

GERAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE POR INTERFEROMETRIA DE DADOS DE RADAR DE ABERTURA SINTÉTICA

Pedro Freitas Ramos Grande ¹
Gabriel Gouvea da Silva ²
Felipe Gomes Rubira ³

INTRODUÇÃO

Dentro do sensoriamento remoto, os sistemas radares operam na faixa do espectro eletromagnético das micro-ondas, com comprimentos de onda que variam de um milímetro a um metro. Diferentemente dos sensores ópticos, os radares trabalham com a transmissão e recepção da radiação eletromagnética, o que os caracteriza como sensores ativos (Ponzoni; Shimabukuro; Kuplich, 2015).

Estes sensores podem distinguir conforme o comprimento de onda no qual operam, que, por sua vez, exerce influência na penetrabilidade da onda na superfície terrestre. Segundo Paradella, Mura e Gama (2021), maiores comprimentos de onda (λ) possuem capacidade de penetrar maiores profundidades. Dessa maneira, radares como o ALOS-PALSAR-2, que operam na banda L (30 a 15 centímetros), oferecem maior penetrabilidade se comparados com sensores que operam na banda X, como o TerraSAR-X (3,75 a 2,4 centímetros).

Além disso, Henderson e Lewis (1998) afirmam que o uso de sensores radares permite extrair informações referentes às propriedades elétricas e físicas dos objetos, como a umidade e a geometria, respectivamente. Outro ponto importante acerca do sensoriamento remoto por radar é que, por se tratar de um sistema ativo e não depender da incidência solar sob a superfície terrestre, pode operar tanto de dia quanto de noite. Paradella et al. (2005) também ressaltam que, devido ao seu maior comprimento de

¹ Graduando do Curso de Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, pedro.freitas@sou.unifal-mg.edu.br;

² Graduando do Curso de Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, gabriel.gouvea@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Professor orientador: Doutor, Instituto de Ciências da Natureza - UNIFAL-MG, felipe.rubira@sou.unifal-mg.edu.br;

onda, os produtos gerados não sofrem tamanha interferência de nuvens, fumaça, chuva e outros fatores que limitam os sensores ópticos.

Dentre as várias aplicações dos radares, em especial os de abertura sintética, utilizados neste trabalho, cita-se a interferometria como uma técnica que utiliza um par de imagens SAR no formato *single look complex* (SLC). Estas imagens, portadoras das informações de fase e amplitude, irão compor um interferograma resultante da interação (ou interferência) entre suas respectivas ondas eletromagnéticas. Paradella, Mura e Gama (2021) podem ser consultados para maiores esclarecimentos sobre a interferometria de imagens de radar de abertura sintética (InSAR).

Segundo Lillesand, Kiefer e Chipman (2004), a aquisição de um par interferométrico pode ser a partir de dois modos: por passagem única e por repetição de passagem. No primeiro caso, o sistema SAR possui duas antenas separadas por determinada distância que permite a interferometria, como é o caso da missão SRTM. Isto permite que a aquisição das imagens seja simultânea. No segundo modo, a aquisição é feita a partir de um sistema com uma única antena que orbita o globo, permitindo a repetição da passagem, porém, com defasagem temporal. Este é o caso do Sentinel-1, que será utilizado neste trabalho.

Por trabalhar com a informação de fase da imagem complexa, a interferometria permite a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE). Isto é executável a partir da formação do par interferométrico, que corresponde à diferença de fase entre as duas imagens complexas de entrada. Tendo conhecimento da geometria de aquisição do sensor, é possível converter a diferença de fase em altitude (Alves; Galo; Galo, 2009).

Dentre os principais modelos existentes de acesso livre, o SRTM e o Copernicus DEM GLO-30 possuem resolução espacial de 30 metros e representam a superfície terrestre do ano 2000, para o SRTM, e entre 2011 e 2015, para o Copernicus DEM. Quanto ao comprimento de onda, o SRTM operou na banda C e o Copernicus DEM, a partir de dados adquiridos pelo TanDEM-X, na banda X. Ambas as bandas são consideradas de baixo comprimento de onda e possuem baixa penetrabilidade. Por essa razão, os dois modelos são denominados Modelos Digitais de Superfície (MDS), ou seja, contabilizam a altitude de construções, vegetação e demais feições acima do solo (Mirosław-Swiątek et al., 2016).

Sabendo das possíveis imprecisões dos modelos digitais de elevação gerados por sistemas SAR que operam na banda C, dada a sua baixa penetrabilidade em dosséis,

mas ciente das dificuldades técnicas inerentes ao trabalho de campo em áreas isoladas e a baixa disponibilidade de dados topográficos gratuitos, o presente trabalho teve por objetivo a geração de um modelo digital de elevação mais atualizado e de maior resolução espacial para a área do Parque Estadual da Serra do Papagaio por meio da técnica de interferometria de dados SAR.

MATERIAIS E MÉTODOS

Criado pelo Decreto nº 39.793, de 05/08/1998, o Parque Estadual da Serra do Papagaio (PESP) está localizado na Região Geográfica Intermediária de Pouso Alegre (IBGE, 2017) e abrange os municípios de Aiuruoca, Alagoa, Baependi, Itamonte e Pouso Alto. Por sua vez, o parque está localizado na porção Sul de Minas Gerais, a 415 quilômetros por rodovia da capital do Estado, Belo Horizonte, 275 km da cidade do Rio de Janeiro e 317 km da capital paulista. Sua criação se dá através da extinção da Estação Ecológica do Papagaio, criada pelo revogado Decreto nº 31.368, de 02/06/1990.

Sua relevância se evidencia na medida em que divide três importantes sub-bacias contribuintes diretas da bacia hidrográfica do Rio Grande: as bacias do Rio Aiuruoca, Rio Baependi e Rio Verde (IEF, 2009). Com clima característico tropical de altitude mesotérmico, sua vegetação é tipicamente herbácea e florestal, com remanescentes de Floresta Ombrófila mista e densa Alto-Montana.

O Parque Estadual da Serra do Papagaio tem seus limites adjacentes ao Parque Nacional do Itatiaia, o primeiro parque nacional do Brasil (BRASIL, 1937). Juntas, as duas unidades de conservação integram o Corredor Ecológico da Mantiqueira e a Área de Proteção Ambiental da Serra da Mantiqueira (APASM) e configuram um dos maiores fragmentos de vegetação nativa da Mantiqueira (IEF, 2009).

Apresentadas as suas principais características físicas e ambientais, inicia-se a etapa de aquisição dos dados necessários para execução deste trabalho. Em razão da área de estudo estar situada em mais de um ponto de passagem do Sentinel-1, foram obtidos dois pares de imagens complexas (SLC) de mesma órbita (53), porém pontos distintos (662 e 667). Logo, salienta-se que todo o processamento aqui descrito foi realizado duas vezes, a fim de cobrir toda a área do Parque Estadual da Serra do Papagaio. Os limites do parque foram obtidos através da plataforma IDE-Sisema.

Ambos os pares adquiridos são compostos por uma imagem de 04 de junho de 2021 e uma imagem de 01 de dezembro de 2021 obtidas através do modo de aquisição

Interferometric Wide Swath (IW) com direção de voo descendente. Segundo Ferrati et al. (2007), a linha de base perpendicular da aquisição de imagens por repetição de passagem deve ser entre 150 e 400 metros para permitir uma mensuração precisa das oscilações topográficas. Já quanto a linha de base temporal, Braun (2021) demonstrou que, quanto menor o tempo de aquisição entre as cenas, menor a interferência na coerência delas, dada as deformações e variações no espaço geográfico por razões naturais e antrópicas.

Dada a escassez de dados que atendam estes dois critérios, optou-se por contemplar os requisitos mínimos para a linha de base perpendicular. Dessa forma, os dois pares de imagens utilizados neste trabalho possuem linhas de base perpendicular de 150 metros e linhas de base temporal de 180 dias. Para o processamento das imagens obtidas, utilizou-se o *software* Sentinel Application Platform (SNAP) da Agência Espacial Europeia (ESA).

Primeiramente, através da ferramenta “S-1 TOPS Split”, reduziu-se as cenas para os *bursts* que abrangem a área de estudo, sub-faixa IW1 e polarização VV. Isso torna o processamento mais eficiente ao manter apenas as informações da cena que serão utilizadas. Em seguida, aplicou-se, em ambas as cenas, o filtro “Apply Orbit File”, a fim de corrigir a posição geográfica precisa das imagens.

Segundo Yague-Martinez et al. (2016), as imagens SAR no modo *Terrain Observation by Progressive Scans (TOPS)* possuem alta taxa de efeito Doppler, o que exige rigorosos requisitos para registrar as cenas. Diante disso, fez-se uso das ferramentas “Back Geocoding” e “S-1 Enhanced Spectral Diversity” disponíveis no pacote Sentinel Toolboxes da ESA.

Conforme Braun e Veci (2021), um interferograma é formado a partir da multiplicação cruzada da imagem de referência pelo conjugado complexo da imagem secundária. Dessa forma, a amplitude resultante será o produto da multiplicação das amplitudes das imagens de entrada e, a fase, a diferença de fase entre os pixels correspondentes no par interferométrico original (PARADELLA; MURA; GAMA, p. 60, 2021). Assim sendo, formou-se o interferograma das imagens registradas por meio da ferramenta “Interferogram Formation”.

Ademais, foi utilizado a ferramenta “S-1 TOPS Deburst” a fim de remover as linhas divisórias entre os *bursts* e, também, aplicou-se o filtro *Goldstein Phase Filtering* proposto por Goldstein e Werner (1998). Segundo os autores, o algoritmo visa reduzir

os ruídos de fase causados pela mudança temporal e da linha de base, além dos ruídos termais.

Ainda assim, Ferretti et al. (2007) apontam que a cena interferométrica pode fornecer uma medição ambígua da altitude relativa do terreno devido à natureza cíclica (2π) da fase interferométrica. Isso deve ser corrigido por um processo denominado *phase unwrapping* (desdobramento de fase, em tradução livre), que permite calcular o valor de elevação do terreno a partir da diferença de fase interferométrica absoluta (Mura, 2000). Assim sendo, através do algoritmo de custo estatístico e fluxo de rede, SNAPHU (Chen; Zebker, 2000), disponibilizado como um *plug-in* pela Agência Espacial Europeia, realizou-se o processo de desdobramento de fase do interferograma.

Por fim, converteu-se a fase interferométrica em elevação através do comando “Phase to Elevation”. Este é o processo no qual o modelo digital de elevação (MDE) é gerado. Porém, as variações topográficas e a inclinação do sensor podem distorcer as distâncias reais, tendo em vista que um sistema SAR opera sob um ponto de vista oblíquo do terreno (Paradella; Mura; Gama, 2021). Diante disso, foi aplicada uma correção do terreno por meio da ferramenta “Range-Doppler Terrain Correction” disponível no SNAP.

Conforme dito anteriormente, todos os passos descritos até aqui foram realizados duas vezes em virtude de o Parque Estadual da Serra do Papagaio se encontrar em duas cenas do satélite Sentinel-1, o que resultou em dois produtos de elevação do terreno. Em razão disso, no *software* livre QGIS, os dois produtos foram mesclados em um único *raster* por meio do comando “Mesclar”, que cria um mosaico composto pelos dois. Posteriormente, recortou-se o arquivo matricial para os limites do parque com *buffer* externo de um quilômetro.

No ArcMap, foram sobrepostos os Modelos Digitais de Superfície SRTM e GLO-30 da Copernicus DEM recortados para a área de estudo junto do modelo gerado por interferometria. Então, criou-se mil pontos aleatórios com distância mínima de 100 metros entre si dentro do polígono da área do parque e, através da ferramenta “Extract Multi Values to Point”, foram adicionados na tabela de atributos os valores de altimetria do pixel correspondente de cada ponto para os três MDS. Ou seja, foram adicionadas à tabela de atributos três novas colunas, cada uma contendo o valor do pixel (altitude em metros) de um dos três MDS.

No Excel, calculou-se o desvio padrão de cada ponto visando mensurar a dispersão dos valores de altitude de cada modelo em um mesmo ponto. Dessa forma, quanto maior o valor do desvio padrão de um ponto, menor a correlação entre os MDS e, da mesma forma, quanto mais próximo de zero, mais semelhantes são os modelos naquele ponto. Então, adicionou-se à tabela de atributos dos pontos o campo “desvio padrão”.

Por fim, foi feita a interpolação IDW do desvio padrão dos pontos, a fim de estimar quais áreas do parque obtiveram maior semelhança entre os MDS e quais apresentaram maiores variações. Além da localização dos pontos, os resultados foram analisados também com base na altitude.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como principal resultado, cita-se a geração de um modelo digital de superfície interferométrico que representa a superfície do Parque Estadual da Serra do Papagaio no ano de 2021 com resolução espacial de 14,06 metros. Conforme descrito na metodologia, o desvio padrão médio dos mil pontos amostrais aleatórios para comparação com o SRTM e o GLO-30 da Copernicus DEM foi de 3,81 metros, obtendo valores máximo e mínimo de, respectivamente, 30,77 e 0,02 metros. Além disso, a mediana do desvio padrão dos pontos amostrais foi 3,17. As estatísticas indicam a presença de *outliers*, que não foram retirados das análises tendo em vista a possibilidade de variações altimétricas da vegetação em função da baixa penetrabilidade da banda C.

Com a interpolação dos valores de desvio padrão de cada ponto, observou-se que os maiores valores estão situados nas bordas do parque, podendo significar variações no uso e cobertura da terra dada a maior exposição destas porções à áreas não protegidas, estando sujeitas ao efeito de borda. Não foi possível estabelecer relação entre a altitude e as oscilações nos valores dos três MDS, visto que os pontos com maiores valores de desvio padrão calculado não se limitam a apenas uma classe de altitude.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista a baixa disponibilidade de dados topográficos para a área de estudo, conclui-se que o modelo digital de superfície gerado atende satisfatoriamente o seu propósito. O MDS apresentou coerência com modelos já existentes e consolidados, como o SRTM e o GLO-30. A partir dele, poderão ser gerados produtos que agregarão

não só para a pesquisa científica, mas também para a gestão do parque, como mapa de declividade, incidência solar, orientação das vertentes, extração da rede de drenagem, entre outros.

Dado o intervalo de cerca de 21 anos entre o SRTM e o modelo gerado por interferometria e a baixa penetrabilidade da banda C, sugere-se que seja avaliado as mudanças no uso e cobertura da terra no parque para o período a fim de verificar mudanças que podem alterar a altitude dos objetos da superfície, como o corte raso da vegetação.

Palavras-chave: Radar de Abertura Sintética; Sentinel-1; InSAR; Modelo Digital de Superfície; Unidades de Conservação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio da chamada 13/2023 que visa fornecer apoio à participação coletiva em eventos de natureza técnico-científica.

REFERÊNCIAS

ALVES, L. N.; GALO, M.; GALO, M. L. B. T. Fundamentos do Processamento Interferométrico de Dados de Radar de Abertura Sintética. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. **Anais do XIV SBSR**. São José dos Campos, SP: INPE, 2009. v. único. p. 7227-7234.

BRASIL, **Decreto nº 1.713, de 14 de junho de 1937**, Cria o Parque Nacional de Itatiaia. Brasil, Rio de Janeiro, 14 jun. 1937.

BRAUN, A. Retrieval of digital elevation models from Sentinel-1 radar data – open applications, techniques, and limitations. **Open Geosciences**, v. 13(1), 532-569, 2021.

BRAUN, A.; VECI, L. **Sentinel-1 Toolbox: TOPS Interferometry Tutorial**. SkyWatch Space Applications, 2021.

CHEN, C. W.; ZEBKER, H. A., Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. **Journal of the Optical Society of America**, v. 17, p. 401-414, 2000.

FERRETTI, A.; MONTI-GUARNIERI, A.; PRATI, C.; ROCCA, F. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. **ESA Publications**, 2007.

GOLDSTEIN, R.M.; WERNER, C.L. Radar Interferogram Filtering for Geophysical Applications. **Geophys. Res. Lett.** V. 25, 4035–4038, 1998.

HENDERSON, F. M.; LEWIS, A. J. **Principles and applications of imaging radar.** Estados Unidos da América: John Wiley & Sons, Inc. 1998.

IBGE. **Divisão regional do Brasil em regiões geográficas imediatas e regiões geográficas intermediárias.** IBGE, Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.

INSTITUTO ESTADUAL DE FLORESTAS – IEF. **Plano de manejo do Parque Estadual da Serra do Papagaio.** 2009. 118p.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote sensing and image interpretation.** Nova Iorque: John Wiley&Sons, p. 763, 2004.

MIROSLAW-SWIATEK, D.; SZPORAK-WASILEWSKA, S.; MICHALOWSKI, R.; KARDEL, I.; GRYGORUK, M. Developing an algorithm for enhancement of a digital terrain model for a densely vegetated floodplain wetland. **Journal of Applied Remote Sensing**, v.10, n.3, 2016.

MURA, J. C., **Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: Sistema Geo-InSAR.** São José dos Campos: INPE, p. 159, 2000.

PARADELLA, W. R.; MURA, J. C.; GAMA, F. F. **Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnologia.** 1o ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2021.

PARADELLA, W. R.; SANTOS, A. R.; VENEZIANI, P.; CUNHA, E.S.P. Radares imageadores nas geociências: estado da arte e perspectivas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57 (1): p. 56-62. 2005.

PONZONI, F.J.; SHIMABUKURO, Y.E.; KUPLICH, T.M. **Sensoriamento remoto da vegetação.** 2. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2015.

YAGUE-MARTINEZ, N. et al. Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 54, n. 4, p. 2220-2234, 2016.