

# Medidas espaciais

Monitoramento por satélite auxilia as operações em lavras a céu aberto tornando mais segura a exploração de minérios

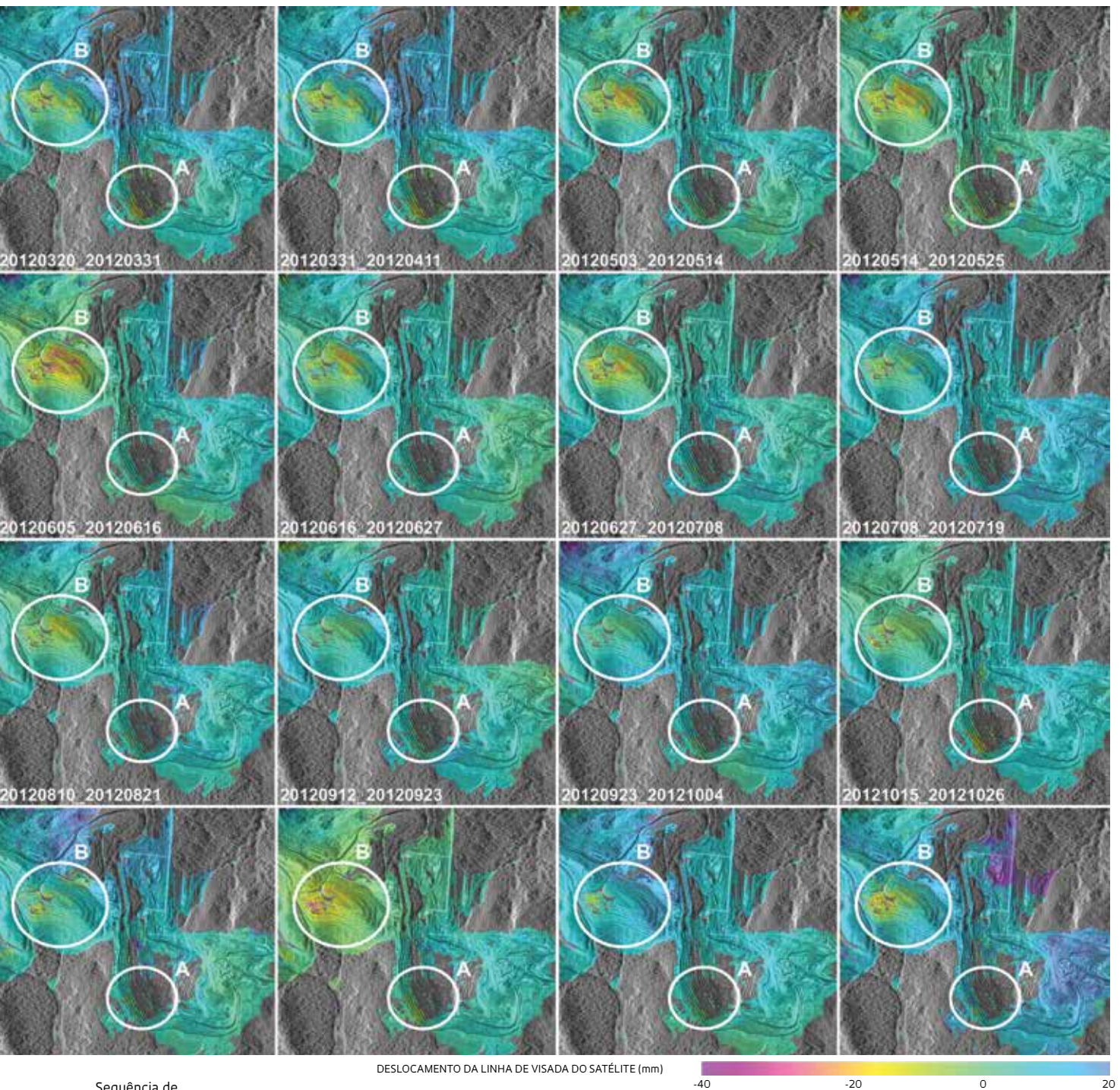
Yuri Vasconcelos

**A** mineração é uma atividade complexa que envolve riscos variados. Um dos mais preocupantes está associado à ruptura dos taludes, que são as encostas que formam o limite lateral das minas a céu aberto, aquelas em que há escavação abaixo da superfície do terreno. Quando esses íngremes paredões, de até 15 metros de altura, cedem, a mina pode sofrer um desmoronamento, colocando em risco a vida de trabalhadores, causando prejuízos materiais e interrompendo as operações no local. Para evitar que tais acidentes ocorram, taludes que apresentam trincas, rachaduras ou algum tipo de movimentação de terra são monitorados de perto por radares e outros equipamentos em terra. Em breve, uma nova tecnologia, baseada na aquisição de imagens de satélites, poderá ajudar a fazer um monitoramento preditivo dos taludes, tornando a exploração mineral no país mais segura.

A inovação é resultado de um projeto de pesquisa desenvolvido no âmbito de um convênio firmado pela empresa Vale, a FAPESP, a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Ge-

rais (Fapemig) e a Fundação Amazônia Paraense (Fapespa). Iniciado em 2012, o projeto tem o objetivo de fazer a detecção e o monitoramento de estabilidade de taludes e de deformações superficiais nas minas de ferro a céu aberto da Vale no Complexo Minerador de Carajás, no Pará, com auxílio de um método avançado e inédito no Brasil, a interferometria diferencial de imagens de radar. Por essa técnica, conhecida simplesmente pela sigla DInSAR (do inglês Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), imagens de alta definição coletadas por satélites fornecem informações que permitem a detecção milimétrica de deslocamentos de terreno dos taludes e das demais estruturas que compõem o complexo minerador, como rampas de acesso, pilhas de disposição de estéril (material não aproveitado), correias transportadoras, barragens, estradas e ferrovias, entre outras.

“A maior novidade do projeto, finalizado no mês de dezembro passado, foi mostrar que a tecnologia espacial DInSAR pode ser utilizada no monitoramento de condições de estabilidade em minas



Sequência de imagens de satélite de Carajás mostra deformações em milímetros, conforme barra de cores, em taludes e pilhas de material não aproveitado nos círculos A e B ao longo de um ano

ativas a céu aberto, fornecendo medidas precisas de deslocamento na superfície de estruturas mineiras e associadas”, afirma o geólogo Waldir Renato Paradella, pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe) e coordenador do projeto FAPESP-Vale. “Essa técnica tem sido usada em outros países para monitoramento de condições de deformações em reservatórios de óleo e gás em terra e de obras de engenharia urbana, como abertura de túneis e construção de metrô. Por exemplo, na Itália, radares orbitais fornecem informações que ajudam no monitoramento de terremotos. A

pesquisa em Carajás foi o primeiro teste em mina ativa a céu aberto em condições tropicais úmidas.”

Ao longo do projeto, a técnica mostrou-se eficiente ao confirmar a ocorrência de deformações detectadas pelo corpo geotécnico da Vale na mina N5W, uma das três a céu aberto que fazem parte do Complexo de Minas de Ferro de Carajás. Por meio da tecnologia DInSAR foi possível avaliar quantitativamente as trincas na rampa de acesso à mina e as fraturas em faces de talude, além da abrangência espacial. “Essa nova tecnologia é uma ferramenta preditiva com elevado grau de confia-

bilidade. Nosso interesse é incorporá-la no futuro às nossas operações e usá-la no monitoramento contínuo de áreas de interesse”, destaca o geólogo Luciano Mozer Assis, da Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos da Vale. Segundo ele, o uso de imagens de radar de abertura sintética (em inglês Synthetic Aperture Radar ou SAR) a bordo de satélite traz vantagens em relação às técnicas comuns porque elas abrangem grandes áreas, são adquiridas sob condição de cobertura de nuvens e durante o período noturno.

**D**urante a aquisição de uma imagem, a antena de um radar SAR, instalado em um satélite orbital, emite milhões de pulsos de ondas eletromagnéticas em direção ao solo. Quando o campo elétrico irradiado interage com o alvo no terreno, parte do sinal é refletida e captada pela antena. Por meio de técnicas de processamento, duas propriedades fundamentais desse sinal retroespelhado são analisadas: a amplitude e a fase. A amplitude indica quanto o alvo reflete da iluminação, enquanto a fase mostra quão distante o alvo se encontra da antena. A fase, portanto, revela a distância do sensor radar para determinado ponto imageado do terreno. A interferometria SAR utiliza as medidas de mudança de fase do sinal entre duas imagens adquiridas sobre a mesma área em tempos diferentes. A diferença de fase entre um par de imagens recebe o nome de interferograma.

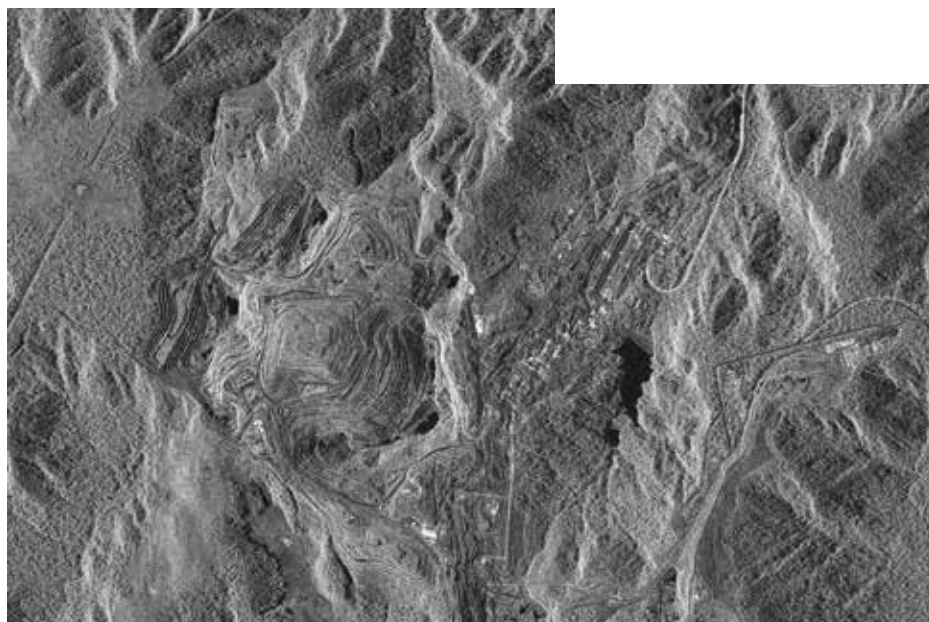
“Quando um alvo no terreno apresenta movimentação entre dois imageamentos, a distância entre o sensor radar e o alvo se altera, o que é expresso por uma diferença de fase. Quando essa diferença é relacionada a um ponto localizado em um talude de mina, provavelmente indica que um deslocamento ocorreu no local”, explica Paradella. A presença de nuvens, umidade e poluição não causa interferências significativas na captação dos sinais, mas a precisão das medições pode ser afetada por atrasos do sinal até atingir o solo. Esses atrasos estão normalmente associados ao comportamento da troposfera, a camada mais baixa da atmosfera terrestre. “Esses ‘ruídos’ são corrigidos pela técnica PSI [sigla de Persistent Scatterer Interferometry], desenvolvida por cientistas da Universidade Politécnica de Milão e patenteada pela empresa italiana TRE como modelagem PSInSAR”, diz Paradella. Para execução do trabalho, os cientistas trabalharam com 33 imagens das minas de Carajás geradas pelo satélite alemão TerraSAR-X, que orbita a Terra

numa altitude de 514 quilômetros e passa sobre o território brasileiro a cada onze dias. Caso o intervalo entre as aquisições fosse em um tempo menor, maiores seriam as chances de detectar deformações no terreno. Em função dos bons resultados alcançados com o estudo, a Vale já planeja colocar em campo um novo projeto, agora direcionado às minas do Quadrilátero Ferrífero, situadas em Minas Gerais. Desta vez, serão utilizados dados combinados de dois satélites, o TerraSAR-X e o italiano Cosmo-Skymed. “Do ponto de vista metodológico, a pesquisa no Quadrilátero Ferrífero, com duração prevista de dois anos, vai complementar a de Carajás. Hoje, com o sistema Cosmo-Skymed, o tempo de revista da mina cairia para oito dias”, diz Paradella. Com o uso de outros futuros satélites, a tendência é que o período de aquisição de dados seja cada vez menor, melhorando a capacidade de detectar deformações em um tempo mais curto.

A Vale planeja empregar a técnica DInSAR juntamente com radares de campo e de estações totais com prismas refletivos, os dois métodos convencionais de levantamento e monitoramento geotécnico hoje em uso em suas minas. “Nossa ideia é que o método que utiliza informações de satélites venha a se somar às técnicas convencionais de campo. Ele será

## O método que usa satélites vai se somar às técnicas de monitoração utilizadas em solo nas minas

Imagem do satélite TerraSAR-X de Carajás, em março de 2012, mostra as minas em traços finos e paralelos e uma barragem no ponto escuro de maior tamanho



# Mina sob pulsos

Como funciona a tecnologia de monitoramento por imagem de sensores espaciais

## 1 SOBREVÃO

Ao sobrevoar as minas a céu aberto, o radar de abertura sintética (SAR) instalado em um satélite espacial envia milhões de pulsos de ondas eletromagnéticas a fim de produzir uma imagem

## 2 INTERAÇÃO

Quando o campo elétrico irradiado interage com o alvo, parte do sinal é refletida e captada de volta pelo radar

## 3 SEGUNDA AQUISIÇÃO

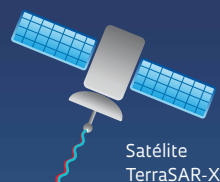
Uma das propriedades desse sinal, chamada fase, indica a distância da antena do radar até os taludes, as pilhas de rejeitos ou as rampas de acesso

## 4 DESLOCAMENTO

Se na passagem seguinte do satélite sobre o alvo a medida da fase tiver sofrido alteração, é provável que tenha ocorrido alguma deformação no terreno, como uma rachadura ou um afundamento muito pequeno e imperceptível

Pulsos refletem e retornam ao satélite

Deslocamento medido



Já as estações totais são um equipamento que faz medições de ângulos verticais e horizontais e de distâncias lineares. Para isso, é preciso posicionar o equipamento num local livre de obstáculos e mirar em prismas refletivos, que são fixados em uma haste e colocados sobre o ponto onde se quer medir – no caso específico da Vale, as faces de bancadas dos taludes. Um feixe de *laser* emitido pela estação total é refletido pelo prisma e retorna à estação. Pelo tempo de resposta e grandezas angulares na visada, um computador interno calcula as distâncias. Os sinais refletidos são armazenados e comparados a sinais medidos anteriormente, revelando se houve mudança no comportamento dos pontos – afastamento ou aproximação – onde os prismas estão instalados. A limitação desse sistema e dos radares de campo é que eles fornecem informações apenas dos locais onde estão instalados, ao contrário da técnica DInSAR, cuja cobertura é muito mais ampla, abrangendo todo o complexo minerador. “A pesquisa mostrou que o uso complementar e sinérgico do DInSAR com os dois sistemas tradicionais é a configuração ótima”, diz o engenheiro elétrico e pesquisador do Inpe José Claudio Mura, vice-coordenador do projeto.

Além da geração de conhecimento que levará à adoção de uma nova tecnologia na mineração brasileira, a pesquisa contribuiu para a formação de pessoal na pós-graduação em sensoriamento remoto no Inpe – um doutorado já foi concluído e dois mestrados estão em andamento. O projeto aprovado na FAPESP foi conduzido por uma equipe multidisciplinar composta por geólogos, cartógrafos, engenheiros elétricos e ambientais, do Inpe, da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista (Unesp), em Presidente Prudente, e do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará (UFPA). ■

complementar ao que já fazemos, com a vantagem de ser preditivo. Com ele, otimizaremos nossas operações”, afirma o geólogo Luciano Assis, da Diretoria de Planejamento e Desenvolvimento de Ferrosos da Vale. Além do inovador DInSAR, existem outras duas técnicas de monitoramento. Os radares de campo, instalados na própria mina, enviam pulsos de sinais de micro-ondas para determinado alvo – uma bancada, por exemplo – e capturam esses sinais de volta, comparando-os com sinais enviados anteriormente. Caso seja detectada alguma mudança de fase entre os sinais emitidos em diferentes momentos, podem estar ocorrendo deformações superficiais no alvo. Esse tipo de radar é usado em diferentes pontos de observação. Em Carajás, a Vale usa três radares SSR (sigla de Slope Stability Radar), da empresa australiana GroundProbe, para fazer o monitoramento de setores da mina.

## Projeto

Deteção e monitoramento de estabilidade de taludes e deformações superficiais em mina a céu aberto através de técnicas avançadas de interferometria diferencial de radar: uma avaliação na mina de ferro N4 (Carajás) utilizando dados do satélite TerraSAR-x (nº 2010/51267-9); **Modalidade** Auxílio Pesquisa – Pesquisa em Parceria para Inovação Tecnológica (Pite); **Pesquisador responsável** Waldir Renato Paradelia (Inpe); **Investimento** R\$ 626.273,35 e US\$ 433.463,20 (FAPESP).

## Artigos científicos

MURA, J. C. et al. Monitoring of surface deformation in open pit mine using DInSAR Time-Series: A case study in the N5W iron mine (Carajás, Brazil) using TerraSAR-X data. Set. 2014. **Proceedings SPIE RS 2014**. v. 9243. out. 2014.

HARTWIG, M. E. et al. Detection and monitoring of surface motions in active open pit iron mine in the Amazon region, using persistent scatterer interferometry with TerraSAR-X satellite data. **Remote Sensing**. v. 5, n. 9, p. 4719-34. set. 2013.

PARADELLA, W. R. et al. Radar interferometry in surface deformation detection with orbital data. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 64, n. 6, p. 797-811. dez. 2012.