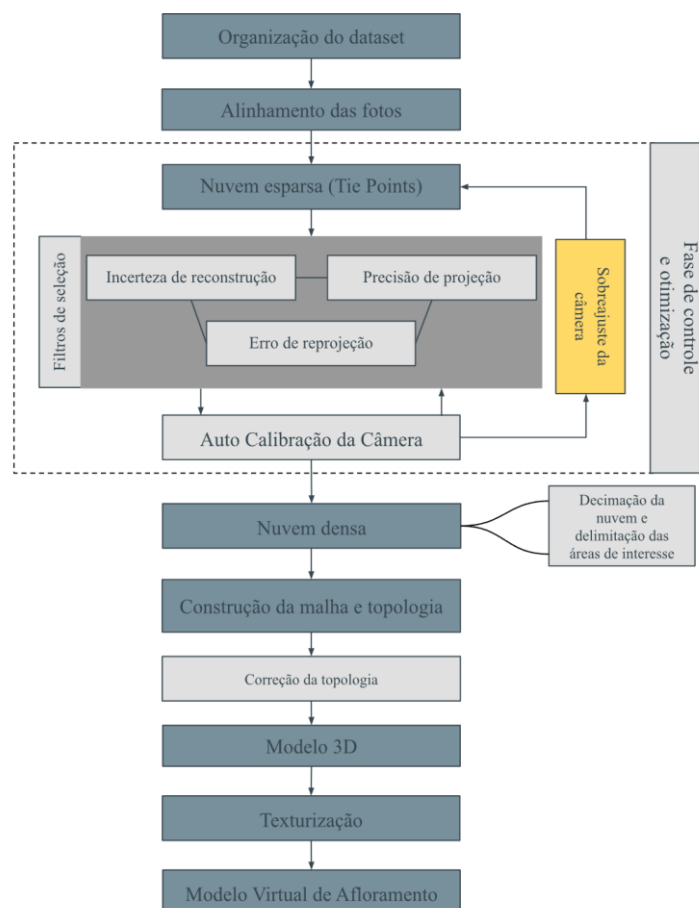


Figura 2. Fluxo de processamento empregado para concepção do Modelo Virtual de Afloramento análogo.

Com o MVA finalizado e utilizando o software LIME v3.2.3 (Buckley, et al., 2019), uma plataforma para manuseio e interpretação de objetos 3D com ferramentas voltadas para aplicações e análises geológicas, espera-se refinar a tomada de atitudes para interpretação da trama estrutural e a delimitação e reconhecimento de contatos, limites e formas dos corpos e feições sedimentares presentes no afloramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Ao final da fase de controle e otimização, foi finalizada a geometria do afloramento virtual, representada por sua nuvem densa (Figura 3), apresentando uma resolução em escala milimétrica e qualidade gráfica em alta resolução. O fluxo empregado demonstrou a redução e mitigação de ruídos e distorções no MVA otimizado, apontando uma redução nos erros de posição e projeção em comparação com sua versão processada seguindo o fluxo padrão do técnica SfM-MVS, sem nenhum controle sobre as etapas (Tabela 1).



Figura 3 – Nuvem densa de pontos do Modelo Virtual de Afloramento otimizado, destacando a geometria do afloramento a partir de sua topografia. As cores do modelo derivam das fotografias, resguardando os aspectos visuais do afloramento real.

Afloramentos Virtuais	Root Mean Square Error (RMSe)				
	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	XYZ (cm)	Reprojeção (Pixels)
MVA Otimizado	38,54	48,75	55,35	83,21	0,31
MVA Padrão	43,55	45,72	73,71	97,06	1,35

Tabela 1 – Erros estimados para posição das câmeras e georreferenciamento do modelo (X - Longitude, Y - Latitude e Z - Altitude), e a reprojeção dos dados das imagens no espaço tridimensional da nuvem de pontos, calculado em pixels. Os erros são reportados segundo sua raiz quadrática média (RMS).

A minimização dos erros observados no modelo otimizado refletem a mitigação de deformações e ruídos nas projeções das feições do afloramento no ambiente 3D virtual, bem como no refino do modelo de distorção de lentes no posicionamento e georreferenciamento dos dados. No caso do erro de reprojeção, calculado em pixels, a mudança expressa a redução de distorções no modelo virtual, resguardando a escala e dimensões reais das heterogeneidades do afloramento, importante para o manuseio e aplicação de MVAs para interpretações de suas feições sedimentares (Chesley et al., 2017). Em relação ao erro de posicionamento, a filtragem de pontos ruins na nuvem de pontos e a otimização do modelo de lentes a partir das projeções filtradas refletiram um refinamento no georreferenciamento do afloramento virtual, entretanto a falta do uso de pontos de controle, ou Ground Control Points (GCPs), não permitiram um ajuste adequado e redução do erro absoluto de posição do modelo (James and Robson, 2012).

Apesar da baixa correção do georreferenciamento do MVA, este pouco compromete a interpretação das feições e geometria do afloramento, enquanto as distorções as quais limitam a manipulação adequada do

afloramento virtual, computadas a partir do erro de reprojeção (pixels), foram minimizadas, alcançando um intervalo em torno de 0.3 pixels (0,008 cm), descrito em revisões do uso da técnica SfM-MVS como suficiente (U.S. Geological Survey, 2021) para o uso dos modelos sem comprometer futuras medições e aplicações.

Antes de realizar a coleta de atitudes de planos e estruturas aflorantes no MVA, bem como a identificação de feições sedimentares e variações visuais indicativas das heterogeneidades do afloramento, espera-se realizar a inclusão de pontos de controle no fluxo de processamento do afloramento virtual com o objetivo de reduzir suas incertezas de posicionamento e refinar as reprojeções das feições na superfície do modelo, mitigando de forma mais eficiente os ruídos ainda presentes e possíveis distorções no modelo que podem comprometer a interpretação de sua trama estrutural e arquitetura sedimentar.

BIBLIOGRAFIA

Agisoft, L. L. C., & Manual, A. P. U. (2023). Professional Edition. Version 2.0. 2. 2023: Agisoft LLC.

Bellian, J.A., Kerans, C., Jennette, D.C., (2005). Digital outcrop models: applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *J. Sediment. Res.* 75, 166–176.

Bryant, I., Carr, D., Cirilli, P., Drinkwater, N., McCormick, D., Tilke, P., Thurmond, J., 2000. Use of 3D digital analogues as templates in reservoir modelling. *Petroleum Geoscience* 6, 195e201.

Buckley, S.J., Ringdal, K., Naumann, N., Dolva, B., Kurz, T.H., Howell, J.A., Dewez, T.J.B., 2019. LIME: Software for 3-D visualization, interpretation, and communication of virtual geoscience models, *Geosphere*, 15(1): 222-235.

Carrivick J.L., Smith M.W., Quincey D.J. (2016). *Structure from Motion in the Geosciences*. West Sussex: John Wiley & Sons.

Chesley, J. T., Leier, A. L., White, S., & Torres, R. (2017). Using unmanned aerial vehicles and structure-from-motion photogrammetry to characterize sedimentary outcrops: An example from the Morrison Formation, Utah, USA. *Sedimentary Geology*, 354, 1-8.

Galland, O., Spacapan, J. B., Rabbel, O., Mair, K., Soto, F. G., Eiken, T., ... & Leanza, H. A. (2019). Structure, emplacement mechanism and magma-flow significance of igneous fingers—Implications for sill emplacement in sedimentary basins. *Journal of Structural Geology*, 124, 120-135.

Hodgetts, D., (2013). Laser scanning and digital outcrop geology in the petroleum industry: a review. *Mar. Pet. Geol.* 46, 335–354.

Hodgetts, D., Drinkwater, N.J., Hodgson, J., Kavanagh, J., Flint, S.S., Keogh, K.J., Howell, J.A., (2004). Three-dimensional geological models from outcrop data using digital data collection techniques: an example from the Tanqua Karoo depocentre, South Africa. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 239, 57–75.

Howell, J.A., Martinius, A.W., Good, T.R., (2014). The application of outcrop analogues in geological modelling: a review, present status and future outlook. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 387, 1–25.

James M.R., Robson S. (2012). Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research* 117: F03017.

James, M. R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., & Niethammer, U. (2017). Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*, 280, 51-66.

Jones, R. R., Pringle, J. K., McCaffrey, K. J. W., Imber, J., Wightman, R. H., Guo, J., & Long, J. J. (2011). Extending Digital Outcrop Geology into the Subsurface. In *Outcrops Revitalized* (pp. 31–50). SEPM (Society for Sedimentary Geology). <https://doi.org/10.2110/sepmcsp.10.031>

Marques, A., Horota, R.K., de Souza, E.M., Kupssinskü, L., Rossa, P., Aires, A.S., Bachi, L., Veronez, M.R., Gonzaga, L., Cazarin, C.L., (2020). Virtual and digital outcrops in the petroleum industry: a systematic review. *Earth Sci. Rev.* 208, 103260.

McCaffrey, K.J.W., Jones, R.R., Holdsworth, R.R.E. et al. (2005). Unlocking the spatial dimension: Digital technologies and the future of geoscience fieldwork. *Journal of the Geological Society* 162: 927–938.

Over, J.R., Ritchie, A.C., Kranenburg, C.J., Brown, J.A., Buscombe, D., Noble, T., Sherwood, C.R., Warrick, J.A., and Wernette, P.A., (2021). Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6—Structure from motion workflow documentation: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1039, 46 p.

Pringle, J.K., Clark, J.D., Westerman, A.R., Stanbrook, D.A., Gardiner, A.R., Morgan, B.E.F., (2001). Virtual outcrops: 3-D reservoir analogues. *J. Virtual Explor.* 4, 1–8.

Pringle, J.K., Howell, J.A., Hodgetts, D., Westerman, A.R., Hodgson, D.M., (2006). Virtual outcrop models of petroleum reservoir analogues: a review of the current state-of-the-art. *First Break* 24, 33–42.

Legarreta, L., & Uliana, M. A. (1996). The Jurassic succession in west-central Argentina: stratal patterns, sequences and paleogeographic evolution. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 120(3-4), 303-330.

Legarreta, L., C. E. Cruz, G. D. Vergani, G. A. Laffitte, and H. J. Villar. (2004). Petroleum mass balance of the Neuquén Basin, Argentina: A comparative assessment of the productive districts and nonproductive trends: AAPG International Conference and Exhibition, Cancun, Mexico, October 24–27, 2004, 6 p.

Vergani, G. D., A. J. Tankard, H. J. Belotti, and H. J., Welsink. (1995). Tectonic evolution and paleogeography of the Neuquén Basin, Argentina, in A. J. Tankard, S. R. Suarez, and J. Welsink, eds., *Petroleum basins of South America: AAPG Memoir* 62, p. 383–402.

Villar, H. J., G. A. Laffitte, and L. Legarreta. (1998). The source rock of the Mesozoic petroleum system of Argentina: A comparative overview on their geochemistry, paleoenvironments and hydrocarbon generation patterns: AAPG International Conference and Exhibition, Rio de Janeiro, November 8–11, p. 186–187.

Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., e Reynolds, J., (2012). ‘Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications: *Geomorphology*, v. 179, p. 300–314.