

DETECÇÃO E MONITORAMENTO DE PROCESSOS EROSIVOS EM MARGENS DE RIOS UTILIZANDO-SE INTERFEROMETRIA DIFERENCIAL POR RADAR

J. B. Nogueira Jr.¹, L. Matos², R. A. S. Rosa², C. T. C. Gamba³, D. S. N. A. Albarelli³, P. R. Crisma³, A. A. Azevedo³, J. M. Lázaro², J. R. Moreira²

¹Santo Antônio Energia S.A., Brasil

²Bradard Indústria S.A., Brasil

³Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Brasil

Comissão IV - Sensoriamento Remoto, Fotogrametria e Interpretação de Imagens

RESUMO

Este trabalho apresenta a aplicação da interferometria diferencial, obtida a partir de um SAR (Radar de Abertura Sintética) aerotransportado, no monitoramento de processos erosivos no rio Madeira. Foram utilizados dados das margens, em um trecho de aproximadamente 240km, que se estende à jusante da barragem da UHE Santo Antônio, no município de Porto Velho (RO), até o município de Humaitá (AM). Para atingir os objetivos propostos foram utilizadas séries temporais, adquiridas entre os meses de agosto de 2015 e julho de 2016, de dados DInSAR na banda P e de única passagem na banda X. Paralelamente, foram realizadas medidas em campo com o intuito de comparar os resultados obtidos com o SAR aerotransportado e validar a metodologia proposta. São aqui descritas a metodologia de processamento de dados, que inclui a técnica DinSAR, e da diferença entre modelos digitais de superfície (DSM), além das análises das séries temporais.

Palavras chave: Erosão Fluvial, Interferometria Diferencial, Processamento de Imagens SAR

ABSTRACT

This paper presents the application of differential interferometry, obtained from an airborne SAR (Synthetic Aperture Radar), in the erosive processes monitoring in the Madeira River. Margin data were used in a stretch of approximately 240km, extending downstream of the Santo Antônio HPP dam, in the municipality of Porto Velho (RO), to the municipality of Humaitá (AM). To reach the proposed objectives, time series, acquired between August 2015 and July 2016, were used for DInSAR data in the P-band and single-pass in the X-band. In parallel, field measurements were carried out to compare results obtained with airborne SAR and to validate the proposed methodology. The data processing methodology, which includes the DinSAR technique, and the difference between digital surface models (DSM), and the time series analysis are described here.

Keywords: River Erosion, Differential Interferometry, SAR Image Processing

1- INTRODUÇÃO

A interferometria diferencial de radar de abertura sintética (DinSAR) e a análise de séries temporais são técnicas já estabelecidas há alguns anos e vem sendo aplicadas com sucesso no sensoriamento remoto com sensores orbitais, para a medição de variações da altura do terreno. Recentemente foi demonstrado que a DInSAR, obtida a partir de plataformas aerotransportadas com sensores que operam na bandas L e P, é capaz de gerar ao longo do tempo, medidas coerentes e com alta resolução espacial, em regiões cobertas por vegetação densa

sem as limitações do DInSAR orbital (Macedo et al., 2012; Macedo e Wimmer, 2015). A possibilidade de se obter medidas com acurácia centimétrica e coerência temporal, com as bandas L e P, faz com que a utilização da DInSAR se mostre vantajosa para monitorar processos físicos como a erosão e a sedimentação em áreas de florestas (Delbridge et al., 2015) e o deslizamentos de terras (Jones et al., 2012). Este artigo descreve as metodologias de aquisição e de processamento de dados de radar desenvolvidas para gerar a primeira série temporal de processos geodinâmicos ao longo das margens de um rio em

áreas da Bacia Amazônica cobertas por florestas. A aquisição dos dados consistiu de 11 passagens com o sistema aerotransportado OrbisAR, da Bradar, entre os meses de agosto de 2015 até julho de 2016. O trecho escolhido compreende uma faixa marginal que se estende por aproximadamente 240km ao longo do rio Madeira em direção à jusante, a partir da barragem da UHE Santo Antônio, no município de Porto Velho (RO), até o município de Humaitá (AM). Para que a interferometria seja realizada é necessário a obtenção de um par de dados da mesma cena, da mesma forma que são os pares estereoscópicos. Neste trabalho, os pares de dados SAR interferométricos na banda P foram adquiridos a partir de duas passagens, ou seja, em dois sobrevoos, com o avião realizando a mesma linha de voo. Já os pares de dados SAR interferométricos na banda X foram adquiridos em uma única passagem. Ambas as aquisições ocorreram mensalmente durante o período de um ano, cobrindo exatamente a mesma área. Após a aquisição dos dados, modelos digitais de elevação (DSM) multitemporais foram gerados e a técnica DInSAR foi aplicada para geração de séries temporais com os dados da banda P. Devido à sua capacidade de atravessar a vegetação, foi possível, com esta banda, obter informações do terreno abaixo da floresta. No caso específico da DInSAR, desvios residuais decimétricos entre as linhas de voo planejada e real foram compensados para estimar uma movimentação do terreno e garantir uma acurácia da ordem de 3cm (Macedo et al., 2012). O principal objetivo deste trabalho foi avaliar o potencial da interferometria diferencial obtida por um radar de abertura sintética (SAR) para o monitoramento de processos erosivos e de sedimentação, nas margens do canal fluvial do rio Madeira. Para a aplicação desta técnica optou-se por dois caminhos distintos: o primeiro deles, orientado a descobrir como movimentos centimétricos do terreno, que estejam associados a processos erosivos ao longo das margens do rio, podem ser identificados e mensurados a partir de dados de interferometria diferencial SAR (DInSAR) obtidos com a banda P do radar; o segundo, a partir da geração de séries temporais de modelos digitais de superfície (DSM) com o objetivo de identificar mudanças abruptas ao longo das margens do rio, que ocorrem em escala macrométrica, principalmente aquelas associadas ao solapamento das margens fluviais. Paralelamente à aquisição dos dados interferométricos, foram realizadas campanhas em campo, cujos objetivos principais eram entender a dinâmica dos processos geomorfológicos ocorridos e obter verdades de campo dos movimentos da superfície associados a algum processo erosivo. Posteriormente, estas medições feitas em campo foram comparadas com aquelas obtidas a partir da técnica DInSAR na banda P, conforme a metodologia proposta, com o objetivo de avaliar e validar os resultados alcançados.

2- METODOLOGIA

2.1- Aquisição de Dados SAR

O primeiro passo para a aplicação da técnica DInSAR consistiu na realização de 11 voos de coleta de dados num período de 12 meses. Este período corresponde a um ciclo hidrológico que engloba períodos de seca e chuva, enchente e vazante das águas do rio. Para garantir um nível de qualidade no estudo da técnica DInSAR, foi necessário a obtenção de uma sequência multitemporal da análise dos processos erosivos, evitando assim que a técnica DInSAR fosse rejeitada por falta de um número suficiente de dados coletados. Outra particularidade da aquisição de dados SAR diz respeito à dinâmica dos processos: como se trata da detecção de mudanças de magnitude centimétrica, intervalos de coleta muito longos poderiam acarretar em medidas cujas magnitudes superam àquelas estabelecida no escopo do projeto (i.e., mm). Desse modo, com a restrição da repetição dos voos de coleta a intervalos próximos a um mês eliminou-se este risco. O primeiro voo de coleta de dados com sistema OrbisAR, denominado de etapa de mapeamento, foi realizado antes das medições, em um período curto de tempo onde não houve ocorrência de movimentação de terreno, e requisitou uma maior cobertura de linhas de voo do que os voos subsequentes. Nele, a interferometria das bandas P e X foi utilizada para gerar um mapeamento topográfico e se obter as imagens de amplitude, os modelos digitais de terreno (DTM) e de superfície (DSM). Enquanto o DSM, gerado a partir dos dados da banda X, possui os valores de altura de tudo que esteja presente na superfície, o DTM, gerado a partir dos dados de banda P, refere-se a valores de altura do terreno que se encontram, inclusive, abaixo da vegetação. A aquisição do DTM, além de fornecer informações sobre o terreno, teve como objetivo principal gerar um conjunto de dados necessários à execução da filtragem da componente topográfica da fase. Em outras palavras, foi gerado para separar perfeitamente os dados provenientes do terreno dos dados provenientes de mudanças ocorridas neste terreno, garantindo assim a precisão desejada durante o processamento dos dados SAR, essencialmente aqueles destinados à aplicação da técnica DInSAR. Esse DTM também permitiu realizar, em complemento com a técnica DInSAR, a diferença entre os modelos digitais de superfície (DSM) gerados em banda X. A motivação para a obtenção da diferença entre os DSMs gerados foi a possibilidade de se detectar mudanças onde o volume erodido produz alterações significativas no terreno como, por exemplo, em casos de desbarrancamento e onde, conseqüentemente, ocorre perda de coerência na fase interferométrica, ou seja, quando as mudanças são tamanhas que impossibilitam a medição por meio da DInSAR. A diferença entre os modelos permite a obtenção da mudança na topografia do terreno pela simples comparação entre modelos topográficos sem depender da coerência temporal. Com a combinação entre DInSAR e diferença entre DSMs foi possível detectar e quantificar fenômenos

geodinâmicos com diferentes ordens de grandeza. As séries temporais foram obtidas a partir de um número maior de aquisições (long-term interferogram) e foram realizadas após o voo de mapeamento, em um momento onde os eventos de movimentação do terreno passaram a ser factíveis. Essas aquisições sucessivas conhecidas com long-term permitem a análise temporal dos dados DInSAR, viabilizando o modelamento e a validação das medidas.

2.2- Série Temporal de DSMs

A série temporal das diferenças entre os modelos digitais de superfície (DSM) gerados com a banda X foi realizada a partir do cálculo da diferença entre o primeiro DSM, obtido em agosto de 2015, e os demais, coletados mês a mês até julho de 2016. Ela fornece uma informação quantitativa sobre as mudanças topográficas ocorridas na superfície. A acurácia dessa detecção é estimada em 2m, considerando-se que o RMSE (*root mean square error*) de cada DSM é de 1m. As mudanças no DSM podem, por exemplo, estar associadas a desmatamentos, crescimento da vegetação, perda ou ganho de volumes consideráveis de terra. A hipótese levantada neste trabalho é de que essas mudanças no DSM, ao longo das margens do rio, estejam, em sua maioria, associadas a desbarrancamentos ou a processos de sedimentação. Em razão destes processos erosivos de grande magnitude, associados ao canal fluvial, caracterizarem-se por movimentações abruptas e incoerentes do terreno, a técnica DInSAR não é capaz de fornecer informações confiáveis deste tipo de evento. Entretanto, as diferenças entre os DSMs quando utilizadas como informações complementares ao DInSAR, podem ajudar na determinação, compreensão e identificação de eventos erosivos ou de outros processos geodinâmicos.

2.3- Série Temporal DInSAR

Os dados SAR na banda P foram adquiridos em linhas de voo com altíssimo rigor de posicionamento. A posição da aeronave foi corrigida em tempo-real com a ajuda de um sistema GPS/INS (Sistema de Navegação Inercial) a bordo. Já a posição e a altitude das antenas do radar, durante o voo, foram determinadas pelo sistema IMU/DGPS (Unidade de Medição Inercial e o GPS Diferencial). Este sistema pós-processado é capaz de garantir uma precisão rotacional de 0,1 grau e uma precisão translacional na ordem de 1,0 decímetro. Mesmo assim, devido principalmente às condições atmosféricas, é impossível que o avião voe em uma linha reta perfeita. Por isso, o processamento dos dados SAR foi realizado com dois tipos de compensações de movimento: uma Compensação de Movimento padrão (MoCo); e uma compensação de movimento dependente de topografia precisa e da abertura da

antena (PTA-MoCo). Posteriormente, foi implementado um correjistro entre as duas aquisições, da ordem de sub-píxels, para colocá-las exatamente sob a mesma geometria, com a ajuda de um modelo de elevação proveniente do mesmo sistema radar nos quais os dados foram adquiridos. Após esta etapa foi aplicada uma filtragem para diminuição de ruído e uma compensação de erros residuais do posicionamento das antenas. Como isso, os modelos de elevação não apresentam nenhuma ondulação significativa (Macedo et al., 2012). A série temporal utilizada foi obtida apenas a partir dos interferogramas provenientes de aquisições sucessivas, determinando-se o movimento acumulado do terreno (Macedo e Wimmer, 2015). Sabendo-se que pode ocorrer perda de coerência ao longo do tempo, entre uma aquisição de dados e outra, aplica-se também uma filtragem simples que consiste na repetição do último valor de fase da série que possua a coerência maior que um determinado limiar. Com isso é sempre possível continuar o processo e acompanhar a tendência dos movimentos. Todas as aquisições foram realizadas com um único ângulo de visada. Entretanto, derivou-se o deslocamento do vetor ascendente supondo que os movimentos do terreno estejam principalmente na direção vertical.

2.4- Trabalho de Campo

Para as medições de movimentação do terreno em campo foram instaladas 202 estacas, distribuídas em 20 áreas de interesse, divididas em 5 blocos, totalizando um montante de 101 seções de medição. Os pontos de medição foram escolhidos com base na análise da dinâmica fluvial observada, em imagens aéreas do Google Earth® e dos satélites Landsat 5 e 8 nos anos de 2001, 2007 e 2014. Áreas suscetíveis a erosão foram escolhidas tanto na margem direita quanto na esquerda do rio. As estacas, feitas de madeira, foram instaladas em pares, perpendicularmente às margens. Em algumas seções foram instalados marcos de concreto, além da segunda estaca, para auxiliar na posterior localização das mesmas, caso fossem perdidas e/ou removidas. Cada par foi organizado com uma estaca de madeira para a medição (chamada E), colocada próxima à margem, e outra que serviu de referência (chamada P) e foi instalada a uma distância de 15 a 25m para além da estaca de medição, em um terreno mais estável. O georreferenciamento das estacas 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 70cm. Posteriormente, com o intuito de melhorar a acurácia dos posicionamentos obtidos, os arquivos GNSS foram corrigidos com informações levantadas a partir de estações base da RBMC do IBGE localizadas em Porto Velho (RO) e Humaitá (AM) atribuindo uma melhor precisão, em torno de 40cm, aos dados planimétricos. A diferença

de elevação (ΔH) entre a estaca de referência e a estaca de medição, que forneceu a variação do movimento, foi obtida com um aparelho topográfico eletrônico de precisão milimétrica em cada uma das campanhas de campo que, ao contrário dos voos de aquisição, teve um intervalo de 2 meses entre uma medida e outra. Entretanto, em ambos os casos, o monitoramento cobriu o período de um ano. Também foram obtidas as modificações planimétricas das margens do rio devido à dinâmica fluvial. Neste caso, as informações foram registradas a partir de caminhamentos nas linhas de margem, com extensão variável de 20 a 200m, utilizando-se o mesmo equipamento GNSS durante as campanhas de campo. A finalidade principal desta atividade foi identificar e quantificar a perda de terreno nas margens.

3- RESULTADOS

A análise foi direcionada a pequenas regiões de interesse (ROIs) de 400m x 400m, que encobrem toda a extensão da maioria dos movimentos ocorridos. A Figura 1 mostra a série temporal das medições DinSAR de um ROI, onde as campanhas de campo foram realizadas. As imagens DinSAR estão sobrepostas às imagens amplitude SAR geradas na banda X e às curvas de nível geradas a partir do modelo digital de superfície (DSM) da banda X gerado neste trabalho, ambos obtidos pelo mesmo sensor aerotransportado durante as campanhas de voo. A localização das medidas de campo está indicada pela denominação B5A19E94, e posicionada na latitude 7°39'18,59"S e longitude 62°54'37,57"W. Essas medidas são relativas a agosto de 2015, e possuem referência zero. As primeiras aquisições de radar com movimentos acumulados de terreno começaram em outubro de 2015 e foram até julho de 2016. O nível d'água alcançou seu máximo em março, como mostram as observações em campo. Tanto o DinSAR quanto as medidas de campo mostram que o terreno está movendo-se para baixo. Esta é uma indicação de que um possível processo de erosão esteja acontecendo. De acordo com as imagens DinSAR os movimentos ganharam velocidade entre janeiro e março de 2016. A série temporal de DSMs revela uma significativa variação de 5m nesse ponto, justamente durante um intervalo em que houve perda de coerência, confirmando assim a possibilidade de detectar esse tipo de fenômeno utilizando o DSM. Finalmente, de maneira a avaliar e validar a aplicação da tecnologia DinSAR na medição de movimentos da superfície, os dados radar obtidos a partir do processamento interferométrico foram comparados com as medições e observações feitas em campo. Num primeiro momento, foi avaliado o desempenho do sensor SAR apenas na indicação de 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 durante todas as campanhas de campo, 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 3cm. 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.

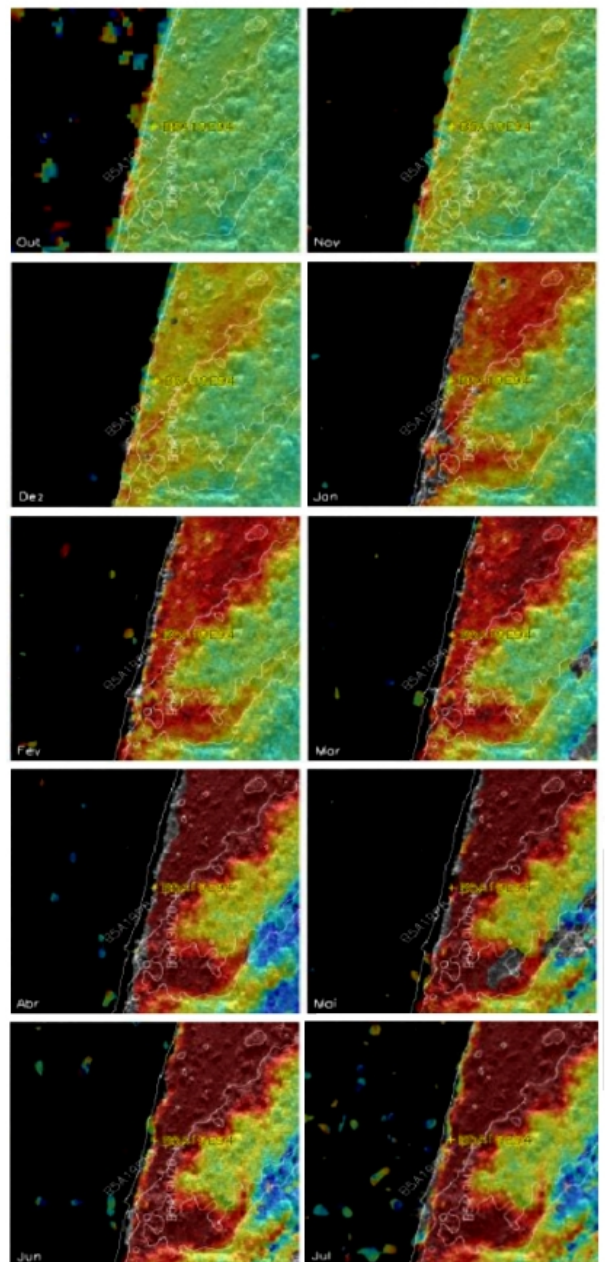


Fig. 1 – Sequência de imagens apresentando a série temporal obtida com a técnica DinSAR

Uma terceira análise estatística foi realizada com o intuito de verificar o grau de correlação entre as medidas estimadas com o radar pela técnica DInSAR e as medidas obtidas em campo e apontaram um grau de um fator de relação de 0,31. Apesar desse valor baixo, ainda assim é possível concluir que existe uma correlação entre as duas medições. Entre as razões que podem ser elencadas para explicar essa correlação entre as medidas e a diminuição do acerto (em torno de 66%) em relação às magnitudes, podem ser citadas: (1) As medidas de campo são pontuais, enquanto que o radar mede a média dos movimentos em uma célula de resolução de 17m x 17m. (2) Em campo, foram medidos os movimentos verticais e os movimentos planimétricos relativos às linhas de margem do rio, os quais geralmente são orientados no plano leste-oeste, enquanto que o radar realiza medições somente na direção de visada direta entre o terreno e o avião (inclinação em relação à horizontal), que é afetada tanto pelos movimentos horizontais quanto pelos verticais, dentro do plano norte-sul. (3) Em alguns casos, foram identificados movimentos nas áreas onde se localizavam as estacas de referência para as medidas de campo, assumidas neste trabalho como estáveis, como revelado pelas imagens DinSAR da Figura 1. Nesses casos, as medidas de campo provavelmente devem estar subestimando os movimentos. (4) É importante citar também fontes externas de interferência nas medidas do radar, como por exemplo a umidade do solo; até hoje, ainda não existe uma compreensão total do grau de interferência da umidade do solo nas medidas DinSAR (Zwieback et al., 2015). Contudo, de maneira geral, constata-se que a tecnologia DInSAR apresenta resultados positivos em várias situações, principalmente quando se analisa a série histórica dos dados SAR onde é possível identificar os fenômenos de alteração das margens. Apesar de não ter havido uma quantificação para essas alterações da margem, em todos os casos foi possível observar este fenômeno nas séries temporais geradas pelo radar.

4- CONCLUSÕES

Conclui-se que os dados DInSAR gerados a partir de um radar SAR interferométrico aerotransportado operando na banda P são suficientemente sensíveis e precisos para detectar e monitorar movimentos do terreno ao longo das margens de rios, como os causados por processos erosivos, mesmo em um ambiente tropical úmido, coberto por vegetação arbórea e com alto potencial de movimentação. Em um universo de 405 medições realizadas em 101 seções de medição, que caracterizam situações de mobilidade distintas, obteve-se um acerto

de 83% no sentido do movimento vertical obtido com a técnica DInSAR em comparação com as medidas de campo e 66% de acerto na magnitude destas medidas dentro de um desvio padrão de 3cm. Esta única comparação entre esse conjunto de dados DInSAR e os dados de campo permitiu conhecer a acurácia e as fontes de interferência dos movimentos detectados com a banda P em áreas de floresta densa. O uso dos DSMs (modelos digitais de superfície), assim como dos DTMs (modelos digitais de terreno), que constituem uma importante referência topográfica, também demonstrou um alto potencial de aplicação. Entende-se que as conclusões a respeito das diferenças entre a magnitude das medidas obtidas em campo e aquelas estimadas pelo radar, bem como a correlação entre as mesmas, carecem de aprofundamento. Melhorias adicionais à cadeia de processamento, como a geração de redes de redundância de interferogramas e filtros de maior resolução espacial estão sendo implementadas. Pretende-se também analisar conjuntamente os dados DInSAR e DSMs, com a finalidade de compreender e classificar os processos de erosão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Delbridge, B.; Bürgmann, R.; Fielding, E. e Hensley, S., 2015. Kinematics of slump/gullion landslide from UAVSAR derived interferograms, em IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milão, Itália, pp. 3842-3845.
- Jones, C.E.; Bawden, G.; Deverel, S.; Dudas, J.; Hensley, S. e Yun, S.H., 2012. Study of movement and seepage along levees using DinSAR and the airborne UAVSAR instrument, em Proceedings of SPIE Remote Sensing, Edimburgo, Escócia, pp. 85360E-1.
- Macedo, K.A.C.; Wimmer, C.; Barreto, T.L.M.; Lübeck, D.; Moreira, J.R. e Oliveira, J.W., 2012. 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, Vol. 5, Nº 3, pp.990-1005.
- Macedo, K.A.C. e Wimmer, C., 2015. Time series of airborne DinSAR data over the Amazon flooded vegetation: water level changes, em IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milão, Itália, pp. 5252-5255.
- Zwieback, S.; Hensley, S. e Hajnsek, I., 2015. Assessment of soil moisture effects on L-band radar interferometry. Remote Sensing of Environment, Vol. 164, Nº 11, pp.77-89.