



Potencial da Utilização de Multivelocidade no Processo de Atualização Temporal de Coordenadas no PPP

Potential of Using Multi-Velocities in the Process of Updating Coordinates Obtained with PPP

Krisley Xavier Soares de Freitas ¹, William Rodrigo Dal Poz ², Lécio Alves Nascimento ³

¹ Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa - MG, Brasil, krisley.freitas@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8453-324X>

² Universidade Federal de Viçosa (UFV), Departamento de Engenharia Civil, Viçosa - MG, Brasil, william.dalpoz@ufv.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9532-3643>

³ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Norte de Minas Gerais (IFNMG) - Campus Araçuaí - MG, Brasil, lecio.nascimento@ifnmg.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2499-4372>

Recebido: 07.2021 | Aceito: 06.2022

Resumo: Atualmente, no procedimento de atualização temporal de coordenadas adota-se velocidades constantes no tempo e únicas (monovelocidade). Entretanto, propõe-se nesta pesquisa avaliar o potencial da realização do procedimento supramencionado com a aplicação de multivelocidade, isto é, atribuindo ao mesmo ponto mais de uma velocidade, sendo cada uma utilizada em um período específico do procedimento. Idealmente, essas velocidades são estimadas por meio de séries temporais de coordenadas com pelo menos dois anos cada, e que somadas compreendam todo o período da atualização temporal desejada. Utilizando dados das estações BOAV, NAUS, VICO, ROCK, LORS e CTA1, calculou-se a discrepância planimétrica e altimétrica resultante da atualização das coordenadas por períodos de 8 e 10 anos. Considerando os resultados obtidos, observou-se que as multivelocidades proporcionaram resultados planimétricos melhores (ou similares) quando comparados àqueles obtidos com as monovelocidades para a maioria das estações utilizadas (5 de 6 estações). Os resultados obtidos nas atualizações com aplicação da multivelocidade estimada com metade da série posicional (4 e 5 anos) apresentaram majoritariamente ordem milimétrica, seja em uma atualização de 8 ou 10 anos e em estações localizadas perto ou distantes das bordas das placas ou sob fortes efeitos de cargas hidrológicas. Entretanto, na altimetria, os melhores resultados (ou similares) deste procedimento foram verificados em 3 das 6 estações. Quando comparada à modelos de velocidade amplamente utilizados, a atualização com multivelocidade se mostrou eficaz, apresentando resultados melhores que os de modelos globais ITRF2000 e NUVEL-1A e regionais VEMOS2009 (utilizado pelo IBGE-PPP) e VEMOS2017.

Palavras-chave: Atualização de coordenadas. Multivelocidade. Série temporal. IBGE-PPP.

Abstract: Currently, in the procedure of temporal updating of coordinates, constant and unique speeds are adopted in time (monovelocity). However, this research proposes to evaluate the potential of performing the aforementioned procedure with the application of multi-speed, that is, attributing more than one speed to the same point, each one being used in specific periods of the procedure. Ideally, these velocities are estimated through time series of coordinates with at least two years each, which together comprise the entire period of the desired temporal update. Using data from BOAV, NAUS, VICO, ROCK, LORS and CTA1 stations, the planimetric and altimetric discrepancy resulting from updating the coordinates for periods of 8 and 10 years was calculated. Considering the results obtained, it was observed that the multi-speeds provided better (or similar) planimetric results when compared to those obtained with the monovelocity for most of the stations used (5 out of 6 stations). The results obtained in the updates with the application of multivelocity estimated with half of the positional series (4 and 5 years) presented mostly millimeter order, either in an update of 8 or 10 years and in stations located near or far from the edges of the plates or under strong effects of hydrological loads. However, in altimetry, the best (or similar) results of this procedure were verified in 3 of the 6 stations. When compared to widely used velocity models, the multivelocity update proved to be effective, presenting better results than the global models ITRF2000 and NUVEL-1A and regional models VEMOS2009 (used by IBGE-PPP) and VEMOS2017.

Keywords: Coordinates update. Multi-velocities. Time Series. IBGE-PPP.

1. INTRODUÇÃO

O processo de segmentação da litosfera, camada terrestre composta pelo manto superior e pela crosta, deu origem a diversas placas de contornos irregulares denominadas de placas litosféricas. Em função da liberação do calor oriundo das fontes internas da Terra, essas placas apresentam uma movimentação contínua ao longo do tempo, em diferentes direções e com magnitudes variáveis, causando alterações nas posições de pontos localizados sobre a superfície da placa (coordenadas), que são dependentes de sua época de obtenção. Nesse sentido, comumente se investiga e monitora a movimentação das placas fundamentando-se na análise da variação temporal da posição (séries temporais posicionais) de pontos que integram redes geodésicas (SAPUCCI; MONICO, 2001; PEREZ, 2002; TERRINHA, 2005).

Diversas atividades geodésicas são dependentes das séries posicionais das estações que compõem as redes geodésicas. Em alguns casos, tais séries são integradas a outras técnicas geodésicas para geração de produtos fundamentais de alta qualidade e acurácia, como por exemplo, a realização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*) denominada de ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), internacionalmente adotada como referencial geodésico terrestre e considerada o referencial mais acurado (NOLL, 2014; ALTAMIMI et. Al, 2016; IERS, 2021). Salienta-se que a materialização do ITRF consiste em um conjunto de posições associadas à uma época específica e suas respectivas velocidades (taxa de movimentação das placas). Contudo, devido ao constante movimento das placas litosféricas, estes conjuntos posicionais necessitam ser recalculadas periodicamente, razão pela qual são disponibilizadas diversas versões do ITRF (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012; BLICK et al., 2014).

Jekeli (2012) afirma que uma forma de lidar com as diferenças de referenciais e épocas das coordenadas consiste em utilizar a transformação de Helmert e seus respectivos parâmetros de transformação, atrelados a um modelo de velocidades para a compatibilização, tanto do sistema de referência (mudança de referencial) quanto da época (atualização temporal de coordenadas). Além disso, Carvalho (2015) destaca que, assim como as coordenadas, as velocidades podem estar associadas a diferentes sistemas de referência, sendo a compatibilização de ambas para um referencial comum uma condição ideal do procedimento de atualização temporal das coordenadas de uma época de origem para uma de destino. Adicionalmente, Sapucci e Monico (2001) destacam que o rigor com que deve ser tratada as transformações entre os diferentes referenciais no posicionamento de alta precisão é justificável devido às variações da ordem de milímetros a centímetros por ano ocasionadas pelo movimento (velocidade) das placas litosféricas. Ademais, deve-se considerar na transformação de Helmert as variações temporais dos parâmetros envolvidos.

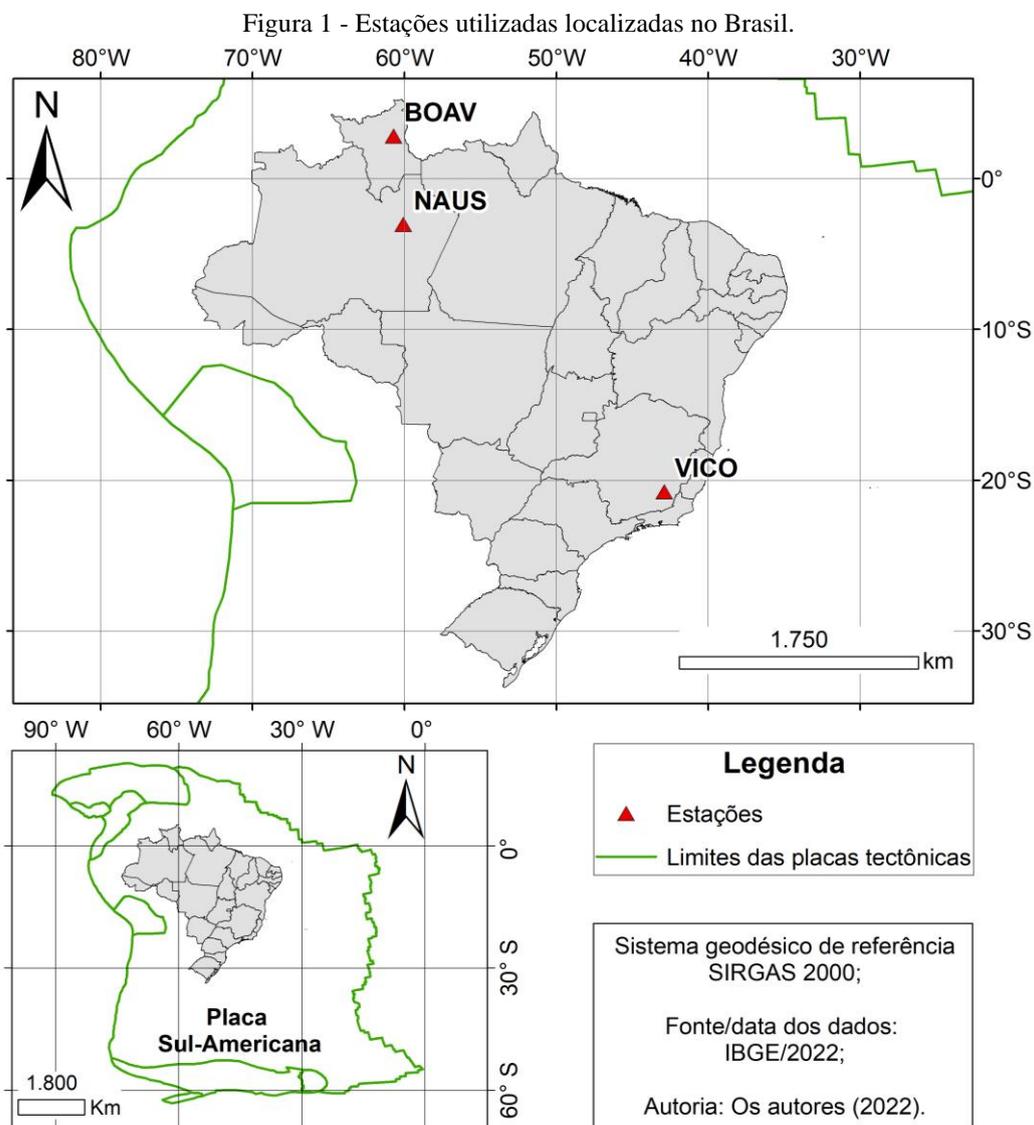
Segundo SIRGAS (2021a), as velocidades de pontos na superfície terrestre podem ser obtidas através de modelos de velocidades ou deformações, ou estimadas através de levantamentos GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) contínuos (séries posicionais) que abranjam um período mínimo de dois anos. De acordo com Zamora (2014), as velocidades podem ser estimadas de forma relativamente fácil através do ajuste de uma regressão linear simples pelo método dos mínimos quadrados, ou seja, assume-se que a movimentação do ponto de interesse segue um modelo linear. Contudo, outros processos geodinâmicos locais ou regionais também exercem influência na movimentação das estações geodésicas, induzindo assim sinais associados à deformação da crosta terrestre, em distintas escalas de tempo, tais como as deformações interanuais de carregamento de superfície e rotação secular de placas tectônicas (SANTAMARÍA-GÓMEZ, 2019). Salienta-se que tais deformações são associadas às variações da massa de água, atmosférica, oceânica e continental; e ao movimento secular do polo de rotação da Terra referente à resposta viscoelástica da Terra aos deslocamentos de massa causados por fatores concomitantes como a deglaciação e mudanças do nível do mar, respectivamente (NAKIBOGLU; LAMBECK, 1980, SANTAMARÍA-GÓMEZ; MÉMIN, 2015). Nesse contexto, é importante que seja utilizado um estimador robusto para a determinação das velocidades com as séries posicionais, tal como o MIDAS (*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness*) (BLEWITT et al., 2016).

No procedimento de atualização temporal de coordenadas, adota-se velocidades constantes no tempo e únicas (monovelocidade) para os pontos de interesse. Entretanto, propõe-se nesta pesquisa avaliar o potencial da realização do procedimento supramencionado com a aplicação de multivelocidade, isto é, atribuindo ao mesmo ponto de interesse mais de uma velocidade, sendo cada uma utilizada em períodos específicos do procedimento. Idealmente, espera-se que essas velocidades sejam estimadas através de séries temporais de

coordenadas do ponto de interesse, com pelo menos dois anos cada SIRGAS (2021a) e que somadas compreendam todo o período da atualização temporal desejada.

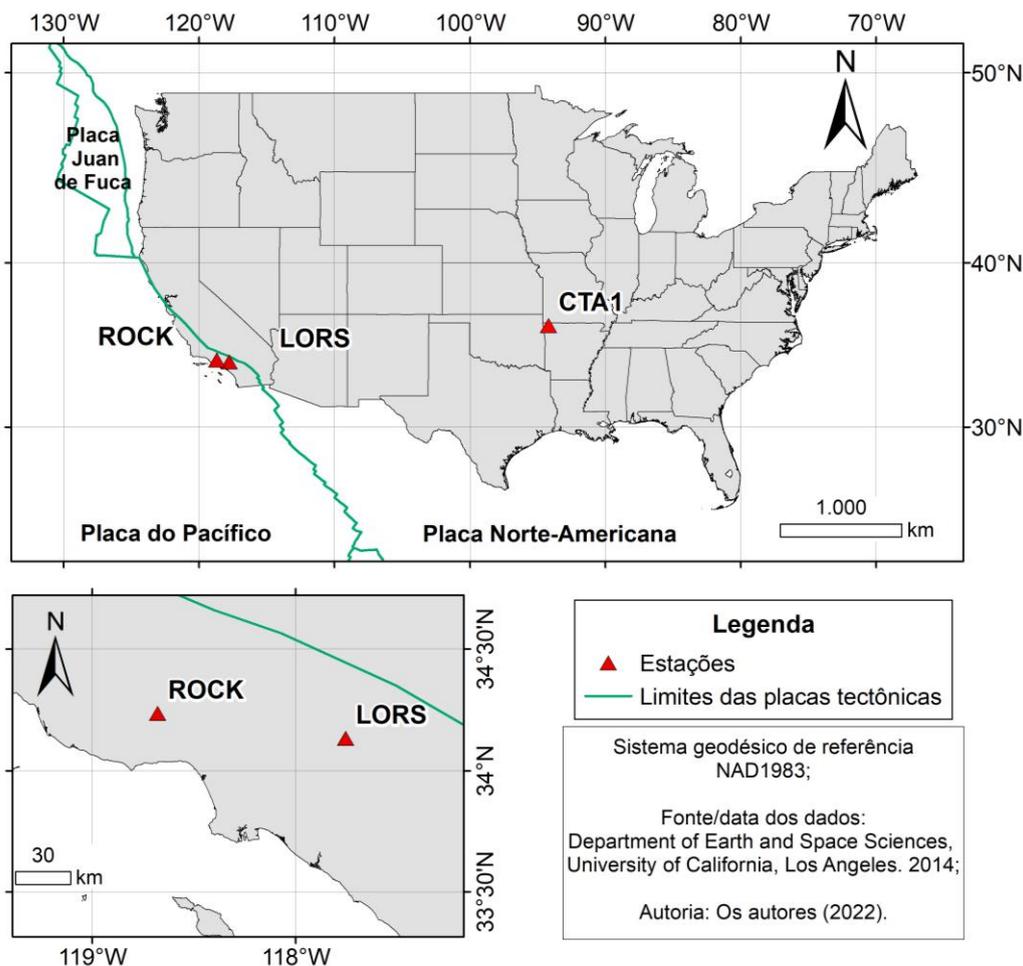
2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização desta pesquisa foram utilizados dados de observação GNSS – GPS (*Global Positioning System*) e GLONASS (*Global'naya Navigatsionnay Sputnikovaya Sistema*) – de seis estações, três localizadas no Brasil e três nos Estados Unidos da América, como mostrado nas Figura 1 e 2.



Elaboração: Os autores (2022).

Figura 2 - Estações utilizadas localizadas nos Estados Unidos da América.



Elaboração: Os autores (2022).

Destaca-se que das três estações localizadas nos Estados Unidos da América, duas se encontram no estado da Califórnia, em uma região de alta atividade sísmica da Placa do Pacífico, caracterizada pela falha geológica de San Andreas, nas cidades de La Verne (LORS) e Simi Valley (ROCK), respectivamente. A terceira localiza-se em Rogers (CTA1), no estado do Arkansas, região estável da placa Norte-Americana. Quanto às três estações localizadas no Brasil, pode-se observar que estas apresentam uma distribuição que contempla regiões distintas do seu território. Cabe destacar que o Brasil está situado na parte estável da placa Sul-Americana. Informações acerca das estações GNSS assim como os períodos adotados nas séries temporais estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Estações utilizadas e seus respectivos períodos de dados. *S.A. = San Andreas

Estação	Rede	Município	País	Placa	Distância de S.A.* (Km)	Data inicial	Data final
BOAV	RBMC	Boa Vista, RR	Brasil	Sul-Americana	----	01/01/2010	31/12/2019
NAUS	RBMC	Manaus, AM	Brasil	Sul-Americana	----	01/01/2010	31/12/2019
VICO	RBMC	Viçosa, MG	Brasil	Sul-Americana	----	01/01/2010	31/12/2019
ROCK	IGS	Simi Valley, CA	EUA	Pacífico	~35	01/01/2012	31/12/2019
LORS	NCN	La Verne, CA	EUA	Pacífico	~57	01/01/2012	31/12/2019
CTA1	NCN	Rogers, AR	EUA	Norte-Americana	~2300	01/01/2010	31/12/2019

Elaboração: Os autores (2022).

A geração das séries posicionais foi efetuada a partir dos dados de observação GNSS (GPS e GLONASS) em formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange*) com período de rastreamento de 24 horas (L1L2), processados em modo estático no serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - PPP) (IBGE-PPP, 2021). Este serviço consiste em uma adaptação do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – PPP*) (versão 1.05/11216 atualizada) para utilização no Brasil, disponibilizado de forma online e gratuita pelo IBGE, e possibilita aos usuários realizar o pós-processamento de dados GPS e

GLONASS, de maneira isolada e/ou simultânea, fornecendo resultados acurados tanto na realização do ITRF(IGS) (*International GNSS Service*) referente à época de coleta dos dados (atualmente IGB14, compatível e alinhado com o ITRF2014) quanto no SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000). Adicionalmente, também são disponibilizadas as coordenadas em SIRGAS2000 na época de realização do sistema, época 2000,4 (IBGE, 2020; IBGE-PPP, 2021). Adicionalmente, destaca-se que este serviço utiliza modelagem para correção dos efeitos derivados das marés oceânicas, dos efeitos troposféricos, dos efeitos de primeira ordem da ionosfera etc. Contudo, não utiliza modelos para a correção dos efeitos de segunda ordem da ionosfera, da carga atmosférica e da carga hidrológica, além de não integrar a portadora L5 e dados da constelação Galileo ao processamento. Detalhes sobre o IBGE-PPP, bem como sobre a modelagem e estratégia de processamento, podem ser consultados em (IBGE, 2020). Adicionalmente, o procedimento utilizado para a geração das séries de informações posicionais (coordenadas cartesianas X, Y, Z ; elipsoidais φ, λ, h e as precisões de ambas) pode ser consultado em Nascimento et al. (2017).

Originalmente, as coordenadas estimadas neste serviço estão associadas à realização IGS (IGS05, IGS08, IGB08, IGS14 ou IGB14) da época de coleta dos dados – ECD. Nesse sentido, notou-se que as coordenadas estavam referenciadas a pelo menos quatro realizações IGSyy-ECD/IGbyy-ECD. Por conseguinte, efetuou-se a compatibilização entre os referenciais IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e ITRF2014-ECD. Este último foi escolhido por ser a mais consistente, justificável pela consideração de movimentos não lineares das estações, incluindo sinais sazonais (anuais e semestrais) de posições de estações e deformação ocorridas após eventos sísmicos causados por grandes terremotos (ALTAMIMI et al., 2016).

Salienta-se que o IGS14/IGB14 e o ITRF2014 são compatíveis e alinhados (IGSACC, 2021; REBISCHUNG; SCHMID, 2016; REBISCHUNG, 2020), assim como o IGS08/IGB08 e o ITRF2008 (IGSACC, 2021; WESTON; SOLER, 2012), o IGS05 e o ITRF2005 (IGSACC, 2021).

O procedimento de compatibilização entre referenciais se deu seguindo o rigor teórico evidenciado por Carvalho (2015), Almeida, Oliveira e Dal Poz (2016), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016), Braga e Dal Poz (2017) e Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021) em que a transformação de referencial ocorre de forma intermediária (transformando do ITRF2005-ECD para ITRF2008-ECD e do ITRF2008-ECD para ITRF2014-ECD), e não de forma direta (ITRF2005-ECD para ITRF2014-ECD). Nesse sentido, após a atualização dos parâmetros e compatibilização dos referenciais das velocidades e das coordenadas, obteve-se as coordenadas referenciadas ao ITRF2014-ECD, prontas então para serem atualizadas. O procedimento para atualização de coordenadas pode ser verificado em Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) e Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021).

Uma vez obtidas as séries temporais posicionais, observou-se que estas apresentavam alguns dias sem dados disponíveis, distribuídos aleatoriamente nos períodos das séries. Considerando que o procedimento de estimação de velocidades utilizado nessa pesquisa requer séries temporais posicionais sem períodos de falhas (sem dados), foi necessário imputar valores aos dias sem dados. Existem diversos métodos que possibilitam o preenchimento de dados faltantes em séries temporais, dentre eles optou-se por utilizar o implementado na função `na.interp()`, pertencente ao pacote `forecast` (HYNDMAN et al., 2021) do programa R (R CORE TEAM, 2021). Esta função inicialmente elimina a componente sazonal da série temporal e em seguida aplica uma interpolação linear, de forma a imputar os valores faltantes, e então adiciona a componente sazonal (MORITZ et al., 2015). Com as séries em ITRF2014-ECD e imputadas dos dados faltantes, procedeu-se à estimação das velocidades utilizando o MIDAS (*Median Interannual Difference Adjusted for Skewness*).

Blewitt et al. (2016) destaca que o método MIDAS é uma versão customizada do Theil-Sen (THEIL, 1950; SEN, 1968) que incorpora as qualidades necessárias para a estimativa acurada de velocidades de estações GNSS, como a insensibilidade a variações sazonais e resistência a saltos de descontinuidade das séries. Nesse sentido, o MIDAS calcula incertezas realistas para as velocidades, que são baseadas na distribuição de amostras de inclinações observadas.

Contudo, o MIDAS apresenta três limitações que seus usuários devem estar atentos. A primeira delas diz respeito a estações que apresentam velocidades não constantes, o que pode tornar a interpretação das velocidades MIDAS problemática. Entretanto, destaca-se que dependendo da situação, esta interpretação pode ser possível. Por exemplo, se uma estação é alvo de um evento que ocorre depois do ponto do meio da série temporal (como por exemplo, um terremoto seguido de deformações pós-sísmicas), a velocidade MIDAS pode

ser interpretada como a velocidade antes do evento. A segunda está associada à não mitigação de efeitos de sinais periódicos, exceto se forem harmônicos de um ano. Portanto, ela é completamente insensível a sinais sazonais de repetições anuais, mas pode ser sensível a sinais de outras frequências. Felizmente, o nível de viés da velocidade causado pelos sinais periódicos diminui rapidamente com o tempo, mais rápido que para o ruído branco (BLEWITT; LAVALLÉE, 2002). Além disso, teoricamente, o número de saltos arbitrariamente grandes que pode ser tolerado pelo MIDAS é $(T-1)/2$, onde T é o período da série temporal em anos. Portanto, três anos é o período mínimo para ser resistente a um único salto, podendo tolerar 17% de dados sendo *outliers*. Assintoticamente, a série temporal mais longa pode tolerar até 25% dos dados sendo *outliers* (BLEWITT et al., 2016). Por último, o MIDAS assume uma série temporal contínua. Logo, sua robustez não pode ser garantida em séries com intervalos vazios. Mais detalhes sobre o MIDAS podem ser encontrados em Blewitt et al. (2016).

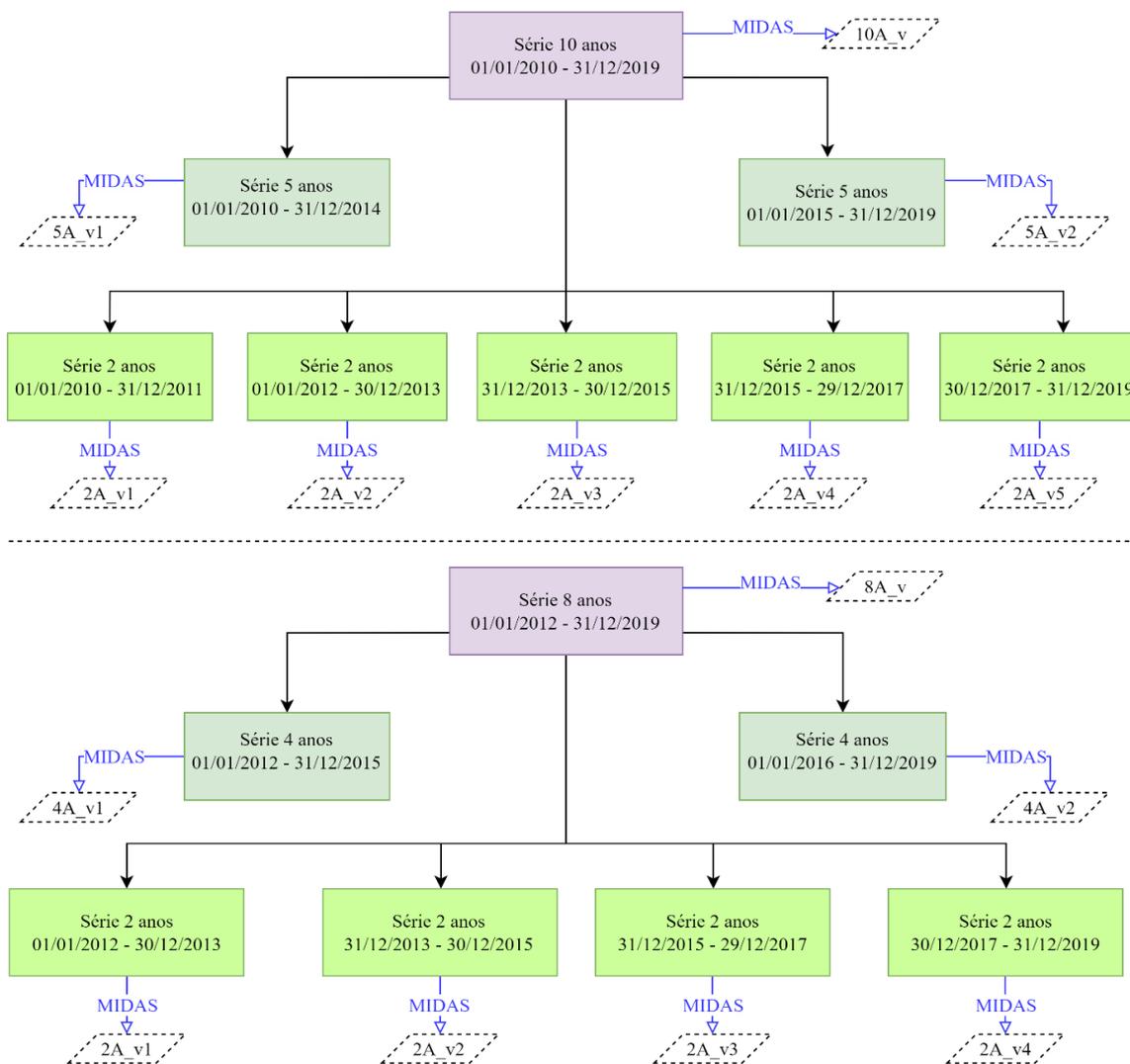
O MIDAS está disponível através do programa SARI (*Senales y Analisis de Ruido Interactivo*) (SANTAMARÍA-GÓMEZ, 2019), que consiste em um conjunto de ferramentas de análises focado em séries temporais posicionais oriundas de observações GNSS, desenvolvido em ambiente R e com interface interativa. O SARI pode ser utilizado offline em um computador local ou acessado a partir de um servidor público em SARI (2021).

Considerando que SIRGAS (2021a) evidencia que as velocidades de pontos na superfície terrestre devem ser estimadas através de levantamentos GNSS, contínuos ou repetitivos (séries temporais posicionais), que abranjam um período mínimo de dois anos, adotou-se como critério para a estimação das velocidades período de dados das séries posicionais, definindo-as como longas (8 e 10 anos), intermediárias (4 e 5 anos) e curtas (2 anos). Dessa forma, três procedimentos foram utilizados na estimação das velocidades:

- a) primeiramente estimou-se a velocidade com dados da série posicional completa de cada estação, ou seja, uma velocidade referente aos 10 anos das séries da BOAV, NAUS, VICO e CTA1 (e uma velocidade referente a 8 anos das séries da ROCK e LORS);
- b) em seguida, dividiu-se as séries iniciais ao meio, formando duas séries de cinco (quatro) anos, e obtendo uma velocidade para cada metade; e
- c) por fim, dividiu-se as séries iniciais em cinco (quatro) partes, de forma que cada parte compreenda um período de dois anos.

O fluxograma do processo de obtenção das velocidades pode ser visualizado na Figura 3.

Figura 3 - Fluxograma do processo de obtenção das velocidades para cada série.



Elaboração: Os autores (2022).

De forma a analisar o desempenho das velocidades, realizou-se a atualização de coordenadas utilizando as velocidades estimadas nos três processos supracitados (para cada série), e posteriormente, calculou-se as discrepâncias planimétrica e altimétrica. Inicialmente considerou-se que as coordenadas de referência para o cálculo das discrepâncias deveriam estar associadas à data/época inicial das séries temporais posicionais utilizadas. Entretanto, não foi possível encontrar coordenadas oficiais de referência para todas as estações na época desejada, além de não haver informações sobre o método de processamento e as precisões das coordenadas fornecidas. Nesse sentido, mostrou-se pertinente utilizar um único método de processamento para estimar as coordenadas de referência das estações utilizadas, diretamente na época de interesse e com precisão conhecida.

Ebner e Featherstone (2008) analisaram as coordenadas de 46 pontos de uma rede de controle geodésico processadas com o software científico Bernese (DACH et al., 2015) e com o CSRS-PPP (NRCan, 2021) e concluíram que para obter resultados compatíveis àqueles obtidos com o Bernese em rede deve-se efetuar o processamento de arquivos de observação GNSS com seis dias (144 horas) consecutivos de rastreamento (limite máximo de processamento atual – janeiro de 2021 – do CSRS-PPP). Dessa forma, optou-se por este procedimento para a obtenção das coordenadas de referência. Após a concatenação dos seis arquivos de observação no formato RINEX, com 24 horas cada, utilizando o software TEQC (*Translation, Editing and Quality Check*) (UNAVCO, 2020) efetuou-se o processamento no CSRS-PPP, obtendo assim as coordenadas de referência para cada estação. Salienta-se que a data tomada como referência foi o dia 04/01, tanto para as séries que começam em 01/01/2010 quanto para as que começam em 01/01/2012. Tal data foi escolhida considerando três dias antes e dois dias depois do dia estabelecido, de forma que este ficasse próximo ao meio

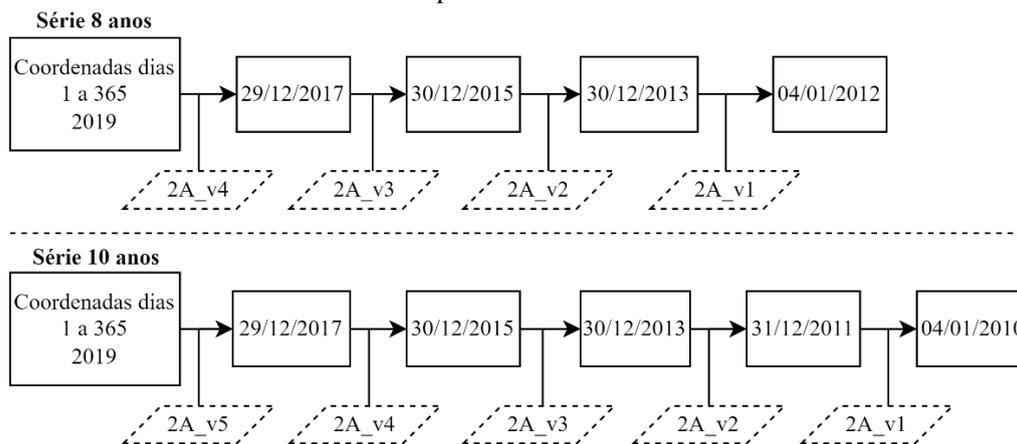
do intervalo dos seis dias, conforme estabelecido em Cunha (2020). Justifica-se a escolha da data de referência supracitada devido a indisponibilidade de arquivos RINEX de observação dos três dias anteriores a 01/01/2010 – data inicial das séries posicionais de algumas estações – o que impossibilitou a aplicação do dia 01/01 como data de referência.

As coordenadas utilizadas na atualização correspondem aos 365 dias do ano de 2019 para todas as estações (01/01/2019 a 31/12/2019 - dia corrido 1 ao 365), que foram atualizadas para respectiva data/época de referência (d_r/e_r). A atualização, assim como a estimação das velocidades, também seguiu três procedimentos.

O procedimento de atualização das coordenadas também seguiu três etapas:

- inicialmente atualizou-se as coordenadas dos 365 dias com monovelocidade (referente à série de dez (oito) anos) diretamente para d_r/e_r ;
- na sequência, realizou-se a atualização com multivelocidade, utilizando as velocidades referentes a cada metade da série inicial. Desse modo, as coordenadas dos 365 dias foram atualizadas para 01/01/2015, época 2015,00 (01/01/2016, época 2016,00) utilizando a velocidade 5A_v2 (4A_v2) e depois atualizadas para d_r/e_r utilizando a velocidade 5A_v1 (4A_v1);
- por fim, as coordenadas dos 365 dias foram atualizadas com multivelocidade, utilizando as velocidades referentes às séries posicionais de dois anos, para d_r/e_r . Este processo é ilustrado no fluxograma exposto na Figura 4.

Figura 4 - Atualização das coordenadas dos 365 dias com multivelocidade para d_r/e_r , utilizando as velocidades das séries posicionais de 2 anos.



Elaboração: Os autores (2022).

De posse das coordenadas atualizadas e de referência, procedeu-se ao cálculo das discrepâncias planimétricas e altimétricas. Para a discrepância planimétrica, inicialmente fez-se necessário efetuar a transformação das coordenadas cartesianas estimadas em coordenadas geodésicas (φ , λ , h), no mesmo referencial, conforme Monico (2008). Seguindo a recomendação de Moritz (2000), utilizou-se o elipsoide GRS80 (*Geodetic Reference System 1980*) na transformação. A sequência de cálculos para a obtenção das discrepâncias planimétricas e altimétricas, em metros, pode ser verificada em Torge (2001), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016), Menezes (2019) e Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021).

Adicionalmente, com o intuito de avaliar a qualidade das velocidades obtidas com o MIDAS, estimou-se velocidades com quatro modelos de velocidades para comparação, sendo eles o NUVEL 1A (DEMETS et al, 1994), ITRF2000 (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002), VEMOS2009 (Modelo de Velocidade para o SIRGAS 2009) (DREWES; HEIDBACH, 2012) e VEMOS2017 (DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020). Destaca-se que o VEMOS2015 (SÁNCHEZ; DREWES, 2016) não foi utilizado devido ao fato dele ser válido somente para o período de março de 2010 a abril de 2015 (SIRGAS, 2021b).

O modelo de velocidade denominado de VEMOS é periodicamente atualizado fundamentando-se nas soluções do centro SIRGAS. Esse modelo representa as médias anuais dos movimentos horizontais da

superfície e possibilitam somente a atualização planimétrica das coordenadas, uma vez que as variações altimétricas são principalmente decorrentes de movimentos locais, dificultando assim a modelagem regional (DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2015). As três últimas versões do VEMOS lançadas são: VEMOS2009, VEMOS2015 e VEMOS2017, sendo a VEMOS2009 utilizada com maior frequência atualmente.

Para o ITRF2000, os modelos globais de movimentos relativos de placas foram obtidos utilizando dados geológicos e geofísicos médios dos últimos milhões de anos, assim como o RM2 (*Relative Motion 2*) (MINSTER; JORDAN, 1978) e o amplamente utilizado NUVEL-1A (DEMETS et al, 1994), dividindo a litosfera em placas tectônicas (aproximadamente 10 grandes e algumas de tamanhos menores). Salienta-se que a taxa de orientação do ITRF2000 está alinhada com o NUVEL-1A, sendo uma aplicação implícita da condição NNR (*No-Net-Rotation*). Nesse sentido, tal procedimento é equivalente à minimização da taxa de rotação global entre ITRF2000 e NNR-NUVEL-1A (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002).

O modelo de velocidades NUVEL-1A é um modelo geofísico amplamente utilizado pela comunidade científica desde sua publicação, combinando variações de anomalias magnéticas, azimutes de falhas, assim como vetores de sismos para estimar as velocidades relativas das placas (DEMETS et al., 1994). Este modelo deriva velocidades angulares relativas de 14 placas litosféricas, adotando como referência, geralmente, a Placa do Pacífico, isto é, todas as outras placas movimentam-se em relação a esta última (DEMETS et al., 1990). Adicionalmente, salienta-se que este é um modelo horizontal (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002).

As velocidades referentes aos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017 foram obtidas através do software RINEXHub, implementado em linguagem C e Java, fundamentando-se nas metodologias empregadas por Nascimento et al. (2017) e por Prol et al. (2014). O software RINEXHub foi registrado no INPI (Instituto Nacional de Propriedade Industrial) sob número *BR512021001835-4* e está disponível gratuitamente no endereço <https://rinexhub.wordpress.com/>. Detalhes sobre o RINEXHub, suas funcionalidades e operacionalização podem ser consultadas em seu manual. Quanto às velocidades referentes ao ITRF2000 e NUVEL-1A destaca-se que estas foram obtidas pela *Plate Motion Calculator*, desenvolvida pela UNAVCO (*University NAVstar Consortiu*), que estima velocidades para qualquer localização na Terra com um ou mais modelos de movimento de placas (UNAVCO, 2021).

Por fim, salienta-se que as velocidades estimadas com os modelos VEMOS aqui utilizadas estão referenciadas ao ITRF2014, enquanto as estimadas com o ITRF2000 e NUVEL-1A estão associadas ao WGS84 (*World Geodetic System 1984*). No entanto, o WGS84 passou por um refinamento adicional para manter a similaridade com as realizações ITRF. Dessa forma, o ITRF2014 e o WGS84 são consistentes e alinhados, com seus parâmetros de transformação nulos (BURCH, 2016).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Inicialmente, salienta-se que, de forma a facilitar as análises e o entendimento, dividiu-se os resultados em dois experimentos. Tais experimentos, descritos na sequência, foram realizados obtendo séries temporais de 365 dias das discrepâncias planimétricas e altimétricas das seis estações, utilizando diferentes estratégias de obtenção de velocidades para a atualização das coordenadas.

As velocidades para as estações utilizadas, obtidas de acordo com a metodologia anteriormente descrita e referenciadas ao ITRF2014, assim como suas incertezas estão dispostas na Figura 5. Em relação às velocidades referentes às estações localizadas no Brasil (BOAV, NAUS e VICO) nota-se que a incerteza (Sigma) da monovelocidade (10A) foi menor que a incerteza de todas as multivelocidades (5A ou 2A). Já as multivelocidades 5A apresentaram incertezas menores que todas as 2A na BOAV e VICO. Na estação NAUS a incerteza da multivelocidade 2A_v5 apresentou valores menores que as incertezas de todas as multivelocidades 5A e demais 2A para as componentes V_x e V_y .

Em relação à magnitude das velocidades, pode-se notar uma grande variação tanto entre as 2A, quanto na comparação com as monovelocidades. Essa variação apresentou maior magnitude na componente V_x e menor na V_z . Para a NAUS, por exemplo, a componente V_x da 10A foi -4,40 mm/ano, bem próximo da 5A_v1 (-4,90 mm/ano) e 5A_v2 (-4,00 mm/ano), ao contrário da 2A_v2 (8,13 mm/ano) e 2A_v4 (-9,84 mm/ano), que apresentaram valores bem distintos. A variação entre os valores das monovelocidades e das 5A foi relativamente menor, se comparado às 2A. Apenas na NAUS (V_y) e VICO (V_x e V_y) a diferença foi maior

que 2 mm/ano. A diferença entre as incertezas das velocidades das séries 5A_v1 e 5A_v2 não foram significativas, especialmente para a NAUS, o que se justifica pela baixa significância da diferença na magnitude do ruído aleatório das séries posicionais.

Figura 5 - Velocidades estimadas pelo MIDAS com seus respectivos sigmas para cada estação.



Elaboração: Os autores (2022).

Considerando as estações localizadas nos Estados Unidos (ROCK, LORS e CTA1), pode-se observar, conforme Figura 5, que diferentemente das estações do Brasil a estação CTA1 apresentou incertezas das velocidades 5A_v2 menores que as da monovelocidade. Além disso, nas três estações as incertezas das 5A/4A_v2 ficaram próximas às da monovelocidade e menores que as das 5A/4A_v1. Adicionalmente, as incertezas das 5A/4A_v1 foram maiores que as incertezas da 5A/4A_v2, que por sua vez foram maiores que as da 5A/4A_v3.

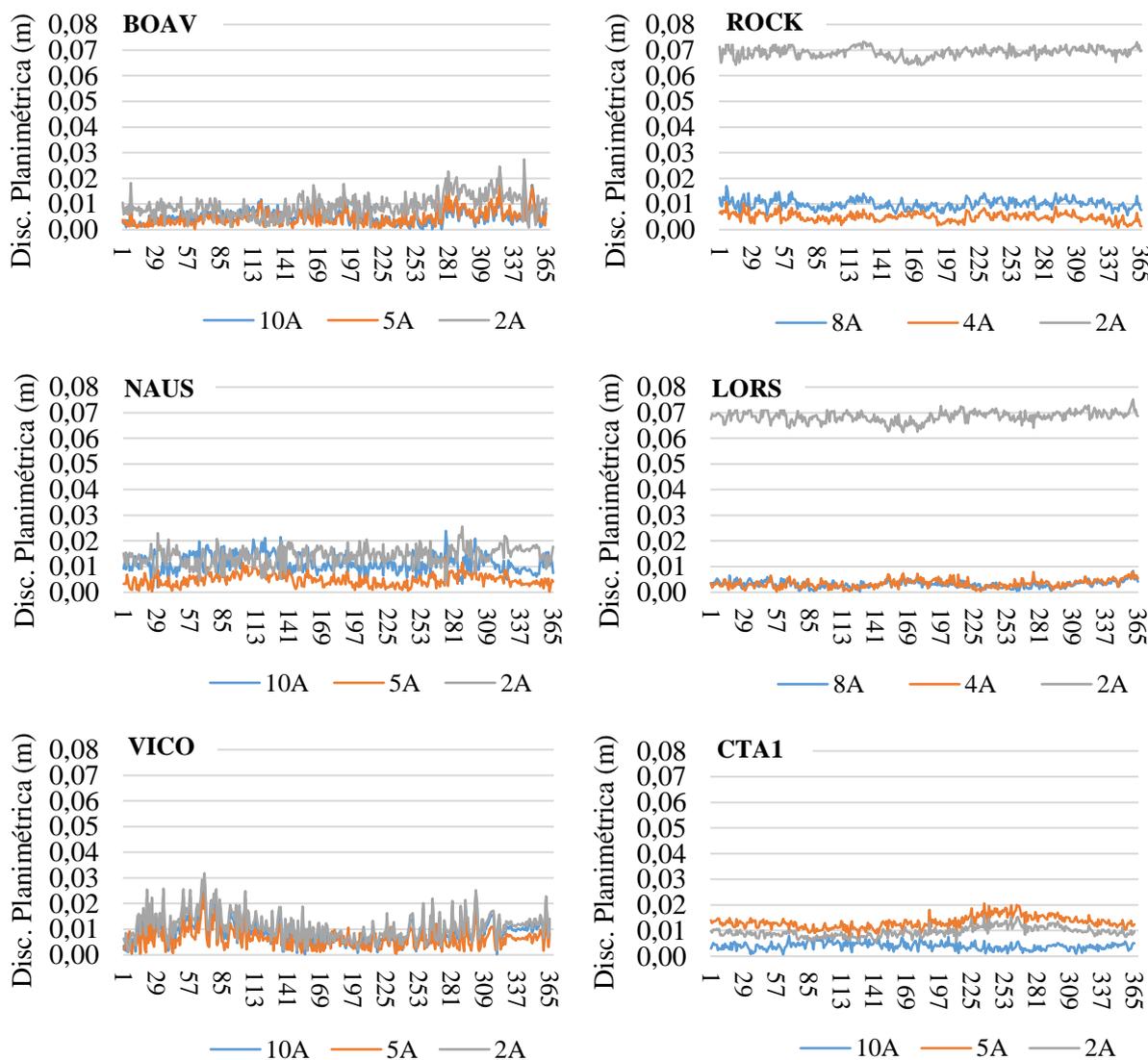
Essa diferença entre as incertezas das velocidades da primeira e segunda metade das séries pode ser explicada pelo fato de as séries temporais posicionais das estações utilizadas serem mais ruidosas até 2015 e mais homogêneas entre 2015 e 2019. Tal fato pode ser causado, possivelmente, pela estratégia de processamento utilizada no IBGE-PPP e pela localização geográfica das estações, o que deve ser investigado. A partir das velocidades estimadas deu-se início aos experimentos descritos na sequência.

3.1 Experimento 1

Neste Experimento foram consideradas as discrepâncias obtidas com as séries 10A/8A, 5A/4A e 2A, de forma a comparar uma atualização com monovelocidade (derivada de uma série longa, 10A (8A), compreendendo todo o período ao qual as coordenadas serão atualizadas) e duas atualizações com multivelocidades (em que a soma dos períodos de cada velocidade compreende todo o período ao qual as coordenadas serão atualizadas).

Pela Figura 6 pode-se observar o pior desempenho relativo das séries 2A das estações ROCK e LORS, o que pode ser justificado pela menor tolerância aos *outliers* anteriormente mencionada e pela proximidade entre as estações. Para as demais estações, os resultados com as 2A não foram tão destoantes, apesar de perceptivelmente piores. As 10A/8A e 5A/4A apresentaram discrepâncias similares, com uma diferença mais evidente na NAUS.

Figura 6 - Discrepância planimétrica obtidas com multivelocidades e monovelocidade para os dias 1 a 365 de 2019.

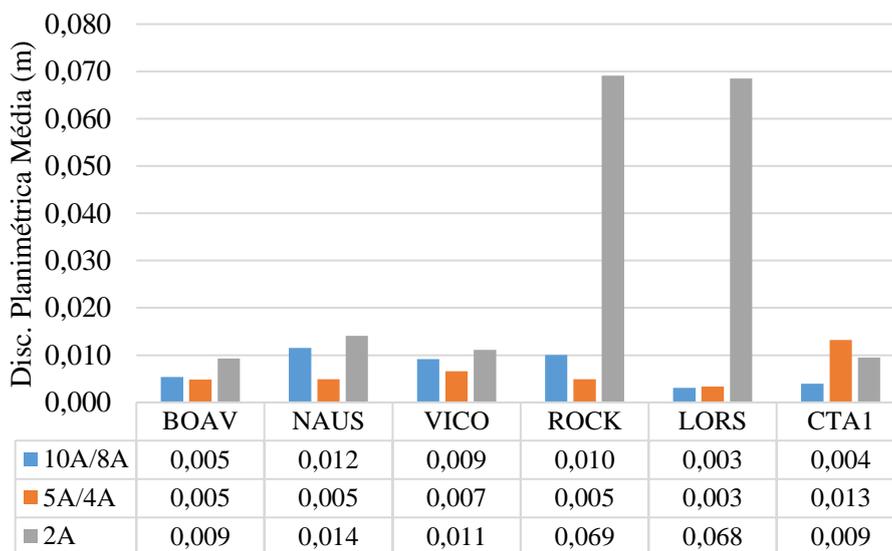


Elaboração: Os autores (2022).

Em relação às estações dos Estados Unidos, dispostas na Figura 6, as discrepâncias obtidas com as 2A nas estações ROCK e LORS (acima de 0,06 m) foram significativamente piores que CTA1 (~0,02 m). Em relação às 10A/8A e 5A/4A houve uma separação um pouco mais clara nos resultados em relação às estações do Brasil.

Considerando as discrepâncias planimétricas médias calculadas para as estações brasileiras, dispostas na Figura 7, pode-se verificar que os valores 2A não foram destoantes das outras séries. Os melhores resultados de discrepância média foram apresentados para as 5A, com destaque para a NAUS, 0,005 m contra os 0,012 m da 10A. Ademais, a maior discrepância média 5A obtida foi de 0,007m, para a VICO. Entretanto, deve-se salientar que as diferenças entre as 10A e 5A não foram significativas.

Figura 7 - Discrepâncias planimétricas médias obtidas com multivelocidades e monovelocidade.



Elaboração: Os autores (2022).

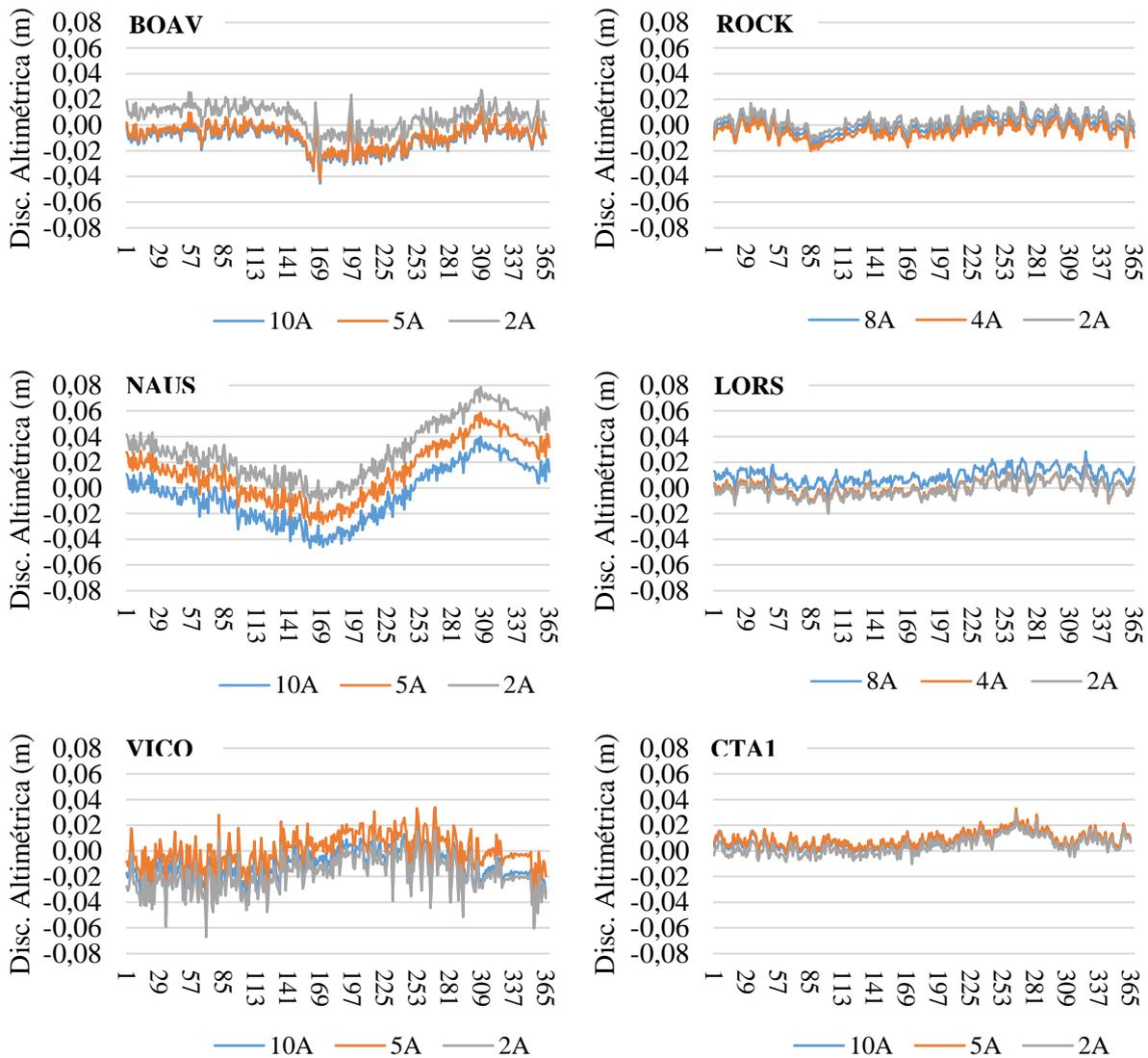
Já para as estações dos Estados Unidos, os resultados foram divergentes, uma vez que as 5A/4A foram melhores que as 10A/8A na ROCK, similares na LORS e piores na CTA1. Além disso, as 2A foram expressivamente piores que as 5A/4A na ROCK e LORS, porém melhor na CTA1. Adicionalmente, mesmo que as estações ROCK e LORS estejam geograficamente próximas, os resultados obtidos para 10A/8A e 5A/4A não apresentaram similaridade.

Tais resultados evidenciam que segmentar uma série longa em duas partes (com cada parte sendo maior que 3 anos), estimar as velocidades para cada parte e realizar a atualização com multivelocidade proporciona resultados melhores que uma atualização com monovelocidade, derivada da série completa. Adicionalmente, as discrepâncias obtidas utilizando as 2A foram, em geral, piores que as obtidas utilizando as 5A/4A e 10A/8A. Dessa forma, a utilização da 2A pode resultar discrepâncias planimétricas piores, justificável pela dependência tanto das características das séries posicionais segmentadas, quanto do método de estimação de velocidades utilizado.

Em relação às discrepâncias altimétricas, dispostas na Figura 8, pode-se verificar que 10A/8A, 5A/4A e 2A exibiram um delineamento similar, considerando cada estação. Entretanto, as 2A apresentaram valores maiores quando comparadas às 10A/8A e 5A/4A, evidenciados nas estações BOAV e NAUS. No entanto, as 2A apresentaram melhores resultados quando comparadas às 10A e 5A para estação VICO. Assim como nas estações brasileiras, o delineamento das discrepâncias nas estações dos Estados Unidos foi similar para as 10A/8A, 5A/4A e 2A. Por outro lado, não houve diferença significativa entre as discrepâncias de cada estação.

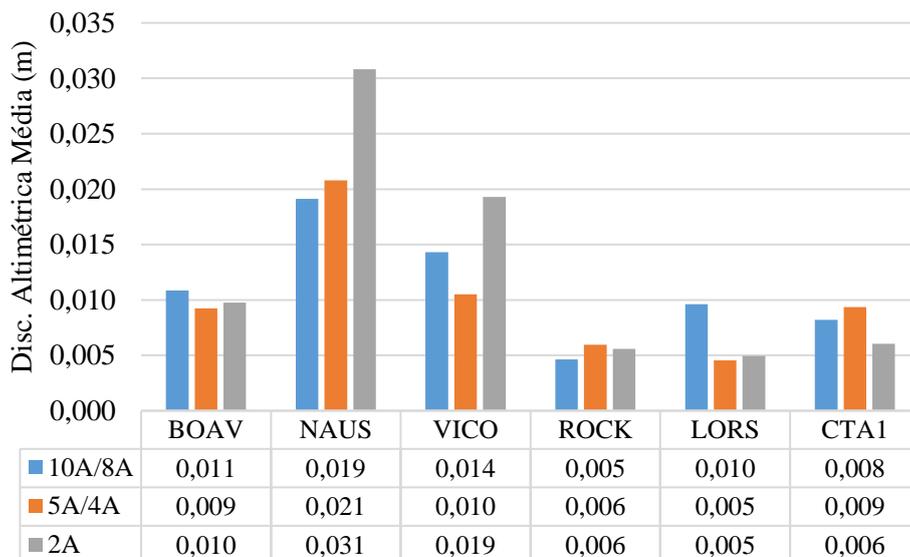
Salienta-se que o delineamento das discrepâncias da NAUS está relacionado à influência do efeito da carga hidrológica, uma vez que a estação está localizada em uma região que possui alta correlação inversa entre a altitude geométrica e as cotas linimétricas do Rio Negro. Para informações sobre o efeito da carga hidrológica na componente altimétrica em Manaus, consultar Bevis et al. (2005), Moreira (2010), Costa et al. (2012), Nascimento et al. (2017), Nascimento, Dal Poz e Freitas (2021).

Figura 8 - Discrepâncias altimétricas obtidas com multivelocidades e monovelocidade para os dias 1 a 365 de 2019.



Elaboração: Os autores (2022).

Figura 9 - Discrepâncias altimétricas médias em módulo obtidas com multivelocidades e monovelocidade.



Elaboração: Os autores (2022).

Averiguando as discrepâncias altimétricas médias das estações, dispostas na Figura 9, nota-se que as 10A/8A apresentaram os melhores resultados na NAUS, enquanto na BOAV e VICO as menores discrepâncias

médias foram obtidas com as 5A. As 2A proporcionaram os piores resultados em duas das seis estações consideradas. Observa-se que nas estações BOAV e VICO as séries 5A obtiveram os melhores resultados. Já as estações ROCK, LORS e CTA1 apresentaram valores bem próximos, abaixo de 0,01 m. Na ROCK e LORS, as 4A e 2A obtiveram a mesma discrepância média, 0,006 m e 0,005 m, respectivamente.

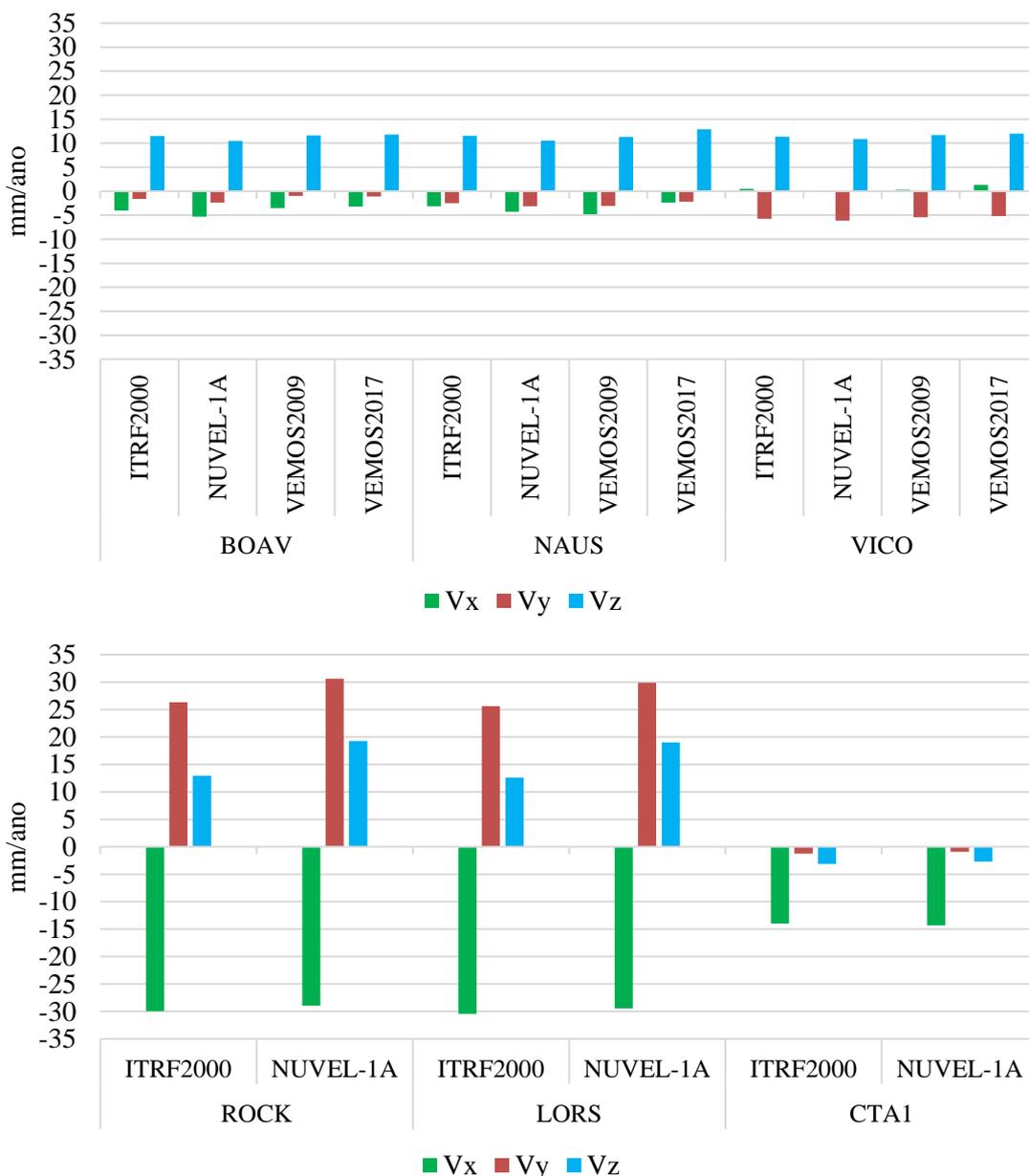
Como mencionado anteriormente, as estações ROCK e LORS situam-se em uma região de alta atividade sísmica, o que poderia causar mudanças nos movimentos lineares de estações e, conseqüentemente, alterar suas velocidades. Conforme dados apresentados pelo Centro de Terremotos do Sul da Califórnia (SCEDC - *Southern California Earthquake Center*), ocorreram 10 terremotos de magnitude entre 5,09 e 7,10 (escala Richter) com epicentro em um raio de 400km das estações ROCK e LORS no período das séries temporais utilizadas (01/01/2012 a 31/12/2019) (SCEDC, 2021). Destaca-se que um terremoto de magnitude 8,8 na escala Richter, ocorrido no Japão, ocasionou alterações altimétricas em estações localizadas a 400km do epicentro conforme Castro, Ferreira e Freitas (2012) e, portanto, optamos por utilizar tal valor para o raio. Contudo, ao analisar as séries utilizadas, verificou-se que os efeitos sísmicos não causaram alterações significativas em suas trajetórias, de forma que as velocidades estimadas pelo MIDAS proporcionaram discrepâncias pequenas (menores que outros modelos de velocidades testados) quando utilizadas para a atualização de coordenadas, como será discutido no Experimento 2, descrito na sequência.

3.2 Experimento 2

Visando avaliar o desempenho das multivelocidades no processo de atualização de coordenadas frente à metodologia frequentemente empregada (monovelocidade), obteve-se velocidades estimadas a partir dos modelos NUVEL-1A, ITRF2000, VEMOS2009 e VEMOS2017. Devido aos melhores resultados obtidos no Experimento 1 para as velocidades 5A/4A, o que as torna mais consistentes em relação às 2A, optou-se pela utilização daquelas para comparação com os modelos selecionados. Considerando que os modelos VEMOS são restritos à América Latina e o Caribe, sua cobertura não abrange os Estados Unidos e, portanto, tais modelos estarão presentes somente nas análises das estações brasileiras. Noutro ângulo, os modelos NUVEL-1A e ITRF2000 possibilitam a estimação de velocidades para qualquer localização na Terra e, dessa forma, serão considerados em todas as estações. Ademais, como já destacado anteriormente, os modelos VEMOS e NUVEL-1A contemplam apenas a atualização de coordenadas planimétricas. Nesse sentido, as discrepâncias altimétricas não serão consideradas nas análises.

A partir das velocidades dispostas na Figura 10 pode-se observar que não ocorre uma variação significativa nos valores das velocidades referentes aos quatro modelos em cada estação, quando comparados entre si. As maiores diferenças ocorreram entre o VEMOS2009 e VEMOS2017 na estação NAUS (2,4 mm/ano na componente V_x) e entre o ITRF2000 e NUVEL-1A para as estações ROCK (4,29 mm/ano na V_y e 6,29 mm/ano na V_z) e LORS (4,32 mm/ano na V_y e 6,40 mm/ano na V_z). As velocidades obtidas para a CTA1 foram bem similares para o ITRF2000 e NUVEL-1A, com diferença de menos de 0,5 mm/ano em cada uma das três componentes. Adicionalmente, observa-se que as velocidades evidenciam o sentido e a magnitude dos deslocamentos das placas tectônicas associadas às estações, cuja maior expressividade pode ser observada para as estações ROCK e LORS, o que se justifica pela proximidade dessas estações à zona de encontro dos limites das placas do Pacífico e Norte-Americana, região de alta atividade sísmica. Tal região é caracterizada pela falha geológica transcorrente de San Andreas, em que a placa do Pacífico desliza lateralmente pela placa Norte-Americana em direção ao norte (SMITH-KONTER; THORNTON; SANDWELL, 2014). Além disso, a aceleração no movimento da Placa do Pacífico/Placa Norte-Americana constatada por DeMets et al. (1994), tomando como referência um ponto no Golfo da Califórnia, também deve ser um fator de influência nos resultados das velocidades estimadas para tais estações. Na CTA1, localizada em uma região mais estável, distante das bordas da Placa Norte-Americana, as velocidades estimadas apresentaram menor magnitude.

Figura 10 - Velocidades estimadas com os modelos de velocidade.



Elaboração: Os autores (2022).

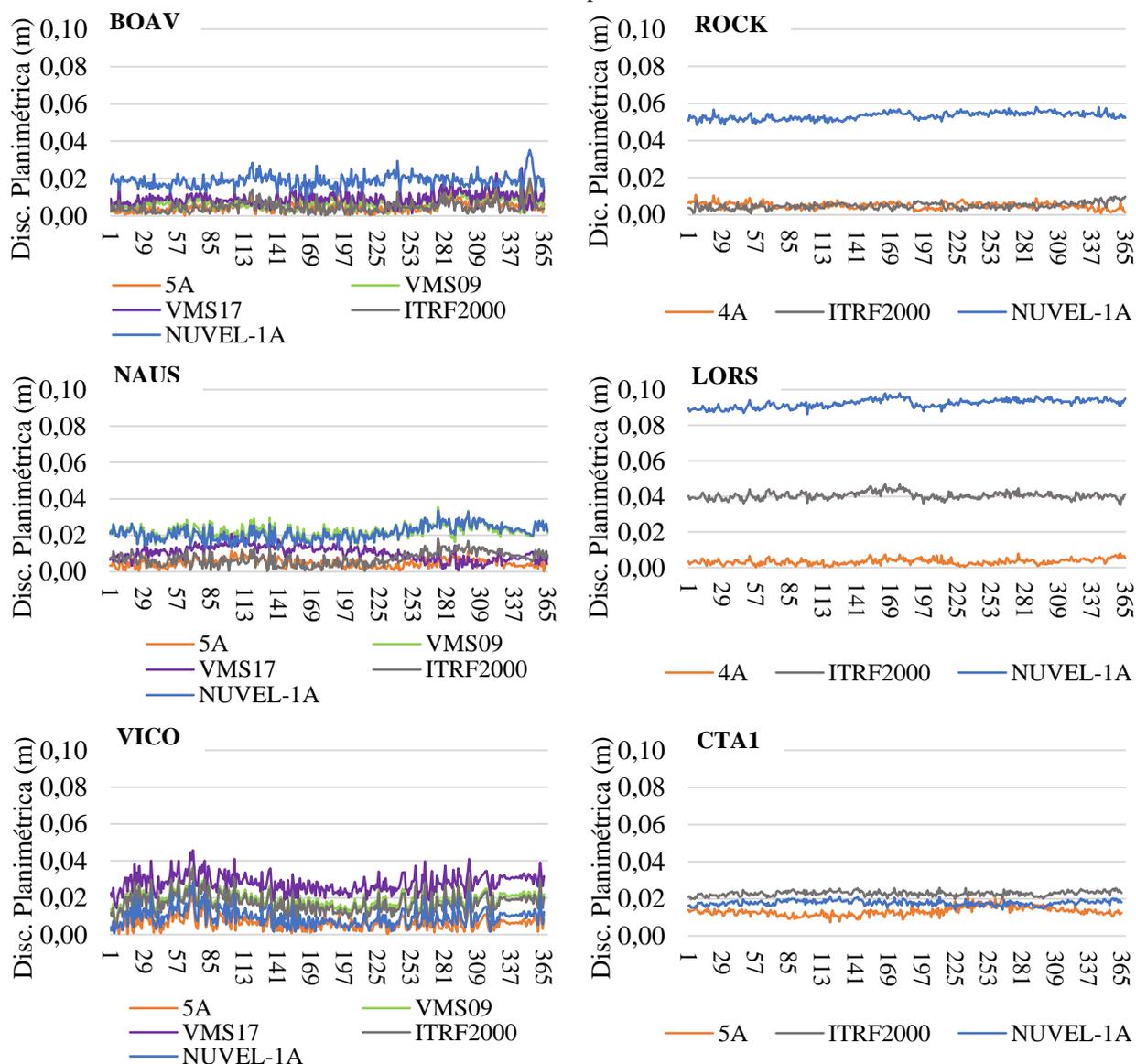
De posse das velocidades, realizou-se a atualização das coordenadas dos 365 dias do ano de 2019 para d_r/e_r utilizando as monovelocidades dos modelos supracitados e comparou-se as discrepâncias obtidas com aquelas das atualizações utilizando as 5A/4A no Experimento 1.

Considerando as discrepâncias planimétricas exibidas na Figura 11 verifica-se que na BOAV as piores discrepâncias foram registradas com o NUVEL-1A, na NAUS com o VEMOS2009 (VMS09) e na VICO com o VEMOS2017 (VMS17). Por outro lado, o ITRF2000 apresentou os resultados mais consistentes entre os modelos. As discrepâncias obtidas utilizando as 5A/4A se mantiveram próximas de 0,01 m na maioria dos casos, com picos ocasionais especialmente na VICO, mas que mesmo assim foram melhores que aquelas referentes aos modelos comparados. O comportamento ocorrido na estação VICO pode estar associado à influência das trocas de equipamentos, o que deve ser investigado.

Em geral, para a BOAV e NAUS as discrepâncias ficaram abaixo de 0,03 m e para a VICO abaixo de 0,04 m, o que considerando uma atualização de 10/8 anos, possui qualidade suficiente para boa parte dos propósitos práticos. Para as estações ROCK e LORS pode-se notar um pior desempenho do NUVEL-1A, com as discrepâncias planimétricas variando entre 0,04 m e 0,10 m, o que é justificável pelos critérios anteriormente mencionados, como a proximidade da falha geológica de San Andreas. Na CTA1, distante das bordas da Placa

Norte-Americana, o NUVEL-1A não só apresentou discrepâncias mais satisfatórias, como também foi melhor que o ITRF2000.

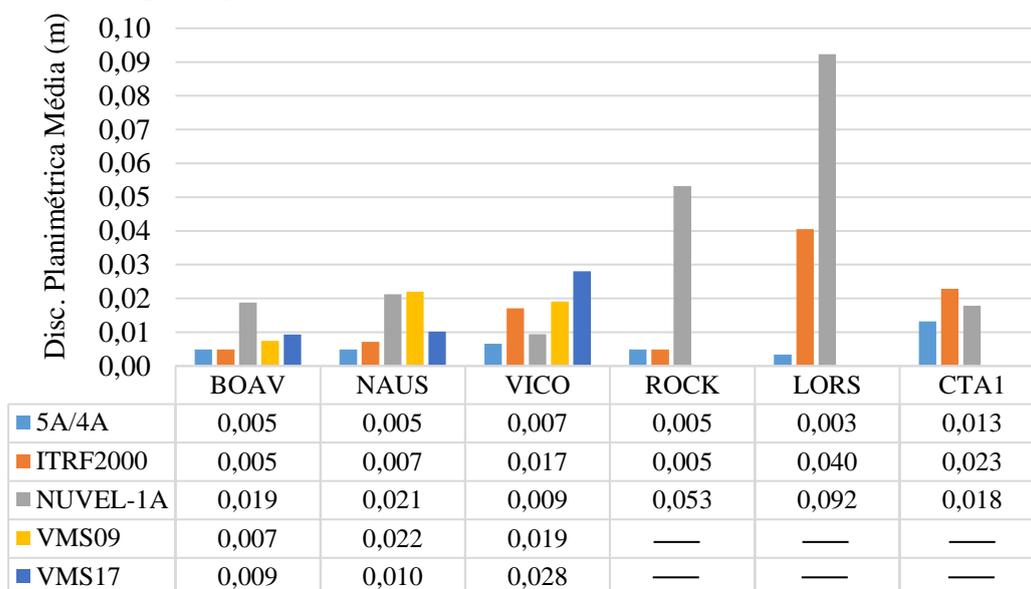
Figura 11 – Comparação das melhores discrepâncias planimétricas obtidas através das multivelocidades com as obtidas com os modelos de velocidade para os dias 1 a 365 de 2019.



Elaboração: Os autores (2022).

Embasando-se nas discrepâncias planimétricas médias dispostas na Figura 12, determinadas a partir dos resultados obtidos com os modelos e multivelocidades, pode-se verificar que o ITRF2000, mesmo sendo um modelo global, proporcionou uma discrepância média menor que o VEMOS2009 e VEMOS2017 nas estações BOAV, NAUS e VICO. As menores discrepâncias médias foram obtidas através das 5A, havendo apenas um “empate” com o ITRF2000 na BOAV. Além disso, destaca-se que a discrepância média obtida com a 5A para tais estações variou apenas entre 0,005 e 0,007 m, contra a variação de 0,009 a 0,028 m do VEMOS2017; 0,007 a 0,022 m do VEMOS2009; 0,009 a 0,021 m do NUVEL-1A; e, 0,005 a 0,017 m do ITRF2000. Considerando as estações ROCK, LORS e CTA1 ficou evidente a pior performance do NUVEL-1A. O ITRF2000 apresentou resultados variados, com 0,005 m de média para a ROCK e 0,04 m para a LORS. Novamente nota-se a consistência das 5A/4A, com discrepância média maior que 0,01 m apenas na CTA1, que apresentou a série temporal posicional mais ruidosa entre as estações analisadas, o que pode ter degradado a qualidade da estimação da velocidade.

Figura 12 - Discrepância planimétrica média (m) obtida com multivelocidade e modelos monovelocidade.



Elaboração: Os autores (2022).

Fundamentando-se nos resultados obtidos por Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) que mostraram que o VEMOS2009 apresentou a 2ª melhor discrepância dentre 15 modelos testados utilizando os parâmetros de transformação do IBGE, e a 4ª melhor discrepância utilizando tanto os parâmetros de Petit e Luzum (2010) quanto os de Altamimi et al. (2007) / Petit e Luzum (2010), considerando a compatibilização de referencial (com três conjuntos de parâmetros) e atualização de coordenadas (com 15 modelos de velocidades) para estações brasileiras e nos resultados apresentados por Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021) que evidenciaram um melhor desempenho do VEMOS2009 em relação ao VEMOS2017 a partir da análise das discrepâncias de 175 estações da RBMC, derivadas de atualizações de coordenadas por períodos entre 10 e 19 anos, verificou-se que as 5A ainda mostraram desempenho superior nas estações brasileiras analisadas, mesmo comparando-as a modelos de velocidade robustos como o VEMOS2009 e VEMOS2017.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Considerando os resultados obtidos pode-se dizer que há indícios, com base nos casos em estudo, que dividir uma série temporal posicional em duas partes (com cada parte sendo maior que 3 anos), estimar uma velocidade para cada parte e realizar a atualização com multivelocidade proporciona resultados planimétricos melhores quando comparados àqueles obtidos em uma atualização com monovelocidade, estimada da série completa. De fato, pôde-se observar que as multivelocidades proporcionaram resultados planimétricos melhores (ou similares) quando comparados àqueles obtidos com as monovelocidades para a maioria das estações utilizadas (5 de 6 estações). De forma geral, nas estações analisadas ficou evidente a consistência dos resultados obtidos pelas 5A/4A, que apresentaram majoritariamente ordem milimétrica, seja em uma atualização de 8 ou 10 anos e em estações localizadas perto ou distantes das bordas das placas ou sob fortes efeitos de cargas hidrológicas.

Para as discrepâncias altimétricas, observou-se que as 5A/4A apresentaram resultados melhores (ou similares) nas estações BOAV, ROCK e LORS. A NAUS obteve melhor resultado com a monovelocidade estimada a partir das séries completas. Na VICO o melhor resultado foi obtido com 2A, o que pode evidenciar que a segmentação das séries posicionais, suscetíveis à influência das alterações de equipamentos, pode mitigar o impacto negativo na estimação das velocidades e, conseqüentemente, na atualização de coordenadas, o que deve ser investigado. Na CTA1 o melhor resultado também foi obtido com 2A. No entanto, as discrepâncias altimétricas 8A/4A/2A e 10A/5A/2A das estações ROCK e CTA1, respectivamente, pouco diferiram entre si, mesmo estando situadas em regiões geológico-geográficas e placas tectônicas diferentes.

Quando comparada à modelos de velocidade amplamente utilizados pela comunidade acadêmica e por profissionais da área, a atualização com multivelocidade se mostrou eficaz, apresentando resultados melhores

que os de modelos globais como o ITRF2000 e NUVEL-1A e regionais como o VEMOS2009 (utilizado pelo IBGE-PPP) e VEMOS2017.

A utilização do MIDAS como estimador de velocidades de séries temporais posicionais visando atualizações de coordenadas com multivelocidade se mostrou coerente, uma vez que ele é insensível à sazonalidade anual e não será aplicado em séries longas. De fato, Klos et al. (2018) destacam que, para escalas de tempo curtas, os sinais periódicos (sazonalidade) se tornam mais importantes, enquanto à medida que a duração da série temporal aumenta, o ruído estocástico se torna mais significativo (principalmente a partir de 9 anos). Portanto, essa metodologia evita estas duas formas de erros que podem prejudicar os resultados.

Adicionalmente, destaca-se a potencialidade do software RINEXHub como ferramenta de suporte às investigações científicas, uma vez que permite o processamento semiautomatizado de dados no IBGE-PPP, otimizando assim a geração e manipulação de séries temporais posicionais, bem como a compatibilização de referenciais e atualização de coordenadas de forma eficiente e eficaz.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam desenvolvidos procedimentos metodológicos fundamentados em técnicas estatísticas robustas, baseadas por exemplo nas transformadas de Fourier ou *Wavelet*, que possibilite analisar as séries temporais e suas características (tendência, sazonalidade, ciclo e ruído), contribuindo assim para a maximização do entendimento das estimativas das velocidades. Adicionalmente, o desenvolvimento e/ou aplicação de algoritmos baseados em métodos de Redes Neurais Artificiais (RNA) ou Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) podem conduzir a resultados significativos no âmbito da análise das séries e estimação das velocidades. Recomenda-se ainda considerar uma maior quantidade e espacialização de estações, considerando nos experimentos estações GNSS localizadas em bordas de outras placas tectônicas ou localizadas em regiões com movimentos significativos de placas de gelo, como no Ártico e na Groelândia. Por fim, destaca-se que avaliar métodos de estimação das velocidades a partir das séries temporais posicionais com suas respectivas propagações de variâncias e análise de precisão e acurácia no processo de atualização temporal de coordenadas é de grande valia.

Agradecimentos

Este estudo teve o incentivo da Universidade Federal de Viçosa através do Departamento de Engenharia Civil, curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil que disponibilizou seus equipamentos e instalações, além do apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Contribuição dos Autores

O primeiro autor foi responsável pela curadoria dos dados, análise formal, investigação, metodologia, administração do projeto, software, validação, visualização e redação - minuta inicial. O segundo autor foi responsável pela conceptualização, metodologia, supervisão, validação e redação - revisão e edição. O terceiro autor foi responsável pelos recursos, software, visualização e redação - revisão e edição.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Referências

- ALMEIDA, M. S.; OLIVEIRA, G. D.; DAL POZ, W. R. Comparação de coordenadas de estações da RBMC transformadas e atualizadas para o ITRF2014. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO – SIMGEO, 6., Recife, 2016. **Anais...** Recife: UFPE, 2016. p. 1-9.
- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; LEGRAND, J.; GARAYT, B.; BOUCHER, C. ITRF2005: A new release

- of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, B09401. 2007. DOI: 10.1029/2007JB004949.
- ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. **Analysis and results of ITRF2008**. IERS Technical Note; 37. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, p. 54, ISBN 978-3-86482-046-5, 2012.
- ALTAMIMI, Z.; P. SILLARD; C. BOUCHER. ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. B10, p. 2214. 2002. DOI: 10.1029/2001JB000561.
- ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P; MÉTIVIER, L; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**. 2016. DOI: 10.1002/2016JB013098.
- BLEWITT, G.; D. LAVALLÉE. Effect of annual signals on geodetic velocity. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, n. B7, p. 2145. 2002. DOI:10.1029/2001JB000570.
- BLEWITT, G.; KREEMER, C.; HAMMOND, W. C.; GAZEAX, J. MIDAS robust trend estimator for accurate GPS station velocities without step detection. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, n. 3, p. 2054-2068, 2016. DOI. 10.1002/2015jb012552.
- BLICK, G.; CROOK, C.; DONNELLY, N.; FRASER, R.; LILJE, M.; MARTIN, D.; RIZOS, C.; ROMAN, D. R.; SARIB, R.; SOLER, T.; STANAWAY, R.; WESTON, N. D. **Reference Frames in Practice Manual**. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen - DENMARK, 2014.
- BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Mudança de referencial e atualização de coordenadas entre o IGS14 (ITRF2014) e o SIRGAS2000 (ITRF2000). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 4., Presidente Prudente, 2017. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2017. p .543-550.
- CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.
- CASTRO, H. M.; FERREIRA, V. G.; FREITAS, S. R. C. Análise de deformação por variação do geopotencial: estudo de caso para o terremoto Maule (mw 8,8) com base em dados mensais da missão GRACE. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 1, p. 86-100, 2012.
- CUNHA, M. M. **Efeitos da carga oceânica no posicionamento por ponto preciso**. 2020. 186 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2020.
- DACH, R.; S. LUTZ, P; WALSER, P; FRIDEZ. **Bernese GNSS Software Version 5.2**. User manual. 2015. Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297.
- DEMETS, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, Current plate motions, **Geophysical Journal International**. 101, 425– 478, 1990.
- DEMETS, C.; GORDON, R.G.; ARGUS, D.F.; STEIN, S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, **Geophysical Research Letters**. v. 21, p. 2191-2194, 1994. DOI: 10.1029/94GL02118.
- DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. **Geodesy for Planet Earth**, Heidelberg, BL, v. 136, p. 657-664, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_81.
- DREWES, H; SÁNCHEZ, L. **Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017**, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC SIRGAS. 2020. DOI: 10.1594/PANGAEA.912350.
- FREITAS, K. X. S.; DAL POZ, W. R.; NASCIMENTO, L. A. Avaliação do Impacto da Compatibilização de Referencial das Velocidades na Redução de Coordenadas no PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, 2021. DOI: 10.14393/rbcv73n1-55416.

- HYNDMAN, R.; ATHANASOPOULOS, G.; BERGMEIR, C.; CACERES, G.; CHHAY, L.; O'HARA-WILD, M.; PETROPOULOS, F.; RAZBASH, S.; WANG, E.; YASMEEN, F. **forecast**: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.12. 2021. Disponível em: <<http://pkg.robjhyndman.com/forecast>>. Acesso em: jun. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - PPP (IBGE-PPP). Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP. 2021. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=saiba-mais-geociencias>>. Acesso em: mai. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS: manual do usuário. Versão Maio de 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: jul. 2021.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Nota Técnica. Término do período de transição para adoção no Brasil do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização de 2000,4 (SIRGAS2000), 2015. Disponível em: <http://geofpt.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/nota_tecnica_termino_periodo_transicao_sirgas2000.pdf>. Acesso em: mai. 2021.
- INTERNATIONAL EARTH ROTATION AND REFERENCE SYSTEMS SERVICE (IERS). **The International Terrestrial Reference Frame (ITRF)**. 2021. Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>. Acesso em: jul. 2021.
- INTERNATIONAL GNSS SERVICE ANALYSIS CENTER COORDINATOR (IGSACC). Chronology of IGS Reference Frame Usage. 2021. Disponível em: <<http://acc.igs.org/igs-frames.html>>. Acesso em: mai. 2021.
- JEKELI, C. **Geometric reference systems in geodesy**. Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences, OST – Ohio State University, p. 209, 2012.
- KLOS, A.; OLIVARES, G.; TEFERLE, F. N.; HUNEGNAW, A.; BOGUSZ, J. On the combined effect of periodic signals and colored noise on velocity uncertainties. **GPS Solutions**. v. 22, n. 1, p. 13, 2018. DOI: 10.1007/s10291-017-0674-x.
- MENEZES, R. R. V. **Análise do GNSS PPP multi-constelações com uso dos sistemas GPS, GLONASS e Galileo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.
- MINSTER, J. B.; JORDAN, T. H. Present-day plate motions. **Journal of Geophysical Research**. v. 83, p. 5331–5354, 1978.
- MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.
- MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. **Journal of Geodesy** 74, 128–133. 2000. DOI: 10.1007/s001900050278.
- MORITZ, S.; SARDÁ, A.; BARTZ-BEIELSTEIN, T.; ZAEFFERER, M.; STORK, J. Comparison of different Methods for Univariate Time Series Imputation in R. **ResearchGate**, p. 1-20, out. 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1510/1510.03924.pdf>.
- NAKIBOGLU, S. M.; LAMBECK, K. Deglaciation effects on the rotation of the Earth. **Geophys. J. R. astr. Soc.** n. 62, p. 49-58, 1980.
- NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p. 150-165, 2017. DOI: 10.1590/S1982-21702017000100010.
- NRCan (Natural Resources Canada). CSRS-PPP Online Computation. 2021 Disponível em: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>. Acesso em: jul. 2021.
- NOLL, C. **SLR, GNSS, VLBI, and DORIS Networks: ILRS+IGS+IVS+IDS**. NASA Goddard Space Flight

Center. United States of America 2014.

- PEREZ, J. A. S. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizadas na placa Sul-Americana: estimativa a partir do processamento de dados GPS**, Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologias, Universidade Estadual de Paulista, Presidente Prudente – SP, 2002.
- PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**. IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. ISBN 3-89888-989-6.
- PROL, F. S.; JUNIOR, J. M.; NIEVINSKI, F. G.; GOMES, R. L. E FILHO, A. C. P. Transformação entre referenciais e cálculo de velocidades através do aplicativo Web Trevel. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 66, n. 3, p. 569-579, 2014.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: jul. 2021.
- RAMOS, M. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. 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. 2016. DOI: 10.1590/S1982-21702016000300022.
- REBISCHUNG, P. [IGSMail-7921] Switch to IGB14 reference frame. 2020. Disponível em: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>. Acesso em: mai. 2020.
- REBISCHUNG, P.; SCHMID, R. Preparations for the IGS realization of ITRF2014. 2016. Disponível em: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7171.pdf>. Acesso em: mar. 2021.
- SÁNCHEZ L.; DREWES H. VEMOS2015: Velocity and deformation model for Latin America and the Caribbean, 2016. DOI: 10.1594/PANGAEA.863131. supplement to: SÁNCHEZ L. DREWES H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes. **Latin America. Journal of Geodynamics**. 2016. DOI: 10.1016/j.jog.2016.06.005.
- SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. **Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America**. International Association of Geodesy Symposia Series, v. 152. 2020. DOI: 10.1007/1345_2020_91.
- SANTAMARÍA-GÓMEZ, A. SARI: interactive GNSS position time series analysis software. **GPS Solutions**, v. 23, n. 2, p. 52, 2019. DOI: 10.1007/s10291-019-0846-y.
- SANTAMARÍA-GÓMEZ, A.; MÉMIN, A. Geodetic secular velocity errors due to interannual surface loading deformation, **Geophysical Journal International**. v.02, n. 2, p. 763–767, 2015. DOI: 10.1093/gji/ggv190.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações. **Revista Brasileira de Geofísica**. v.18, n.2, p. 161-172, 2001. DOI: 10.1590/S0102-261X2000000200005.
- SARI. Senales y Analisis de Ruido Interactivo. 2021. Disponível em: <<https://alvarosg.shinyapps.io/sari/>>. Acesso em: jul. 2021.
- SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**. v. 63, p. 1379–1389. 1968.
- SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). Modelo de velocidade para o SIRGAS. 2021a. Disponível em:<<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model>>. Acesso em: jun. 2021.
- SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). Sistema de Referência Geocêntrico. 2021b. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-definition/>. Acesso em: fev. 2021.
- SMITH-KONTER, B. R.; THORNTON, G. M.; SANDWELL, D. T. Vertical crustal displacement due to interseismic deformation along the San Andreas fault: Constraints from tide gauges. **Geophys. Res. Lett.**, 41, p. 3793–3801, 2014. DOI:10.1002/2014GL060091.
- SOUTHERN CALIFORNIA EARTHQUAKE DATA CENTER (SCEDC). **Earthquake Catalogs**. 2021. DOI:10.7909/C3WD3xH1. Disponível em: <<https://service.scedc.caltech.edu/eq-catalogs/radius.php>>.

Acesso em: 31 ago. 2022.

- TERRINHA, P. A fronteira de placas litosféricas África-Ibéria e a fonte do sismo de Lisboa de 1755. **Seminário do CGUL-Centro de Geofísica** da Universidade de Lisboa, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/514/1/33632.pdf>>. Acesso em 23 abr. 2021.
- THEIL, H. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis, **Indagationes Mathematicae**. v. 12, p. 85–91. 1950.
- TORGE, W. **Geodesy**. 3ª edição. Berlim-New York: Walter de Gruyter, 2001.
- UNAVCO. TEQC - The Toolkit for GNSS Data. 2020. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/dataprocessing/teqc/teqc.html>>. Acesso em: abr. 2020.
- UNIVERSITY NAVSTAR CONSORTIUM (UNAVCO). Plate Motion Calculator. 2021. Disponível em: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>. Acesso em: jun. 2021.
- WESTON, N.; SOLER, T. **Rigorous Geodetic Positioning in the Americas**. In: 8th. FIG Regional Conference 2012. Montevideo, Uruguay, 26-29 November 2012. Disponível em <https://geodesy.noaa.gov/web/science_edu/presentations_library/files/fig-weston-uruguay.pdf>. Acesso em jul. 2021.
- ZAMORA, J. M. **Desarrollo, implementación y análisis de un modelo cinemático local de velocidades para costa rica basado en la integración y homogenización de datos de estaciones GNSS continuas**. Tesis (Doctor en Ciencias Físicas). Escuela Técnica Superior de Ingenieros em Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madri. Madri, 2014.

Biografia do autor principal



Krisley Xavier Soares de Freitas é natural de Viçosa-MG. Formado em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica pela Universidade Federal de Viçosa (2018), pós graduado em Geoprocessamento e Georreferenciamento pela Faculdade Única de Ipatinga (2018) e mestre em Engenharia Civil, área de Concentração em Informações Espaciais (Geodésia) pela Universidade Federal de Viçosa. Atualmente é doutorando em Engenharia Civil, área de Concentração em Informações Espaciais (Geodésia) pela Universidade Federal de Viçosa.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.