

ANÁLISE PRELIMINAR DOS PROCESSOS DEFORMACIONAIS EM ÁREA DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO EM MOSSORÓ-RN POR INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL SAR

Lenon Silva de Oliveira¹, Fabio Furlan Gama¹, Edison Crepani¹, José Claudio Mura¹, Delano Menecucci Ibanez²

¹ Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto - PGSER, Divisão de Observação da Terra e Geoinformática - DIOTG, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE

² CENPES/Petrobras, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello
lenon.oliveira@inpe.br, fabio.furlan@inpe.br, edison.crepani@inpe.br, jose.mura@inpe.br, dibanez@petrobras.com.br

RESUMO

As atividades de produção de óleo e gás podem propiciar deformações na superfície, como processos de subsidência e/ou soerguimento, com causas decorrentes das etapas de extração e injeção nos poços petrolíferos. Por sua vez, estes processos necessitam análises quantitativas dos eventos deformacionais, visando a mensuração e o monitoramento de variações ocorridas na superfície. O presente trabalho busca a identificação de correlações entre eventos deformacionais de superfície e as estruturas geológicas presentes em uma área de extração de petróleo próxima ao município de Mossoró – RN. Através da aplicação da técnica de interferométrica por espalhadores persistentes foi possível identificar processos deformacionais com velocidade variando entre -13,7 a 6,7 mm/ano. Os maiores valores de subsidência apresentam indícios de correlação ao longo de falhas distensionais e lineamentos estruturais, enquanto os maiores valores de soerguimento parecem se associar a falhas transcorrentes.

Palavras-chave — deformações, hidrocarbonetos, InSAR, PSI.

ABSTRACT

Anthropogenic oil and gas extraction activities can lead to surface deformations, such as subsidence and/or elevation processes, with causes arising from the production stages of the wells. In turn, these processes require quantitative analysis of deformational events, aiming at measuring and monitoring surface variations. The present work seeks the identification of correlations between surface deformational events and geological structures in an area of oil extraction near Mossoró - RN. Through the application of the persistent scatterer interferometry technique, it was possible to identify deformational processes with velocities ranging from -13.7 to 6.7 mm/year. The most significant subsidence and uplift values show a correlation between the interception of extensional faults with interpreted lineaments besides transcurrent faults.

Keywords — displacements, hydrocarbons, InSAR, PSI.

1. INTRODUÇÃO

A extração de óleo e gás é fundamental para a cadeia produtiva mundial, causando uma alta demanda de exploração desses recursos não renováveis encontrados em depósitos sedimentares, que estimula o aumento da produção nos poços. Eventualmente, esse processo de aumento da produção pode requerer a aplicação de técnicas que visem o aumento da produtividade, como o fraturamento hidráulico e a perfuração horizontal em litologias com baixa permeabilidade [1]. Contudo, a extração desses bens pode favorecer deformações no terreno e induzir eventos sísmicos correlacionados aos processos intrínsecos à produção. Com base nisso, é essencial a identificação e caracterização de potenciais eventos de instabilidade por meio de análises qualitativas e quantitativas, visando a predição de possíveis desastres [2].

As mensurações de deformações ocorridas na superfície podem ser realizadas por métodos convencionais, como a adoção de equipamentos de posicionamento geodésico ou de estações robóticas. Contudo, esses instrumentos possuem aplicabilidade em áreas com menor dimensão, o que pode tornar onerosa a utilização dessas técnicas de campo em áreas extensas, considerando o custo logístico dessas análises realizadas *in situ*. Assim, métodos complementares podem ser associados às análises de campo, como a aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, como a interferometria SAR, para a obtenção de dados deformacionais [3].

A interferometria SAR (InSAR) é uma técnica que utiliza as informações de amplitude e fase de um par de imagens SAR de formato complexo, a fim de gerar um modelo digital de superfície. O valor de fase presente em cada pixel da imagem está correlacionado à respectiva altitude da superfície, permitindo a geração de um modelo numérico do terreno. Por intermédio de diferentes técnicas que utilizam dados interferométricos é possível obter informações das variações observadas em superfície [4, 5].

As técnicas de interferometria SAR exibem vantagens em relação aos métodos convencionais, pois permitem a mensuração de variações da superfície em grandes áreas, sem a exigência de atividades de campo.

A interferometria diferencial SAR (DInSAR) é uma técnica baseada no InSAR que possibilita a aquisição de informações sobre alterações ocorridas na superfície. Isso se dá através da diferença de fase entre pelo menos dois produtos interferométricos. Dessa forma, por meio do DInSAR é possível em escala centimétrica identificar deformações do terreno, causadas por eventos de terremotos, subsidência e deslizamento, sendo essas variações da superfície medidas pela diferença de fase relativa [5].

Esse método demonstra grande potencial na identificação e monitoramento de variações na superfície, servindo como ferramenta complementar para o direcionamento de atividades e análises de campo [6].

A fase interferométrica é constituída pelo somatório da componente de fase relacionado à altitude do terreno, deslocamento causado por mudanças do terreno, ruídos atmosféricos, erro na estimativa de linha de base, ruídos do sistema e *speckle* [5, 7]. Deste modo, o método DInSAR sofre grande influência das componentes de fase do ruído e da atmosfera, que podem introduzir erros às análises deformacionais. Portanto, torna-se essencial a aplicação de métodos que visem a redução desses efeitos, como a utilização da técnica DInSAR atrelada ao processamento de dados de múltiplas aquisições. Por meio da utilização de séries temporais, é possível reduzir a influência da fase atmosférica e de ruídos [8].

As principais técnicas DINSAR de análises temporais, são conhecidas como DInSAR avançado (*Advanced DInSAR* – A-DInSAR), que corresponde a técnica de interferometria por espalhadores persistentes (*Persistent Scatterers Interferometry* – PSI ou PSInSAR), SBAS (*Small Baseline Subset*) e a SqueeSAR [9], que permitem identificar deformações em escala milimétrica.

A PSI localiza os alvos pontuais que refletem a energia eletromagnética durante todo o período de análise, que sejam visíveis por toda série temporal de análise, mesmo com a presença de diferenças na órbita do satélite [5]. Esses alvos com baixa variação são denominados de espalhadores persistentes (*Persistent Scatterers* - PS). Essas informações permitem a realização de uma análise temporal da fase interferométrica por ponto, sendo o deslocamento da superfície representado pelas diferenças de fase [10, 11].

Fazendo uso de inúmeras imagens, o método PSI aplica análises estatísticas dos erros de fase para correlacionar estes às componentes atmosféricas e de ruídos. Assim, o objetivo da técnica PSI é separar os componentes de fase de deformação mediante tratamentos estatísticos dos conjuntos de imagens disponíveis. Portanto, com o auxílio da modelagem da componente de fase de deformação do terreno é possível obter uma estimativa da deformação em caráter espacial e temporal [7].

A técnica PSI é amplamente utilizada em análises e monitoramentos de deformações na superfície, como em análises urbanas, mineração, campos de extração de óleo e gás e outras áreas que exibem grande número de alvos

persistentes [9]. Contudo, devido à natureza ambígua da fase, que varia de 0 a 2π , a técnica PSI mostra limitações quanto à capacidade de medir fenômenos que apresentam rápida deformação, com proporções maiores que $\lambda/4$, entre as aquisições [7].

1.1. Deformações de solo causadas por atividades petrolíferas

O método de extração de óleo e gás em depósitos *Onshore* convencionais ocorre através da injeção de fluido nas camadas litológicas. A exploração desses bens naturais pode ocasionar eventos de instabilidade, associados às modificações exercidas nas estruturas geológicas em decorrência da retirada do óleo e gás [12].

Os processos de produção reduzem as reservas do subsolo, causando a diminuição da pressão interna do reservatório e, subsequentemente, o aumento da tensão efetiva, ocasionando eventuais retrações no reservatório. A posterior injeção de fluido também modifica as condições internas, podendo afetar tanto a parte inferior, quanto a superior da formação. Além dos processos de subsidência causados pela extração do óleo e gás, também podem ocorrer processos de reativação de falhas geológicas, desencadeando eventos sísmicos. Essas alterações nas condições naturais podem afetar de forma significativa a estabilidade dos locais de extração e as áreas adjacentes, podendo propiciar eventos de subsidência. Sendo assim, torna-se necessária a aplicação de análises deformacionais dessas áreas, para auxiliar na predição de possíveis desastres [9].

Desta forma, o presente trabalho visa identificar a associação entre processos deformacionais e estruturas geológica distribuídas em uma área com extração de óleo e gás em superfície (*Onshore*), localizada entre os municípios de Mossoró, Areia Branca e Serra do Mel, na Bacia Potiguar, no Estado do Rio Grande do Norte, através do uso da técnica PSI e da interpretação da geologia estrutural da localidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de localização e geologia

A área de estudo está localizada nas proximidades dos municípios de Mossoró, Areia Branca e Serra do Mel, no Estado do Rio Grande do Norte. O local possui inúmeros poços de extração de óleo e gás *Onshore* inseridos na Bacia Potiguar, que apresenta segmento emerso e outro submerso, englobando os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. A formação da bacia sedimentar está relacionada com o processo de estiramento crustal ocorrido durante o rompimento do Supercontinente Gondwana, que gerou a separação das placas Sul-Americana e Africana [13].

A área de estudo possui coberturas sedimentares do período Neógeno (23,03Ga), com depósitos aluvionares de

canal, flúvio-marinhos e aluvionares antigos. A porção aflorante da bacia Potiguar presente na área de estudo apresenta calcários, margas, siltitos, folhelhos, argilitos e dolomitos da Formação Jandaíra, formada durante o período Cretáceo (65,5-115,5Ma) [14].

2.2. Processamento de dados

Os dados deformacionais foram obtidos através da técnica de interferometria por espalhadores persistentes. A PSI utiliza os valores de fase interferométrica de pontos com propriedade de espalhamento que apresentam pouca variação com o tempo e geometria de visada [10]. Essas informações permitem a realização de uma análise temporal da fase interferométrica por ponto, sendo relacionadas as diferenças de fase ao deslocamento da superfície nesses locais [11].

Desta forma, através do uso do *software* Sarscape, foi realizada a técnica PSI a partir de um conjunto de 30 imagens radar oriundas do satélite sentinel-1A, entre o período de 01/01/2020 a 26/12/2020.

Posteriormente, o resultado do processamento PSI foi reamostrado através de estatística zonal no QGIS 3.22.8, considerando o valor médio dos pontos persistentes (PS) interceptados por grades de 500 x 500 m. Esse procedimento visou a redução de ruídos e a subsequente melhoria na representação dos processos deformacionais.

As feições estruturais foram obtidas através da vetorização dos dados da folha Mossoró [14] e, além disto, foram identificados lineamentos através da interpretação visual de padrões geomorfológicos retilíneos sobre o relevo

sombreado gerado a partir do modelo digital de elevação oriundo do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). A extração dos lineamentos se baseou na metodologia adotada no trabalho de Andrade Filho e Rossetti [15].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da utilização da técnica PSI foi possível identificar o processo de soerguimento e subsidência na área durante o ano de 2020. A velocidade deformacional variou durante o período entre -13,7 a 6,7 mm/ano, sendo -0,52 mm/ano a velocidade deformacional média.

As estruturas geológicas presentes na área de estudo mostram relações espaciais com a movimentação superficial, conforme observado na figura 1. As maiores velocidades deformacionais estão localizadas na parte norte da área de estudo ao longo de falhas normais NE-SW e próximas ao cruzamento com lineamentos topográficos e falhas transcorrentes. Nesse local predomina movimentos de soerguimento, indicando uma possível correlação entre esses eventos de elevação superficial e o quadro estrutural da parte norte da área de estudo. Os processos de subsidência abrangem, em sua maioria, o domínio central da região, sendo os maiores valores de rebaixamento, em parte, adjacentes às falhas distensionais e lineamentos topográficos.

Por fim, os valores deformacionais extremos encontrados nos limítrofes da área podem estar associados à erros de borda oriundos do processamento por estatística zonal.

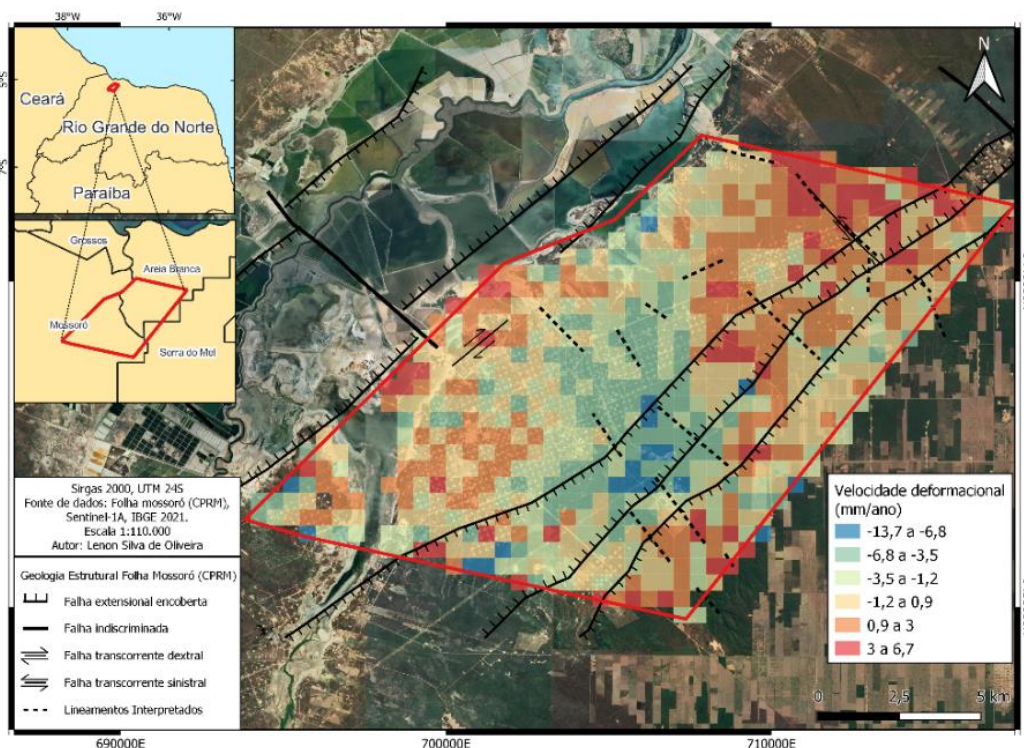


Figura 1. Velocidades deformacionais obtidas pelo método PSI na área de estudo no ano de 2020.

4. CONCLUSÕES

A área de estudo apresentou processos deformacionais de subsidência e soerguimento durante o ano de 2020, fornecendo indícios da associação destes com as estruturas geológicas. Com isso, evidencia-se a presença de possíveis movimentos em falhas dispostas na área de estudo. Assim, estudos futuros serão desenvolvidos com a finalidade de avaliar a influência dos processos de produção dos poços com a ativação de movimentos nas estruturas geológicas e, o subsequentemente desencadeamento de eventos deformacionais nas áreas adjacentes.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2022/05735-8. Os autores agradecem às instituições pelo apoio prestado.

6. REFERÊNCIAS

- [1] K. E. Murray, A. A. Holland. Subsurface Fluid Injection in Oil and Gas Reservoirs and Wastewater Disposal Zones of the Midcontinent. In: AAPG Annual Convention and Exhibition, 2014, Houston, TX, USA. *Proceedings...*, pp. 1-15, 2014.
- [2] G. T. Beliveau et al. Assessment of ground deformation and seismicity associated to fluid injection and oil/gas extraction in the Argentinian Patagonia. *Research Square*, pp. 1-22, 2022.
- [3] A. F. Silva, J. M. G. Sotomayor and V. F. N. Torres. Correlations of geotechnical monitoring data in open pit slope back-analysis – A mine case study. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v. 121, n. 10, pp. 557-564, 2021.
- [4] J. C. Mura. *Geocodificação automática de imagens de radar de abertura sintética interferométrico: sistema Geo-InSAR*. 2000. 159 pp. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2000.
- [5] W. R. Paradella, J. C. Mura and F. F. Gama. *Monitoramento DInSAR para Mineração e Geotecnia*. 1.ed. São José dos Campos: Oficina de Textos, 160 pp. 2021.
- [6] W. R. Paradella et al. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. *Engineering Geology*, v. 193, pp. 61-78, 2015.
- [7] F. A. Temporim. *Monitoramento de deformações em superfície na mina de ferro NSE/Província Carajás por interferometria diferencial avançada com dados TerraSAR-X*. 2017. 156 pp. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2017.

- [8] W. R. Paradella et al. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 64, n. 6, pp. 797-811, 2012.
- [9] B. Hu, H. Li, X. Zhang and L. Fang. Oil and Gas Mining Deformation Monitoring and Assessments of Disaster: Using Interferometric Synthetic Aperture Radar Technology. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, v. 8, n. 2, pp. 108-134, 2020.
- [10] A. P. Crósta et al. Sensoriamento remoto em exploração mineral no Brasil. In: MELFI, A. J.; MISI, A.; CAMPOS, D. A.; CORDANI, U. G. (Ed.). *Recursos minerais no Brasil: problemas e desafios*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, Vale S.A., pp. 190-208, 2016.
- [11] A. Ferretti, C. Prati and F. Rocca. Permanent scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 39, n. 1, pp. 8-20, 2001.
- [12] A. P. A. Mendes et al. Produção de Petróleo Terrestre no Brasil. *BNDES*, v. 25, n. 49, pp. 215-264, 2019.
- [13] R. T. Bertani, I. G. Costa, R. M. D. Matos. Evolução tectono-sedimentar, estilo estrutural e hábitat do petróleo na Bacia Potiguar. In: RAJA GABAGLIA, G.P.; MILANI, E.J. (Coord.) *Origem e evolução de bacias sedimentares*. Rio de Janeiro: Petrobras. SEREC.CENSUD, pp. 291-310, 1990.
- [14] CPRM. Serviço Geológico do Brasil. *Carta Geológica da Folha Mossoró SB-24-X-D-I*, escala 1:100.000. 2011. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/17785>>. Acesso em: 29 ago. 2022.
- [15] C. O. Andrade Filho, D. F. Rossetti. Effectiveness of SRTM and ALOS-PALSAR data for identifying morphostructural lineaments in northeastern Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, v. 33, n. 4, pp. 1058-1077, 2012.