

Avaliação da Interferometria Diferencial (DInSAR), gerada com a Banda-P, na detecção e medição de movimentos do terreno nas margens do Rio Madeira, RO-AM

Carlos Tadeu de Carvalho Gamba¹
Daniel Seabra Nogueira Alves Albarelli¹
Pedro Rabello Crisma¹
Adalberto Aurelio Azevedo¹
Lucia de Fatima Silveira Dozzi¹
Karlus Alexander Camara de Macedo²
Dieter Lübeck²
Thiago Luiz Morais Barreto²
Leandro Matos²
João Bosco Nogueira Junior.³

¹ Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT
Av. Professor Almeida Prado, 532 - 05508-901 - São Paulo - SP, Brasil
{carlosgamba, dseabra, pcrisma}@ipt.br

² Bradar Sensoriamento Remoto - BRADAR
Av. Shishima Hifumi, 2911 - 12244-000 - São José dos Campos - SP, Brasil
{karlus.macedo, dieter.luebeck}@bradar.com.br

³ Santo Antônio Energia - SAE
UHE Santo Antônio - Margem esquerda, s/nº, Bloco 1 - 76805-812 - Porto Velho - RO, Brasil
joaobosco@santoantonioenergia.com.br

Abstract. This paper describes the performance of Differential Interferometry (DInSAR), generated from an interferometric SAR operating with P-Band, in detection and measurement of ground surface movements caused by erosive processes in the Madeira River (RO-AM). The study area is characterized by approximately 240 kilometers of riverbanks, beginning in the Santo Antônio Hydro Power Plant, located in the city of Porto Velho (Rondônia), and extends downstream to the city of Humaitá (Amazonas). The analysis methodology was established by comparing DInSAR time series with field observations obtained in 101 measurement sections. The results showed a positive performance of the DInSAR technology, indicating that of a total of 405 field measurements, in 83% of the samples, the technology was capable of pointing the same direction of vertical movement recorded in the field. In the case of the magnitude of the measurements, considering a margin of error of 6 cm, in 66% of the cases the interferometric SAR presented the same measurement obtained in the field. Notwithstanding satisfactory results, the technique is supposed to be improved by applying new developments in the differential data processing. In any case, considering the actual results, the technology presents already a great potential for application to monitoring movements of the terrain surface.

Palavras-chave: remote sensing, image processing, differential SAR interferometry, erosive processes sensoriamento remoto, processamento de imagens, interferometria diferencial SAR, processos erosivos.

1. Introdução

A Interferometria Diferencial (DInSAR) é uma técnica destinada à medição de pequenas oscilações da superfície terrestre, a partir de um conjunto de aquisições sucessivas de um Radar de Abertura Sintética (SAR). Esta tecnologia, que opera sobre as diferenças de fase entre duas ou mais aquisições feitas por um sensor SAR, começou a ser utilizada no final década de 1980 conforme se pode constatar no trabalho de Gabriel et al. (1989). Devido à sua capacidade de fornecer informações sobre grandes áreas, a DInSAR vem sendo avaliada como uma poderosa ferramenta para o monitoramento de movimentações do terreno em escala centimétrica a milimétrica. Experiências desenvolvidas por Werner et al. (2003), Lanari et al.

(2004), Ferretti et al. (2007), Perna et al. (2008), Crosetto et al. (2011) a partir de dados SAR gerados nas Bandas C e X, têm demonstrado este potencial.

No Brasil, entretanto, o uso desta tecnologia é mais recente. Os primeiros experimentos que envolvem a aplicação da técnica DInSAR remetem ao ano de 2011 quando um grupo de trabalho liderado por pesquisadores do INPE iniciou uma pesquisa voltada ao monitoramento da estabilidade de taludes e de deformações superficiais na Mina de Ferro de Carajás, utilizando dados do satélite TerraSAR-X. Apesar do sucesso na utilização deste recurso tecnológico, constatado nos trabalhos de Mura et al. (2015) e Paradella et al. (2015), a aquisição de dados por plataformas orbitais, operando nas Bandas C e X, pode apresentar algumas limitações em razão de interferências atmosféricas (Zebker et al., 1997) e, principalmente, devido à impossibilidade de se obter informações da superfície do terreno quando a área de interesse encontra-se coberta por vegetação.

Trabalhos experimentais utilizando plataformas aerotransportadas e radares de abertura sintética operando com as Bandas L e P têm se mostrado alternativas interessantes uma vez que são capazes de fornecer medições com alta resolução espacial, de terrenos cobertos por algum tipo de vegetação, superando assim as limitações da DInSAR quando obtida a partir de plataformas orbitais (Macedo et al., 2012; Jones et al., 2012). Por esta razão, estes produtos têm se tornado mais apropriados para medir processos erosivos e de sedimentação que ocorrem abaixo do dossel (Macedo e Wimmer, 2015).

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho da tecnologia DInSAR, gerada com um SAR aerotransportado operando com a Banda P, na detecção e quantificação de processos erosivos caracterizados basicamente pela movimentação vertical do terreno, a partir da análise e comparação dos dados obtidos pelo radar, com 101 seções de medição distribuídas em 5 blocos ao longo das margens do rio Madeira (Figura 1), num trecho de aproximadamente 240 quilômetros que se inicia no barramento da UHE Santo Antônio, no município de Porto Velho (Rondônia), e se estende para jusante, até o município de Humaitá (Amazonas).

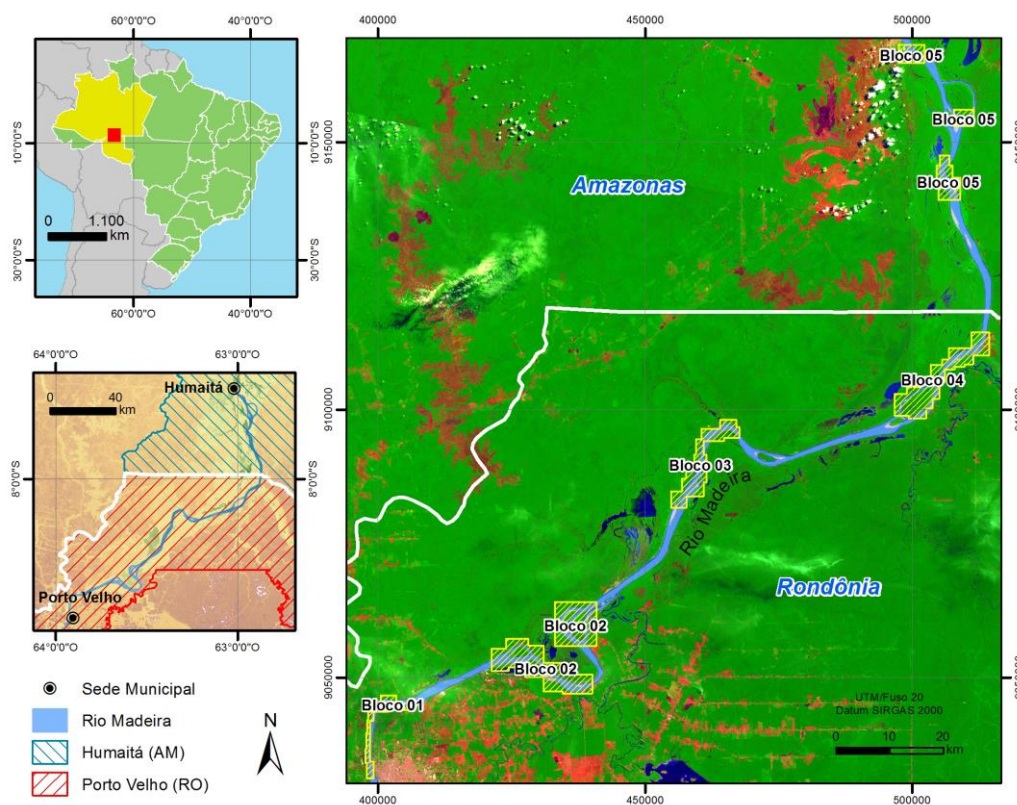


Figura 1. Localização (destaque em vermelho no mapa acima à esquerda) da área de estudo.

2. Metodologia

2.1 Aquisição e processamento dos dados DInSAR

A metodologia de medição de movimentação de terreno por radar baseada na técnica DInSAR, apresentada neste trabalho, consistiu em adquirir repetidamente, ao longo de 12 meses, dados SAR com linha de base efetiva de zero metros. Para isso, a plataforma aérea repetiu os voos com um desvio de visada de no máximo 5 metros e variação de *squint* de mais ou menos 2 graus, gerando dados SLC (*single-look complex*) com 1,5 metros de resolução espacial. Um sistema DGPS/INS foi utilizado para medir a posição das antenas, informação esta que posteriormente foi incorporada ao sistema durante o processamento SAR (Macedo e Scheiber, 2005, Macedo et al., 2012) para a compensar imprecisões do movimento da aeronave (PTA-MoCo).

Após a geração das imagens SAR, passou-se à etapa de processamento dos interferogramas (Figura 2) caracterizada, principalmente, pelo coregistro das imagens, pela filtragem da fase e pela remoção das componentes topográficas. A filtragem de fase visa a, essencialmente, reduzir o ruído nas informações obtidas pelo radar. Entretanto, neste processamento pode haver redução na resolução dos dados SAR em função da intensidade de filtragem aplicada. A fim de se obter a melhor relação possível entre filtragem e resolução, foi utilizada uma janela deslizante de 17 x 17 metros a partir de um filtro *boxcar*. Cabe ressaltar, no entanto, que filtros mais avançados podem ser utilizados com intuito de preservar a resolução espacial sem que haja perda na intensidade desejada no processo de filtragem.

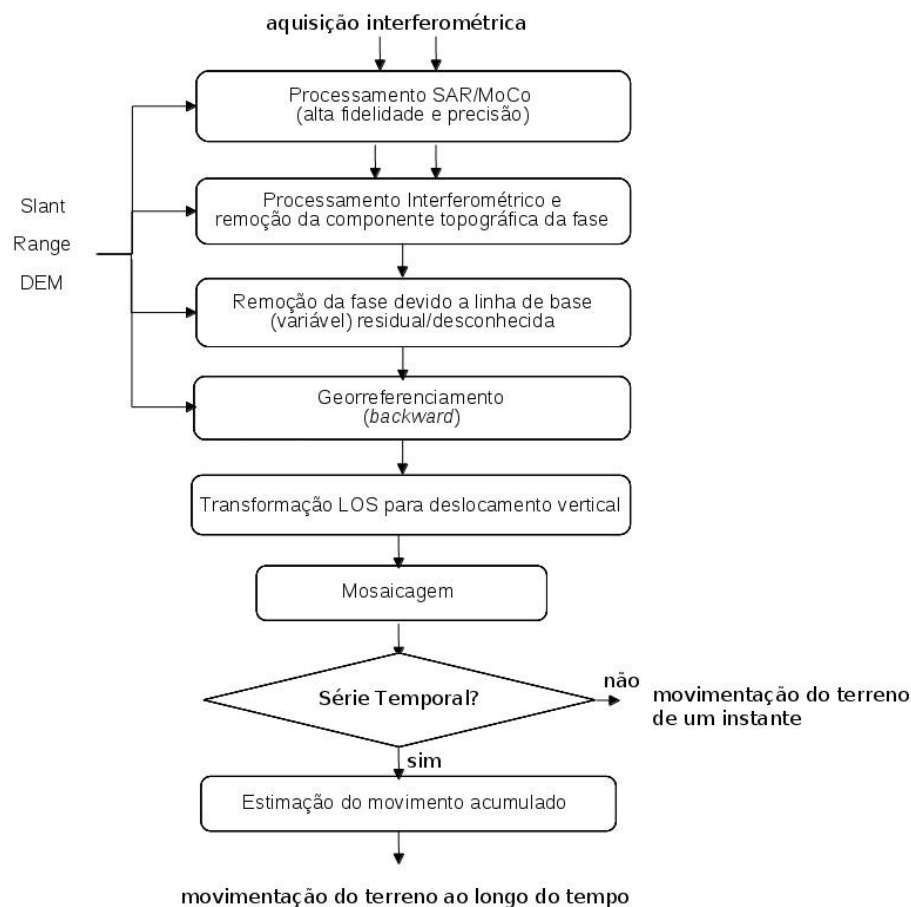


Figura 2. Fluxograma da metodologia de processamento dos dados SAR interferométricos.

Mesmo com a utilização de um sistema DGPS/INS de alta precisão, erros residuais de movimento da antena, da ordem de 10 a 15 cm, foram identificados nos interferogramas

gerados. Por conta disso foram implementadas técnicas de estimativa do movimento para reconstruir a trajetória da aeronave, ou a linha de base, e assim compensar as imperfeições neste movimento. A estimação e compensação da linha de base residual aplicada neste projeto foi a ZIBE (*Zero-baseline steered Interferogram Baseline Estimation*), que está descrita em Macedo et al. (2012). A etapa seguinte à compensação da linha de base residual foi consolidada com a geocodificação dos interferogramas e a conversão da fase, de radianos para metros, com a projeção do movimento de terreno para a direção pertinente no trabalho, no caso, a vertical.

Destaca-se por fim, que todo o processamento descrito teve como principal objetivo permitir que o sistema disponibilizasse uma série temporal com os dados de radar. De posse desta série foi possível estimar o movimento acumulado do terreno por meio da integração direta ou por um sistema redundante de interferogramas (Macedo e Wimmer, 2015; Macedo et al., 2016). Estes resultados permitiram que as informações obtidas fossem então comparadas com as leituras de campo.

2.2 Análise e validação de campo

Os sistemas fluviais são importantes agentes geomorfológicos. Além de funcionarem como canais de escoamento, exercem um forte controle sobre o transporte de sedimentos e condicionam sobremaneira a ação erosiva dos rios sobre o substrato geológico ao longo do tempo. Considerando que os rios são parte integrante do ciclo hidrológico, esta associação entre clima e geologia define um conjunto de processos peculiares que, quando modificado, é capaz de produzir sensíveis consequências ao meio físico em um espaço de tempo mais restrito. Caso específico da área de estudo, que se encontra dentro da zona de influência da UHE Santo Antônio.

Um fenômeno comum que potencializa os processos erosivos nas margens dos rios é a alteração dos gradientes hidráulicos causada pela oscilação do nível do freático durante os sucessivos ciclos de enchente e vazante do rio. Este movimento natural, que pode ser incrementado durante a operação de um reservatório, faz com que as margens estejam sujeitas ao aumento da pressão erosiva nas bordas do canal durante as cheias e ao aumento do escoamento tanto em superfície quanto em subsuperfície nas vazantes. Conjugados, estes processos podem intensificar o solapamento das margens, o que em muitos casos, pode representar a perda de terras ou o aumento dos riscos para edificações de comunidades ribeirinhas.

Uma das formas de se monitorar estes movimentos é através da instalação de estacas de madeira nas margens do canal fluvial. Esta técnica foi implementada com eficiência por Fernandez (1990) e Siqueira et al. (2013) no monitoramento de processos erosivos no Rio Paraná, em especial na área de influência do reservatório de Porto Primavera. Para monitorar a movimentação das margens do Rio Madeira, os procedimentos utilizados foram similares: a medição foi feita de modo direto, a partir da instalação de estacas de madeira em seções perpendiculares à margem do rio, com uma das estacas próxima à margem em trechos suscetíveis a movimentação (estaca de medição) e a outra deslocada a uma distância que variou entre 9 metros e 36 metros, em uma porção de solo considerada estável (estaca de referência).

Nas campanhas de campo, foram instaladas 202 estacas, distribuídas em 20 áreas de interesse, divididas em 5 blocos, totalizando 101 seções de medição. Em algumas áreas foram instalados marcos de concreto, além da segunda estaca, para auxiliar na posterior localização das mesmas, caso estas fossem perdidas e/ou removidas. A escolha destes locais de medição foi feita a partir de uma análise temporal de imagens dos satélites Landsat 5 e 8 para os anos de 2001, 2007 e 2014. Também foram utilizadas imagens de alta resolução (câmera HRC do satélite CBERS 2B e Google Earth) quando disponíveis.

O número de seções por área (de 3 até 6 seções), assim como o espaçamento entre elas (de 10 até 200 metros) variou conforme a homogeneidade do processo de solapamento das margens: quanto mais homogêneo o processo, menor o número de seções e maior o espaçamento entre elas.

As estacas foram identificadas a partir das informações dos respectivos blocos e áreas, sendo nomeadas com o prefixo P, quando utilizadas como referência e E, quando utilizadas para medição. O georreferenciamento delas foi feito utilizando-se um GNSS diferencial (Trimble Pro XRT), com correção da posição em tempo real por meio da rede OmniSTAR, o que proporcionou uma precisão planimétrica da ordem de 70 centímetros. Posteriormente, com o intuito de melhorar a acurácia dos posicionamentos, foi feita a correção dos arquivos GNSS com informações levantadas a partir de estações base da RBMC do IBGE localizadas em Porto Velho (RO) e Humaitá (AM), atribuindo uma precisão em torno de 40 cm aos dados planimétricos. O desnível altimétrico (ΔH) entre a estaca próxima à margem (E) e a estaca de referência (P), que caracterizou o processo e a magnitude da movimentação, foi estabelecido com precisão milimétrica por meio de medições efetuadas com um Nível Eletrônico Sprinter 250M da Leica Geosystems.

O monitoramento das áreas foi realizado entre os meses de agosto de 2015 e julho de 2016, totalizando o período de um ano. Apesar dos imageamentos serem realizados mês a mês, o intervalo entre uma medida de campo e a seguinte foi de dois meses. Ainda assim, em todas as campanhas, as atividades de medição foram executadas simultaneamente à aquisição dos dados DInSAR, considerando apenas uma pequena defasagem temporal em razão da velocidade com que as informações foram coletadas pela aeronave. Esta estratégia permitiu acompanhar os processos de movimentação das margens durante a evolução do ciclo de enchente e vazante do rio. As campanhas de campo (um total de 6) foram divididas em etapas de instalação (1ª) e etapas de medição (2ª a 6ª etapa). As medições coletadas foram tabuladas, revisadas e então comparadas com os dados da interferometria diferencial obtido pelo SAR.

3. Discussão dos resultados

As análises realizadas foram orientadas para detectar e quantificar as movimentações da superfície do terreno, comparando os resultados obtidos a partir da interferometria diferencial com as informações obtidas em campo. É importante ressaltar, entretanto, que a precisão dos dados DInSAR varia em função da banda de operação e do grau de correlação entre os retroespalhadores naturais durante as aquisições. Na Banda P, por exemplo, interferências causadas por mudanças de umidade podem provocar alterações no sinal resultante do radar, fazendo com que a coerência interferométrica caia para um coeficiente menor que 0,3 (considerando uma escala de valores entre 0 e 1). Este fator de correlação implica um desvio padrão da ordem de 3 cm. No entanto, a coerência temporal na banda P se mantém bem estável entre aquisições interferométricas – acima de 0,3 para mais de 80% da imagem. Para evitar a incorporação de resultados não confiáveis foi adotado um desvio padrão de 3 cm como margem de erro (que estima uma diferença da ordem de 6 cm) para as medidas produzidas pela DInSAR.

Também é importante destacar que as comparações entre os dados de campo e os do radar foram realizadas sobre as séries temporais obtidas com a técnica DInSAR. Por esta razão foram considerados apenas os valores acumulados quantificados a partir do instante inicial de monitoramento (T_0 , em agosto de 2015). Ainda que as movimentações do terreno sejam observadas mês a mês, a escolha desta estratégia teve como objetivo observar não só o crescimento desse movimento ao longo do tempo, mas também a sua tendência.

Num primeiro momento foi avaliado o desempenho do sensor SAR na indicação do sentido dos movimentos da superfície. Nesta análise foram consideradas as indicações positivas, dentro do desvio padrão, para os movimentos verticais de subida ou descida da superfície. Ou seja, foi considerado acerto quando o mesmo vetor de movimento foi constatado tanto no dado do radar quanto na medida de campo. Os resultados atestaram que de um total de 405 medidas efetuadas

para toda a série temporal, 83% das movimentações indicadas pela DInSAR foram iguais ao movimento constatado em campo. A segunda análise se concentrou na magnitude dos movimentos. Neste caso, foram considerados os movimentos identificados na mesma direção que se encontravam dentro da margem de erro, ou seja, do desvio padrão de 3 cm. Das 405 medidas efetuadas, verificou-se que 66% se encontravam dentro dos limites estabelecidos para o desvio padrão. Ou seja, mesmo que as medidas não apresentassem valores idênticos, a proximidade dos valores indicou acerto da DInSAR na magnitude do movimento.

No que diz respeito à magnitude é preciso, no entanto, considerar alguns aspectos. Nas comparações realizadas foi possível constatar que em alguns casos as diferenças entre as medidas obtidas em campo e aquelas obtidas pela DInSAR ficaram bem acima do desvio padrão considerado. Em certas situações foram superiores a 12 cm. Mesmo que tenha sido possível constatar um bom nível de acerto para as comparações globais, estas diferenças ainda devem ser investigadas até a conclusão deste estudo. Ainda assim, um aspecto positivo, que envolve a questão da magnitude das medidas, tem de ser ressaltado: a tendência do movimento.

Quando se compara a série histórica nas imagens DInSAR com os resultados das medições de campo, verifica-se que mesmo quando as medidas estão distantes, é possível observar, em vários exemplos, que o radar registra a mesma tendência do movimento observada em campo (Figura 3). Um dos motivos que pode ter relação direta com esta diferença na magnitude, diz respeito à filtragem executada com uma janela deslizante de 17 x 17 metros. De fato, no interior desta janela podem ocorrer eventos distintos daqueles ocorridos no local onde a estaca de medição foi instalada, sendo muito provável que tais eventos exerçam algum tipo de influência sobre os resultados da medição estimados pela técnica DInSAR. Estudos preliminares realizados com uma janela menor (5 x 5 metros) apresentaram melhor correlação entre as medidas de campo e do radar. Entretanto, o aumento do ruído ainda não permitiu que fossem estabelecidas conclusões definitivas a este respeito. Uma alternativa que vem sendo avaliada é a aplicação de um processo de filtragem mais robusto, uma vez que questões relacionadas às diferenças de magnitude podem também estar vinculadas à propagação do ruído ao longo da série temporal. Isto explicaria, em parte, o fato das diferenças aumentarem conforme o tempo avança.

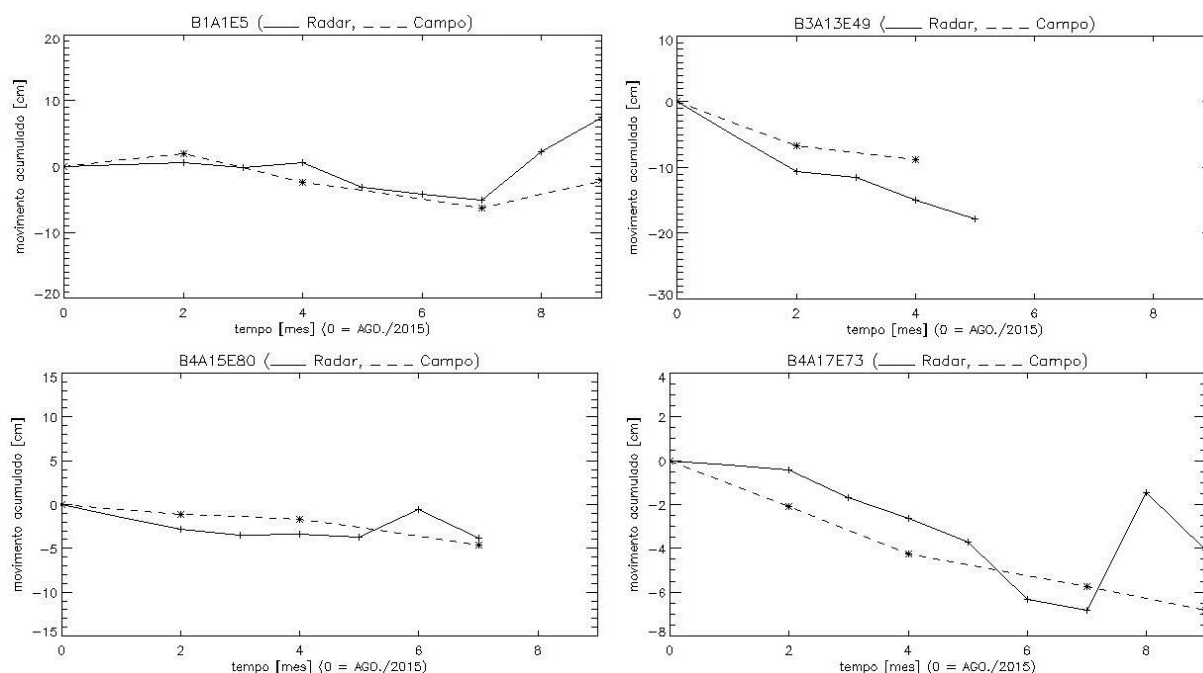


Figura 3. Comparações entre as medidas obtidas pela DInSAR e pelo trabalho de campo.

Por fim foram analisadas as movimentações ocorridas em áreas não monitoradas por seções ou, mesmo, naquelas onde as medições não foram feitas por conta da perda da estaca de medição. De maneira geral, constata-se que a tecnologia DInSAR apresenta resultados positivos nestas situações, pois na série histórica dos dados SAR também foi possível identificar os fenômenos de alteração das margens (Figura 4). Considerando que estas movimentações nas margens podem alcançar dimensões macrométricas, entende-se que o potencial de aplicação desta tecnologia pode ser incrementado se for possível conjugar no mesmo levantamento, a aquisição de outros produtos como modelos do terreno derivados da Banda-P e de superfície gerados em outros comprimentos de onda como a Banda-X, pois a detecção estes fenômenos também pode ser analisada por meio de imagens amplitude ou pela subtração entre modelos de elevação ou superfície.

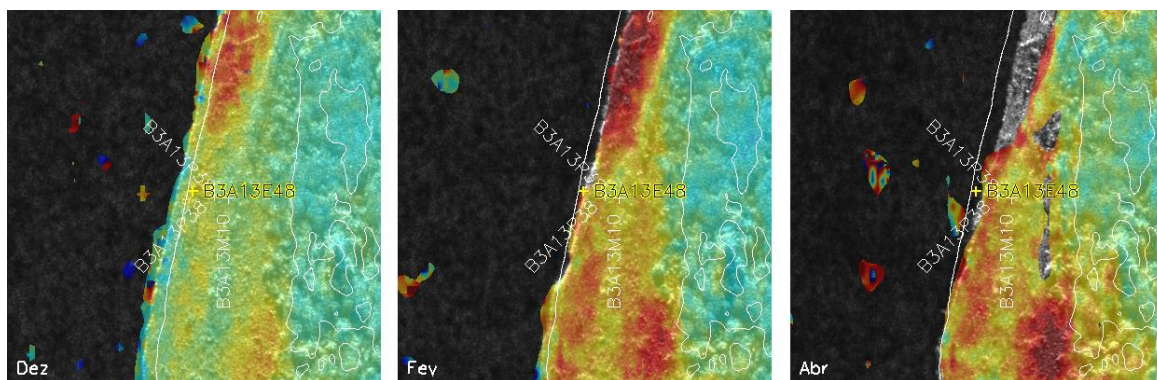


Figura 4. Imagens DInSAR sobrepostas a imagens amplitude (da Banda-X), com a variação temporal (meses de dezembro, fevereiro e abril) do movimento. As áreas com tons verdes indicam estabilidade enquanto que os tons amarelos e vermelhos indicam subsidência.

4. Conclusões

A análise do desempenho da DInSAR gerada a partir de um SAR interferométrico operando na Banda-P mostra que esta técnica, quando aplicada em um ambiente tropical úmido, coberto por vegetação arbórea e com alto potencial de movimentação, apresenta resultados altamente positivos. Em um universo de 405 medições realizadas em 101 seções de medição, que caracterizam situações de mobilidade distinta, obteve-se um acerto de 83% no sentido do movimento vertical obtido com a DInSAR em comparação com as medidas de campo e 66% de acerto na magnitude destas medidas dentro de um desvio padrão de 3 cm.

A dinâmica das margens, causada por processos erosivos de superfície e subsuperfície, fortemente controlados pelos ciclos de enchente e vazante do Rio Madeira, pôde ser constatada nas imagens DInSAR, tanto em locais onde foram realizadas as medições quanto naqueles onde a movimentações só foram observadas *in loco*. Entende-se que as conclusões a respeito das diferenças entre a magnitude das medidas obtidas em campo e pelo radar ao longo do tempo, ainda não são definitivas. Mesmo assim, foi possível concluir que os dados de radar são capazes de apontar, com eficiência, a tendência do movimento da superfície.

Considerando que métodos mais robustos de processamento podem melhorar a qualidade das informações geradas pela DInSAR, constata-se que esta tecnologia apresenta grande potencial para aplicação no monitoramento de processos erosivos em margens de rios em grande escala.

Referências bibliográficas

Crosetto, M.; Monserrat, O.; Cuevas, M.; Crippa, B. Spaceborne differential SAR interferometry: Data analysis tools for deformation measurement. **Remote Sensing**, v. 3, n. 2, p. 305-318, 2011.

Fernandez, O. V. Q. **Mudanças no canal fluvial do rio Paraná e processos de erosão nas margens. Região de Porto Rico, PR.** 1990. 86 p., 86p. Dissertação (Mestrado), IGCE/UNESP, Rio Claro, 1990.

Ferretti, A.; Savio, G.; Barzaghi, R.; Borghi, A.; Musazzi, S.; Novali, F.; Prati, C.; Rocca, F. Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 45, n. 5, p. 1142–1153, 2007.

Gabriel, A.K., Goldstein, R.M., Zebker, H.A., 1989. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. **Journal of Geophys. Research: Solid Earth**, v. 94, n. B7, p. 9183-9191, 1989.

Jones, C. E.; Bawden, G.; Deverel, S.; Dudas, J.; Hensley, S.; Yun, S. H. Study of movement and seepage along levees using DInSAR and the airborne UAVSAR instrument. In: SPIE Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 2012. Edinburgh, U.K., p. 85360E-85360E-8.

Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorquí, J.J., Berardino, P., Sansosti, E. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 42, n. 7, p. 1377-1386, 2004.

Macedo K. A. C.; Scheiber, R. Precise topography-and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 2, n. 2, p. 172-176, 2005.

Macedo K. A. C.; Wimmer, C.; Barreto, T. L.; Lubeck, D.; Moreira, J. R.; Rabaco, L. L. M.; Oliveira, W. J. Long-term airborne DInSAR measurements at X-and P-Bands: A case study on the application of surveying geohazard threats to pipelines. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 5, n. 3, p. 990-1005, 2012.

Macedo K. A. C.; Wimmer, C. Time series of airborne DInSAR data over the Amazon flooded vegetation: Water level changes. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2015 (IGARSS). Proceedings. 2015, Milan, Italy, p. 5252-5255.

Macedo K. A. C.; Barreto, T. L. M.; Matos L.; Lübeck, D.; Gamba, C. T. C.; Albarelli, D. S. N. A.; Crisma, P. R.; Azevedo, A. A.; Nogueira, J. B. P-Band DInSAR time series of river bank erosions: Preliminary results and comparisons with field measurements. In: ForestSAT 2016. 2016, Santiago, Chile, 2016.

Mura, J. C., Paradella, W. R., Gama, F. F., dos Santos, A. R., & Silva, G. G. Monitoramento de deformações de superfície em mina de ferro a céu aberto (N5W-Carajás) utilizando série temporal de Interferometria Diferencial SAR (DInSAR), baseado em dados do satélite TerraSAR-X. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 17, 2015, João Pessoa. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015, p. 911-918.

Paradella, W. R.; Ferretti, A.; Mura, J. C.; Colombo, D.; Gama, F. F.; Tamburini, A.; Santos, A. R.; Novali, F.; Galo, M.; Camargo, P. O.; Silva, A. Q.; Silva, G. G.; Silva, A.; Gomes, L. L. Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province (Amazon Region) using an integrated SAR analysis. **Engineering Geology**, v. 193, p. 61-78, 2015.

Perna, S., Wimmer, C., Moreira, J., Fornaro, G. X-band airborne differential interferometry: Results of the OrbiSAR campaign over the Perugia area. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 46, n. 2, p. 489-503, 2008.

Siqueira, A. G.; Azevedo, A. A.; de Souza, L. A. P.; Silva, M. Modificações fluviais à jusante de barragens. In: 14º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 14, 2013, Rio de Janeiro, Brasil, (s.n.).

Werner, C.; Wegmuller, U.; Strozzi, T.; Wiesmann, A. Interferometric point target analysis for deformation mapping. In: IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. (IGARSS). Proceedings. 2003, Toulouse, France, v. 7, p. 4362-4364.

Zebker, H. A.; Rosen, P. A.; Hensley, S. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 102, n. B4, p. 7547-7563, 1997.