



## Detecção e avaliação de efeitos geodinâmicos em uma porção das estações GNSS brasileiras

Luciana Maria Da Silva<sup>1</sup>, Sílvio Rogério Correia De Freitas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pós-doc no Centro de Estudos de Petróleo. Universidade de Campinas (UNICAMP), Campinas – SP e Pesquisadora Visitante no Departamento de Ciências Matemáticas. Universidade de Durham, Durham-UK. Os resultados do trabalho foram desenvolvidos durante o Doutorado em Ciências Geodésicas (Geodésia Física). Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba – PR. lumasilva15@gmail.com (autor correspondente). <sup>2</sup>Docente e Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba – PR. sfreitas@ufpr.br.

Artigo recebido em 12/01/2020 e aceito em 07/06/2020

### RESUMO

Neste trabalho apresentamos uma metodologia para detecção de possíveis efeitos geodinâmicos, utilizando dados GNSS, modelos de velocidade SIRGAS, Geológico e Geofísico. As observações GNSS foram processadas para obtenção da variação da coordenada vertical e horizontal. Os modelos de velocidade VEMOS2009 e 2015 serviram como base comparativa para verificar os resultados obtidos com o processamento GNSS. A partir do conjunto de vetores de velocidades das estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) obtidos do NNR-NUVEL-1A, estimaram-se os elementos definidores do movimento da placa SOAM. Em seguida, foram realizadas algumas análises e comparações com os vetores de rotação da placa SOAM obtidas pelo modelo APKIM2008. As análises conduzidas tiveram por base observações contínuas, desde 2007 até 2016, junto a uma porção de estações GNSS pertencentes à RBMC (estações SIRGAS-CON). Os resultados considerando os modelos de velocidade de SIRGAS mostraram que após o terremoto no Chile em algumas regiões do Brasil houveram efeitos geodinâmico. Em comparação aos modelos geológico e geofísico observou-se que o campo de velocidade definido no processamento GNSS conseguiu retratar a realidade, como caso de estudo foi considerado a estação de Imbituba.

Palavras chaves: geodinâmico, geofísico, geológico, placa litosférica.

### Detection and assessment of geodynamic effects on a portion of Brazilian GNSS stations

### ABSTRACT

This work presents a methodology for detecting possible geodynamic effects using GNSS data, SIRGAS, Geological, and Geophysical velocity models. GNSS observations were processed to obtain the variation for the vertical (up) and horizontal coordinates. The VEMOS2009 and 2015 velocity models served as a comparative basis to verify the results obtained with GNSS processing. From the set of velocity vectors of stations belonging to the Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS (RBMC) obtained from NNR-NUVEL-1A, estimated the defining elements of the movement of the SOAM plate. Then, it performed some analyses and comparisons with the SOAM plate rotation vectors obtained by the APKIM2008 model. The studies conducted were based on continuous observations, from 2007 to 2016, on a portion of GNSS stations belonging to RBMC (SIRGAS-CON stations). The results considering the SIRGAS velocity models showed that after the earthquake in Chile, in some regions of Brazil, there were geodynamic effects. Comparison to the geological and geophysical models, it was observed that the velocity field defined in GNSS processing was able to portray reality, as well as case study, which was considered the Imbituba station.

Keywords: geodynamic, geophysics, geologic, lithospheric plate.

### Introdução

As mudanças no Sistema Terra têm como principais focos de análises, as redistribuições de massas observadas a partir da superfície ou do

exterior da Terra, as quais se refletem principalmente nos aspectos geocinemáticos, nas variações do campo da gravidade e na rotação da Terra (Da Silva e De Freitas, 2019). O Global

Geodetic Observing System (GGOS) se constitui na base científica e na infraestrutura geodésica necessária ao acompanhamento das mudanças globais. Este, no presente, consiste na principal linha de interação global da Geodésia com os demais campos do conhecimento humano, coordenada pela *International Association of Geodesy* (IAG) (GGOS, 2020).

Há quatro temas centrais do GGOS relacionados com as mudanças globais, os quais são: *Theme 1 - Internacional Height Reference System* (IHRs); *Theme 2 - Geohazards Monitoring*; *Theme 3 - Sea Level Changes, Variability, and Forecasting*; *Theme 4 - Geodetic Space Weather Research* (GGOS, 2020). Do ponto de vista geodésico e considerando principalmente os temas 1 e 3 do GGOS, há que se discutir os aspectos geocinemáticos da interação oceano-continente, fundamentais para a definição e realização de um Sistema Vertical de Referência (SVR) dentro de uma perspectiva de unicidade global (De Freitas, 2015; Da Silva, 2017; Da Silva et al., 2018; Da Silva e De Freitas, 2019).

As interações dos continentes com os oceanos e a atmosfera devem ser analisadas em relação à resposta dinâmica da Terra, de modo a permitir a discriminação de movimentos seculares e periódicos e efeitos de carregamentos esporádicos tais como os associados à passagem de frentes meteorológicas (Vandam et al., 1994; Luz et al., 2009, Da Silva, 2017).

O referenciamento geocêntrico das variações locais da posição de pontos da crosta pode ser usado para monitorar variações verticais da posição do marégrafo, sendo fundamental para evitar que movimentos verticais da crosta sejam interpretados como variações do Nível Médio do Mar (Da Silva et al., 2016). É necessário também considerar os movimentos relativos devido ao carregamento periódico diferencial dos efeitos da maré sobre a crosta (Farrel, 1972). A flexão diferencial da crosta provocada pela interação entre as marés terrestres e oceânicas e variações de pressão atmosférica (De Freitas, 1993, Benedito, 2016; Abreu, 2019, Yue et al., 2020), podem produzir efeitos no posicionamento relativo sobre linhas de bases longas (Vandam et al., 1994; De Freitas et al., 1995; Da Silva, 2017).

As estruturas geodésicas atualmente possuem as três componentes definidoras da posição de um ponto no espaço, adicionalmente com a componente de definição temporal. O SIRGAS no Brasil é um exemplo, tendo como base o *International Terrestrial Reference Frame 2000* (ITRF2000) (Ramos et al., 2016). As coordenadas SIRGAS podem ser utilizadas como junção nos

processamentos GNSS, mas antes se deve reduzi-las à época das observações dos satélites a partir dos modelos geofísicos ou geodésicos de movimentos das placas, (Costa, 1999; Da Silva, 2017).

A utilização da técnica GNSS vem contribuindo com os estudos de fenômenos geofísicos e suas medições servem para determinar o movimento das placas tectônicas da Terra, e para estudar a deformação em torno de falhas ativas (Mohamed et al., 2016; Sánchez e Drewes, 2020). Adicionalmente, tem contribuído para avaliação dos efeitos geodinâmicos (Albaraci et al., 2019).

Sapucci e Monico (2000) e Da Silva et al. (2016) ilustram a necessidade de que nos referenciais geodésicos modernos é necessário que se leve em conta a velocidade das placas que compõem a superfície da Terra. O comportamento temporal mais irregular é devido principalmente aos deslocamentos das placas tectônicas e, de forma secundária e episódica, por deformações locais (Sánchez e Drewes, 2016a).

A posição e a velocidade final das estações são estimadas transformando a posição das estações para um mesmo referencial. São supostamente eliminados os efeitos do movimento global da placa, tal que são representados somente os movimentos residuais, os quais podem ser entendidos como devidos às deformações intraplaca, ou seja, as deformações dentro das placas rígidas, tal como acontece ao longo de falhas ativas e efeitos isostáticos associados a cadeias de montanhas (Drewes, 1993).

Na placa SOAM, particularmente no Brasil, os movimentos crustais intraplacas são pequenos comparados com regiões com atividades tectônicas pronunciadas. Nas zonas periféricas da placa ocorrem movimentos relativos com distintas direções, sentidos e magnitudes, gerando diversos tipos de estruturas geológicas, como azimutes de falhas, espalhamento do solo oceânico, variações de anomalias magnéticas, entre outras (Perez et al., 2003, Da Silva, 2017).

Ressalta-se que é importante o conhecimento do comportamento cinemático das estações, para sua aplicação e realização no tempo. Entretanto, para as áreas sujeitas à deformação na placa da América do Sul (SOAM), os modelos geofísicos não explicam os efeitos cinemáticos e os modelos geodésicos podem apenas estimar a velocidade horizontal, o que é insuficiente em alguns casos, como na incorporação de estações novas e na manutenção da consistência e integridade do Sistema Geodésico de Referência (SGR) no tempo (Báez Soto et al., 2004). As estações quando localizadas próximo ao encontro

entre duas placas litosféricas, apresentam um comportamento temporal mais irregular do que em relação às estações sobre partes estáveis das mesmas, como, por exemplo, as estações brasileiras.

Segundo Drewes (2004) e Da Silva et al. (2017), as coordenadas das estações vinculam-se a um sistema de referência bem definido, e mesmo sabendo que tais estações se movem com o passar do tempo, as suas coordenadas numa dada época são fixas. A adoção e a realização do SIRGAS2000 em cada um dos países requerem o conhecimento do campo de velocidades das estações e a definição de uma época de referência. Esta adoção é empregada para manter a consistência do SGR na utilização das coordenadas (Sánchez e Drewes, 2016b).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo investigar e avaliar os efeitos geodinâmicos de uma porção das estações pertencentes a RBMC e da rede SIRGAS (SIRGAS-CON), com base das análises temporais desenvolvidas ao longo de cerca de 9 anos.

### Aspectos teóricos para o desenvolvimento metodológico

- Organização dos dados para o processamento GNSS

O ITRF é resultante da combinação de várias técnicas geodésicas espaciais: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), Satellite Laser Ranging (SLR), Lunar Laser Ranging (LLR), GNSS e Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite (DORIS), são produzidas soluções diárias, semanais e anuais (SIRGAS, 2020a). O International Terrestrial Reference System (ITRS) é realizado periodicamente, devido à variação temporal das coordenadas das estações, em um determinado ITRF<sub>yyyy</sub>, onde yyyy significa a época de referência da realização. O ITRF<sub>yyyy</sub> consiste em um conjunto de coordenadas cartesianas e velocidades das estações, bem como a completa Matriz Variância-Covariância (MVC) destes parâmetros (Da Silva, 2017). A posição, na época  $t$  de um ponto na superfície sólida da Terra é dada pela equação (01):

$$\bar{P}(t) = \bar{P}(t_0) + \bar{V}(t_0) * (t - t_0) + \sum_i \bar{C}_i(t) \quad (01)$$

Na equação (01),  $\bar{P}(t)$  e  $\bar{P}(t_0)$  são os vetores de posição do ponto nas épocas  $t$  e  $t_0$ ;  $\bar{V}(t_0)$  é o vetor de velocidade do ponto na época

$t_0$ ;  $\sum_i \bar{C}_i(t)$  incorpora no modelo um conjunto de correções referidas à época  $t$ , tais como marés terrestres, carga oceânica e atmosférica, entre outras.

Para fazer a transformação entre as realizações dos ITRFs são gerados parâmetros de transformação a partir da transformação de Helmert ou similaridade com sete parâmetros ( $T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3$ ) ou quatorze parâmetros ( $T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3, \dot{T}_1, \dot{T}_2, \dot{T}_3, \dot{D}, \dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$ ). Ressalta-se que  $\dot{T}_1, \dot{T}_2, \dot{T}_3, \dot{D}, \dot{R}_1, \dot{R}_2, \dot{R}_3$  são as primeiras derivadas de  $T_1, T_2, T_3, D, R_1, R_2, R_3$  representando as respectivas variações temporais.  $T_1, T_2, T_3$  são as translações entre as posições do centro de massa,  $R_1, R_2, R_3$  são as rotações e  $D = 1 + \delta$  é o fator de escala (ITRF, 2020).

Segundo Costa (1999), a ideia básica de combinar resultados de várias técnicas diferentes é evitar erros sistemáticos oriundos de uma técnica específica, sendo a combinação a única maneira de se alcançar confiabilidade, juntamente com a precisão. Para Seeber (1993, p. 289), em uma visão geral, os erros são introduzidos em um processo de estimação de parâmetros, se a modelagem for razoavelmente simples e não se adequar devidamente à realidade física.

A aplicação das técnicas geodésicas espaciais exige sistemas de referência consistentes para as coordenadas das estações terrestres e para as efemérides dos satélites. Destaca-se que as efemérides utilizadas no presente trabalho são calculadas pelo International GNSS Service (IGS) e pelo Center for Orbit Determination in Europe (CODE), as quais podem ser devidamente compatibilizadas com as realizações ITRF/IGS. A Figura 1 apresenta como é realizada a aplicação das técnicas geodésicas espaciais, bem como a relação que há entre o sistema satelital e o sistema terrestre.

A incorporação das técnicas espaciais de observação em Geodésia implica na consideração dos aspectos cinemáticos aos quais estão submetidos os SGRs, considerando que as órbitas estão na época de observação, as coordenadas estão em uma época de definição do referencial, e existem diferenças nas velocidades das placas na parte estável e nas áreas de deformação, entre outros efeitos (Sanchez e Drewes, 2016a).

A Figura 1 mostra que as coordenadas “originais” do satélite estão em um referencial celeste e as das estações estão em um sistema referencial terrestre. Para que se possa determinar as coordenadas da estação e as do satélite, estas são transformadas do referencial celeste para o terrestre, considerando os efeitos da rotação terrestre. A distância entre satélite-receptor é dada pela equação (02):

$$d \neq \sqrt{(X_s - X'_p)^2 + (Y_s - Y'_p)^2 + (Z_s - Z'_p)^2} \quad (02)$$

Ainda da Figura 1, vale ressaltar que para o processamento GNSS as coordenadas dos pontos terrestres e dos satélites têm que estar em um mesmo sistema de referência. As coordenadas dos satélites se dão no ITRF em uma época atual, assim como, as coordenadas dos pontos terrestres se dão em um sistema de referência associado à época de definição. Para se obter o mesmo sistema deve-se transformar as coordenadas dos pontos utilizados como estações de referências, da época de definição até a época atual de medição. A transformação inclui: mudança do ITRF e velocidades das estações.

- Atualização das coordenadas via velocidade das estações

Com base nas velocidades das estações é possível atualizar as coordenadas de uma estação, da época de referência para qualquer outra, ou conhecendo-se a época de observação, pode-se determinar as coordenadas para a época de referência. Para uma melhor estimativa da velocidade, o intervalo de tempo mínimo com dados disponíveis da série temporal GNSS deve ser aproximadamente 5 anos (IBGE, 1997), permitindo discriminar movimentos episódicos dos seculares. A Figura 2 mostra como é realizada a atualização das coordenadas das estações a partir das velocidades.

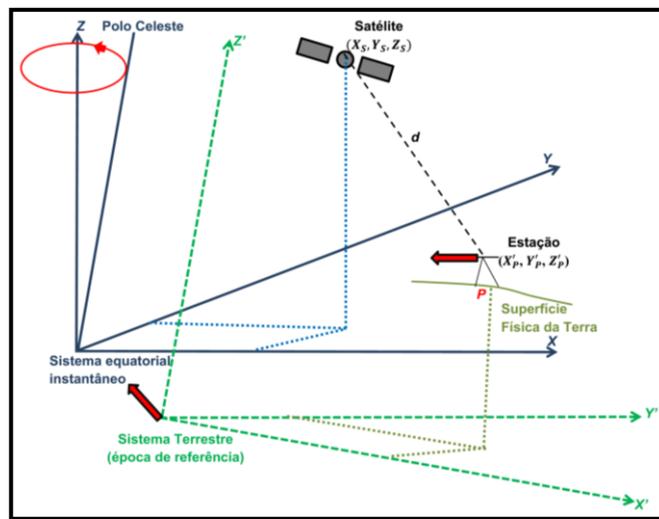


Figura 1: Relação entre o sistema terrestre e o sistema satelital: processamento GNSS. Fonte: Da Silva (2017) *apud* adaptado de Drewes e Sánchez (2015)

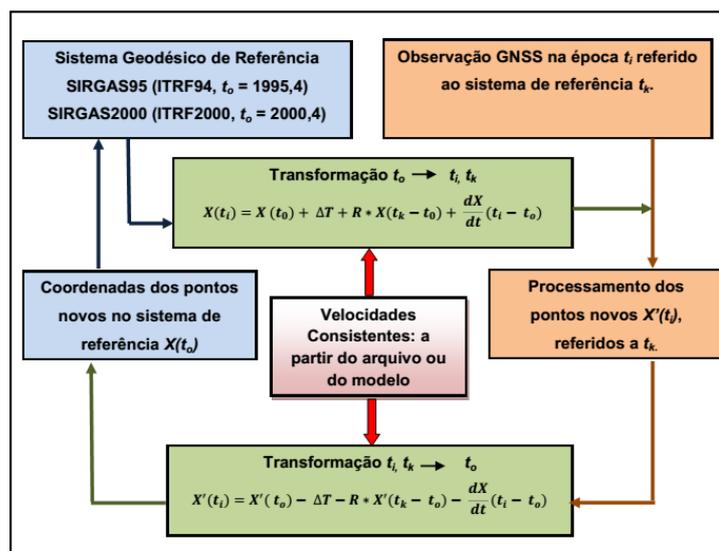


Figura 2: Transformações Das Coordenadas No Sistema Terrestre. Fonte: Da Silva (2017) *apud* adaptado de Drewes e Sánchez (2015) e SIRGAS (2020b)

Na Figura 2 observa-se que inicialmente precisa-se definir o sistema de referência, para realizar a transformação da época de realização para época atual, sendo necessárias medições GNSS na época atual. No processo de transformação das observações é necessário arquivo das coordenadas  $X(t_0)$  na época de realização dos pontos de referências, realizando-se o cálculo das coordenadas das novas estações observadas  $X'(t_i)$ , referida ao mesmo sistema de referência que as coordenadas  $X(t_0)$ . Para realizar a transformação inversa, é necessário obter as coordenadas na época atual e tendo o sistema de referência determinado, obtêm-se as coordenadas na época inicial.

Vale ressaltar alguns detalhes em relação ao processo de transformação:

- Diferenças entre as diversas realizações do ITRF a partir dos parâmetros de transformação de Helmert (7 ou 14).
- As coordenadas das estações na época de definição do SGR podem ser levadas para a época de observação com as velocidades conhecidas, como mostra a equação (03), (Drewes, 2004):

$$\begin{aligned} X_{t_i} &= X_{t_0} + V_X(t_i - t_0) \\ Y_{t_i} &= Y_{t_0} + V_Y(t_i - t_0) \\ Z_{t_i} &= Z_{t_0} + V_Z(t_i - t_0) \end{aligned} \quad (03)$$

Na equação (03),  $X_{t_i}, Y_{t_i}, Z_{t_i}$  são as coordenadas na época de observação;  $X_{t_0}, Y_{t_0}, Z_{t_0}$  são as coordenadas na época de definição do SGR;  $V_X, V_Y, V_Z$  são as componentes de velocidade do ponto;  $(t_i - t_0)$  é a diferença do tempo da época de observação em relação à época de definição do referencial. Nesta situação  $V_X, V_Y, V_Z$  são obtidas das soluções de coordenadas em relação ao tempo e velocidades, como por exemplo, ITRF2000.

- As coordenadas das estações devem ser reduzidas até o ITRFyyyy, as velocidades das estações novas são desconhecidas, equação (04), sendo necessário interpolar a partir de alguma modelo de velocidade, (Drewes, 2004):

$$\begin{aligned} X_{t_0} &= X_{t_i} - V_X(t_i - t_0) \\ Y_{t_0} &= Y_{t_i} - V_Y(t_i - t_0) \\ Z_{t_0} &= Z_{t_i} - V_Z(t_i - t_0) \end{aligned} \quad (04)$$

- Métodos para interpolação das coordenadas  
Um método para interpolação das velocidades horizontais se apresenta no Modelo de Velocidade do SIRGAS (em inglês *Velocity Model of Sirgas (VEMOS)*). Vale destacar que a

partir do VEMOS2009 (Drewes e Heidbach, 2009; 2012) não se obtém as velocidades verticais, pois não podem ser interpoladas com modelos regionais, devido às deformações locais, movimentos tectônicos, efeitos hidrológicos, glaciais e meteorológicos. Com a atualização deste modelo para VEMOS2015 (Sánchez e Drewes, 2016a; 2016b) foi possível à obtenção das velocidades verticais, pois o cálculo é a partir de medições GNSS.

As coordenadas quando são calculadas automaticamente, por exemplo, com o software Bernese Processing Engine (BPE), não se evidencia erros grosseiros e nem influências globais, havendo a necessidade de serem produzidas cuidadosamente. Destaca-se que o uso de efemérides precisas, código e fase, modelos de troposfera e ionosfera, correções de carga oceânica e atmosférica são alguns dos cuidados que devem ser tomados com o processamento BPE, assim como no processamento semiautomático.

Diante do que foi apresentado anteriormente em relação à transformação, o cálculo da velocidade de cada estação pode ser realizado a partir de séries temporais com soluções semanais de uma rede. Com estas, observa-se a mudança gradual das coordenadas com o decorrer do tempo. Sendo assim, é possível detectar efeitos físicos ou estruturais das estações, avaliar os efeitos geodinâmicos locais ou regionais e determinar a velocidade das estações (Silva et al., 2010; Da Silva, 2017). A partir dessas observações, as velocidades das estações são determinadas de forma muito precisa, permitindo a elaboração de modelos cinemáticos de movimento de placas, livres de qualquer suposição geológica (Sánchez e Drewes, 2016a).

Neste sentido, o SIRGAS recomenda o uso do VEMOS para o cálculo das velocidades de pontos na América do Sul e Caribe (Drewes e Heidbach, 2009; 2012; Sánchez e Drewes, 2016a; 2016b; Sánchez e Drewes, 2020) como modelo para obter velocidade horizontal da parte estável da placa SOAM. Mas em áreas com intensa atividade tectônica, o modelo tem limitações.

A Figura 03 mostra uma imagem da América do Sul e Caribe, com o campo de velocidades dado pelo modelo VEMOS2015 referido ao ITRF2008 (Sánchez e Drewes, 2016b). Este foi calculado a partir de medições GNSS registradas depois dos terremotos ocorridos no Chile e México em 2010 (SIRGAS, 2020c). Mais detalhes podem ser vistos também em (Sánchez e Drewes, 2016a; 2016b).

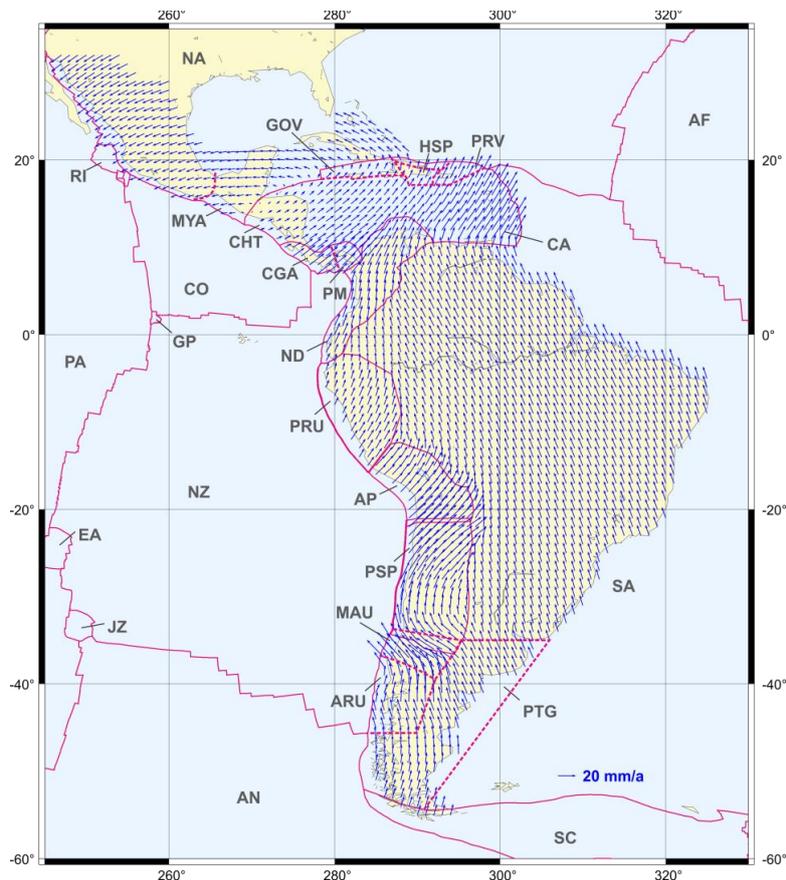


Figura 3 - Modelo de velocidades para América do Sul e Caribe (VEMOS2015) referido ao ITRF2008. Fonte: Sánchez e Drewes (2016b)

Para combinação das estruturas geológicas é indicado o modelo geofísico No Net Rotation - Northwestern University VELOCITY model 1A (NNR-NUVEL-1A) (De Mets et al., 1990; 1994). A teoria de placa tectônicas está baseada principalmente em levantamentos geológicos e geofísicos que representam uma tendência média de movimento avaliada sobre milhões de anos

As placas litosféricas são a fragmentação da crosta terrestre em diversas partes. Em decorrência de aspectos geodinâmicos, estas placas se movem continuamente com diferentes magnitudes, direções e sentido do movimento relativo de acordo com a região em que estão localizadas (Zakarov, 1981, p. 279; Costa, 1999, p. 108). O sentido do movimento relativo é descrito por um vetor de rotação denominado Vetor de Euler (vetor geocêntrico de rotação), sendo especificado quando se tem a latitude e a longitude do polo de rotação, adicionalmente com a velocidade angular de rotação (Turcotte e Schubert, 2001, p. 32). O módulo do Vetor de Euler ou Polo de Euler, ainda chamado de polo de rotação é proporcional à velocidade angular no extremo do vetor, localizado na crosta terrestre (Drewes, 1982, p. 71).

Os vetores de Euler estimados podem ser transformados em velocidades de estações e comparados com observações geodésicas. Três parâmetros são necessários para especificar o vetor de Euler ( $\vec{\Omega}$ ), sendo comumente representado em um sistema cartesiano a partir das três componentes  $\Omega_x, \Omega_y$  e  $\Omega_z$  ou pelos vetores de rotação geocêntricos, dado pelas coordenadas do polo de rotação ( $\Phi, \Lambda$ ) e a velocidade de rotação da placa ( $\omega$ ), (De Mets et al., 1990; Costa et al., 2003). O problema geométrico do movimento das placas consiste em estabelecer o polo de rotação de cada placa e a sua velocidade angular.

Os movimentos crustais horizontal ou vertical são determinados pela repetição de medições geodésicas, realizadas em uma determinada época ou continuamente (Torge, 2001, p. 355). Cada movimento diferencial ( $\Delta \vec{x}_i$ ) de um ponto  $P_i(\vec{x}_i)$  sobre a placa  $k$  em um intervalo de tempo ( $\Delta t$ ), pode ser descrito matematicamente pela equação (05):

$$\Delta \vec{x}_i = (\vec{\Omega}_k * \vec{x}_i) \Delta t \quad (05)$$

Em relação à equação (05) quando se adota um sistema de coordenadas esféricas, representa-se o vetor de rotação  $\vec{\Omega}_k$  a partir de  $(\Phi_k, \Lambda_k)$  e da velocidade de rotação  $(\omega_k)$ , o vetor  $\vec{x}_i$  é representado pela latitude e longitude geodésica  $(\varphi_i, \lambda_i)$  e os deslocamentos de  $P_i$  por  $(\Delta\varphi_i, \Delta\lambda_i)$ . As velocidades de um ponto na placa em relação ao tempo são obtidas derivando a equação (05). Sendo assim, encontra-se a relação dos pequenos deslocamentos  $\Delta\varphi$  e  $\Delta\lambda$  e os parâmetros da placa  $(\Phi, \Lambda, \omega)$ , estas são calculadas pela equação (06) Drewes (1982, 1993):

$$\Delta\varphi_i = \frac{d\varphi}{dt} = \omega_k \cos(\Phi_k) \sin(\lambda_i - \Lambda_k) \quad (06)$$

$$\Delta\lambda_i = \frac{d\lambda}{dt} = \omega_k [\sin(\Phi_k) - \cos(\lambda_i - \Lambda_k) \tan(\varphi_i) \cos(\Phi_k)]$$

O deslocamento em um sistema cartesiano (McCarthy, 1996) é dado pela equação (07):

$$\Delta x = \frac{dx}{dt} = \Omega_y Z - \Omega_z Y$$

$$\Delta y = \frac{dy}{dt} = \Omega_z X - \Omega_x Z \quad (07)$$

$$\Delta z = \frac{dz}{dt} = \Omega_x Y - \Omega_y X$$

Das equações (06) e (07) vale ressaltar que  $\frac{d\varphi}{dt}$  e  $\frac{d\lambda}{dt}$  são dados em  $\left(\frac{\circ}{\text{MA}}\right)$ , sendo MA = milhões de anos e  $\frac{dx}{dt}, \frac{dy}{dt}, \frac{dz}{dt}$  são dados em  $\left(\frac{\text{mm}}{\text{ano}}\right)$ .

Destaca-se que, os modelos de placas tectônicas determinados com observações geodésicas utilizam as velocidades obtidas com técnicas GNSS, VLBI e SLR. Alguns desses modelos são: Recent Plate Velocities (REVEL) (Sella et al., 2002); Actual Plate Kinematic Model (APKIM) (Drewes, 1998); APKIM2003 (Drewes e Meisel, 2003); APKIM2008 (Sánchez e Drewes, 2016b). Outros estudos com o objetivo de determinar o campo de velocidades da parte estável da placa SOAM foram desenvolvidos, tais como: Costa et al. (2003), Perez et al. (2003), Báez Soto (2006), Da Silva et al. (2016), Sánchez e Drewes, (2016a) e (2016b); Da Silva (2017) e Sánchez e Drewes (2020).

## Metodologia

Com a organização e o resgate das informações geodésicas foram utilizados os modelos de velocidade indicados pelo SIRGAS (VEMOS2009 e VEMOS 2015), assim como os modelos geológico e geofísico NNR-NUVEL 1A e APKIM2008, para comparação com estes modelos foi realizado um processamento de dados GNSS no software Bernese 5.2. Para isto gerou-se o campo de velocidade para uma porção das estações brasileiras pertencentes ao SIRGAS e a RBMC e consideramos a principal placa da América do Sul.

## Materiais

Este estudo foi desenvolvido a partir dos seguintes materiais:

- Levantamento de referências bibliográficas, resgate de informações geodésicas e os temas centrais do GGOS.
- Foram consideradas 35 estações GNSS, conforme pode ser visto na Figura 4 a localização de todas as estações utilizadas no processamento para determinação da posição da estação IMBT. Onde se observa que as estações estão distribuídas em todo o território brasileiro.
- O período de dados utilizados é de 5 de setembro de 2007 a 2 de janeiro de 2016, tendo início na semana GPS 1443 e finalizando na semana GPS 1877, totalizando 435 semanas GPS e 3042 observações para cada estação. Vale ressaltar que podem acontecer intempéries e não haver disponibilidade de dados. A escolha da data para início do processamento de dados coincide com a época de materialização da estação IMBT. Esta estação é importante para estudos devido ser um dos Data Vertical do Brasil.
- Observações GNSS - As observações obtidas da RBMC estão em arquivos diários em formato RINEX (Receiver Independent Exchange Format), correspondendo às seções iniciadas às 00h01min e encerradas às 24h00min, tendo um intervalo de rastreamento de 15 segundos. Os equipamentos instalados nas estações da RBMC permitem facilidades operacionais e a disponibilização de serviços, para a realização de levantamentos em tempo real, através da técnica RTK (Real Time Kinematic) ou DGPS (Differential GPS) e o cálculo das correções WADGPS (Wide Area Differential GPS).
- Foram utilizados 98748 arquivos RINEX dos dados das estações GNSS obtidas da RBMC, correspondendo a um total de aproximadamente 420 Gigabytes de dados brutos. Após a seleção dos dados, foram definidas as principais

informações e estratégias que seriam utilizadas no processamento dos dados GNSS no Bernese 5.2. Estas informações precisam estar bem definidas, pois o software Bernese é formado por um conjunto de programas que desempenham funções distintas dentro de um processamento de dados GNSS, para mais detalhes ver Da Silva (2017, Da Silva et al. 2018 e Da Silva e De Freitas, 2019).

- O *software* Bernese versão 5.2 foi a ferramenta utilizada para o processamento das coordenadas para geração do mapa do campo de velocidade e para comparação com os mapas de campo de velocidades com a aplicação do VEMOS2009, VEMOS2015, NNR-NUVEL 1A e APKIM2008.

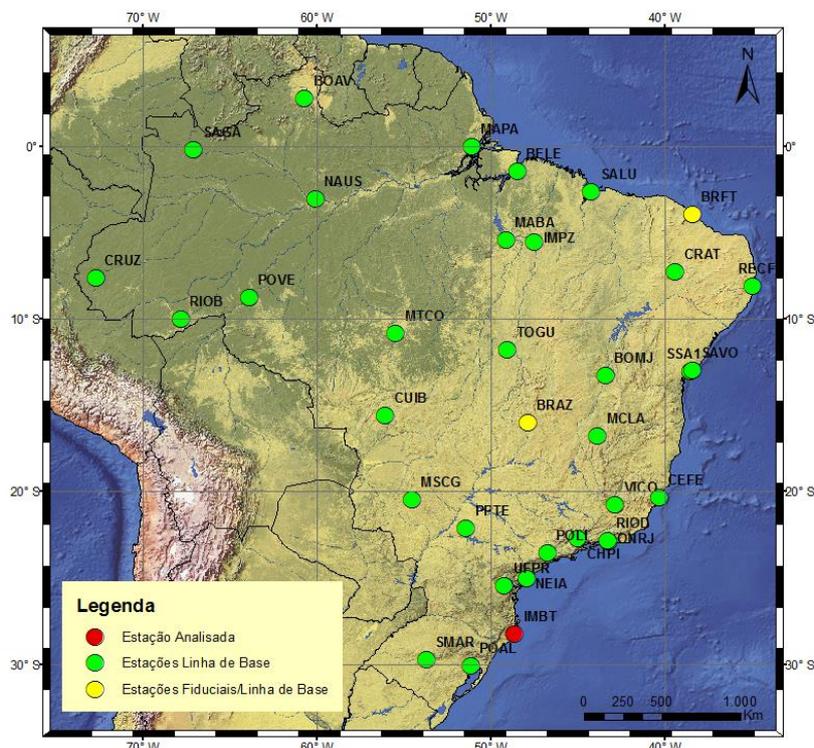


Figura 4: Distribuição das estações GNSS ao longo do território brasileiro

- VEMOS2009 – Neste modelo foram consideradas 496 estações, sendo 95 destas correspondente à solução multianual do SIRGAS (SIR09P01) e as outras estações derivadas de campanhas repetidas de rastreios com GPS por tempo determinado. O campo de superfície foi determinado aplicando o método de elemento finito e colocação por mínimos quadrados com funções de covariância empiricamente determinadas. Mais detalhes podem ser vistos em Drewes e Heidbach (2012) e SIRGAS (2020a).
- VEMOS2015 – Foi calculado a partir de medições GNSS (GPS+GLONASS) registradas depois dos fortes terremotos ocorridos no Chile e no México em 2010. Este modelo se apoia exclusivamente na solução multianual SIR15P01, a qual inclui dados de 456 estações GNSS de monitoramento contínuo observados entre 14 de março de 2010 e 11 de abril de 2015. Mais detalhes podem ser vistos em Sánchez e Drewes

(2016a); Sánchez e Drewes (2016b) e SIRGAS (2020b).

- O NNR-NUVEL 1A é o modelo cinemático para a crosta terrestre, baseado em informações geofísicas e geológicas, onde se considera uma variação linear das coordenadas ao longo do tempo. Ele apenas representa placas rígidas e não inclui zonas de deformação, tal como, por exemplo, os Andes (De Mets et al., 1990; De Mets et al., 1994; Drewes e Heidbach, 2012).
- O APKIM2000 e sua atualização o APKIM2008, em contrapartida, são baseados em observações VLBI, SLR e GNSS (Drewes, 1998; Drewes e Meisel, 2003; Sánchez e Drewes, 2016b).

### Método

*Definição das estratégias utilizadas no processamento de dados GNSS* - As informações das estratégias foram bem definidas, pois o software Bernese é formado por um conjunto de

programas que desempenham funções distintas dentro de um processamento de dados GNSS, mais detalhes podem ser vistos em Da Silva (2017).

A partir do modo BPE (Bernese Processing Engine) realizou-se o processamento automatizado no software Bernese 5.2. Para o feito, desenvolveram-se dois scripts (extensão PCF) um diário baseado no RNX2SNX (RINEX para SINEX) do Bernese 5.2 (Dach, 2011) e um semanal baseado no SEMAN1584 do IBGE (IBGE, 2011). O script semanal é utilizado ao finalizar o processamento diário, pois sua utilização é para avaliar as séries e realizar a combinação das soluções diárias em uma única solução. Vale ressaltar que no processamento semanal a coordenada de cada estação é reduzida ao dia médio de cada semana GPS processada.

*Desenvolvimento de scripts para o processamento dos dados GNSS* - Os scripts foram desenvolvidos a partir da adição das funções que existem no Bernese, sendo necessário serem salvos em diretório. Vale ressaltar que algumas funções têm mais de uma funcionalidade. E, então, é importante que se salve em diretórios distintos. Estes diretórios são criados uma única vez e são executados junto ao script.

Para geração das séries temporais é importante o conhecimento dos dados de entrada, as análises dos dados de saída e a validação dos resultados. No processamento diário são gerados dois arquivos importantes a serem utilizados no processamento semanal, um contém as coordenadas finais e outro contém as equações normais. A combinação das soluções diárias é realizada a partir de um ajustamento por mínimos quadrados das equações normais, onde se estima as coordenadas e velocidades a priori das estações. Na combinação de soluções GNSS podem-se realizar dois tipos de soluções: rede injuncionada (ponderação das coordenadas e velocidades a priori das estações de referência) e rede livre.

*Propagação das coordenadas* - Selecionou-se as 2 estações brasileiras que fazem parte do IGB08 (BRAZ e BRFT), as quais foram utilizadas para a extrapolação das coordenadas para época que atualmente é processada. A época referida para o processamento é 01 de janeiro de 2005. Sendo o IGB08 a atualização mais recente do IGS08. Mais detalhes da atualização podem ser vistos em IGSCB (2018). Para realização da propagação da coordenada utilizou-se o programa COOVEL, o qual faz parte do conjunto de programas que compõem o Bernese (Dach e Walser, 2015; Dach et al., 2015). A utilização do programa COOVEL foi para propagar um conjunto de coordenadas

referidas a uma determinada época, para outra época. Nesta pesquisa utilizou-se as coordenadas de referência IGS05, IGS08 e IGB08 para propagar para a época de processamento.

## Resultados e discussão

A Figura 5 apresenta a direção e sentido das velocidades das estações trabalhadas nesta pesquisa, as quais fazem parte da RBMC e pertencentes à Rede SIRGAS-CON. As velocidades foram obtidas a partir do emprego do VEMOS2009 e do VEMOS2015.

Conforme pode ser observado, as velocidades de todas as estações seguem direções, sentidos e magnitudes próximas. Isto se deve ao fato de que o Brasil está localizado em uma parte estável na placa Sul-americana, de baixa atividade sísmica. O comportamento diverge da velocidade das estações que ocupam regiões de deformação na placa Sul-Americana daquele apresentado para as estações brasileiras. Não sendo adequada a utilização do modelo VEMOS para locais com deformações ou com grandes atividades sísmicas. O VEMOS2009 é um modelo que se recomenda apenas para obter as variações das coordenadas horizontais ao longo do tempo. Sua atualização o VEMOS2015, já possui a velocidade da componente altimétrica das estações. Estudos recentes desenvolvidos por Sánchez e Drewes (2020) mostraram uma atualização do modelo VEMOS. Os autores mostram que os resultados obtidos com o VEMOS2017 são praticamente idênticos aos resultados obtidos com o VEMOS2015 a placa Sul-americana.

Pode-se observar na Figura 5, que as velocidades com aplicação do VEMOS2015, têm uma diferença em relação à aplicação do VEMOS2009. Ressalta-se que o VEMOS2015 foi desenvolvido após o terremoto de Maule no Chile em 2010, o qual afetou o comportamento das velocidades horizontais na Placa SOAM, como é apresentado nas Figuras 6 e 7.

No Brasil, mesmo as velocidades das estações tendo praticamente mesma direção, sentido e magnitude, a taxa de variação da velocidade é distinta de região para região, tanto para latitude como longitude. Na Figura 6 apresenta-se a variação da velocidade em latitude, a qual mostra a diferença que há com a utilização do VEMOS2009 e com o VEMOS2015. Mais detalhes do desenvolvimento do VEMOS2015 podem ser vistos em Sánchez e Drewes (2016b).

Da análise da Figura 6, evidencia-se que houve variação da velocidade em latitude. Mas, observa-se que, algumas estações não sofreram

variações na velocidade da latitude (pontos em laranja).

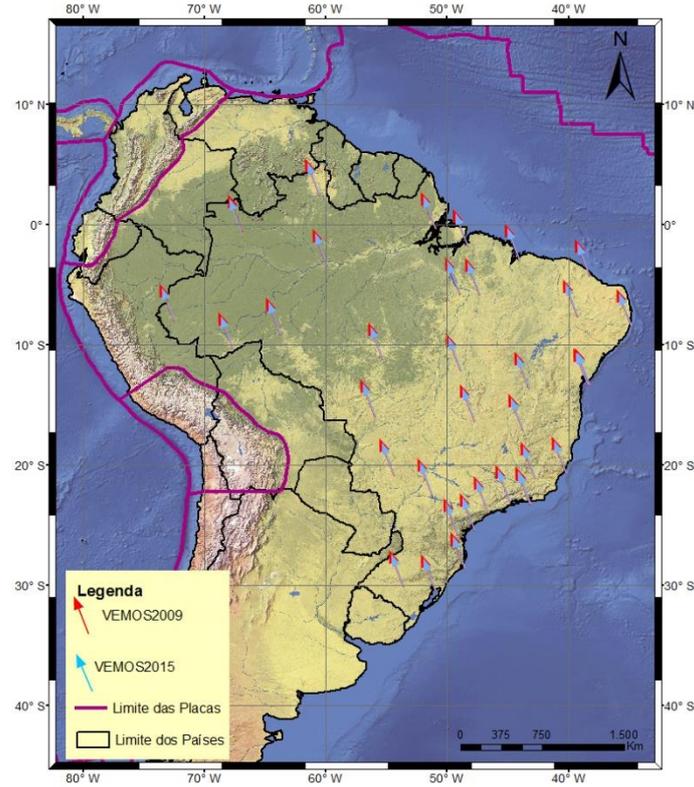


Figura 5 - Direção e sentido da velocidade das estações pertencentes à RBMC.

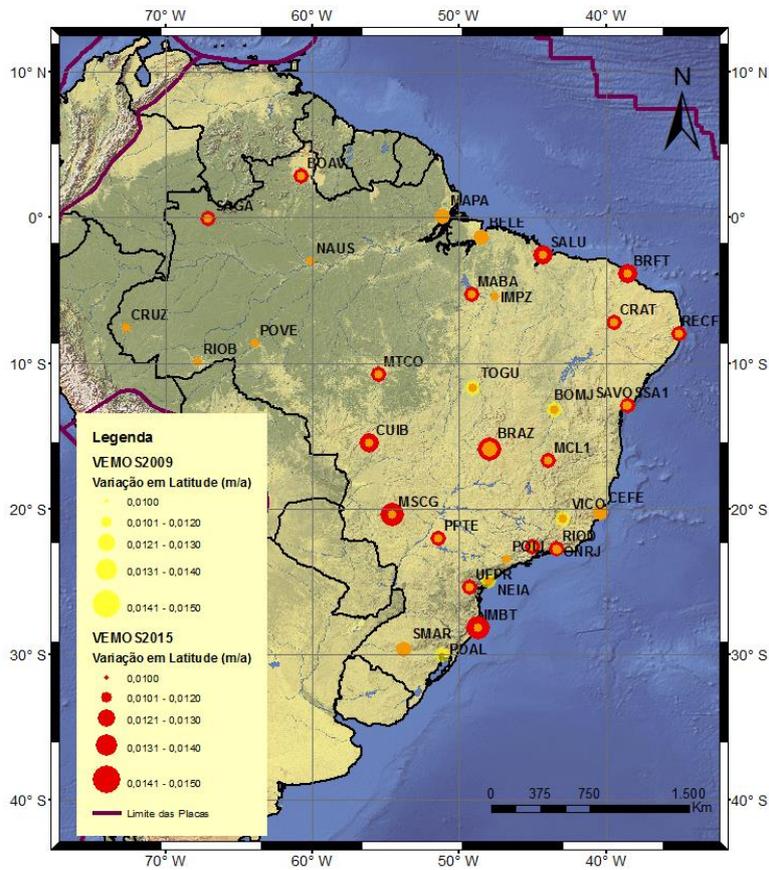


Figura 6: Variação da velocidade em latitude com a utilização do VEMOS2009 e VEMOS2015

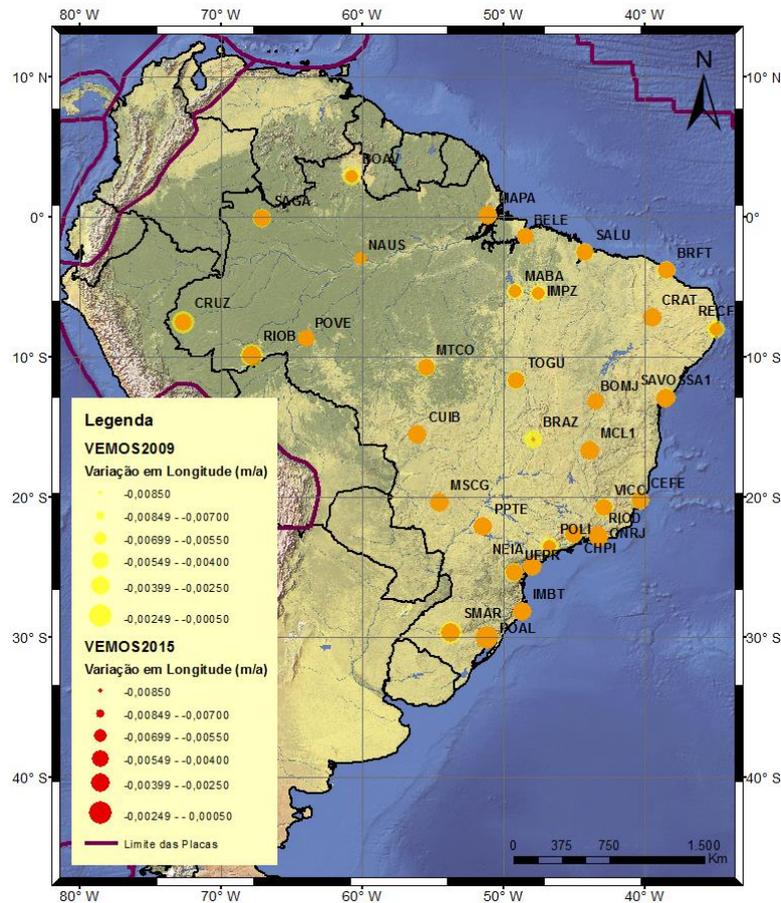


Figura 7: Variação da velocidade em longitude com a utilização do VEMOS2009 e VEMOS2015

Analisando a Figura 7, evidencia-se que houve variação da velocidade em longitude. Vale ressaltar que a variação da longitude não considerou o valor em módulo. Mas, observa-se que, algumas estações não sofreram variações na velocidade da longitude (pontos em laranja). A Tabela 1 apresenta as velocidades da latitude e da longitude e as variações para as estações trabalhadas entre o VEMOS2009 e o VEMOS2015.

Observa-se na Tabela 1 que a estação IMBT apresenta uma variação em latitude de 2,2 mm/ano e uma variação em longitude de -1,2 mm/ano comparando a velocidade antes e após o Terremoto em Maule. A estação de BRAZ apresenta fortes variações em latitude de 2,1 mm/ano e em longitude de -4,8 mm/ano. Sendo que POAL foi à estação que apresentou a maior variação em latitude (-2,4 mm/ano). A estação IMBT é o objeto de estudo desta pesquisa, sendo assim, destaca-se na Tabela 2 os resultados das velocidades a partir do Modelo VEMOS2009 e VEMOS2015 e a estimativa via processamento GNSS apenas para esta estação.

Analisando as velocidades derivadas dos modelos VEMOS e as estimadas pelo

processamento GNSS verifica-se que ambas são próximas. Analisando o processamento realizado no Bernese 5.2, observa-se que há uma subsidência na componente altimétrica da estação IMBT de -3,02 mm/ano.

Nos parágrafos iniciais foram apresentados os resultados do campo das velocidades para as estações pertencentes à RBMC utilizando o modelo VEMOS2009 e VEMOS2015, as quais estão localizadas na placa SOAM. Destaca-se que poucos estudos são desenvolvidos na placa SOAM, mais especificamente no Brasil, por este estar localizado na região estável da placa. As velocidades geradas pelo NNR-NUVELIA servem como aproximação para propagar as coordenadas da estação a partir da época de referência. Destaca-se que a partir do conjunto de vetores de velocidades das estações da RBMC obtidos do NNR-NUVEL-1A, estimaram-se os elementos definidores do movimento da placa SOAM. Com este conjunto pode-se realizar algumas análises e comparações, onde se utilizará os vetores de rotação da placa SOAM do APKIM2008, calculado por Sánchez e Drewes (2016b). Adicionalmente será utilizado o processamento das observações das estações

trabalhadas para se calcular os vetores de rotação da placa SOAM para esta pesquisa. Ressalta-se que para realizar o cálculo destes parâmetros utilizaram-se as equações (5), (6) e (7) e suas respectivas inversas. O campo de velocidade

estimado no processamento é comparado com as velocidades obtidas pelos modelos do NNR-NUVEL1A e APKIM2008, como se apresenta na Figura 8.

Tabela 1: Diferenças da Variação em Latitude e em Longitude obtidas com a Comparação do VEMOS2009 E VEMOS2015

Estação	VEMOS 2009		VEMOS 2015		VARIACÕES	
	Vel <sub>lat</sub> (m/a)	Vel <sub>long</sub> (m/a)	Vel <sub>lat</sub> (m/a)	Vel <sub>long</sub> (m/a)	Vel <sub>lat</sub> (mm/a)	Vel <sub>long</sub> (mm/a)
BELE	0,0125	-0,0045	0,013	-0,0052	0,5	-0,7
BOAV	0,0115	-0,0033	0,0122	-0,0055	0,7	-2,2
BOMJ	0,0126	-0,004	0,012	-0,0053	-0,6	-1,3
BRAZ	0,0123	-0,0037	0,0144	-0,0085	2,1	-4,8
BRFT	0,0118	-0,0036	0,0139	-0,0045	2,1	-0,9
CEFE	0,0122	-0,0039	0,0123	-0,0041	0,1	-0,2
CHPI	0,0117	-0,0034	0,0125	-0,0042	0,8	-0,8
CRAT	0,0117	-0,0032	0,0124	-0,0026	0,7	0,6
CRUZ	0,0116	-0,001	0,0105	-0,004	-1,1	-3
CUIB	0,012	-0,0035	0,0135	-0,0039	1,5	-0,4
IMBT	0,012	-0,0026	0,0142	-0,0038	2,2	-1,2
IMPZ	0,0119	-0,0041	0,0116	-0,0067	-0,3	-2,6
MABA	0,012	-0,004	0,013	-0,0057	1	-1,7
MAPA	0,0122	-0,0037	0,0122	-0,0038	0	-0,1
MCL1	0,0119	-0,0033	0,0123	-0,0033	0,4	0
MSCG	0,012	-0,0025	0,0142	-0,0033	2,2	-0,8
MTCO	0,0119	-0,0032	0,0125	-0,005	0,6	-1,8
NAUS	0,0112	-0,0055	0,0103	-0,0062	-0,9	-0,7
NEIA	0,0122	-0,0031	0,0107	-0,0035	-1,5	-0,4
ONRJ	0,0118	-0,0039	0,0114	-0,0033	-0,4	0,6
POAL	0,0122	-0,0019	0,0098	-0,0022	-2,4	-0,3
POLI	0,0117	-0,0033	0,0113	-0,0055	-0,4	-2,2
POVE	0,0102	-0,0043	0,0118	-0,004	1,6	0,3
PPTE	0,012	-0,0026	0,0121	-0,0039	0,1	-1,3
RECF	0,0117	-0,0031	0,0126	-0,0064	0,9	-3,3
RIOB	0,012	-0,0011	0,0113	-0,0028	-0,7	-1,7
RIOD	0,0119	-0,0038	0,0128	-0,0032	0,9	0,6
SAGA	0,0113	-0,0029	0,0122	-0,0047	0,9	-1,8
SALU	0,0118	-0,0038	0,0131	-0,0044	1,3	-0,6
SAVO	0,0118	-0,0032	0,0125	-0,0048	0,7	-1,6
SMAR	0,0122	-0,0019	0,0121	-0,0031	-0,1	-1,2
SSA1	0,0118	-0,0032	0,0108	-0,0033	-1	-0,1
TOGU	0,0121	-0,0036	0,0116	-0,0047	-0,5	-1,1
UFPR	0,012	-0,0029	0,0121	-0,0042	0,1	-1,3
VICO	0,0123	-0,0036	0,0115	-0,004	-0,8	-0,4

Tabela 2: Velocidades Derivadas do VEMOS2009, VEMOS2015 e do Processamento para Estação IMBT

Modelo	V <sub>Lat</sub> (mm/a)	V <sub>Long</sub> (mm/a)	h(mm/a)	V <sub>X</sub> (mm/a)	V <sub>Y</sub> (mm/a)	V <sub>Z</sub> (mm/a)
VEMOS2009	12,00	-2,60	-	1,80	-6,00	10,60
VEMOS2015	14,20	-3,80	-3,40	-0,37	-5,30	14,14
Processamento	16,18	-3,87	-3,02	-0,39	-5,69	12,56

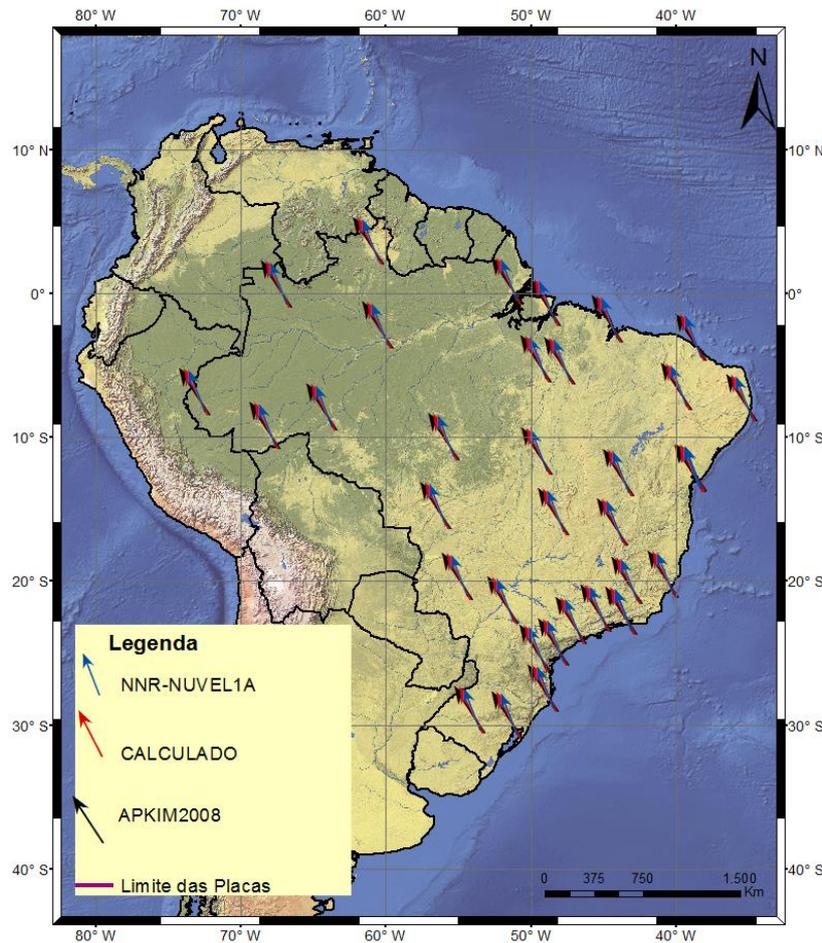


Figura 8: Representação do vetor resultante da velocidade, comparação derivada dos modelos NNR-NUVEL1A, APKIM2008 e os valores calculados a partir do processamento GNSS.

Observa-se na Figura 8 que as estações obtidas com diferentes modelos e com a solução geodésica, têm direções, sentidos e magnitudes similares. Estas também apresentam comportamentos similares com os campos de velocidades gerados utilizando-se o VEMOS2009

e VEMOS2015. Na Tabela 3 apresentam-se os vetores de rotação da placa SOAM advindos dos modelos NNR-NUVEL1A, APKIM2008 e os calculados. Na Tabela 4 apresentam-se os vetores de rotação da placa SOAM.

Tabela 3: Comparação entre os Vetores de Rotação da Placa SOAM

Modelo	Placa	$\Delta x$ (s/MA <sup>(*)</sup> )	$\Delta y$ (s/MA)	$\Delta z$ (s/MA)
NNR-NUVEL-1A	SOAM	-0,060	-0,087	-0,050
APKIM 2008	SOAM	-0,231	-0,367	-0,153
CALCULADO	SOAM	-0,157	-0,112	-0,089

(\*) MA = Milhões de anos

Tabela 4 - Comparação entre os Vetores de Rotação da Placa SOAM em Coordenadas Esféricas. Fonte: (1) De Mets et al. (1994); Drewes (1998); Drewes e Meisel (2003); (2) Sánchez e Drewes (2016b).

Modelo	Placa	$\Phi^o$	$\Lambda^o$	$\frac{\Omega^o}{MA}$
NNR-NUVEL1A (1)	SOAM	-25,24	235,57	0,1164
APKIM2008(2)	SOAM	-19,4	237,80	0,4600
CALCULADO	SOAM	-24,80	215,64	0,2126

Destaca-se que os valores calculados nas Tabelas 3 e 4 derivados das velocidades das estações utilizadas no processamento, representam de forma mais realística o movimento das estações brasileiras, assim como os resultados para Imbituba, os quais foram obtidos a partir do processamento e assim foram calculados, Tabelas

2 e 5, respectivamente. Na Tabela 5 apresentam-se as velocidades das componentes obtidas dos modelos NNR-NUVEL1A, APKIM2008 e as calculadas para a estação de Imbituba, utilizando o IGB08 e os parâmetros apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 5: Componentes das Velocidades a partir do NNR-NUVEL1A, APKIM2008 e a Solução Calculada para Estação IMBT

Modelo	V <sub>Lat</sub> (mm/a)	V <sub>Long</sub> (mm/a)	V <sub>X</sub> (mm/a)	V <sub>Y</sub> (mm/a)	V <sub>Z</sub> (mm/a)
NNR-NUVEL1A	10,20	-3,57	0,850	-6,37	10,01
APKIM2008	41,61	-8,68	4,562	-12,61	23,40
Calculado	19,20	-9,95	-0,39	-8,02	10,80

## Conclusão

A partir da utilização de dados provenientes de séries temporais do posicionamento GNSS pode-se detectar e avaliar os efeitos geodinâmicos em uma porção das estações GNSS brasileiras, assim como analisar o comportamento do Datum Vertical Brasileiro (estação IMBT). Assim como a partir dos modelos de velocidades propostos pelo SIRGAS e modelo de velocidade geofísico e geológico, observou-se que embora as estações brasileiras se encontram em uma área estável, após um terremoto em Maule, algumas estações sofreram variações em sua direção de latitude e longitude. Pode-se destacar algumas estações com variações em sua direção, por exemplo, a estação BRAZ apresentou fortes variações em latitude de 2,1 mm/ano e em longitude de -4,8 mm/ano. Embora, a estação POAL foi a que apresentou a maior variação em latitude (-2,4 mm/ano). Em relação ao Datum Vertical Brasileiro, a estação IMBT, apresentou variação em latitude de 2,2 mm/ano e uma variação em longitude de -1,2 mm/ano comparando a velocidade antes e após o Terremoto em Maule.

Desta forma, os resultados considerando os modelos de velocidade de SIRGAS mostraram que após o terremoto no Chile em algumas regiões do Brasil houveram efeitos geodinâmico. Em comparação aos modelos geológico e geofísico observou-se que o campo de velocidade definido no processamento GNSS conseguiu-se retratar a realidade, como caso de estudo, foi considerada a estação de Imbituba, e analisando a componente altimétrica observou-se que há subsidência na área.

## Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística por disponibilizar gratuitamente os dados GNSS oriundo da RBMC. LMS gostaria de agradecer a bolsa de Doutorado (160309/2013-1).

## Referências

- Abreu, M.A., 2019. Determinação e Análise das Principais Componentes de Maré Terrestre e de Carga Oceânica, por meio de Dados de Posição e do Campo de Gravidade Terrestre. Tese (Doutorado). Brasília, UNB.
- Albaraci, F.L., Guimarães, G.N., Trabanco, J.L.A., Santos, M., 2019. Modelagem dos Efeitos Geodinâmicos que afetam as Medições Maregráficas e GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia*, vol. 71, nº 1, pp. 75 – 98. 10.14393/rbcv71n1-46124.
- Báez Soto, J.C., Drewes, H., De Freitas, S.R.C. 2004. Introducción de los Sistemas Geodésicos Cinemáticos Modernos Aplicación y Consistencia. Congreso Internacional de Ciencias de la Tierra - Santiago, Chile.
- Báez Soto, J.C., 2006. Monitoramento das Deformações da Rede de Referência do SIRGAS em Área com Atividade Tectônica. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curitiba, UFPR.
- Benedito, P.M.P, 2016. A Influência da Carga Oceânica nos Modelos de Maré Terrestre - Estudo de Caso em Cananéia, Valinhos e Presidente Prudente. Dissertação de Mestrado. Campinas, UNICAMP.
- Yue, C., Dang, Y., Xu, C., Gu, S., Dai, H., 2020. Effects and Correction of Atmospheric Pressure Loading Deformation on GNSS Reference Stations in Mainland China. *Mathematical Problems in Engineering*, Volume 2020, Article

- ID 4013150, 10 pages.  
<https://doi.org/10.1155/2020/4013150>.
- Costa, S.M.A., 1999. Integração da Rede Geodésica Brasileira aos Sistemas de Referência Terrestres. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas), Curitiba, UFPR.
- Costa, S. M., Santos, M., Gemael, C., 2003. A Velocity Field Estimation of the Brazilian Portion of the SOAM Plate. GPS Solution, n° 7, p. 186-193.
- Dach, R., 2011. Script RNX2SNX: RINEX TO SINEX. Bernese 5.2.
- Dach, R., Lutz, S., Walser, P., Fridez, P., 2015. Bernese GNSS Software version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern.
- Dach, R., Walser, P., 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2: Tutorial – Processing Example, Introductory Course and Terminal Session. Astronomical Institute, University of Bern.
- Da Silva, L.M., De Freitas, S.R.C., Dalazoana, R. 2016. Análise de Séries Temporais Maregráficas Correlacionadas com Observações GNSS do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba-SC. Revista Brasileira de Cartografia, v. 68, p. 73-90.
- Da Silva, L.M., Ferreira, L.M., Camboim, S.P., De Freitas, S.R.C., 2017. Análise de Dados Geodésicos a partir do Desenvolvimento de uma Aplicação Standalone. Revista Brasileira de Geomática. v. 5, n. 3, p. 308-325. doi:10.3895/rbgeo.v5n3.5427.
- Da Silva, L.M., 2017. Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas). Curitiba, UFPR.
- Da Silva, L.M., De Freitas, S.R.C., Dalazoana, R., 2018. Analysis of Dynamic Effects on the Brazilian Vertical Datum. IntechOpen Science: Sea Level Rise and Coastal Infrastructure: Yuanzhi Zhang, Yijun Hou and Xiaomei Yang, p. 21-38, doi: 10.5772/intechopen.71546.
- Da Silva, L., De Freitas, S., 2019. Análise da Evolução Temporal do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba. Revista Cartográfica 98, p. 33-57. <https://doi.org/10.35424/rcar.v5i98.140>.
- De Freitas, S.R.C., 1993. Marés gravimétricas: Implicações para a placa Sul-Americana. Tese (Doutorado), São Paulo, USP - IAG.
- De Freitas, S.R.C., Mantovani, M.S.M., Melchior, P., Shukowsky, W., 1995. Some Implications of the Gravity Tides in the South American Plate. Earth Tides, ed. H. Hsu, Science Press, New York, p. 387-393.
- De Freitas, S.R.C., 2015. SIRGAS-WGIII Activities for Unifying Height Systems in Latin America. Revista Cartográfica 91, p. 75-91.
- De Mets, C., Gordon, R., Argus, D.F., Stein, S., 1990. Current Plate Motion. Geophysical Journal International, n° 101, p. 425-478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x>.
- De Mets, C., Gordon, R., Argus, D. F., Stein, S. Effect of Recent Revision to the Geomagnetic Reversal Time Scale on Estimates of Current Plate Motion. Geophysical Research Letters, v. 21, n° 20, p. 2191-2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>.
- Drewes, H., 1982. A Geodetic Approach for the Recovery of Global Kinematic Plate Parameters. Bulletin Géodésique, n° 56, p. 70-79.
- Drewes, H., 1993. Global and Regional Deformation Models of the Earth's Surface. Proceeding of the International Conference on Cartography and Geodesy, Maracaibo (Venezuela), Instituto de Antronomia y Geodesia, Madrid, p. 288-298.
- Drewes, H., 1998. Combination of VLBI, SLR and GPS determined station velocities for actual plate kinematic and crustal deformation models. M. Feissel (Ed.) - Geodynamics, IAG Symposia, Springer, v. 119, p.377-382. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-642-72245-5_59).
- Drewes H., Meisel B., 2003. An Actual Plate Motion and Deformation Model as a Kinematic Terrestrial Reference System. Geotechnologien Science Report, n° 3.
- Drewes, H., 2004. Procesamiento de Información GPS com Relación a Marcos de Referencia de Épocas Diferentes. SIRGAS Workshop, Aguascalientes-México.
- Drewes, H., Heidbach, O., 2009. The 2009 Horizontal Velocity Model for South America and the Caribbean. Submitted to C. Pacino et al. (Eds.). IAG Scientific Assembly "Geodesy for Planet Earth": IAG Symposia Series, Buenos Aires, Argentina.
- Drewes, H., Heidbach, O., 2012. The 2009 Horizontal Velocity Model for South America and the Caribbean. In: S. Kenyon et al. (eds.), Geodesy for Planet Earth, International Association of Geodesy Symposia 136, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, p. 657-664, doi: 10.1007/978-3-642-20338-1\_81.
- Drewes, H.; Sánchez, L., 2015. Geodetic Reference Systems and Frame. VII SIRGAS School on Reference Systems, Santo Domingo, Dominican Republic. Disponível em:

- [http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletins/BoI20/36\\_Drewes\\_Sanchez\\_2015\\_Geodetic\\_reference\\_systems.pdf](http://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletins/BoI20/36_Drewes_Sanchez_2015_Geodetic_reference_systems.pdf).
- Farrel, W.E., 1972. Deformation of the Earth by Surface Loads. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, n°. 10, p. 761-797.
- GGOS. The Global Geodetic Observing System: Introducing GGOS, 2020. Additional Information: GGOS Components. Disponível em <http://www.ggos.org/>. Acesso: 20 abril 2020.
- IBGE. Relatório de visita à Estação Maregráfica de Imbituba. Rio de Janeiro, 1997. Departamento de Geodésia.
- IBGE. Manual de Atividades: Centro de Processamento SIRGAS – IBGE, 2011.
- IGSCB. IGB08: an update on IGS08, 2018. Disponível em: <https://igscb.jpl.nasa.gov/pipermail/igsmail/2012/007853.html>. Acessado em 23/02/2018.
- ITRF. International Terrestrial Reference Frame: Relationship between TRS's, 2020. Disponível em: [http://itrf.ensg.ign.fr/rel\\_trs.php](http://itrf.ensg.ign.fr/rel_trs.php). Acessado em 18/04/2020.
- Luz, R.T., Bosch, W., De Freitas, S.R.C., Heck, B., Dalazona, R., 2009. Evaluating the Brazilian Vertical Datum Through Improved Coastal Satellite Altimetry Data. *Michael Sideris. (Org.). IAG Series: Observing our Changing Earth*, 1 ed. Berlin: Springer-Verlag, v. 133, p. 735-741. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5\\_84](https://doi.org/10.1007/978-3-540-85426-5_84).
- Mccarthy, D.D., 1996. IERS Technical Note 21 – IERS Conventions (1996). U. S. Naval Observatory.
- Mohamed, A.S., Radwan, A.M., Sharf, M., Hamimi, Z., Hegazy, E.E., Aly, N.A., Gomaa, *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 18, p.161-172. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2000000200005>.
- Seeber, G., 1993. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications*. Walter de Gruyter, New York, 531 p.
- Sella, G., Dixon, T., Mao, A., 2002. REVEL: A Model for Recent Plate Velocities from Space Geodesy, *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n° B4, p. 11-31. <https://doi.org/10.1029/2000JB000033>
- Silva, A. L., Costa, S. M. A., Vaz, J. A., 2010. Deslocamento das Estações SIRGAS-CON em Função do Terremoto ocorrido no Chile – Uma Abordagem do Centro de Processamento SIRGAS – IBGE. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife – PE, p. 1-5.
- M., 2016. Evaluation of the Deformation Parameters of the Northern part of the Egypt using Global Navigation Satellite System (GNSS). *National Research Institute of Astronomy and Geophysics: NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, p. 1-11, doi:10.1016/j.nrjag.2016.01.001.
- Perez, J.A.S., Monico, J.F.G., Chavez, J., 2003. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning: The South American Plate Case. *Journal of Global Positioning System*, v. 2, n° 2, p. 90-99.
- Ramos, M.P., Dal Poz, W.R., Carvalho, A.S., 2016. Análise das Possibilidades de Transformação de Referencial e Atualização de Coordenadas Estimadas pelo PPP. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n°3, p.389-404. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000300022>.
- Sánchez, L., Drewes H. Vemos2015, 2016a. Velocity and Deformation Model for Latin America and the Caribbean, PANGAEA, doi:10.1594/PANGAEA.863131.
- Sánchez, L., Drewes H., 2016b. Crustal Deformation and Surface Kinematics after the 2010 Earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*, p. 1-23. doi:10.1016/j.jog.2016.06.005.
- Sánchez, L., Drewes, H., 2020. Geodetic Monitoring of the Variable Surface Deformation in Latin America. *International Association of Geodesy Symposia*. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/1345\\_2020\\_91](https://doi.org/10.1007/1345_2020_91).
- Sapucci, L.F, Monico, J.F.G., 2000. Transformação de Helmert Generalizada no Posicionamento de Alta Precisão: Fundamentação Teórica e Exemplicações.
- SIRGAS. Rede SIRGAS-CON: Coordenadas, 2020a. Disponível em: <http://www.sirgas.org/index.php?id=183>. Acessado em 01/04/2020.
- SIRGAS. Velocidades, 2020b. Disponível em: <http://www.sirgas.org/index.php?id=54>. Acessado em 01/04/2020.
- SIRGAS. VEMOS, 2020c. Disponível em: <http://www.sirgas.org/index.php?id=241>: VEMOS. Acessado em 01/04/2020.
- Torge, W., 2001. *Geodesy. 3rd compl. rev. and ext. ed.*, Walter de Gruyter. Berlin. ISBN 3-11-017072-8, 416 p.
- Turcotte, D.L., Schubert, G., 2001. *Geodynamics, Second Edition*. Cambridge University Press, United Kingdom. 456 p.
- Vandam, T.M., Blewitt, G., Heflin, M.B, 1994. Atmospheric Pressure Loading Effects on

Global Positioning System. Journal of Geophysical Research, v. 99, n° B12, p. 23939-23950.

Zakatov, P. S., 1981. Curso de Geodesia Superior. Editora Rubiños-1860, S.A., Madrid.