

UMA ABORDAGEM GEOESPACIAL PARA MONITORAMENTO DE SUBSIDÊNCIA EM PLANÍCIES DELTAICAS

Elmo Leonardo Xavier Tanajura¹
Admilson da Penha Pacheco²
José Maria Landim Dominguez³

Doi: 10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v25n2p117-130

¹Programa de Pós-Graduação em Geociências – UFPE, elmo.tanajura@ufba.br

²Departamento de Engenharia Cartográfica e Programa de Pós-graduação em Geociências – UFPE - pacheco3p@gmail.com;

³Departamento de Sedimentologia e Programa de Pós-graduação em Geologia – UFBA - landim@ufba.br

RESUMO

Processos de subsidência caracterizam-se pelo movimento de uma porção da superfície física da terra, podendo provocar um afundamento súbito ou recalque gradual do terreno. Esses processos geralmente estão relacionados com algum fenômeno geológico que dependendo do grau de intensidade das ocorrências podem causar sérios impactos nas regiões afetadas. A compreensão desse fenômeno é indispensável para avaliação das tendências dos processos de subsidência, proporcionando assim entre outros aspectos, diretrizes para um bom planejamento e uso do solo. Os métodos geoespaciais têm se apresentado como uma alternativa eficiente para a detecção e monitoramento das movimentações de terreno provocadas por fenômenos geológicos. Dessa forma, o presente trabalho propõe uma abordagem dos principais fundamentos de duas técnicas geoespaciais com a finalidade de utilizá-las na detecção e monitoramento de subsidência em planícies deltaicas, são elas: O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e o InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

Palavras Chave: Processos de Subsidência; Detecção; Monitoramento; Sistema Geodésico de Referência; GNSS; InSAR

ABSTRACT

Subsidence processes are characterized by the movement of a portion of the physical surface of the Earth that can cause a sudden sinking or gradual repression of the terrain. These processes are, generally, related to some geological phenomenon that depending on the intensity degree of occurrences can cause serious impacts in the affected regions. The understanding of this phenomenon is essential for the assessment of the subsidence processes trends, thereby providing some guidelines for a good planning and a correct land's use. Geospatial methods have been presented as an efficient alternative for the detection and monitoring of the terrain movements caused by geological phenomena. Thus, the present work proposes an approach to the main fundamentals of two geospatial techniques in order to use them to detection and monitoring of the studied processes in deltaic plains, they are: GNSS (*Global Navigation Satellite System*) and InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

Keywords: Subsidence Process; Detection ; Monitoring; Geodetic Reference System; GNSS; InSAR

INTRODUÇÃO

Estudos de subsidência caracterizam-se geralmente por serem individualizados, concentrando-se regionalmente e utilizando-se de uma série de metodologias alternativas. Os resultados por sua vez, podem não ser comparáveis ou complementares aos de outros estudos. Isso dificulta tentativas para sintetizar as investigações sobre um entendimento mais abrangente do fenômeno (Yuill *et al.*, 2009).

Ocorrências de subsidência são comuns em planícies deltaicas, muitas vezes ocasionadas pela própria compactação natural dos sedimentos que a formam. Os ambientes sedimentares deposicionais, como é o caso dos deltas, são bastante propensos à subsidência devido à compactação de sedimentos. Estes ambientes são construídos primariamente pelo depósito de sedimentos a partir do sistema fluvial. Com o passar do tempo o volume dos sedimentos depositados diminui naturalmente, e nesse processo de acomodação, acaba resultando na compactação e consequentemente a subsidência.

A compactação de sedimentos é frequentemente citada como o processo de subsidência contemporâneo dominante em regiões deltaicas. Sua importância tanto em deltas quanto em estuários tem sido destacada por uma série de estudos (Törnqvist *et al.*, 2008; Horton & Shennan, 2009; Meckel *et al.*, 2006).

A estrutura costeira da Louisiana e do delta do Mississippi, nos Estados Unidos, está bem fundamentada em mais de um século de pesquisas geológicas. Motivo pelo qual esta área de estudos vem sendo constantemente citada em diversas investigações ambientais, dentre as quais, destacam-se significativos processos de subsidência. Em estudos realizados por Yuill *et al.* (2009) na costa da Louisiana, foram listados seis categorias primárias de

processos que originaram subsidência nesta região, são elas :

- (1) Tectonismo (processos de falhamento e halocinese);
- (2) Compactação sedimentar durante o Holoceno;
- (3) Carga sedimentar;
- (4) Ajustamento isostático glacial;
- (5) Retenção de fluidos;
- (6) Manejo da drenagem superficial.

Salienta-se que estas categorias não são completamente independentes, pois os processos relacionados a uma categoria podem afetar outras.

Numa perspectiva de acompanhamento de movimentações relacionadas a esses processos, os métodos geoespaciais têm se apresentado como uma alternativa eficiente para a detecção e monitoramento dessas variações.

O presente trabalho propõe uma abordagem dos principais fundamentos de duas técnicas geoespaciais utilizadas para essa finalidade: O GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e o InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*).

DETECÇÃO DE DEFORMAÇÕES COM IMAGENS DE RADAR: ASPECTOS GERAIS

Conceito básicos de SAR (*Synthetic Aperture Radar*)

O conceito SAR foi originalmente proposto por Carl Wiley no início da década de 50. Nas suas deduções, foi relacionada a ideia de sintetizar uma longa antena para obtenção de respostas com uma melhor resolução em termos de azimute, em comparação com o radar de abertura real. Segundo o autor, uma plataforma SAR ao se deslocar gera um efeito Doppler levando a uma propagação de frequência azimutal ao passar sobre um alvo (Wiley, 1954).

Operando em frequências de microondas, os sistemas de radar de abertura sintética fornecem imagens únicas que representam as propriedades elétricas e geométricas de uma superfície em quase todas as condições de tempo. Suas imagens diferenciam-se das oriundas de sensores óticos convencionais, pois ao invés da resposta espectral do alvo em níveis de cinza, as informações contidas em cada pixel são fornecidas num formato complexo, onde suas componentes (real e imaginária) são deduzidas em função da amplitude e fase do sinal. Sendo assim, cada pixel contém um número complexo que carrega a informação de amplitude e fase sobre o campo de microondas retroespalhados por todos os dispersores. As cenas podem ser representadas em Imagens de Amplitude ou Imagens de Intensidade (INPE, 2015). A

localização e dimensão do pixel, bem como sua resolução, dependem unicamente das características do sistema SAR.

A utilização de radar a nível orbital teve início em 1978 quando a NASA lança o SEASAT, primeiro satélite de sensoriamento remoto projetado para estudos oceanográficos a partir de Radar de Abertura Sintética. A missão, que operou durante 106 dias, foi concebida para demonstrar a viabilidade de monitoramento por satélite global de fenômenos nos oceanos (NASA 2015). Porém, missões mais duradouras tiveram seu marco a partir do lançamento do ERS-1 pela Agência Espacial Europeia no início dos anos 1990. A Figura 1 apresenta as principais missões em atividade e desativadas que contêm em suas plataformas Sistemas Sensores Radares.

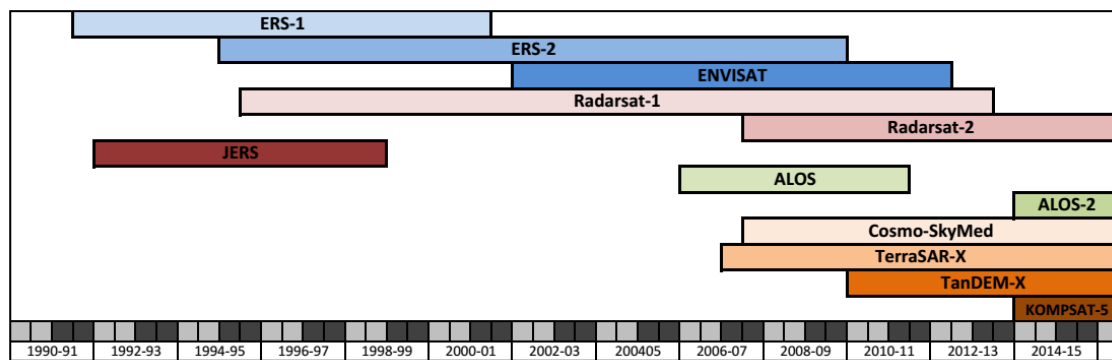


Figura1: Missões espaciais que comportam sistemas sensores radares em suas plataformas (Fonte: O autor).

As plataformas são posicionadas para aquisição de informações da superfície da Terra a partir de ângulos diferentes. Os instrumentos SAR podem operar em diferentes comprimentos de onda do radar (Bandas C, L e X).

Geometria dos Sistemas InSAR

A diferença de fase interferométrica entre os sinais recebidos num InSAR podem

ser combinadas para cada ponto das imagens sendo relacionada com a diferença de comprimento da trajetória geométrica antena/alvo, a qual depende da topografia da superfície. Se a geometria interferométrica do sistema for conhecida, a diferença de fase pode ser convertida numa altitude para cada ponto de imagem.

Os sistemas combinam de forma coerente os sinais a partir de duas antenas separadas espacialmente ou temporalmente, por este motivo torna-se possível a

configuração de uma geometria interferométrica.

As duas classes principais de radares interferométricos são definidas na literatura

de acordo com a configuração geométrica do sistema (Fig. 2).

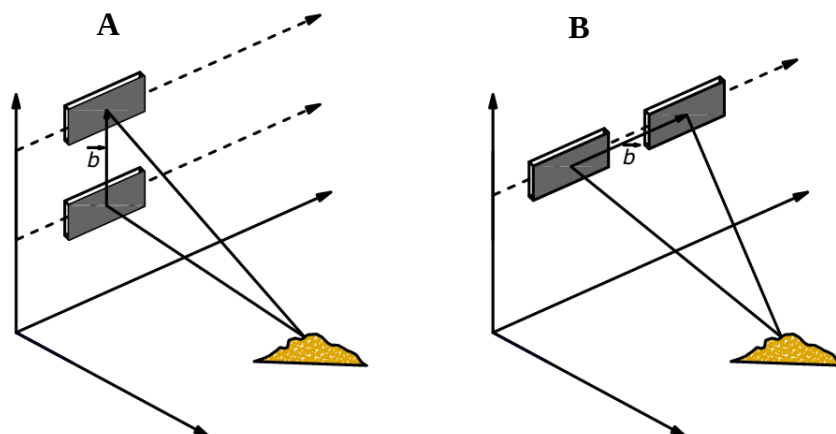


Figura 2: Configurações geométricas dos sistemas InSAR (Fonte: Adaptado de Simons & Rosen, 2007).

Num primeiro cenário (Figura 2A), existem duas antenas separadas espacialmente e montadas numa mesma plataforma. Diferentes trajetórias são percorridas num mesmo instante, de forma que o mesmo alvo é visado simultaneamente pelas antenas, ficando assim configurada a geometria interferométrica em função da linha de base $\vec{b}$.

Numa segunda situação (Figura 2B), as informações acerca de um mesmo alvo são tomadas em instantes diferentes ao longo da mesma trajetória, nesse caso explora-se repetidas órbitas do mesmo satélite e distância formada pela posição da antena nos dois instantes de captura formará a linha de base $\vec{b}$.

A separação temporal entre as cenas pode variar desde segundos a anos. As duas observações podem ser feitas por sensores diferentes, desde que tenham parâmetros do sistema de radar quase idênticos. Um movimento do alvo será detectado através da comparação das imagens. Dessa maneira é possível gerar, com precisão, modelos digitais de deslocamentos ou deformações.

Fundamentos matemáticos para cálculos de deformações

Considerando um sistema interferométrico, ilustrado na Figura 3, onde

um mesmo alvo é visado a partir de dois pontos de vista diferentes.

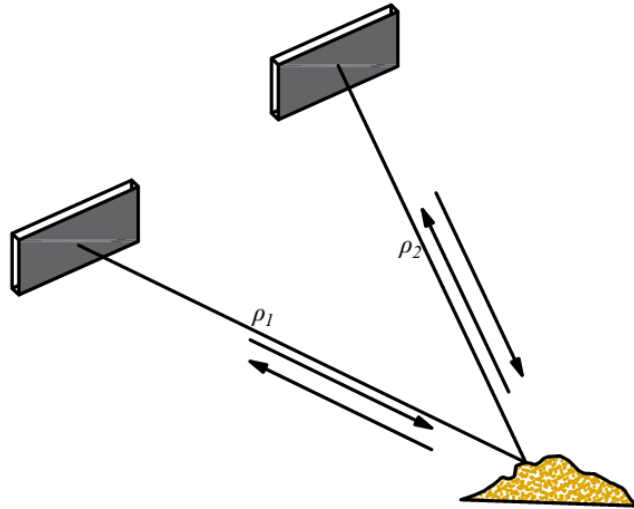


Figura 3: Emissão e recepção do sinal a partir de diferentes pontos de vista (Fonte: Adaptado de NASA 2015).

Sendo, ρ_1 e ρ_2 as distâncias geométricas do alvo à plataforma, a equação para o deslocamento do alvo pode ser obtida partindo da seguinte relação fundamental da

diferença de fase interferométrica $\Delta\phi$ num comprimento de onda λ (Simons & Rosen, 2007):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_2 + \rho_2) - \frac{2\pi}{\lambda}(\rho_1 + \rho_1) \quad (1)$$

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_2 - \rho_1) \quad (2)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta\rho \quad (3)$$

Sendo: $\rho = 2$

Se as observações são feitas em momentos distintos (t_1 e t_2) a partir de diferentes localizações no espaço, uma linha de base $\vec{b}$ é estabelecida e a fase interferométrica é proporcional à topografia da superfície

($\Delta\rho_{topo}$). Caso a superfície tenha sofrido alguma deformação ($\Delta\rho_{change}$), essa variação topográfica também será detectada a partir da proporcionalidade da fase (Fig. 4).

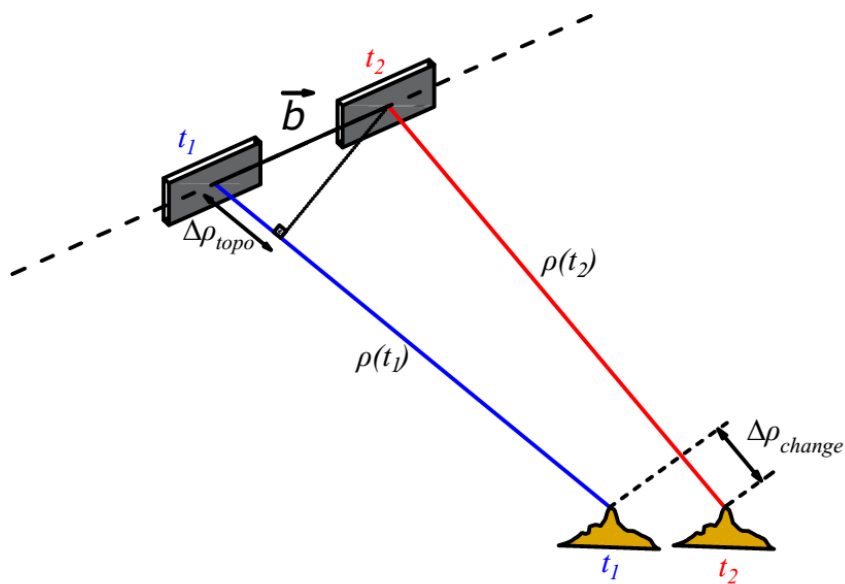


Figura 4: Relação da deformação da superfície com a fase (Adaptado de NASA 2015).

A equação de fase para obtenção dos deslocamentos pode assim ser definida por:

$$\Delta\phi = \frac{4\pi}{\lambda} (\Delta\rho_{change} + \Delta\rho_{topo}) \quad (4)$$

Se topografia da superfície é conhecida, então o segundo termo pode ser eliminado, restando assim como única incógnita, o termo referente à deformação da superfície.

Exemplos de aplicações da técnica no monitoramento de subsidência

O princípio básico do SAR na detecção de subsidência consiste na operação da fase, pixel a pixel, num conjunto de dados

em duas épocas ou aquisições distintas, para uma mesma posição na superfície analisada. A diferença de fase resultante é representada por uma série de franjas interferométricas denominadas interferogramas e está diretamente relacionada à superfície topográfica. Nesse contexto, o SAR tem o potencial de fornecer informações muito importantes acerca de movimentações sobre a superfície principalmente devido a sua alta precisão na componente vertical. Para um caso específico, diferentes abordagens podem ser aplicadas dependendo da disponibilidade de um Modelo Digital de Elevação (MDE) (Strozzi *et al.*, 2001).

Um exemplo de mapa de deslocamento é apresentado na Figura 5, gerado a partir de dados SAR do satélite ERS-1 pelo USGS (U.S. Geological Survey).

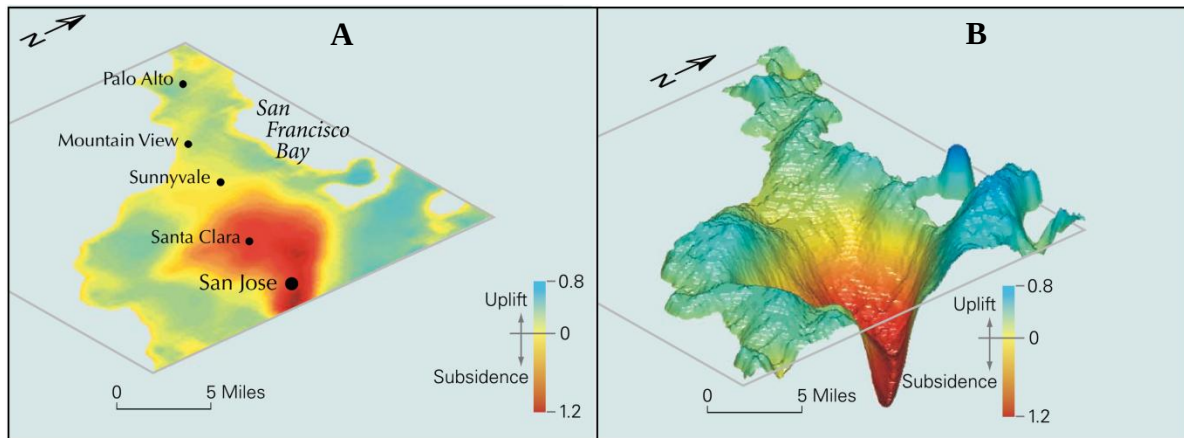


Figura 5: Relação entre o Interferograma SAR ERS-1 e processos de subsidência e soerguimento ocorridos em *Santa Clara Valley* – Califórnia USA (Fonte: Modificado de Galloway *et al.* 2000)

No interferograma da Figura 5A, a paleta de cores representa desde os processos de subsidência do solo na cor vermelha até os processos de soerguimento, em azul. O intervalo de tempo entre as cenas que originou os interferogramas foi de 7 meses – janeiro a agosto de 1997. O relevo sombreado (Figura 5B) é o campo de fase exibido com altíssimo exagero vertical.

O GNSS COMO FERRAMENTA NO MONITORAMENTO DE SUBSIDÊNCIA

Generalidades e aplicações

O GNSS, conjunto das constelações de satélites artificiais de posicionamento, tem sido a principal ferramenta da atualidade utilizada em atividades que envolvam o posicionamento de um modo geral. Posicionar um objeto em Geodésia consiste em atribuir-lhe coordenadas com o propósito de vinculá-lo a um sistema de referência pré-estabelecido. Portanto, as aplicações do GNSS são inúmeras, e vêm crescendo continuamente. Segundo Monico (2008) a utilização aplicada das técnicas vem sendo empregada de modo extensivo em atividades de geodinâmica; navegação global e regional; estabelecimento de redes

geodésicas locais, regionais, continentais e globais (ativas e passivas); determinações altimétricas; levantamentos geodésicos para fins de mapeamento, monitoramento e controle de deformações.

Estudos realizados em diversas modalidades têm mostrado que a subsidência pode ser mensurada e monitorada com precisão centimétrica, utilizando a técnica do GNSS.

Numa pesquisa realizada numa extensa área minerária no norte da China, foram utilizadas três Estações do *International GNSS Service* (IGS) como referência para o monitoramento da subsidência através de uma rede de 19 pontos alocados numa área de aproximadamente 8.000 km². As velocidades semanais de variação das coordenadas das estações foram comparadas com o processamento dos vértices da rede baseado no modelo *Robust Kalman Filtering* (RKF). As soluções encontradas para as precisões correspondentes às deformações chegaram ao nível do milímetro, a partir de rastreios GNSS com 4 horas de duração (Bian *et al.* 2014).

Uma técnica ainda pouco explorada na literatura internacional apresenta-se com excelente perspectiva no monitoramento da subsidência, trata-se da ***Space-Surface***

bistatic Differential Interferometry (SS-DI).

O Artífício da Interferometria Diferencial, antes utilizado amplamente em aplicações sensoriamento remoto por radar através dos Radars de Abertura Sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR) ou ainda na Geodésia Espacial por meio dos levantamentos por VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), tem sido empregado em conjunto com o advento do GNSS para detecção de variações/deformações. A técnica consiste num sistema formado por uma estação de referência e uma estação de medição. A estação de referência é composta de um receptor multicanal e duas antenas, sendo uma preparada para receber o sinal diretamente do satélite, enquanto que a outra recebe o eco sinal oriundo da estação de medição. A estação de medição é um *transponder* instalado na região de interesse e suas variações de posição são mensuradas por vetores de deformação obtidos por

interferometria diferencial (Zeng et al. 2015).

Introdução ao Sistema Geodésico de Referência

A avaliação temporal das coordenadas num monitoramento de subsidência com GNSS consiste em quantificar os deslocamentos de pontos na superfície física da terra numa escala de tempo a partir das variações das suas coordenadas tridimensionais no espaço em função do sistema geodésico de referência adotado.

Um ponto na superfície física da Terra pode ser representado pelo terno cartesiano de coordenadas geocêntricas (X, Y, Z) onde a origem do sistema localiza-se no centro de um elipsoide de revolução, que para o caso do GNSS, coincide com o centro de massa da Terra (geocentro) - (Fig. 6).

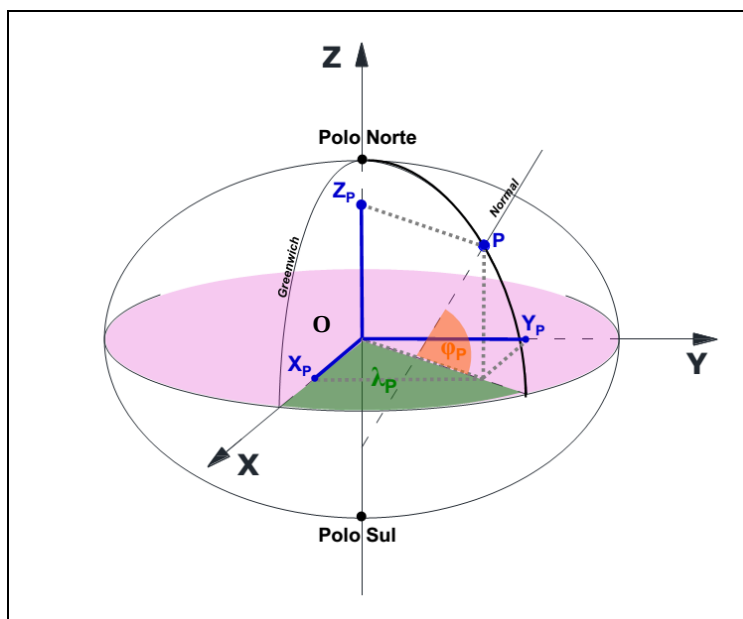


Figura 6: Sistema cartesiano geocêntrico relacionando as coordenadas geodésicas (ϕ_p = latitude e λ_p = longitude) com suas componentes cartesianas (X_p, Y_p, Z_p) para um ponto P projetado no elipsoide de revolução ao longo da normal (Adaptado de Seeber, 2003).

Atualmente, com a definição de sistema geodésico moderno, estes são definidos e materializados de maneira que as coordenadas tridimensionais dos vértices que o compõe estejam relacionadas a uma determinada época, tornando-os assim uma referência espaço-temporal.

No Brasil, o sistema geodésico oficial é o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). O Sistema foi estabelecido no Brasil através da Resolução 1/2005, da Presidência do IBGE (RPR – 1/2005), onde foi alterada a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) sendo definidos novos parâmetros e modelos matemáticos para conversão dos sistemas anteriores (sistemas clássicos). Após um período de transição de 10 anos, o sistema passou a ser adotado em caráter definitivo a partir de 25 de fevereiro de 2015.

A realização do SIRGAS adotado para o SGB está definido para a época de referência 2000,4, razão pela qual o sistema recebe a nomenclatura de SIRGAS2000. Isto significa que ao processar um conjunto de dados geodésicos relativamente em referência a este sistema, as coordenadas geradas serão posicionadas geometricamente em relação aos seus parâmetros espaciais, sendo também retroagidas à época de referência, no caso, 2000,4.

O SIRGAS2000 atualmente compatibiliza os referenciais geodésicos utilizados pelos países das Américas e promove a definição e estabelecimento de um referencial único com precisão compatível com a tecnologia atual de posicionamento. Além disso, sua definição é totalmente compatível com o ITRS (*International Terrestrial Reference System*) e sua realização é uma densificação regional

do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) (IBGE, 2015).

Os métodos de posicionamento podem ser classificados em *absoluto*, quando as coordenadas estão associadas diretamente ao geocentro, e *relativo*, no caso em que as coordenadas são determinadas com relação a um referencial materializado por um ou mais vértices com coordenadas conhecidas. O objeto a ser posicionado pode estar em repouso ou em movimento, o que gera um complemento à classificação com respeito ao referencial adotado (Monico, 2008).

Nas aplicações de monitoramento de subsidência, o nível de precisão das observações é preconizado num padrão elevado, pois muitas vezes os deslocamentos são da ordem do milímetro. Por essa razão, um fator muito importante a ser levado em consideração nas coordenadas monitoradas está relacionado às variações provocadas pelos deslocamentos das placas tectônicas. Para isso, utiliza-se de modelos geofísicos de velocidades de movimentações das placas para correção dessas variações. A partir desses modelos, é possível atualizar as coordenadas de uma estação, em função do deslocamento das placas, para sua época de referência ou para qualquer outra.

Variação temporal de coordenadas cartesianas

As coordenadas cartesianas de um ponto qualquer na superfície física da Terra, podem ser reduzidas para uma determinada época de acordo com a seguinte equação (Costa, 1999):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}(t) = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix}(t - t_0) \quad (5)$$

Onde:

X, Y e Z são as coordenadas cartesianas a serem reduzidas à época t ;

X_0 , Y_0 e Z_0 são as coordenadas destes mesmos pontos para a época de referência t_0

V_x , V_y e V_z são as respectivas velocidades das componentes na estação de referência;

$(t - t_0)$ trata-se do intervalo de tempo transcorrido entre as épocas.

Atualmente, o modelo geofísico recomendado pelo *International Earth Rotation Service* (IERS) para indicar o campo de velocidades das placas tectônicas é o **NNR-NUVEL 1A** (*No Net Rotation – Northwestern University Velocity model 1A*). Este modelo foi estabelecido em 1996 a partir da proposta de DeMets *et al.* (1990, 1994), onde foram utilizados dados geológicos e geomagnéticos dos últimos 3 milhões de anos, sendo considerado um modelo internacional padrão do ITRF (Jin & Zhu, 2004).

A confiabilidade deste modelo é sustentada pelo fato dele combinar várias informações como variações de anomalias magnéticas, azimutes de falhas na crosta e

vetores de terremotos para estimar a velocidade de cada placa litosférica (Monico, 2008).

O movimento relativo de uma placa tectônica num determinado sistema de referência pode ser descrito por um vetor de rotação denominado vetor de Euler ($\vec{\Omega}$), cujo módulo é proporcional à velocidade angular no seu extremo, localizado na crosta. Este ponto é denominado de pólo de Euler (ou pólo de rotação) (Larson *et al.*, 1997).

O vetor de Euler pode ser associado a um sistema de coordenadas cartesianas através das três componentes Ω_x , Ω_y e Ω_z , onde a matriz antissimétrica para uma Placa Tectônica qualquer pode ser expressa por:

$$\vec{\Omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\Omega_z & \Omega_y \\ \Omega_z & 0 & -\Omega_x \\ -\Omega_y & \Omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

O vetor de velocidade $[V_x \ V_y \ V_z]^T$ pode ser determinado em função das velocidades angulares (Vetor de Euler) do NNR-NUVEL

1A, por exemplo, e das coordenadas cartesianas (X, Y e Z) de uma rede de pontos, sendo assim expressas por:

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Omega_y Z - \Omega_z Y \\ \Omega_z X - \Omega_x Z \\ \Omega_x Y - \Omega_y X \end{bmatrix} \quad (7)$$

As componentes de velocidade angular resultante do NNR-NUVEL 1A para cada uma das principais placas litosféricas

(Fig. 7) que compõe a superfície terrestre são apresentadas na Tabela 1 a seguir:

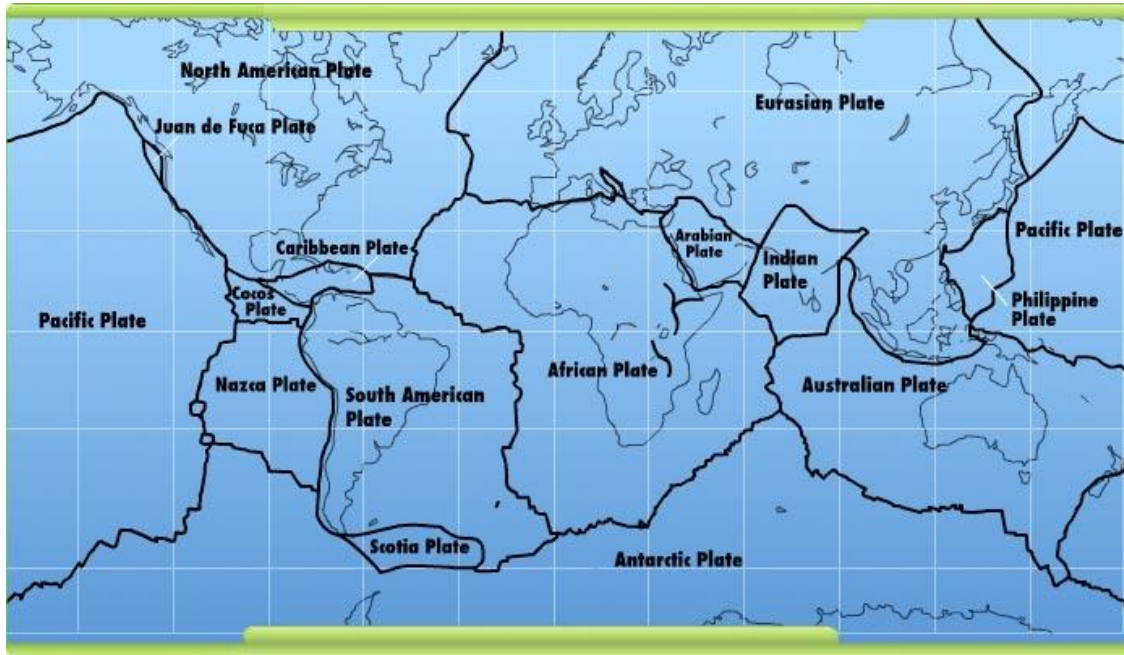


Figura 7: Mapa das principais placas tectônicas (Fonte: http://www.learner.org/interactives/dynamicearth/images/new_map.jpg)

Tabela 1: Vetor de rotação para cada placa expressos em radianos por milhões de anos (Mccarthy,1996).

Placa	Ω_x rad/M anos	Ω_y rad/M anos	Ω_z rad/M anos
Pacific	-0,001510	0,004840	-0,001510
Cocos	-0,010425	-0,021605	-0,010425
Nazca	-0,001532	-0,008577	-0,001532
Caribbean	-0,000178	-0,003385	-0,000178
South America	-0,001038	-0,001515	-0,001038
Antarctica	-0,000821	-0,001701	-0,000821
India	0,006670	0,000040	0,006670
Australia	0,007839	0,005124	0,007839
Africa	0,000891	-0,003099	0,000891
Arabia	0,006685	-0,000521	0,006685
Eurasia	-0,000981	-0,002395	-0,000981
North America	0,000258	-0,003599	0,000258
Juan de Fuca	0,005200	0,008610	0,005200
Philippine	0,010090	-0,007160	0,010090
Rivera	-0,009390	-0,030960	-0,009390
Scotia	-0,000410	-0,002660	-0,000410

O NNR-NUVEL1A deve ser usado como um padrão, para as estações que aparentam razoavelmente seguirem os seus valores. Para algumas estações, em particular àquelas localizadas nas imediações de bordas de placas, poderão ser feitas estimativas das velocidades utilizando valores específicos derivados ou não do NNR-NUVEL1A. Esta é também uma maneira de levar em consideração alguns movimentos verticais não negligenciáveis. Ao serem publicadas as coordenadas de uma determinada estação deverá ser associada a ela a sua época de referência (Mccarthy, 1996).

As velocidades angulares das placas tomam como referência a placa do pacífico, sendo definidas sobre a condição de que a resultante da deformação das placas seja nula (Bock, 1996). Uma rotação de **$4,86 \cdot 10^{-6} \text{ rad/M}$** , por exemplo, (correspondente na base sexagesimal a um arco $1''/\text{M}$ anos), equivale a um deslocamento aproximado de

0,03 mm por ano numa estação situada no Equador.

Atualmente, as velocidades das estações são estimadas juntamente com suas coordenadas com base em medidas GNSS coletadas nas redes geodésicas, como por exemplo a rede SIRGAS. Neste caso, o modelo geofísico de velocidades proporciona parâmetros iniciais para o ajustamento de dados GNSS. A grande vantagem no uso do GNSS para a estimativa de coordenadas e velocidades está na alta resolução temporal e na acurácia proporcionada pelo sistema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens orbitais de radar trazem consigo a facilidade de obtenção de informações espaciais com certa regularidade estabelecida por sua resolução temporal. No caso de aplicações de monitoramento de subsidência, onde muitas

vezes os deslocamentos analisados são de ordem centimétrica ou até mesmo milimétrica, é de extrema importância que as imagens utilizadas estejam devidamente pré-processadas, onde é imprescindível a realização de correções atmosféricas, calibrações entre outros cuidados que precisam ser devidamente adotados para garantir a qualidade do produto final.

Os deslocamentos mensurados pelo GNSS são estabelecidos tanto de uma forma absoluta, pelo fato de atuarem pontualmente nos vértices avaliados, quanto numa abrangência regionalizada, nesse caso as análises são efetuadas em rede, técnica essa adotada na maioria das aplicações que envolvem o tema. Para que as variações temporais de coordenadas sejam calculadas a um nível de acurácia que detecte mínimos movimentos dos vértices, recomenda-se a utilização receptores de multi-frequência para os rastreios e que o pós-processamento das observáveis seja realizado em softwares científicos. Ainda que as informações coletadas nessa modalidade dependam exclusivamente de levantamentos de campo, existe uma tendência para que os métodos adotados para essa finalidade se tornem plenamente automatizados, não somente as estações de referência como ocorre atualmente. Nesse caso, os levantamentos são realizados a partir de redes ativas onde a transmissão dos dados, processamento e armazenamento são realizados de forma integrada e automatizada.

As metodologias apresentadas têm se mostrado eficientes na detecção e monitoramento de subsidência, sendo utilizadas de forma independente ou integradas.

REFERENCIAS

Bock, Y., Reference System. In: Kleusberg, A., Teunissen, P.J.G. GPS for Geodesy. Berlin: Springer, 1996.

Bian, H. F., Zhang, S. B., Zhang, Q. Z., Zheng, N. S. 2014. Monitoring large-area mining subsidence by National Research Council, 1991, Mitigating losses from land subsidence in the United States: Washington, D. C., National Academy Press, 58 p.

Costa, S.M.A. 1999. Integração da rede geodésica brasileira aos sistemas de referência terrestres. Tese de Doutorado, Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. 170p.

Demets, C., Gordon, R., Argus, D. 1990. Current plate motions. Geophysical journal international, 101:425-478,

Demets, C., Gordon, R., Argus, D., Stein, S. 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophysical research letters, 21:2191-2194.

Galloway, D. L., Jones, D.R., Ingebritsen, S. E. 2000. Measuring land subsidence from space. US Geological Survey, Fact Sheet, 051-00.

Horton, B. P., Shennan, I. 2009. Compaction of Holocene strata and the implications for relative sea level change on the east coast of England. Geology, 37:1083-1086.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2015. Sistemas de Referência Geocêntrico para as Américas. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/sirgas/principal.htm>>. Acesso em: 25/09/15.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2015. Teoria : Sistemas de Radar Princípios Físicos. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/radar/radar.htm>>. Acesso em: 25/09/15.

Jin, S. & Zhu, W. 2004. A revision of the parameters of the NNR-NUVEL-1A plate velocity model. Journal of Geodynamics, 38:85-92.

- Larson, K. M., Freymueller, J. T., Philipsen, S. 1997. Global plate velocities from the Global Positioning System. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 102:9961-9981.
- Mccarthy, D.D. Conventions of International Earth Rotation and Reference Systems Service. 1996. IERS Technical Note, 21:1-95.
- Meckel, T. A., ten Brink, U.S., Williams, S. J. 2006. Current subsidence rates due to compaction of Holocene sediments in southern Louisiana. *Geophysical Research Letters*, 33: L11403.
- Monico, J. F. G. 2008. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2ª edição, São Paulo, Editora UNESP, 472 p.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. 2015. Principles and Theory of Radar Interferometry. ROI_PAC short course (2012) notes by Paul Rosen, JPL. Disponível em: <https://www.unavco.org/education/advancing-geodetic-skills/short-courses/course-materials/insar/2014-insar-isce/InSARPrinciplesTheory_UNAVCO_14.pdf>. Acesso em: 25/09/15.
- Seeber, G. 2003. Satellite geodesy: foundations, methods, and applications. Walter de Gruyter, 612 p.
- Simons, M., Rosen, P. A. 2007. Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy. In: Schubert, G. *Treatise on Geophysics*, Elsevier, p. 391-446.
- Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G., Spreckels, V. 2001. Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 67:1261-1270.
- Törnqvist, T. E., Wallace, D. J., Storms, J. E., Wallinga, J., Van Dam, R. L., Blaauw, M., Snijders, E. M. 2008. Mississippi Delta subsidence primarily caused by compaction of Holocene strata. *Nature Geoscience*, 1: 173-176.
- Wiley, C. 1954. Pulsed Doppler Radar Method and Means. US Patent N°. 3.196.436.
- Yuill, B., Lavoie, D., Reed, D. J. 2009. Understanding subsidence processes in coastal Louisiana. *Journal of Coastal Research*, 1: 23-36.
- Zeng, T., Zhang, T., Tian, W., Hu, C. 2015. A novel subsidence monitoring technique based on space-surface bistatic differential interferometry using GNSS as transmitters. *Science China Information Sciences*, 58:1-16.