

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

KRISLEY XAVIER SOARES DE FREITAS

**IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DO REFERENCIAL DE VELOCIDADES E
DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO
DE COORDENADAS NO PPP**

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

KRISLEY XAVIER SOARES DE FREITAS

**IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DO REFERENCIAL DE VELOCIDADES E
DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO
DE COORDENADAS NO PPP**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2021**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F866i
2021
Freitas, Krisley Xavier Soares de, 1991-
Impacto da compatibilização do referencial de velocidades
e da utilização de multivelocidade no processo de atualização de
coordenadas no PPP / Krisley Xavier Soares de Freitas. –
Viçosa, MG, 2021.

1 dissertação eletrônica (123 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Engenharia Civil, 2021.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2021.186>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Sistema de posicionamento global. 2. Análise de séries
temporais. 3. Coordenadas geográficas. I. Poz, William Rodrigo
Dal, 1975-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 526.1

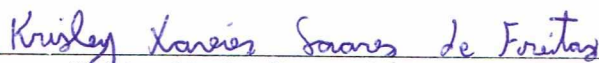
KRISLEY XAVIER SOARES DE FREITAS

**IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DO REFERENCIAL DE VELOCIDADES E
DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO
DE COORDENADAS NO PPP**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

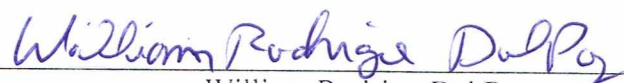
APROVADA: 27 de outubro de 2021

Assentimento:



Krisley Xavier Soares de Freitas

Autor



William Rodrigo Dal Poz

Orientador

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Jane e José pelo apoio, suporte e incentivo que me possibilitaram perseguir o caminho acadêmico.

Ao grande amigo professor doutor Lécio Alves Nascimento, que não tenho palavras o suficiente para descrever toda ajuda, orientação, conselhos e inúmeras discussões desde a graduação. Muitíssimo obrigado por tudo, sua ajuda foi crucial para eu chegar até aqui.

Ao grande amigo de longuíssima data Guilherme GWD pelas infinitas conversas.

Ao professor doutor William Rodrigo Dal Poz que sempre me incentivou à pesquisa.

Ao IBGE, NOAA, UNAVCO e NGL pela disponibilidade dos dados de forma gratuita e sem registro, o que contribui de forma incomensurável às pesquisas científicas.

A Universidade Federal de Viçosa, pelo conhecimento proporcionado e pela estrutura disponibilizada.

Ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

FREITAS, Krisley Xavier Soares de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2021. **Impacto da compatibilização de referencial das velocidades e da utilização de multivelocidade no processo de atualização de coordenadas no PPP.** Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

No Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), as coordenadas estimadas na época do levantamento são referenciadas à materialização do sistema de referência global utilizada nas órbitas dos satélites, atualmente IGB14 (época de coleta dos dados). No entanto, sistemas geodésicos regionais são utilizados em diferentes países, como no Brasil, que adota o SIRGAS2000 (época 2000,4). Uma forma de lidar com estas diferenças, é a utilização da transformação de Helmert em conjunto com um modelo de velocidades para a compatibilização tanto do referencial, quanto da época. Nesse contexto, esta pesquisa tem como primeiro objetivo avaliar o impacto da compatibilização do referencial de velocidades no processo da atualização de coordenadas no PPP. Utilizou-se dados GNSS em formato RINEX de 175 estações da RBMC processados com o serviço online IBGE-PPP. Diante dos resultados encontrados, pôde-se verificar que a compatibilização de referencial das velocidades se mostrou eficaz para o processo de atualização das coordenadas obtidas no IBGE-PPP. Das 1513 coordenadas calculadas com cada uma das quatro velocidades testadas, em 62,92% dos casos, a VEMOS2009-CCR (com compatibilização de referencial – CCR) apresentou menores discrepâncias, seguida pela VEMOS2017-CCR com 29,54%, VEMOS2009-SCR (sem compatibilização de referencial – SCR) com 7,21% e VEMOS2017-SCR com 0,33%. Em relação à diminuição das discrepâncias após a compatibilização de referencial das velocidades, verificou-se que, para o VEMOS2009, 85,86% das coordenadas apresentaram uma menor discrepância após a atualização. Já para o VEMOS2017 essa diminuição ocorreu em 98,61% das coordenadas. Outro objetivo desta pesquisa foi avaliar o potencial da realização do procedimento de atualização temporal de coordenadas 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, essas velocidades são estimadas através de séries temporais do ponto de interesse, com pelo menos dois anos cada, e que somadas compreendam todo o período da atualização temporal desejada. Utilizando dados de cinco estações dos Estados Unidos e cinco estações do Brasil, calculou-se a discrepância planimétrica e altimétrica (em relação às coordenadas de referência) resultante da atualização das

coordenadas por períodos de 8 e 10 anos. Considerando os resultados obtidos, pôde-se observar que para as estações do Brasil as multivelocidades proporcionaram resultados planimétricos melhores (ou similares) quando comparados àqueles obtidos com as monovelocidades. Entretanto, esse cenário não se repetiu para as estações dos Estados Unidos. De forma geral, nas dez estações analisadas fica evidente a consistência dos resultados obtidos pelas multivelocidades estimadas a partir de séries temporais posicionais com períodos de 5 ou 4 anos, majoritariamente milimétrica, seja em uma atualização de 8 ou 10 anos, em estações localizadas perto ou distantes das bordas das placas ou sob fortes efeitos de cargas hidrológicas. Quando comparada aos modelos VEMOS2009, VEMOS2017, ITRF2000 e NUVEL-1A, amplamente utilizados pela comunidade acadêmica e por profissionais da área, a atualização com multivelocidade se mostrou eficaz, apresentando inclusive resultados melhores que os de modelos regionais como o VEMOS2009, utilizado pelo IBGE-PPP.

Palavras-chave: GNSS. IBGE-PPP. Multivelocidade. Série temporal.

ABSTRACT

FREITAS, Krisley Xavier Soares de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2021. **Impact of the compatibility of velocities reference frame and the use of multi-velocities in the process of updating coordinates using PPP.** Adviser: William Rodrigo Dal Poz.

In Precise Point Positioning (PPP), the coordinates estimated at the time of the survey are referenced to the materialization of the global reference frame used in the satellite orbits, currently IGB14 (epoch of data collection). However, regional geodetic systems are used in different countries, such as Brazil, which adopts SIRGAS2000 (2000.4 epoch). One way to deal with these differences is to use the Helmert transformation in conjunction with a velocity model to make both the frame and the period compatible. In this context, this research has as its first objective to evaluate the impact of the compatibility of the velocity frame in the process of updating coordinates in PPP. GNSS data in RINEX format from 175 RBMC stations processed with the IBGE-PPP online service was used. In view of the results found, it was possible to verify that the compatibility of the velocity frame was effective for the process of updating the coordinates obtained from the IBGE-PPP. Of the 1513 coordinates obtained with each of the four velocities, VEMOS2009-CCR (with frame compatibilization - CCR) had 62.92% of the smallest discrepancies, followed by VEMOS2017-CCR with 29.54%, VEMOS2009-SCR (no compatibilization of frame – SCR) with 7.21% and VEMOS2017-SCR with 0.33%. Regarding the decrease in discrepancies after the velocity frame compatibility, it was found that, for VEMOS2009, 85.86% of the coordinates showed a smaller discrepancy after the update. As for VEMOS2017, this decrease occurred in 98.61% of the coordinates. Another objective of this research was to evaluate the potential of performing the coordinate temporal update procedure with the application of multi-velocity, that is, attributing more than one velocity to the same point of interest, each one being used in specific periods of the procedure. Ideally, these velocities are estimated through time series of the point of interest, with at least two years each, and which together comprise the entire period of the desired temporal update. Using data from five stations in the United States and five stations in Brazil, the planimetric and altimetric discrepancy (in relation to the reference coordinates) resulting from the update of the coordinates for periods of 8 and 10 years was calculated. Considering the results obtained, it could be observed that for the stations in Brazil the multispeed provided better planimetric results (or similar) when compared to those obtained with the single velocities. However, this scenario has not been repeated for US stations. In general, in the ten stations analyzed, the

consistency of the results obtained by the multi-velocities estimated from positional time series with periods of 5 or 4 years, mostly millimetric, is evident, either in an update of 8 or 10 years, in stations located near or away from the edges of the plates or under strong effects of hydrological loads. When compared to the VEMOS2009, VEMOS2017, ITRF2000 and NUVEL-1A models, widely used by the academic community and by professionals in the field, the update with multi-velocities proved to be effective, even presenting better results than regional models such as VEMOS2009, used by the IBGE- PPP.

Keywords: Coordinates update. GNSS. IBGE-PPP. Multi-velocities. Time series.

LISTA DE FIGURAS

2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAL DAS VELOCIDADES NA ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP

Figura 1 - Disposição das estações da RBMC utilizadas.	33
Figura 2 - Fluxograma do procedimento completo para compatibilização de referencial e atualização de uma coordenada do ITRF2014, época de coleta dos dados, para o ITRF2000, época 2000,4.....	35
Figura 3 - Comparação das discrepâncias planimétricas das estações ALAR, BOAV, ROGM, SALU, SMAR, TOPL e VICO obtidas utilizando as quatro velocidades.	38
Figura 4 - Porcentagem de menores discrepâncias obtidas por cada velocidade.	41
Figura 5 - Comparação das velocidades CCR e SCR.....	42
Figura 6 - Comparação dos modelos VEMOS2017 e VEMOS2009.	43
Figura 7 - Comparação das discrepâncias obtidas com a metodologia apresentada e com as coordenadas fornecidas pelo IBGE-PPP diretamente em 2000,4.....	45

3 POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP

Figura 1 - Rede ITRF2014 e suas técnicas de Geodésia Espacial.....	56
Figura 2 - Esquerda: VEMOS2009; Direita: VEMOS2017	65
Figura 3 - Diferenças das velocidades entre ITRF2000 e NUVEL-1A.....	67
Figura 4 – Disposição das estações localizadas nos Estados Unidos.....	68
Figura 5 - Disposição das estações localizadas no Brasil.....	69
Figura 6 - Abas do RINEXHub e suas respectivas funcionalidades.	73
Figura 7 - Fluxograma exemplificando o procedimento completo para compatibilização de coordenadas do ITRF2005 para ITRF2014 e posterior atualização.	75
Figura 8 - Fluxograma do processo de estimação das velocidades para cada série.	78
Figura 9 - Atualização das 365 coordenadas para dr/er , utilizando as Multi-2A.....	81
Figura 10 - Amplificação das mudanças de trajetória em períodos curtos. Setas vermelhas indicam a trajetória de 2 anos e a verde a trajetória de 8 anos.	83

Figura 11 - Discrepância planimétrica obtida para as estações do Brasil utilizando mono e multivelocidade	86
Figura 12 - Discrepância planimétrica obtida para as estações dos Estados Unidos utilizando mono e multivelocidade	87
Figura 13 - Discrepância planimétrica média obtida para as cinco estações do Brasil.	88
Figura 14 - Discrepância planimétrica média obtida para as cinco estações dos Estados Unidos.....	89
Figura 15 - Discrepância altimétrica obtida para as estações do Brasil utilizando mono e multivelocidade.	90
Figura 16 - Discrepância altimétrica obtida para as estações dos Estados Unidos utilizando mono e multivelocidade.....	91
Figura 17 - Discrepância altimétrica média em módulo obtida para as estações do Brasil.	92
Figura 18 - Discrepância altimétrica média em módulo obtida para as estações dos Estados Unidos.....	92
Figura 19 – Discrepâncias planimétricas para as estações do Brasil obtidas através da atualização das coordenadas utilizando modelos de velocidades e multivelocidade.	97
Figura 20 - Discrepâncias planimétricas para as estações dos Estados Unidos obtidas através da atualização das coordenadas utilizando modelos de velocidades e multivelocidade.	98
Figura 21 - Discrepância planimétrica média referente às cinco estações do Brasil.....	99
Figura 22 - Discrepância planimétrica média referente às cinco estações dos Estados Unidos.	100

LISTA DE TABELAS

2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAL DAS VELOCIDADES NA ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP

Tabela 1 - Parâmetros de transformação entre os ITRF 2014, 2008, 2005 e 2000.	30
Tabela 2 - Soluções IGS utilizadas no IBGE-PPP, de acordo com a data do levantamento.	33
Tabela 3 - Discrepância média e REQM dos dados analisados.	44
Tabela 4 - Média e REMQ das discrepâncias obtidas no experimento 3.	45

3 POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP

Tabela 1 - Características dos serviços PPP online.	58
Tabela 2 - Arquivos disponíveis após o processamento no IBGE-PPP.	62
Tabela 3 - Realizações IGS adotadas no IBGE-PPP, de acordo com a data do levantamento.	63
Tabela 4 - Estações utilizadas e seus respectivos períodos de dados.	69
Tabela 5 - Velocidades estimadas pelo MIDAS para as séries das estações localizadas no Brasil.	82
Tabela 6 - Velocidades estimadas pelo MIDAS para as séries das estações localizadas nos Estados Unidos.	84
Tabela 7 - Velocidades obtidas a partir dos modelos de velocidade ITRF2000, NUVEL-1A, VEMOS2009 e VEMOS2017 para as estações do Brasil.	95
Tabela 8 - Velocidades obtidas a partir dos modelos de velocidade ITRF2000, NUVEL-1A para as estações dos Estados Unidos.	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APPS	<i>Automatic Precise Positioning Service</i>
AFREF	<i>African Reference Frame</i>
ARGN	<i>Australian Regional GNSS Network</i>
BDS	<i>BeiDou Navigation Satellite System</i>
CGS	<i>Canadian Geodetic Survey</i>
CLS	<i>Combined Least Squares</i>
CORS	<i>Continuously Operating Reference Stations</i>
CSRS-PPP	<i>Canadian Spatial Reference System – PPP</i>
DGPS	<i>Differential GPS</i>
DORIS	<i>Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite</i>
ECD	<i>Época de Coleta dos Dados</i>
EUREF	<i>European Terrestrial Reference Frame</i>
EPN	<i>EUREF Permanent Network</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
GALILEO	<i>European Global Navigation Satellite System</i>
GAPS	<i>GPS Analysis and Positioning Software</i>
GEONET	<i>GPS Earth Observation Network</i>
GLONASS	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya System</i>
GMF	<i>Global Map Function</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPT2	<i>Global Pressure and Temperature</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
IBGE	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística</i>
IBGE-PPP	<i>Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – PPP</i>
IAG	<i>International Association of Geodesy</i>
IDS	<i>International DORIS Service</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
ILRS	<i>International Laser Ranging Service</i>
IRNSS	<i>Indian Regional Navigation Satellite System</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>

IUGG	<i>The International Union of Geodesy and Geophysics</i>
IVS	<i>International VLBI Service</i>
LLR	<i>Lunar Laser Range</i>
LSC	<i>Least Squares Collocation</i>
MAGNET	<i>Mobile Array of GPS for Nevada Transtension</i>
MIDAS	<i>Median Interannual Difference Adjusted for Skewness</i>
NAD83	<i>North American Datum of 1983</i>
NCN	<i>NOAA CORS Network</i>
NGL	<i>Nevada Geodetic Laboratory</i>
NGS	<i>National Geodetic Survey</i>
NNR	<i>No-Net-Rotation</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
PPP	<i>Posicionamento por Ponto Preciso</i>
QZSS	<i>Quasi-Zenith Satellite System</i>
RBMC	<i>Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS</i>
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
RAAP	<i>Rede Altimétrica de Alta Precisão</i>
RTK	<i>Real Time Kinematic</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SGB	<i>Sistema Geodésico Brasileiro</i>
SIRGAS	<i>Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas</i>
SIRGAS-CON	<i>Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo</i>
SLR	<i>Satellite Laser Ranging</i>
SPRGN	<i>South Pacific Regional GNSS Network</i>
TCs	<i>Technique Centers</i>
TEQC	<i>Translation, Editing and Quality Check</i>
VEMOS	<i>Modelo de velocidade para o SIRGAS</i>
VLBI	<i>Very Long Baseline Interferometry</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1	Hipóteses.....	19
1.2	Objetivos.....	19
1.2.1	Objetivo geral	20
1.2.2	Objetivos específicos	20
1.3	Justificativa	20
1.4	Estrutura da pesquisa	22
	Referências	22
2	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAL DAS VELOCIDADES NA ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP.....	26
2.1	Introdução	27
2.2	Modelos de velocidades VEMOS.....	29
2.3	Transformação de referencial e atualização de coordenadas	30
2.4	Materiais e métodos	32
2.5	Resultados.....	36
2.5.1	Experimento 1	36
2.5.2	Experimento 2	40
2.5.3	Experimento 3	44
2.6	Conclusões	46
	Referências	46
3	POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP	50
3.1	Introdução	51
3.2	Revisão de literatura	53
3.2.1	Redes GNSS	53
3.2.2	ITRF	55
3.2.3	PPP online	57
3.2.4	Séries temporais posicionais.....	62
3.2.5	Modelos de velocidade	64
3.3	Materiais e métodos	67
3.3.1	Materiais	68
3.3.2	Metodologia.....	70
3.4	Resultados.....	81
3.4.1	Experimento 1	85

3.4.2	Experimento 2	93
3.5	Conclusões	101
	Referências	101
4	CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES	110
	APÊNDICE	113

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Terra é composta por uma série de camadas aproximadamente concêntricas, sendo a mais externa denominada de litosfera. Essa camada, constituída por parte do manto superior e pela crosta, sofreu um processo de segmentação ao longo das eras geológicas que resultou na geração de diversas placas de contornos irregulares, chamadas de placas litosféricas. Devido às fontes de calor interno da Terra (remanescente e de decaimento radioativo), a coalescência estável e contínua entre essas placas é impedida, fazendo com que elas se movimentem para acomodar a liberação do calor (TERRINHA, 2005). Tal movimentação acontece continuamente ao longo do tempo, em diferentes direções e com magnitudes variáveis, fazendo com que as coordenadas de pontos localizados sobre a superfícies dessas placas também variem no tempo, sendo dependentes da época em que foram estimadas (SAPUCCI e MONICO, 2001).

Uma forma de investigar e monitorar as deformações crustais causadas pelos movimentos de placas litosféricas consiste na observação contínua ou periódica de coordenadas de estações que integram uma rede geodésica (SAPUCCI e MONICO, 2001). Essas redes globais aliam técnicas GNSS (*Global Navigation Satellite System*), VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*) e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite*) para gerar produtos de alta qualidade e acurácia, que são fundamentais para, por exemplo, realizar o monitoramento contínuo do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), que constitui uma realização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*), internacionalmente adotado como sistema de referência terrestre, além de ser considerado o referencial geodésico mais acurado (NOLL, 2014; ITRF, 2021).

O ITRF é materializado através de um conjunto de pontos (coordenadas associadas à uma época específica) e suas respectivas velocidades. Como as placas litosféricas estão em constante movimento, estas coordenadas necessitam ser recalculadas periodicamente, razão pela qual são disponibilizadas diversas realizações do ITRS (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012; BLICK et al., 2014).

Segundo Jekeli (2012), uma forma de lidar com as diferenças entre os referenciais e épocas das coordenadas consiste em utilizar a transformação de Helmert e seus respectivos parâmetros de transformação, atrelados às velocidades das estações para a compatibilização tanto do referencial quanto da época (atualização de coordenadas). Além disso, destaca-se que assim como as coordenadas, as velocidades normalmente estão associadas a referenciais, sendo a compatibilização de ambas para um referencial comum uma condição ideal do procedimento

de atualização das coordenadas de uma época de origem para uma de destino (ALTAMIMI; COLLILIEUX; MÉTIVIER, 2012).

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 pela ocorrência do movimento das placas tectônicas, que causam variações de milímetros a centímetros por ano. Conseqüentemente, uma simples transformação de Helmert não é suficiente, sendo também necessário considerar as variações dos parâmetros envolvidos nessa transformação.

Diversas pesquisas que aplicam os procedimentos de compatibilização de referenciais e atualização de coordenadas podem ser encontradas. Algumas visam avaliar a precisão das compatibilizações ou o desempenho dos parâmetros de transformação ou dos modelos de velocidade, outros verificam a importância das transformações e atualizações das coordenadas. Soler e Snay (2004) avaliaram a compatibilização entre os referenciais ITRF2000 e NAD83 (*North American Datum of 1983*). Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015) analisaram a compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão.

Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) analisaram 45 possibilidades de compatibilização de referenciais e atualização de coordenadas (3 conjuntos de parâmetros de transformação e 15 modelos de velocidades) utilizando coordenadas de 86 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS). As duas melhores combinações encontradas foram: os conjuntos de parâmetros de Petit e Luzum (2010) com o modelo de velocidades MORVEL 2010, e dos parâmetros de Altamimi et al. (2007) / Petit e Luzum (2010) também com o MORVEL 2010.

Braga e Dal Poz (2017) compatibilizam referenciais e atualizaram coordenadas de 29 estações da RBMC utilizando três estratégias: referenciais e épocas incompatíveis; apenas referenciais compatíveis; e, referenciais e épocas compatíveis. Diante dos resultados, notou-se a importância da compatibilização dos referenciais das coordenadas e especialmente das épocas, uma vez que a evolução temporal se mostrou o fator predominante na alteração das componentes planimétricas.

Salienta-se que em algumas das pesquisas mencionadas - como Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015) e Braga e Dal Poz (2017) - a compatibilização do referencial das velocidades foi realizado, entretanto, em nenhuma delas foi avaliado o impacto dessa compatibilização nas discrepâncias encontradas após o processo de atualização.

As velocidades utilizadas para a atualização de coordenadas podem ser obtidas através de modelos de velocidades ou deformações ou estimadas através de levantamentos GNSS

contínuos abrangendo um período mínimo de dois anos (SIRGAS, 2021). Esses levantamentos, que formam uma série temporal posicional, possuem sinais induzidos pela deformação da Terra, em distintas escalas de tempo, variando desde as deformações sub-diárias das marés, às deformações interanuais de carregamento de superfície e rotação secular de placas tectônicas (SANTAMARÍA-GÓMEZ, 2019). De acordo com Zamora (2014), as velocidades podem ser estimadas de forma relativamente fácil através do ajuste de um modelo de regressão linear simples às séries posicionais pelo método dos mínimos quadrados, ou seja, quando se assume que a movimentação do ponto de interesse segue um modelo linear.

Comumente, utiliza-se o método de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) para geração de séries temporais posicionais, principalmente pela sua eficiência na realização do posicionamento, sendo empregado globalmente em diversas aplicações (NISTOR; BUDA, 2015; CHOY; BISNATH; RIZOS, 2016). Segundo Nascimento (2016), o PPP pode ser realizado de duas formas: utilizando software científico (que normalmente possuem restrições, alto custo e exige maior conhecimento teórico do usuário) ou serviços de PPP online, que são disponibilizados de forma gratuita por centros de pesquisa e instituições de vários países. Ademais, Nascimento et al. (2017) mostram que o PPP online é uma ferramenta eficiente para a geração de séries temporais posicionais de dados GNSS.

Diversas investigações têm se destinado a estudar os movimentos de estações GNSS fundamentando-se em séries temporais posicionais geradas pelo método PPP. Em alguns casos, objetiva-se investigar sinais de sazonalidade ou o impacto de ruídos nas séries, noutros, verificar deformações na superfície terrestre, ou ainda estimar velocidades.

Rosa (2008) investigou a influência sazonal presente em séries temporais posicionais com períodos de pelo menos dois anos de três estações da RBMC, sendo elas NAUS, BRAZ e BRFT. A partir das técnicas de *wavelets* e dos mínimos quadrados, constatou-se tanto a presença de efeitos sazonais anuais como semianuais nas séries das estações estudadas. Além disso, verificou-se que o maior efeito sazonal está concentrado na componente vertical.

Zamora (2014) gerou um modelo de velocidades local utilizando dados de 30 estações GNSS, sendo 22 na Costa Rica, contemplando o período de janeiro de 2009 a abril de 2011. Foi utilizada a metodologia do ajuste dos mínimos quadrados à série temporal posicional para estimar as velocidades. Os valores obtidos foram comparados com as velocidades da rede SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo), e apresentaram diferença média de 0,6 mm/ano, -0,8 mm/ano e -1 mm/ano para V_x , V_y e V_z , respectivamente.

Holden et al. (2017) estimaram velocidades a partir de séries temporais posicionais de dez anos, oriundas de estações situadas na Nova Zelândia, Austrália e sudoeste do Pacífico. As

velocidades horizontais foram estimadas utilizando a regressão linear CLS (*Combined Least Squares*), que permite a estimação direta das velocidades das estações considerando as componentes horizontais de forma conjunta, assim como suas respectivas precisões. Já as velocidades verticais foram estimadas utilizando regressão linear simples. Ao comparar as velocidades estimadas com as velocidades fornecidas pelo ITRF, observou-se uma diferença média de 0,4 mm/ano (horizontal) e 0,9 mm/ano (vertical). A incerteza média foi de $\pm 1,7$ mm/ano e $\pm 5,8$ mm/ano, respectivamente.

Staller et al. (2018) usaram dados de 33 estações GNSS localizadas no Equador, referentes ao período de 2008 a 2014, para estimar velocidades horizontais através de uma regressão linear ponderada após aplicar um modelo funcional que considera tendência, sazonalidade e ruídos nas séries temporais posicionais. Os dados analisados confirmaram e quantificaram as atividades tectônicas atuais no Equador. Em comparação com as velocidades do ITRF2008, as diferenças obtidas para as cinco principais estações analisadas ficaram abaixo de 1,5 mm/ano. Os resultados também foram consistentes com os apresentados por Trenkamp et al. (2002) e Nocquet et al. (2014).

Chanard et al. (2018) propuseram um modelo global para deslocamentos superficiais induzidos pela redistribuição de massa, integrando séries temporais de dados de observações GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) e GNSS (provindos de 689 estações globalmente distribuídas). Salientam que a elaboração de tal modelo é de suma importância, podendo contribuir para a melhoria de estimativas de velocidades para placas tectônicas.

Nascimento (2021) investigou a influência da carga hidrológica nas velocidades e no deslocamento de 8 estações da RBMC situadas na bacia amazônica através de séries temporais posicionais e de cotas linimétricas. As velocidades foram estimadas a partir do ajuste de modelos de regressão linear simples, enquanto os deslocamentos periódicos (oscilações) foram estimados a partir das amplitudes calculadas. Constatou-se que as séries de componentes Δn , Δe e Δu foram afetadas pelo efeito da carga hidrológica, entretanto, com magnitudes diferentes, sendo mais evidente nas séries de componentes verticais. Consequentemente, as velocidades determinadas a partir destas séries também são afetadas. As velocidades V_n , V_e e V_u estimadas foram comparadas com as do VEMOS2009 e as fornecidas pela rede SIRGAS-CON, apresentando discrepâncias entre -0,1 mm/ano e 1,4 mm/ano; -2,1 mm/ano e 1,7 mm/ano; e -2,7 mm/ano e 8,4 mm/ano, respectivamente.

Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021) estimaram velocidades pelo método dos mínimos quadrados a partir de séries temporais posicionais de pelo menos quatro anos para 94 estações pertencentes à RBMC, visando avaliar o impacto de sazonalidade e tipos de ruídos presentes

nas séries. De acordo com os resultados, verificou-se que não há diferença significativa na estimação de velocidades planimétricas das estações ao negligenciar a sazonalidade. O mesmo não foi observado para as componentes verticais, por possuírem comportamentos periódicos mais acentuados. Quanto aos ruídos, foi verificada a presença de ruídos brancos e *flicker*. Entretanto, os ruídos não afetaram os valores das velocidades, apesar de depreciar significativamente suas precisões.

Salienta-se que as pesquisas supramencionadas estimam velocidades, mas não as avaliam no processo de atualização de coordenadas. Atualmente, quando se deseja atualizar coordenadas de uma estação (ou qualquer ponto específico), primeiramente obtém-se as componentes de sua velocidade (através de um modelo de movimentação de placas tectônicas disponível ou estimada através de séries temporais posicionais), e na sequência as coordenadas são atualizadas para a época de interesse. Essa metodologia considera que cada ponto na superfície terrestre possui uma velocidade constante no tempo e única, que nesta pesquisa será chamada de monovelocidade. Entretanto, propõe-se a realização da atualização de coordenadas utilizando multivelocidade, isto é, atribuir à um mesmo ponto mais de uma velocidade, sendo cada uma utilizada em um período específico do processo de atualização. Tal metodologia institui um fator de inovação à esta pesquisa. Adicionalmente, propõe-se também avaliar o impacto da compatibilização de referencial das velocidades no processo de atualização de coordenadas.

1.1 Hipóteses

Assim sendo, definem-se como hipóteses desta pesquisa:

- i. compatibilizar o referencial de velocidades no processo de atualização de coordenadas resulta em menores discrepâncias, se comparado à não compatibilização;
- ii. utilizar multivelocidade no processo de atualização de coordenadas pode gerar melhores resultados que os obtidos com monovelocidade, dado um mesmo período de atualização;
- iii. velocidades derivadas de séries temporais para pontos específicos podem gerar melhores resultados na atualização de coordenadas que velocidades estimadas por modelos regionais ou globais.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar o impacto da compatibilização de referencial de velocidades e da utilização de multivelocidade na atualização de coordenadas estimadas pelo PPP.

1.2.2 Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- avaliar o desempenho dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017 na atualização de coordenadas, considerando ou não a compatibilização do referencial das velocidades estimadas;
- comparar as discrepâncias obtidas utilizando a metodologia de compatibilização proposta e a metodologia empregada pelo IBGE-PPP (que não utiliza a compatibilização de velocidades);
- estimar monovelocidades e multivelocidades através de séries temporais posicionais e avaliar o desempenho dessas velocidades na atualização de coordenadas;
- analisar o desempenho da atualização com multivelocidade em comparação com modelos de velocidades utilizados pela comunidade geodésica;
- implementar um programa computacional que automatize o processo de obtenção e manipulação de observação GNSS, bem como a geração de séries temporais posicionais - com opção de compatibilização destas para um mesmo referencial e/ou época de interesse.

1.3 Justificativa

Monitorar a Terra é fundamental para enfrentar os desafios científicos referentes à quantificação e entendimento das mudanças que afetam o sistema terrestre. Como a Terra está se deformando devido às placas tectônicas, deformações pós-sísmicas, dinâmica de fluidos geofísicos globais ou derretimento de gelo atual? Como determinar com precisão e acurácia as posições de pontos na superfície da Terra que está em constante deformação? A fim de responder a essas questões científicas, fundamentais para a compreensão da dinâmica terrestre, é extremamente importante conhecer a velocidade com que um ponto de interesse se movimenta em relação a um referencial determinado.

Deformações de maiores magnitudes causam grandes mudanças nas posições e nas velocidades de estações geodésicas, conseqüentemente afetando também os referenciais, como o ITRF e suas realizações regionais como o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) na América Latina e Caribe (SÁNCHEZ e DREWES, 2016).

Para garantir estabilidade de longa duração dos referenciais, a atualização de coordenadas entre épocas diferentes exige confiáveis modelos contínuos de deformação da superfície (ou modelos de velocidade) (SÁNCHEZ; DREWES, 2016). Dessa forma, utilizar modelos de velocidade que não compreendem períodos em que aconteceram processos de deformação significativos ou que foram elaborados através de observações que não englobam todo o período de interesse ao qual se deseja atualizar as coordenadas, pode comprometer a qualidade dos resultados da atualização.

Para o caso brasileiro, onde o referencial geodésico adotado oficialmente é o SIRGAS2000 (época 2000,4), atualizar uma coordenada de 2021 para 2000,4, utilizando apenas um modelo de velocidade como o VEMOS2009 (elaborado com base em observações realizadas no período de 2 de janeiro de 2000 a 30 de junho de 2009) significa usar um modelo que leva em consideração menos da metade do período entre as duas datas/épocas para calcular o deslocamento total.

Além disso, o VEMOS2009 considera velocidades de estações com uma distribuição irregular, o que impacta as incertezas de suas velocidades, que vão de 1 mm/ano a 9 mm/ano em regiões de cobertura mais esparsa, como a parte central da placa Sul-Americana, na qual o Brasil está situado (DREWES; HEIDBACH, 2012). O VEMOS2009, assim como diversos modelos de velocidades regionais/globais, não apresenta as variações da componente vertical. Esta indisponibilidade está relacionada à dificuldade de se modelar as variações verticais superficiais, dependentes de modelos geofísicos regionais e locais detalhados para a obtenção de movimentos locais da crosta (DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2015).

Por conseguinte, diante dos problemas supracitados, torna-se pertinente estimar e avaliar as velocidades locais, testando diferentes metodologias de estimação de velocidades e estratégias de atualização das coordenadas.

Adicionalmente, no PPP, as coordenadas estimadas na época do levantamento são referenciadas à materialização de referência global utilizada nas órbitas dos satélites, enquanto diversos países adotam sistemas geodésicos regionais. Uma forma de lidar com estas diferenças, é a utilização da transformação de Helmert em conjunto com um modelo de velocidades para a compatibilização tanto do referencial, quanto da época. Como as velocidades também estão associadas à um sistema de referência, mostra-se relevante avaliar o impacto da

compatibilização dos referenciais das velocidades no processo de atualização das coordenadas, especialmente para posicionamentos de alta precisão.

1.4 Estrutura da pesquisa

Esta pesquisa está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 1, já apresentado, fornece uma introdução geral aos assuntos que serão abordados e expõe o objetivo, hipóteses e justificativa desta pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta uma análise do desempenho dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017 na aplicação da atualização de coordenadas, considerando ou não a compatibilização do referencial das velocidades estimadas.

O Capítulo 3 apresenta uma análise do potencial da realização do procedimento de atualização de coordenadas 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.

Por fim, o Capítulo 4 apresenta as conclusões gerais obtidas a partir dos dois estudos realizados nesta pesquisa, assim como recomendações para pesquisas futuras.

Referências

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**, 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, 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5, 2012.

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.; DAL POZ, W. R.; LAROCCA, A. P. C.. Compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.l.], v. 21, n. 3, set. 2015. ISSN 1982-2170. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/43215>. Acesso em: 24 jun. 2021.

CHANARD, K.; FLEITOUT, L.; CALAIS, E.; REBISCHUNG, P.; AVOUAC, J.P. Toward a global horizontal and vertical elastic load deformation model derived from GRACE and GNSS station position timeseries. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, n. 123, p. 3225–3237, 2018. DOI: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2017JB015245>.

CHOY, S. L.; BISNATH, S.; RIZOS, C. Uncovering common misconceptions in GNSS precise point positioning and its future prospect. **GPS Solutions**. Heidelberg, BE, p. 1- 10, 21 may. 2016. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10291-016-0545-x>. Acesso em: 15 de out. 2020.

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, jul. 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_81.

HOLDEN, L.; SILCOCK, D.; CHOY, S.; CAS, R.; AILLERES, L.; FOURNIER, N. Evaluating a campaign GNSS velocity field derived from an online precise point positioning service, **Geophysical Journal International**, Volume 208, Issue 1, January 2017, Pages 246–256, DOI: 10.1093/gji/ggw372.

IBGE (2015). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 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). Disponível em: http://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/nota_tecnica_termino_periodo_transicao_sirgas2000.pdf. Acesso em: 03 out. 2020.

ITRF (2021). INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME. Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>. Acesso em: 26 fev. 2021.

JEKELI, C. **Geometric reference systems in geodesy**. Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences, OST – Ohio State University, 209 p., 2012.

NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. 2016. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Viçosa, MG, 2016.

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, p. 150-165, 2017.

NASCIMENTO, L. A. **Análise temporal do efeito da carga hidrológica nas deformações em estações GNSS localizadas na Amazônia brasileira**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

NISTOR, S.; BUDA, A. S. Analysis of GNSS data using precise point positioning technique for the determination of permanent station in România. **Mathematical Modelling in Civil Engineering**, v. 11, n. 3, p. 31-37, set. 2015. DOI: 10.1515/mmce-2015-0013.

NOCQUET, J. M., VILLEGAS-LANZA, J. C., CHLIEH, M., MOTHESS, P. A., Rolandone, F., Jarrin, P., ... & Martin, X. Motion of continental slivers and creeping subduction in the northern Andes. **Nature Geoscience**. 7(4), 287-291. 2014.

NOLL, C. (2014). SLR, GNSS, VLBI, and DORIS Networks: ILRS+IGS+IVS+IDS. NASA Goddard Space Flight Center. United States of America.

PETIT, G; LUZUM, B (eds.). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). IERS Technical. Note No. 36. IERS Conventions. Frankfurt am Main, 2010. Disponível em: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Acesso em: 16 fev. 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**. Curitiba, v. 22, n. 3, 2016.

RAMOS, M. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Determinação de Velocidades das Estações da RBMC com Uso do Software SARI . **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 453-469, 6 abr. 2021.

ROSA, G.P.S. **Análise de Séries Temporais de Coordenadas Estimadas com GPS: Uma Proposta Metodológica para Eliminação de Efeitos Sazonais**. Tese (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008. 106 p.

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.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, Alvaro. SARI: interactive GNSS position time series analysis software. **GPS Solutions**, v. 23, n. 2, p. 52, 2019. DOI. 10.1007/s10291-019-0846-y

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações. **Revista Brasileira de Geofísica**. Presidente Prudente-SP, v.18, n.2, pp.161-172, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2000000200005>.

SIRGAS (2021). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Modelo de velocidade para o SIRGAS. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model>. Acesso em: 28 fev. 2021.

SOLER, T; SNAY, R. A. Transforming positions and velocities between the International Terrestrial Reference Frame of 2000 e North American datum of 1983. **Journal of Surveying Engineering**. Estados Unidos, v. 130, n. 2, p. 49-55, 2004

STALLER, A., Álvarez-Gómez, José.Antonio., Luna, M.P., Béjar-Pizarro, M., Gaspar-Escribano, J.M., Martínez-Cuevas, S., Crustal motion and deformation in Ecuador from cGNSS time series, **Journal of South American Earth Sciences**. 2018. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.05.014.

TERRINHA, Pedro. 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, Maio de 2005. Disponível em: <https://repositorio.lneg.pt/bitstream/10400.9/514/1/33632.pdf>. Acesso em 23 abr. 2021.

TRENKAMP R, KELLOGG J, FREYMULLER J, MORA H . Wide plate margin deformation, South Central America and Northwestern South America, CASA GPS observations. **Journal of South American Earth Sciences** 15: 157–171. DOI: 10.1016/S0895-9811(02)00018-4, 2002.

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**. 2014. 105 f. Tesis (Doctor en Ciencias Físicas). Escuela Técnica Superior de Ingenieros em Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madri. Madri, 2014.

2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAL DAS VELOCIDADES NA ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP

Resumo: No Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), as coordenadas estimadas na época do levantamento são referenciadas à materialização do sistema de referência global utilizada nas órbitas dos satélites, atualmente IGB14 (época de coleta dos dados). No entanto, sistemas geodésicos regionais são adotados em diferentes países, como no Brasil, que adota o SIRGAS2000 (época 2000,4). Uma forma de lidar com estas diferenças, é a utilização da transformação de Helmert em conjunto com um modelo de velocidades para a compatibilização tanto do referencial, quanto da época. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o desempenho dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017 na aplicação do procedimento de atualização de coordenadas para o posicionamento GNSS de alta precisão, considerando ou não a compatibilização do referencial das velocidades estimadas. Utilizou-se dados GNSS em formato RINEX de 175 estações da RBMC processados com o serviço online IBGE-PPP. Diante dos resultados encontrados, pôde-se verificar que a compatibilização de referencial das velocidades se mostrou eficaz para o processo de atualização das coordenadas obtidas no IBGE-PPP. Das 1513 coordenadas obtidas com cada uma das quatro velocidades estudadas, a VEMOS2009-CCR apresentou 62,92% das menores discrepâncias, seguida pela VEMOS2017-CCR com 29,54%, VEMOS2009-SCR com 7,21% e VEMOS2017-SCR com 0,33%. Em relação à diminuição das discrepâncias após a compatibilização de referencial das velocidades, verificou-se que para o VEMOS2009, 85,86% das coordenadas apresentaram uma menor discrepância após a atualização. Já para o VEMOS2017 essa diminuição ocorreu em 98,61% das coordenadas.

Palavras-chave: VEMOS2009. VEMOS2017. Atualização de coordenadas. Referencial de velocidades. IBGE-PPP.

Abstract: In Precise Point Positioning (PPP), the coordinates estimated at the epoch of the survey are referenced to the materialization of the global reference system used in the orbits of the satellites, currently IGB14 (epoch of observation). However, regional geodetic systems are officialized and adopted in different countries, such as in Brazil, which adopts SIRGAS2000 (epoch 2000.4). One way of dealing with these differences is to use the Helmert transformation in conjunction with a velocity model (which also has a reference system) to make both the

reference and the epoch compatible. This work aims to evaluate the performance of the VEMOS2009 and VEMOS2017 models in the application of the coordinate update procedure for high precision GNSS positioning, considering or not the compatibility of the reference velocities obtained. It was used GNSS data in the RINEX format from 175 RBMC stations processed with the IBGE-PPP online service. In view of the results found, it was possible to verify that the compatibility of the velocities reference proved to be effective for the process of updating the coordinates obtained in the IBGE-PPP. Of the 1513 coordinates obtained with each of the four velocities, VEMOS2009-CCR presented 62.92% of the smallest discrepancies, followed by VEMOS2017-CCR with 29.54%, VEMOS2009-SCR with 7.21% and VEMOS2017-SCR with 0,33%. Regarding the decrease in discrepancies after the compatibility of the velocities reference, it was found that, for VEMOS2009, 85.86% of the coordinates presented a smaller discrepancy after the update. For VEMOS2017, this decrease occurred in 98.61% of the coordinates.

Keywords: VEMOS2009. VEMOS2017. Coordinates update. Reference frame of velocities. IBGE-PPP.

2.1 Introdução

No Brasil, adota-se oficialmente o SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000) como referencial geodésico desde dia 25 de fevereiro de 2005, instituído pela resolução 01/2005 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Tal sistema consiste em uma densificação regional do ITRF2000 (*International Terrestrial Reference Frame 2000*), cuja época de referência é 2000,4 (IBGE, 2015). No entanto, as coordenadas estimadas no PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) são originalmente associadas ao referencial das órbitas dos satélites GNSS (*Global Navigation Satellite System*) para a época do levantamento, atualmente IGB14. Portanto, dados GNSS coletados a partir de 17 de maio de 2020 e processados no serviço online IBGE-PPP terão as coordenadas referenciadas ao IGB14, na época de coleta dos dados (IBGE, 2020).

Segundo Jekeli (2012), 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 de coordenadas). 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 pela ocorrência do movimento das placas tectônicas (deriva continental) que compõem a parte superior da Terra, causando variações de milímetros a centímetros por ano. Conseqüentemente, uma simples transformação de Helmert não é suficiente, sendo necessário considerar as variações dos parâmetros envolvidos nessa transformação.

Adicionalmente, outros processos geodinâmicos locais ou regionais também exercem influência na movimentação (velocidades) das estações geodésicas, dentre eles: as variações de cargas hidrológicas e atmosféricas (que de modo sazonal, geram alterações de vários centímetros nas coordenadas); terremotos mais intensos, que podem mudar de forma repentina as coordenadas de centímetros a metros etc. (MOREIRA, 2010; SILVA; COSTA; VAZ, 2010; BRUNINI; SÁNCHEZ, 2015).

Desta forma, modelos de velocidades ou de deformações, que englobam alguns dos processos supracitados, podem ser utilizados para determinação das velocidades das estações. Para a região de cobertura do SIRGAS, deve-se utilizar o VEMOS (Modelo de Velocidade para o SIRGAS), em suas versões 2003, 2009, 2015 ou 2017 (SIRGAS, 2021a). Como destaca Carvalho (2015), assim como as coordenadas, as velocidades podem estar associadas a diferentes sistemas de referência, sendo a compatibilização de ambas para um referencial comum condição necessária ao procedimento de atualização das coordenadas de uma época de origem para uma de destino.

Diversos estudos, afins ou correlatos, que aplicam os procedimentos de atualização das coordenadas podem ser encontrados. Dentre estes, pode-se destacar: Soler e Snay (2004) que avaliam a compatibilização dos referenciais ITRF2000 e NAD83 (*North American Datum of 1983*); Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015) que tratam da compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão; Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) onde analisam as possibilidades de compatibilização de referencial e atualização de coordenadas estimadas pelo PPP; Braga e Dal Poz (2017) que analisam a compatibilização de referencial e atualização de coordenadas entre o ITRF2014 (IGS14) e o SIRGAS2000 e Braga e Dal Poz (2019) que verificam as potencialidades do PPP no software Bernese com compatibilizações de sistemas geodésicos de referência e de tempo. Com exceção do primeiro, as demais pesquisas utilizam o VEMOS2009 para a determinação das velocidades utilizadas.

Portanto, diante do exposto, objetiva-se nesta pesquisa avaliar o desempenho dos modelos VEMOS2009 e VEMOS2017 na aplicação do procedimento de atualização de coordenadas para o posicionamento GNSS de alta precisão, considerando ou não a compatibilização do referencial das velocidades obtidas.

2.2 Modelos de velocidades VEMOS

O VEMOS consiste em um modelo de velocidades fundamentado nas soluções do sistema de referência SIRGAS, sendo constantemente atualizado. A partir das atualizações foram lançadas algumas versões do VEMOS, denominadas respectivamente de: VEMOS2003 (DREWES; HEIDBACH, 2005), VEMOS2009 (DREWES; HEIDBACH, 2012), VEMOS2015 (SÁNCHEZ; DREWES, 2016) e VEMOS2017 (DREWES; SÁNCHEZ, 2020). Considerando a recomendação de utilização destes modelos para a área de cobertura do SIRGAS, destaca-se que no Brasil se utiliza, com frequência, o VEMOS2009. Suas vantagens em relação ao VEMOS2003 consistem no maior número de velocidades utilizadas, melhor qualidade das medidas e ampliação da área de abrangência. O VEMOS2017 consiste na atualização mais recente do modelo e descreve a atual deformação na América Latina e no Caribe, dando continuidade ao modelo de superfície-cinemática representado pelo VEMOS2015. Vale destacar que o VEMOS2015 apresenta a limitação de ser válido somente para o período de março de 2010 a abril de 2015 (SÁNCHEZ; DREWES, 2016).

Salienta-se que tais modelos representam médias anuais dos movimentos horizontais da superfície, possibilitando a atualização de coordenadas para uma época específica. Devido ao uso nesta pesquisa, serão descritos apenas os modelos VEMOS2009 e VEMOS2017.

O VEMOS2009 considerou em sua formulação as velocidades de 496 estações, sendo 95 referentes à solução multianual do SIRGAS (SIR09P01) e as demais derivadas de campanhas de rastreamento com GPS. A determinação de seu campo de velocidade superficial foi efetuada aplicando-se o método do elemento finito (FEM - *Finite Element Method*) e colocação por mínimos quadrados (LSC - *Least Squares Collocation*) associado a funções de covariância, determinadas de forma empírica. Salienta-se que suas velocidades são referenciadas ao ITRF2005 e sua precisão é de aproximadamente 1,5 mm/a (DREWES; HEIDBACH, 2012).

O VEMOS2017 consiste na versão mais atual do modelo, em que descreve a atual deformação na América Latina e no Caribe, recobrando a região de 120°W, 55°S a 35°W, 32°N, apresentando uma resolução espacial de 1° x 1°. Em sua elaboração utilizou-se as velocidades de 515 estações geodésicas, compreendendo o período 1 de janeiro de 2014 a 28 de janeiro de 2017. Seu campo de velocidade foi determinado com a aplicação do método de colocação por mínimos quadrados associado a funções de covariância, determinadas de forma empírica. Destaca-se que as velocidades determinadas neste modelo estão referenciadas ao ITRF2014 e sua precisão é de 1,0 mm/a na direção norte-sul e 1,7 mm/a na direção leste-oeste (DREWES; SÁNCHEZ, 2020).

IBGE (2015) destaca que os modelos de velocidade supramencionados proporcionam somente a atualização das coordenadas planimétricas, uma vez que as variações altimétricas são principalmente decorrentes de movimentos locais, dificultando a modelagem regional.

2.3 Transformação de referencial e atualização de coordenadas

A compatibilização entre as materializações dos ITRF (IGS) é efetuada aplicando-se a transformação de Helmert. Os parâmetros utilizados consistem em três translações, três rotações e um fator de escala, assim como suas respectivas taxas de variação, determinados em uma época t_k , como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de transformação entre os ITRF 2014, 2008, 2005 e 2000.

Parâmetros	T_X (mm)	T_Y (mm)	T_Z (mm)	D (ppb)	R_X (mas)	R_Y (mas)	R_Z (mas)
ITRF2014 para ITRF2008, época 2010,0	1,6	1,9	2,4	-0,02	0,000	0,000	0,000
ITRF2008 para ITRF2005, época 2000,0	-2,0	-0,9	-4,7	0,94	0,000	0,000	0,000
ITRF2005 para ITRF2000, época 2000,0	0,1	-0,8	-5,8	0,4	0,000	0,000	0,000
Variações temporais (rates)	\dot{T}_X (mm /ano)	\dot{T}_Y (mm /ano)	\dot{T}_Z (mm /ano)	\dot{D} (ppb /ano)	\dot{R}_X (mas /ano)	\dot{R}_Y (mas /ano)	\dot{R}_Z (mas /ano)
ITRF2014 para ITRF2008, época 2010,0	0,0	0,0	-0,1	0,03	0,000	0,000	0,000
ITRF2008 para ITRF2005, época 2000,0	0,3	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	0,000
ITRF2005 para ITRF2000, época 2000,0	-0,2	0,0	-1,8	0,08	0,000	0,000	0,000

*mas: milisegundo de arco

Fonte: ALTAMIMI et. al (2007), ALTAMIMI et. al (2012) e ALTAMIMI et. al (2017).

Nesse caso, reduz-se os parâmetros de sua época (t_k) para a época (t_o) referente as coordenadas no sistema de referência de origem (o) conforme Eq. (1) (SAPUCCI; MONICO, 2001; PETTIT; LUZUM, 2010; CARVALHO, 2015):

$$\vec{P}_{t_o} = \vec{P}_{t_k} + \vec{P}_{t_k}(t_o - t_k) \rightarrow \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ D \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{pmatrix}_{t_o} = \begin{pmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ D \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{pmatrix}_{t_k} + \begin{pmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{pmatrix}_{t_k} (t_o - t_k) \quad (1)$$

em que \vec{P}_{t_o} é o vetor dos parâmetros de transformação na época das coordenadas no sistema origem; \vec{P}_{t_k} é o vetor dos parâmetros de transformação na época de sua determinação; \vec{P}_{t_k} é o vetor das taxas de variação dos parâmetros na época de sua determinação; T_X , T_Y e T_Z são as translações em X, Y e Z entre os dois referenciais, dadas em metros; D é o fator de escala entre os dois referenciais, adimensional, dado em partes por bilhão - ppb; R_X , R_Y e R_Z são as rotações diferenciais em torno dos eixos X, Y e Z, dadas em radianos; e \dot{T}_X , \dot{T}_Y , \dot{T}_Z , \dot{D} , \dot{R}_X , \dot{R}_Y e \dot{R}_Z correspondem as taxas de variação anual dos parâmetros anteriormente descritos.

Após a atualização dos parâmetros, realiza-se a transformação das coordenadas de um sistema origem (o) para um sistema de destino (d), dada pela Eq. (2), onde as coordenadas nas duas materializações, bem como os sete parâmetros de transformação devem estar na mesma época t_o (PETTIT; LUZUM, 2010).

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t_o)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{o(t_o)} + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \end{bmatrix}_{t_o} + \begin{bmatrix} D & -R_Z & R_Y \\ R_Z & D & -R_X \\ -R_Y & R_X & D \end{bmatrix}_{t_o} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{o(t_o)} \quad (2)$$

A última etapa do processamento consiste na atualização das coordenadas da época t_o para a época de interesse t . No entanto, para a realização da última etapa, conforme o rigor teórico, faz-se necessário que as velocidades utilizadas estejam no mesmo referencial das coordenadas na época t_o (CARVALHO, 2015). Como destacado anteriormente, as velocidades originais do VEMOS2009 são referenciadas ao ITRF2005, e as do VEMOS2017 ao ITRF2014.

A compatibilização do referencial das velocidades do sistema de origem do modelo (o_m) para um sistema destino (d) é dada pela Eq. (3) (CARVALHO, 2015).

$$\begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d = \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{o_m} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \end{bmatrix}_{t_o} + \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{R}_Z & \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z & \dot{D} & -\dot{R}_X \\ -\dot{R}_Y & \dot{R}_X & \dot{D} \end{bmatrix}_{t_o} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{o(t_o)} \quad (3)$$

Na sequência, reduz-se as coordenadas das estações da época t_o para a época t de interesse, utilizando-se a Eq. (4) (CARVALHO, 2015; SIRGAS, 2021b):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t_o)} + \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d (t - t_o) \quad (4)$$

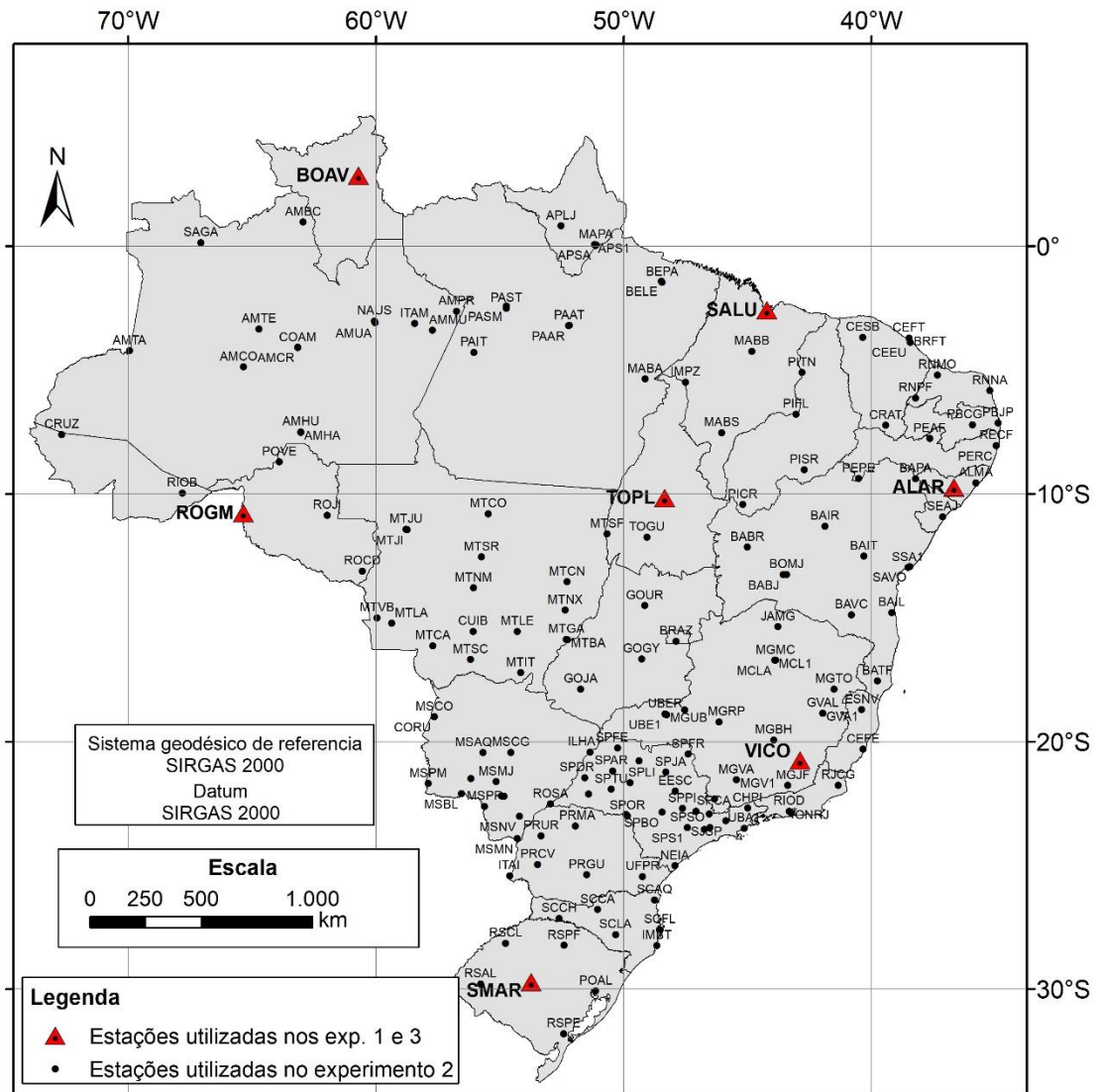
em que $[X, Y, Z]_{d(t)}^T$ são as coordenadas da estação na época e referencial de interesse; $[X, Y, Z]_{d(t_o)}^T$ são as coordenadas cartesianas da estação na época de origem e referencial de interesse; $[V_X, V_Y, V_Z]_d^T$ são os vetores velocidade do ponto considerado no mesmo referencial das coordenadas na época t_o .

2.4 Materiais e métodos

Neste Capítulo foram utilizados dados de observação GNSS (GPS e GLONASS) de 175 estações da RBMC, assim como suas coordenadas de referência, referenciadas ao SIRGAS2000 (época 2000,4), disponíveis em seus respectivos descritivos. A disposição das estações utilizadas pode ser visualizada na Figura 1.

Realizou-se três experimentos distintos: o primeiro, utilizando arquivos de observação no formato RINEX, com intervalo de rastreamento de 24 horas (L1/L2), das estações ALAR, BOAV, ROGM, SALU, SMAR, TOPL e VICO disponíveis nos dias 01/04 a 10/04 para os anos de 2010 a 2019. Justifica-se a escolha destas estações devido a abrangência de regiões distintas do Brasil; o segundo, utilizando arquivos de observação no formato RINEX, com intervalo de rastreamento de 24 horas (L1/L2), de todas as estações disponíveis nos dias 01/04 para todos os anos entre 2010 a 2019; e o terceiro, que além dos dados das sete estações obtidos no primeiro experimento, referentes ao ano de 2019, utilizou as coordenadas referenciadas ao SIRGAS2000 (época 2000,4) das mesmas estações, disponibilizadas diretamente pelo IBGE-PPP.

Figura 1 - Disposição das estações da RBMC utilizadas.



Fonte: O autor (2021).

As observáveis GNSS dos arquivos RINEX foram processadas no serviço online IBGE-PPP (IBGE-PPP, 2020), obtendo assim as coordenadas estimadas na data do levantamento. Evidencia-se que em tal serviço, o referencial das coordenadas está associado à data de coleta dos dados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Soluções IGS/ITRF utilizadas no IBGE-PPP, de acordo com a data do levantamento.

Realização IGS/ITRF	Data de rastreo GNSS
IGS05/ITRF2005	05/11/2006 a 16/04/2011
IGS08/ITRF2008	17/04/2011 a 06/10/2012
IGb08/ITRF2008	07/10/2012 a 28/01/2017
IGS14/ITRF2014	29/01/2017 a 16/05/2020
IGb14/ITRF2014	17/05/2020 a atualmente

Fonte: IBGE-PPP, 2020.

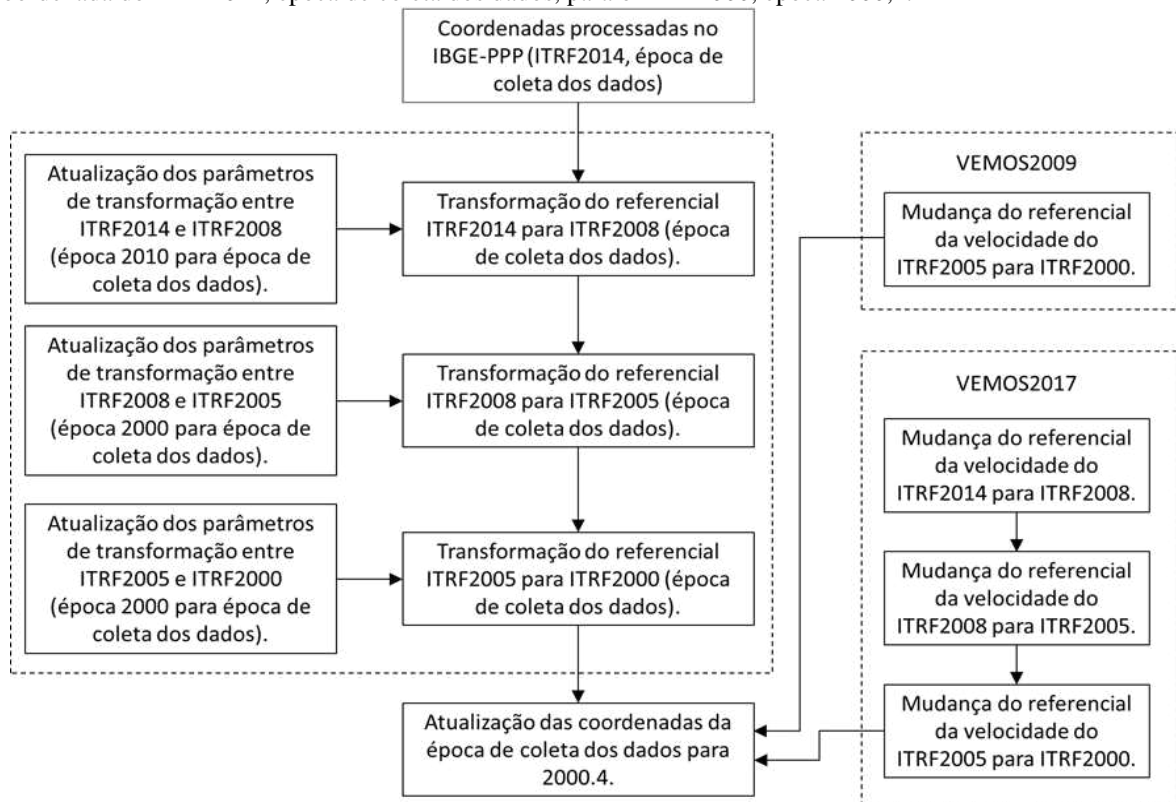
Salienta-se que o IGS14/IGb14 e o ITRF2014 são compatíveis e alinhados (IGS ACC, 2020; REBISCHUNG e SCHMID, 2016; REBISCHUNG, 2020), assim como o IGS08/IGb08 e o ITRF2008 (IGS ACC, 2020; WESTON e SOLER, 2012), o IGS05 e o ITRF2005 (IGS ACC, 2020) e o SIRGAS2000 e o ITRF2000 (WESTON e SOLER, 2012; SIRGAS, 2021c).

As velocidades de cada estação foram obtidas através da interpolação da grade do VEMOS2009 e VEMOS2017, disponibilizados pelo SIRGAS em sua página eletrônica. Este procedimento foi programado em linguagem C, com base na metodologia empregada por Prol et. al (2014).

Após a atualização dos parâmetros e compatibilização dos referenciais das velocidades e das coordenadas, foram obtidas as coordenadas referenciadas ao ITRF2000, época 2000,4, compatíveis com as coordenadas de referência das estações da RBMC.

O procedimento de compatibilização de referenciais se deu seguindo o rigor teórico evidenciado por Carvalho (2015), Almeida, Oliveira e Dal Poz (2016), Braga e Dal Poz (2017) e Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) em que a transformação de referencial ocorre de forma intermediária (transformando do ITRF2014 para ITRF2008, do ITRF2008 para ITRF2005 e finalmente para o ITRF2000) como ilustrado no fluxograma da Figura 2, e não de forma direta (ITRF2014 para ITRF2000). Nesse sentido, após a atualização dos parâmetros e compatibilização dos referenciais das velocidades e das coordenadas, obteve-se as coordenadas referenciadas ao ITRF2000, época 2000,4, compatíveis com as coordenadas de referência das estações da RBMC.

Figura 2 - Fluxograma do procedimento completo para compatibilização de referencial e atualização de uma coordenada do ITRF2014, época de coleta dos dados, para o ITRF2000, época 2000,4.



Fonte: O autor (2021).

Para calcular as discrepâncias planimétricas, primeiro fez-se necessário a transformação das coordenadas cartesianas estimadas em coordenadas geodésicas (ϕ , λ , h), no mesmo referencial, conforme Monico (2008). Segundo 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, em metros, é apresentada nas Eq. (5 a 10) (TORGE, 2001).

Inicialmente, são calculadas as discrepâncias da latitude (ϕ) e longitude (λ) em radianos (Eq. (5)) e posteriormente em metros (Eq. (6)).

$$\begin{vmatrix} \Delta\phi(rad) \\ \Delta\lambda(rad) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \phi(referência) - \phi(estimada) \\ \lambda(referência) - \lambda(estimada) \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{vmatrix} \Delta\phi(metros) \\ \Delta\lambda(metros) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} M \cdot \Delta\phi(rad) \\ N \cdot \cos\phi \cdot \Delta\lambda(rad) \end{vmatrix} \quad (6)$$

onde M é o raio de curvatura da seção meridiana (Eq. (7)), N o raio de curvatura da seção primeiro vertical (Eq. (8)), $\bar{\phi}$ é a média entre as latitudes de referência e estimada, e e^2 a

segunda excentricidade (Eq. (9)). Destaca-se que as coordenadas de referência foram obtidas nos descritivos das estações da RBMC (SIRGA2000, época 2000,4).

$$M = \frac{a(1 - e^2)}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \bar{\phi})^{\frac{3}{2}}} \quad (7)$$

$$N = \frac{a}{(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \bar{\phi})^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \quad (9)$$

A discrepância planimétrica, em metros, é dada pela Eq. (10).

$$T = \sqrt{\Delta\phi_{(\text{metros})}^2 + \Delta\lambda_{(\text{metros})}^2} \quad (10)$$

Salienta-se que as discrepâncias altimétricas não serão analisadas, uma vez que o processo de atualização de coordenadas é predominantemente horizontal (IBGE, 2015).

2.5 Resultados

As análises foram realizadas sobre as discrepâncias obtidas com o uso dos dois modelos considerando quatro estratégias de processamento: velocidades do VEMOS2009 sem compatibilização de referencial das velocidades (SCR), do VEMOS2009 com compatibilização do referencial das velocidades (CCR), do VEMOS2017-SCR e do VEMOS2017-CCR.

2.5.1 Experimento 1

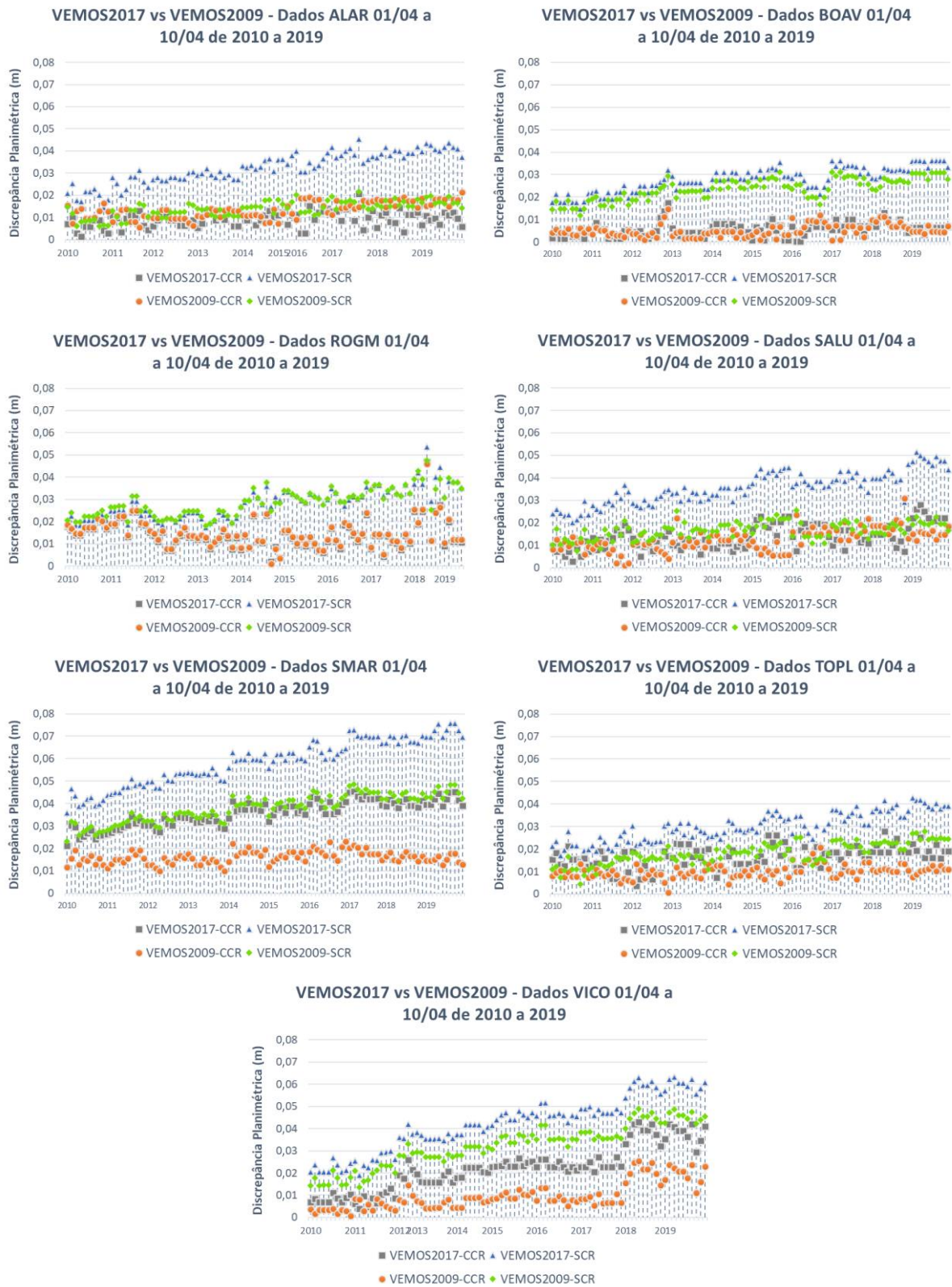
Os resultados do Experimento 1 referem-se às discrepâncias planimétricas obtidas utilizando as quatro velocidades para cada uma das estações (ALAR, BOAV, ROGM, SALU, SMAR, TOPL e VICO), apresentadas na Figura 3.

Para a estação ALAR pode-se notar que houve uma significativa melhora (diminuição) das discrepâncias considerando o VEMOS2017-CCR. A melhora mais significativa foi de 3,4 cm e a menos de 1,0 cm, correspondendo a uma redução de 91,91% e 54,63% respectivamente,

em relação à discrepância obtida no VEMOS2017-SCR. Em média, as discrepâncias apresentaram uma redução de 71,5% (2,3 cm) em relação ao VEMOS2017-SCR. Considerando o VEMOS2009-CCR verificou-se que apenas 48,31% das discrepâncias melhoraram, com máxima de 1,1 cm (66,26%), mínima de 0,2 cm (12,36%) e média de 0,5 cm (30,59%). Restringindo-se apenas às discrepâncias que apresentaram pior resultado, destaca-se que o mais expressivo foi de +0,99 cm, o que representou uma piora de 150%, a média foi de +0,35 cm (+35,11%). Comparando os resultados apresentados pelo VEMOS2017-CCR e VEMOS2009-CCR, pode-se notar que o VEMOS2017-CCR apresentou melhores resultados, o que não ocorreu quando comparados o VEMOS2017-SCR e o VEMOS2009-SCR, cujos melhores resultados foram obtidos pelo VEMOS2009-SCR.

A estação BOAV apresentou resultados similares à ALAR para os dois modelos VEMOS, tanto para as velocidades SCR como para as CCR (que melhoraram 100% das discrepâncias da estação). O VEMOS2017-CCR apresentou melhora máxima de 3,3 cm (99,34%), mínima de 1,0 cm (45,31%) e média foi de 2,2 cm (80,04%) quando comparado ao VEMOS2017-SCR. Para o VEMOS2009-CCR, a máxima redução foi de 3,0 cm (97,11%), a menor de 0,5 cm (28,14%) e a média foi de 1,9 cm (77,61%) em relação ao VEMOS2009-SCR. Equivalente ao encontrado nas estações BOAV e ALAR, a estação ROGM também apresentou comportamento similar para os cenários considerados. O VEMOS2017-CCR evidenciou redução máxima de 2,7 cm (92,91%), mínima de 0,1 cm (2,37%) e média de 1,4 cm (48,21%), quando comparado ao VEMOS2017-SCR. Para o VEMOS2009-CCR, a melhora máxima foi de 2,6 cm (95,56%), a mínima de 0,1 cm (2,74%) e a média foi de 1,4 cm (47,12%) comparado ao VEMOS2009-SCR.

Figura 3 - Comparação das discrepâncias planimétricas das estações ALAR, BOAV, ROGM, SALU, SMAR, TOPL e VICO obtidas utilizando as quatro velocidades.



Fonte: O autor (2021).

Na estação SALU, assim como ocorreu na ALAR, o VEMOS2009-CCR não apresentou expressividade na redução das discrepâncias. Sua melhora máxima foi de 2,0 cm (94,74%), mínima de 0,0 cm e média de 0,6 cm (33,36%) quando comparado ao VEMOS2009-SCR. Particularizando para as coordenadas em que a atualização piorou a discrepância, a máxima foi de +1,55 cm (+100,65%) e média de +0,39 cm (+30,05%) respectivamente. Por outro lado, o VEMOS2017-CCR melhorou todas as discrepâncias, com redução máxima de 3,1 cm (85,57%), mínima de 1,3 cm (44,00%) e média de 2,2 cm (62,24%) em relação ao VEMOS2017-SCR.

Analisando as discrepâncias obtidas para a estação SMAR verifica-se que os resultados obtidos pelo VEMOS2017-CCR e o VEMOS2009-SCR foram similares e mostram uma performance mais significativa para o VEMOS2009-CCR. Salienta-se que ambos os modelos apresentaram expressiva melhora após a compatibilização de referencial. O VEMOS2017-CCR obteve melhora máxima de 3,1 cm (44,03%), mínima 1,1 cm (32,03%) e média foi de 2,3 cm (38,93%) em relação ao VEMOS2017-SCR, enquanto o VEMOS2009-CCR apresentou melhora máxima de 3,1 cm (69,67%), mínima de 1,1 cm (38,46%) e média de 2,2 cm (57,15%) em relação ao VEMOS2009-SCR.

Considerando a estação TOPL verifica-se que o VEMOS2009-CCR apresentou os melhores resultados em 92% das coordenadas processadas, quando comparado ao VEMOS2009-SCR. Destas, a máxima melhora foi de 2,0 cm (96,23%), mínima de 0,0 cm (0,65%) e média de 0,9 cm (46,24%). Limitando-se às discrepâncias que pioraram após a compatibilização de referencial (8% do total), observou-se que a média foi de +0,37 cm (+48,90%). Para o VEMOS2017, que obteve melhora em 100% das discrepâncias, a máxima foi de 2,4 cm (83,49%), mínima de 0,0cm e média de 1,4 cm (44,63%).

Em relação aos resultados da VICO, verifica-se uma nítida melhora das discrepâncias após a compatibilização de referencial das velocidades, principalmente para VEMOS2009-CCR, que apresentou máxima discrepância de 3,1 cm (96,67%), mínima de 0,6 cm (40,15%) e média de 2,2 cm (71,51%) quando comparado ao VEMOS2009-SCR. O VEMOS2017-CCR apresentou melhora máxima de 2,6 cm (79,47%), mínima de 1,2 cm (31,48%) e média de 2,0 cm (50,21%) em comparação ao VEMOS2017-SCR.

2.5.2 Experimento 2

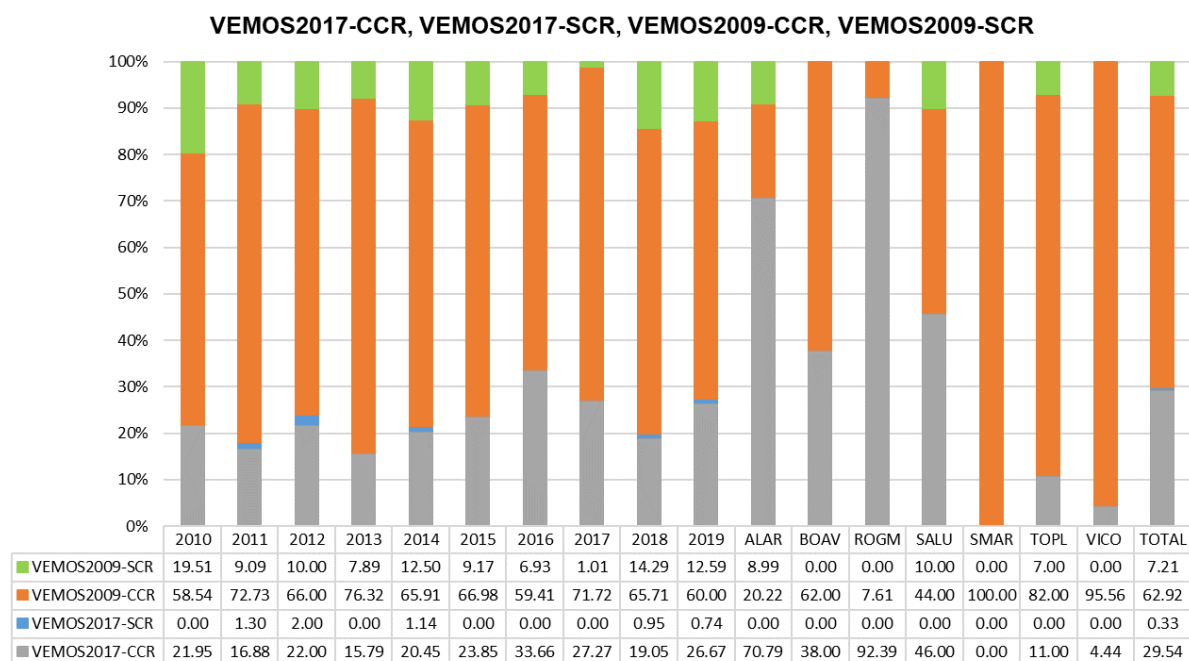
No segundo experimento, foram realizadas quatro análises com os dados provenientes de 175 estações, com observações do dia 01/04 para todos os anos entre 2010 e 2019, adicionados aos dados já obtidos no Experimento 1, totalizando 1513 coordenadas.

Primeiramente, comparou-se as quatro velocidades entre si, ou seja, calculou-se quatro discrepâncias para cada coordenada (uma para cada velocidade), e foi registrado qual velocidade proporcionou a menor discrepância. A junção de todos os resultados supracitados está disposta na Figura 4, que exhibe a porcentagem de menores discrepâncias obtidas com cada velocidade. Nesse contexto, pode-se notar o baixo desempenho das velocidades sem compatibilização de referencial. Das coordenadas analisadas, o VEMOS2017-SCR e VEMOS2009-SCR apresentaram apenas 0,33% e 7,21% das menores discrepâncias. As velocidades com compatibilização obtiveram a ampla maioria das menores discrepâncias (92,46%), sendo 62,92% referentes ao VEMOS2009-CCR e 29,54% ao VEMOS2017-CCR.

Os dados categorizados por ano apresentaram comportamento similar ao das estações individuais, sem indicações de alguma velocidade possuir melhor desempenho em períodos específicos. Já quanto aos dados das sete estações selecionadas, pode-se notar uma grande variação do desempenho das velocidades. Nas estações SMAR e VICO, localizadas respectivamente no Rio Grande do Sul e Minas Gerais, a velocidade VEMOS2009-CCR obtiveram 100% e 95,56% dos melhores resultados, enquanto na estação ALAR (Alagoas) e ROGM (Rondônia) a VEMOS2017-CCR obteve 70,79% e 92,39% dos melhores resultados, respectivamente.

Essa variação nos resultados pode estar relacionada ao fato de os erros das velocidades do VEMOS2009 serem dependentes da densidade de observações que cobrem cada área, podendo variar de ± 1 mm/ano até ± 9 mm/ano, de acordo com Drewes e Heidbach (2012). Os erros do VEMOS2017 também estão relacionados à densidade de cobertura, no entanto este modelo possui um maior número de estações em relação ao VEMOS2009.

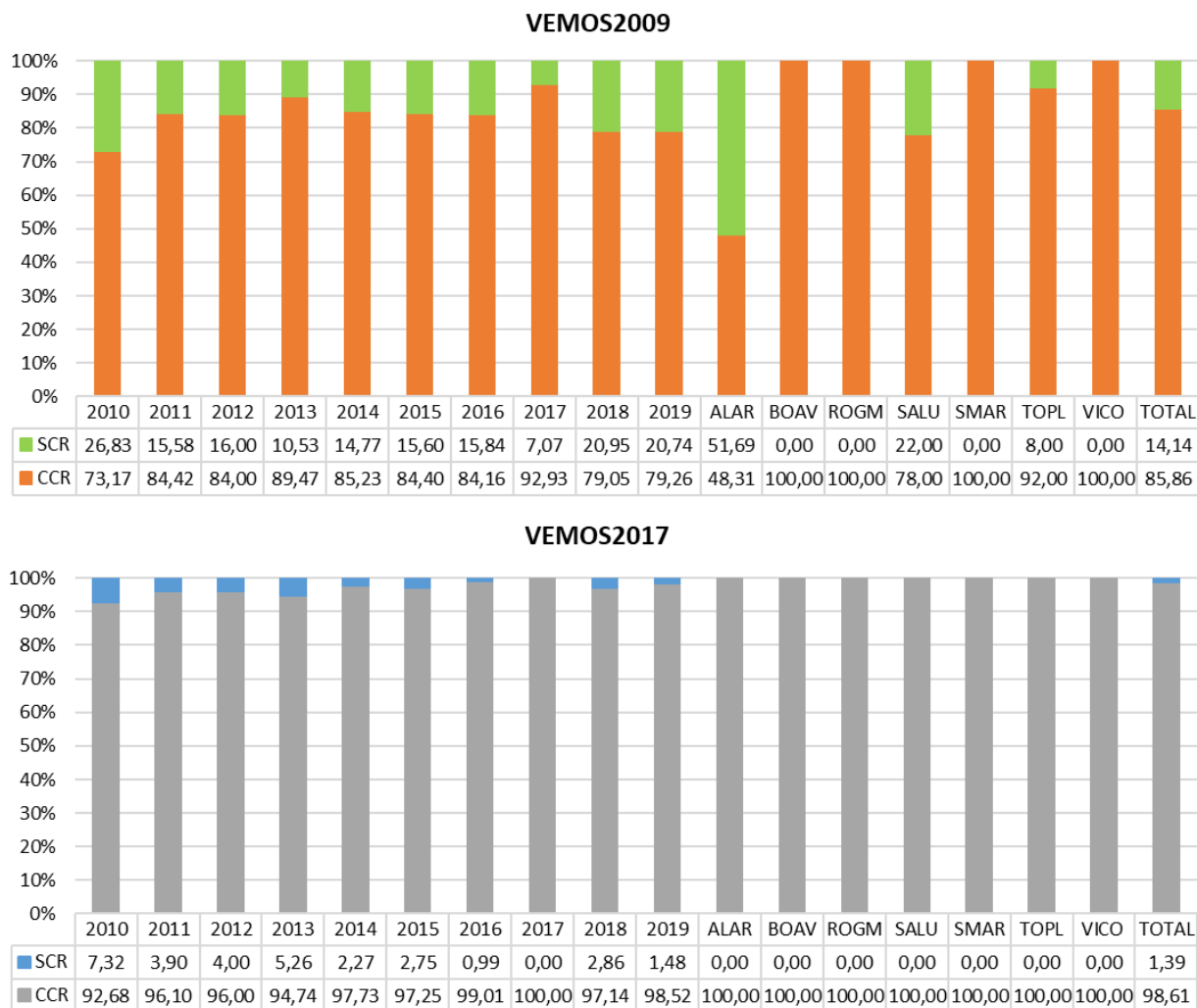
Figura 4 - Porcentagem de menores discrepâncias obtidas por cada velocidade.



Fonte: O autor (2021).

Na segunda análise confrontou-se as velocidades CCR e SCR de cada modelo VEMOS individualmente, ou seja, para cada coordenada foram obtidas duas discrepâncias com o VEMOS2017 (CCR e SCR) e duas com o VEMOS2009, e então foi registrado se a menor discrepância foi obtida com a velocidade CCR ou SCR. Desta forma, os resultados apresentados na Figura 5 comparam apenas a eficácia da compatibilização, sem comparar um modelo VEMOS ao outro.

Figura 5 - Comparação das velocidades CCR e SCR.

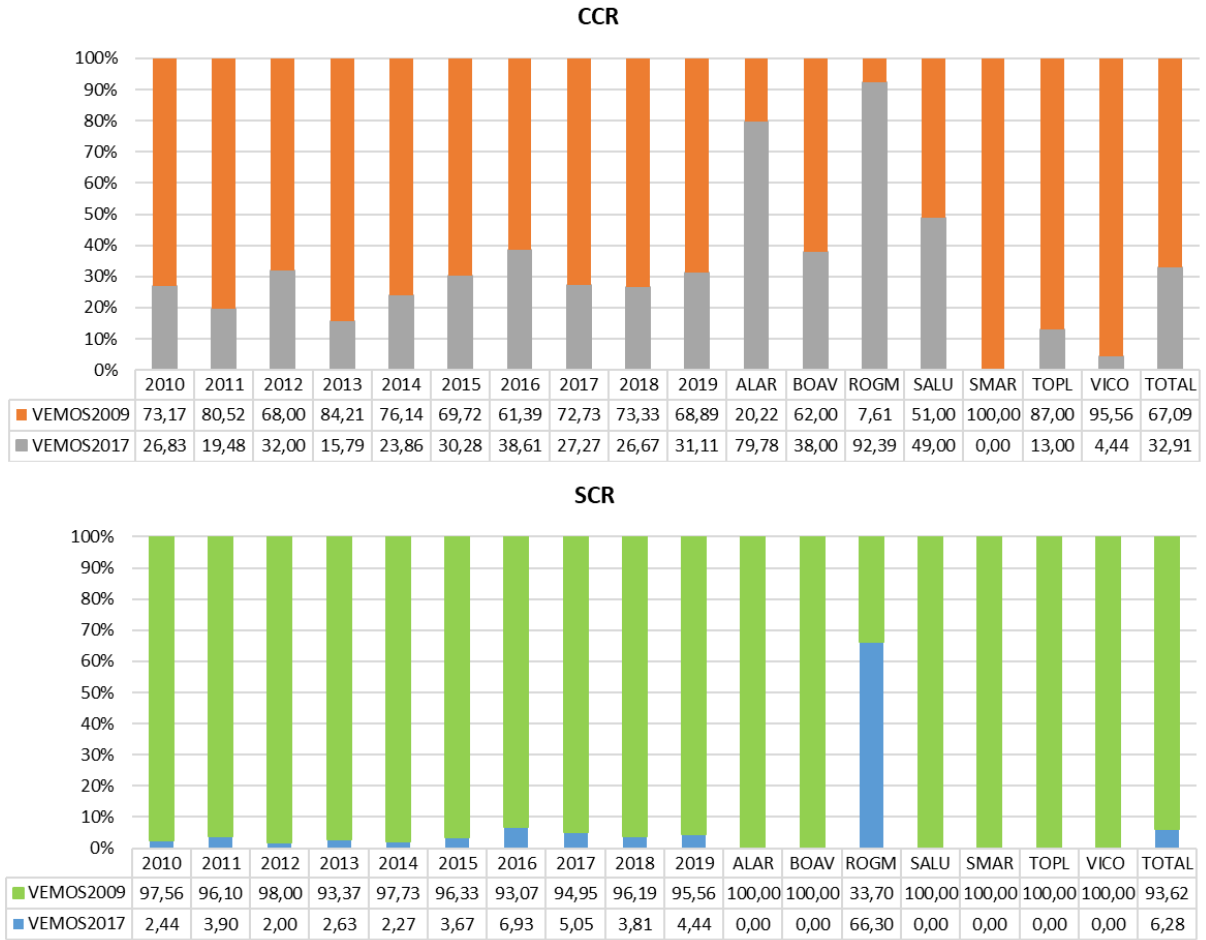


Fonte: O autor (2021).

Analisando individualmente os modelos VEMOS2009 e VEMOS2017, fica mais uma vez evidente o impacto da compatibilização do referencial das velocidades, melhorando 98,61% das discrepâncias utilizando o VEMOS2017-CCR e 85,86% utilizando o VEMOS2009-CCR. No geral o comportamento dos dados seguiu o mesmo padrão, exceto na estação ALAR, onde 51,69% dos melhores resultados corresponderam ao VEMOS2009-SCR.

Na terceira análise, confrontou-se os modelos VEMOS (2017 e 2009) para cada velocidade, ou seja, para cada coordenada obteve-se duas discrepâncias com velocidades CCR (uma com VEMOS2017 e uma com o VEMOS2009) e duas com velocidades SCR, registrando com qual modelo VEMOS ocorreu a menor discrepância para cada um dos casos. Desta forma, a Figura 6 exibe a porcentagem de menores discrepâncias obtidas com VEMOS2017 (CCR e SCR) e do VEMOS2009 (CCR e SCR).

Figura 6 - Comparação dos modelos VEMOS2017 e VEMOS2009.



Fonte: O autor (2021).

A partir dos resultados dispostos na Figura 6, verifica-se um melhor desempenho do VEMOS2009, que é significativamente superior para as velocidades SCR, com 93,62% dos melhores resultados, com exceção da estação ROGM, em que o VEMOS2017-SCR apresentou resultado superior (66,30%). Para as velocidades CCR, o VEMOS2009 apresentou 67,09% de melhores resultados, com o VEMOS2017 sendo melhor apenas nas estações ROGM (92,39%), e ALAR (79,78%).

Por fim, a última análise realizada foi sobre a discrepância média dos dados utilizados nos Experimentos 1 e 2, assim como a REQM (Raiz do Erro Quadrático Médio), como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Discrepância média e REQM dos dados analisados.

	<u>VMS2017- CCR</u>		<u>VMS2017- SCR</u>		<u>VMS2009- CCR</u>		<u>VMS2009- SCR</u>	
	Disc. Média (m)	REMQ (m)	Disc. Média (m)	REMQ (m)	Disc. Média (m)	REMQ (m)	Disc. Média (m)	REMQ (m)
2010	0,013	0,002	0,025	0,002	0,010	0,001	0,013	0,001
2011	0,015	0,004	0,028	0,005	0,010	0,003	0,016	0,003
2012	0,014	0,002	0,031	0,003	0,009	0,001	0,017	0,001
2013	0,017	0,002	0,034	0,002	0,009	0,001	0,019	0,001
2014	0,018	0,005	0,036	0,006	0,011	0,003	0,020	0,003
2015	0,018	0,007	0,038	0,008	0,013	0,006	0,022	0,007
2016	0,018	0,005	0,039	0,007	0,015	0,008	0,024	0,008
2017	0,020	0,010	0,045	0,010	0,013	0,008	0,029	0,008
2018	0,022	0,008	0,042	0,007	0,017	0,004	0,024	0,008
2019	0,022	0,013	0,045	0,015	0,018	0,011	0,027	0,016
ALAR	0,009	0,001	0,032	0,004	0,013	0,001	0,014	0,001
BOAV	0,006	0,001	0,028	0,003	0,005	0,001	0,024	0,002
ROGM	0,014	0,004	0,028	0,004	0,015	0,004	0,029	0,004
SALU	0,014	0,003	0,036	0,005	0,013	0,002	0,017	0,001
SMAR	0,036	0,003	0,059	0,010	0,016	0,001	0,038	0,004
TOPL	0,016	0,002	0,030	0,004	0,010	0,001	0,018	0,002
VICO	0,022	0,010	0,042	0,014	0,010	0,004	0,032	0,008

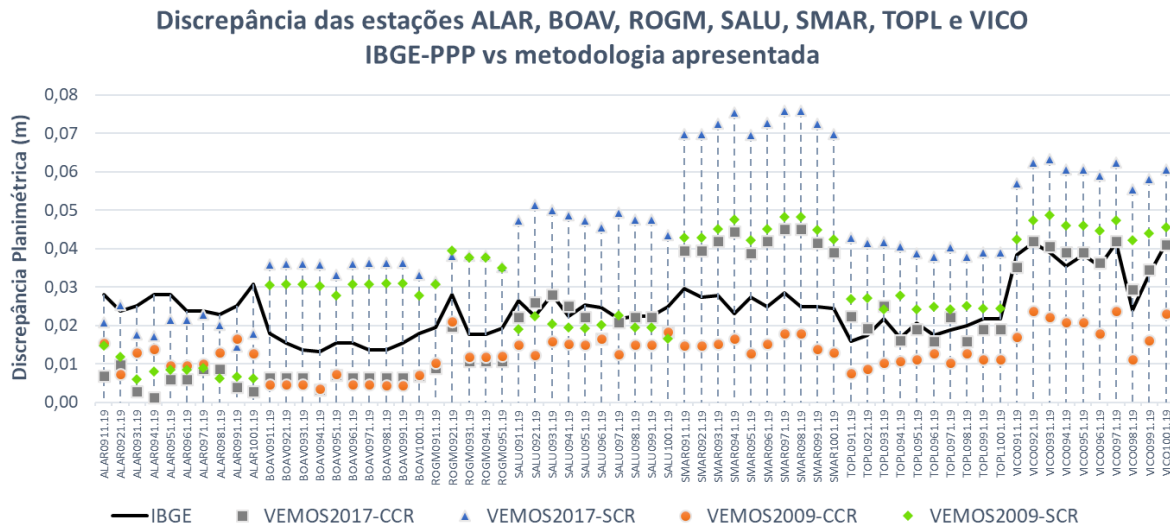
Fonte: O autor (2021).

Dessa forma, os dados de discrepância média separados tanto por anos, quanto por estações, evidenciam a diferença de desempenho das quatro velocidades, com a VEMOS2009-CCR apresentando os melhores resultados, seguida pela VEMOS2017-CCR, VEMOS2009-SCR e VEMOS2017-SCR respectivamente. As REQM das quatro velocidades mostraram comportamentos similares nos anos analisados, e assim como as discrepâncias médias apresentaram uma tendência, provavelmente devido aos movimentos da placa Sul-Americana e ao maior intervalo de tempo utilizado na atualização das coordenadas, o que deve ser investigado.

2.5.3 Experimento 3

Neste experimento comparou-se os resultados obtidos através da metodologia apresentada nesta pesquisa com a metodologia empregada pelo IBGE-PPP para a atualização das coordenadas. Desta forma, calculou-se as discrepâncias das coordenadas fornecidas pelo IBGE-PPP diretamente na época 2000,4 das estações ALAR, BOAV, ROGM, SALU, SMAR, TOPL e VICO referentes ao ano de 2019 e realizou-se a comparação com as discrepâncias já obtidas no Experimento 1, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Comparação das discrepâncias obtidas com a metodologia apresentada e com as coordenadas fornecidas pelo IBGE-PPP diretamente em 2000,4.



Fonte: O autor (2021).

As discrepâncias obtidas com a velocidade VEMOS2009-CCR apresentaram melhores resultados em relação ao IBGE-PPP em 100% das coordenadas analisadas. Já a VEMOS2017-CCR apresentou resultados variados, com melhor performance que o IBGE-PPP nas estações ALAR, BOAV e ROGM, e pior nas estações SMAR e VICO, com as estações SALU e TOPL apresentando alternância nos resultados (ora melhor com um ora melhor com outro). Já as velocidades SCR apresentaram majoritariamente resultados piores que os do IBGE-PPP.

Analisando a média das discrepâncias e a REMQ apresentadas na Tabela 7, observa-se que o IBGE-PPP apresentou resultados piores do que as duas velocidades CCR.

Tabela 4 - Média e REMQ das discrepâncias obtidas no experimento 3.

	IBGE-PPP	VEMOS2017-CCR	VEMOS2017-SCR	VEMOS2009-CCR	VEMOS2009-SCR
Média (m)	0,0243	0,0214	0,0452	0,0130	0,0296
REMQ (m)	0,0033	0,0126	0,0179	0,0016	0,0109

Fonte: O autor (2021).

A discrepância média da VEMOS2017-CCR foi levemente menor que a média do IBGE-PPP, mas com a REQM mais alta. A VEMOS2017-SCR apresentou a pior média e a pior REQM.

Vale destacar que apesar de o IBGE-PPP utilizar o VEMOS2009 para atualizar as coordenadas, ele não realiza o processo de compatibilização de referencial das velocidades,

assim como usa parâmetros próprios para a compatibilização de referencial das coordenadas, que são diferentes aos do ITRF e não possuem variação temporal (IBGE, 2020).

2.6 Conclusões

Diante dos resultados encontrados, pôde-se verificar que a compatibilização de referencial das velocidades se mostrou eficaz para o processo de atualização das coordenadas obtidas no IBGE-PPP. Das 1513 coordenadas obtidas com cada uma das quatro velocidades, a VEMOS2009-CCR apresentou 62,92% das menores discrepâncias, seguida pela VEMOS2017-CCR com 29,54%, VEMOS2009-SCR com 7,21% e VEMOS2017-SCR com 0,33%.

Considerando apenas os resultados de velocidades CCR dos dois modelos, o VEMOS2009 apresentou 67,09% das menores discrepâncias, e o VEMOS2017 32,91%. Para as velocidades SCR, a superioridade do VEMOS2009 foi ainda mais expressiva, possuindo 93,62% das menores discrepâncias, contra 6,28% do VEMOS2017.

Em relação à diminuição das discrepâncias após a compatibilização de referencial das velocidades, verificou-se que, para o VEMOS2009, 85,86% das coordenadas apresentaram uma menor discrepância após a atualização. Já para o VEMOS2017 essa diminuição ocorreu em 98,61% das coordenadas. Entretanto, vale destacar que a maior porcentagem de discrepâncias reduzidas pelo VEMOS2017 não necessariamente significa discrepâncias menores que as do VEMOS2009 (seja CCR ou SCR).

Salienta-se que foram analisados dados de todos os anos entre 2010 e 2019, e não foi observada nenhuma diferença significativa de performance dos modelos ao longo dos anos, mostrando que apesar do VEMOS2017 ser um modelo mais recente, não apresentou melhor desempenho em datas mais atuais. Assim como o VEMOS2009, que é um modelo baseado em observações mais antigas, não mostrou perda de desempenho em datas mais recentes.

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, 6., 2016, Recife. **Anais...** Presidente Prudente - SP, 2017. p. 543-550.

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**, 112, B09401, doi:10.1029/2007JB004949. 2007.

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, 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5, 2012.

ALTAMINI, Z. REBISCHUNG, P; MÉTIVIER, L; COLLILIEUX, X.. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**. 2016.

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.

BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Potencialidades do PPP no Software Bernese com Compatibilizações de Sistemas Geodésicos de Referência e de Tempo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 3, p. 726-755, 25 set. 2019.

BRUNINI, C.; SÁNCHEZ, L. Geodetic Reference Frame for the Americas: advancing Geodesy in Latin America and the Caribbean. **GIM Internacional**. Estados Unidos, v. 27, p. 26-31, 2015.

CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana**. 188 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; LAROCCA, A. P. C. Compatibilização de Referenciais de Coordenadas e Velocidades Com Estimativa de Precisão. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.l.], v. 21, n. 3, sep. 2015. ISSN 1982-2170. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/43215>>. Acesso em: 26 jul. 2020.

DREWES H., HEIDBACH O. (2005). **Deformation of the South American crust estimated from finite element and collocation methods**. In: Sansò F. (Ed.) A Window on the Future of Geodesy, IAG Symposia 128: 544-549, Springer, doi: 10.1007/3-540-27432-4_92.

DREWES H., HEIDBACH O. (2012). **The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean**. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposia, 136: 657-664, doi: 10.1007/978-3-642-20338-1_81.

DREWES H. AND SÁNCHEZ L. (2020): **Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017**, doi: 10.1594/pangaea.912350, Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC SIRGAS, supplement to: SÁNCHEZ L., DREWES H. (2020): **Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America**. International Association of Geodesy Symposia Series, Vol 152, doi: 10.1007/1345_2020_91.

IBGE (2015). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 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). Disponível em: http://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/nota_tecnica_termino_periodo_transicao_sirgas2000.pdf. Acesso em: 03 out. 2020.

IBGE (2020). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do usuário - IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS. Versão: maio 2020. Editor: Coordenação de Geodésia - Diretoria de Geociências. Brasil. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 16 set. 2020.

IGS ACC (2020). INTERNATIONAL GNSS SERVICE ANALYSIS CENTER COORDINATOR. **Chronology of IGS Reference Frame Usage**. 2020. Disponível em: <<http://acc.igs.org/igs-frames.html>>. Acesso em 21 mai. 2020.

JEKELI, C. **Geometric reference systems in geodesy**. Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences, OST – Ohio State University, 209 p., 2012.

MOREIRA, D. M. **Rede de Referência Altimétrica para Avaliação da Altimetria por Satélites e Estudos Hidrológicos na Região Amazônica**. 175 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2010.

MORITZ, H. Geodetic Reference System 1980. **Journal of Geodesy** 74, 128–133. 2000. <https://doi.org/10.1007/s001900050278>.

PETTIT, G. E LUZUM, B. **IERS Nota Técnica 36**. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. 179 pp. Disponível em: <<https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>>. Acesso em: 23 abr. 2020.

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**. Uberlândia, n. 66/3, p. 569-579, 2014.

RAMOS, DAL POZ e CARVALHO, 2016. Análise Das Possibilidades De Transformação De Referencial E Atualização De Coordenadas Estimadas Pelo PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 22, n. 3, 2016. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/48684/29281>>. Acesso em: 01 nov. 2019.

REBISCHUNG, P.; SCHMID, R.. **IGS14/igs14.atx: a new Framework for the IGS Products**. 2016. American Geophysical Union. Disponível em: <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1341338/1341338.pdf>>. Acesso em 27 jul. 2020.

REBISCHUNG, P. e SCHMID, R. **Switch to Igb14 reference frame**. 2020. Disponível em: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html?fbclid=IwAR2BtFMNHlgczy3lQYqv4rLca6NZXj_hJvg66ubDdD0VJ1vEOxrHMEfNeTs>. Acesso em: 3 jun. 2020.

SÁNCHEZ L., DREWES H. (2016): VEMOS2015: **Velocity and deformation model for Latin America and the Caribbean**, doi: 10.1594/pangaea.863131, supplement to: SÁNCHEZ L. DREWES H. (2016): Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, doi: 10.1016/j.jog.2016.06.005.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações. **Revista Brasileira de Geofísica**. Presidente Prudente-SP, v.18, n.2, pp.161-172, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2000000200005>.

SILVA, A. L.; COSTA, S. M. A.; VAZ, J. A. Deslocamento das estações SIRGAS-CO em função do terremoto ocorrido no Chile – uma abordagem do centro de processamento SIRGAS – IBGE. In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. **Anais...** Recife - PE, 27-30 de Julho de 2010. p. 001 de 003.

SIRGAS (2021a). SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS. Modelo de velocidades para o SIRGAS. 2021. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

SIRGAS (2021b). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Uso de velocidades no processamento de dados GNSS. 2021c. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/using-velocities-gnss>. Acesso em: 01 mar. 2021.

SIRGAS (2021c). SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS. SIRGAS2000. 2021. Disponível em: < <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-realizations/sirgas2000/>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

SOLER, T; SNAY, R. A. Transforming positions and velocities between the International Terrestrial Reference Frame of 2000 e North American datum of 1983. **Journal of Surveying Engineering**. Estados Unidos, v. 130, n. 2, p. 49-55, 2004.

TORGE, W. **Geodesy**. 3ª edição. Berlim-New York: Walter de Gruyter, 2001.

WESTON, N. D. e SOLER, T. Rigorous Geodetic Positioning in the Americas. In: FIG REGIONAL CONFERENCE, 8, 2012. Montevideo, Uruguay, **Anais...** Montevideo. 2012. p. 1-13.

3 POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DE MULTIVELOCIDADE NO PROCESSO DE ATUALIZAÇÃO DE COORDENADAS NO PPP

Resumo: Atualmente, 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, essas velocidades são estimadas por meio de séries temporais do ponto de interesse, com pelo menos dois anos cada, e que somadas compreendam todo o período da atualização temporal desejada. Utilizando dados de cinco estações dos Estados Unidos e cinco estações do Brasil, calculou-se a discrepância planimétrica e altimétrica (em relação às coordenadas de referência) resultante da atualização das coordenadas por períodos de 8 e 10 anos. Considerando os resultados obtidos, pôde-se observar que para as estações do Brasil as multivelocidades proporcionaram resultados planimétricos melhores ou similares, quando comparados àqueles obtidos com as monovelocidades. Entretanto, esse cenário não se repetiu para as estações dos Estados Unidos. De forma geral, nas dez estações analisadas fica evidente a consistência dos resultados obtidos pelas multivelocidades estimadas a partir de séries temporais posicionais com períodos de 5 ou 4 anos, majoritariamente milimétrica, seja em uma atualização de 8 ou 10 anos, em estações localizadas perto ou distantes das bordas das placas ou sob fortes efeitos de cargas hidrológicas. Quando comparada à modelos de velocidade amplamente utilizados pela comunidade acadêmica, a atualização com multivelocidade se mostrou eficaz, apresentando inclusive resultados melhores que os de modelos regionais como o VEMOS2009, utilizado pelo IBGE-PPP.

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

Abstract: Nowadays, when updating coordinates, it is used velocities that are unique and constant in time (single velocity). However, this research proposes to evaluate the potential of updating coordinates with the application of multi-velocities, that is, attributing more than one velocity to the same point of interest, each one being used in specific periods of the procedure. Ideally, these velocities are estimated through time series of the point of interest, with at least two years each, and which together comprise the entire period of the desired temporal update. Using data from five stations in the United States and five stations in Brazil, the planimetric and altimetric discrepancy (in relation to the reference coordinates) resulting from the update

of the coordinates for periods of 8 and 10 years was calculated. Considering the results obtained, it could be observed that for the stations in Brazil the multispeed provided better planimetric results (or similar) when compared to those obtained with the single velocities. However, this scenario has not been repeated for US stations. In general, in the ten stations analyzed, the consistency of the results obtained by the multi-velocities estimated from positional time series with periods of 5 or 4 years, mostly millimetric, is evident, either in an update of 8 or 10 years, in stations located near or away from the edges of the plates or under strong effects of hydrological loads. When compared to velocity models widely used by the academic community, updating with multi-velocities proved to be effective, even presenting better results than regional models such as VEMOS2009, used by IBGE-PPP.

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

3.1 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 (TERRINHA, 2005; SAPUCCI; MONICO, 2001).

Diversas atividades geodésicas são dependentes das séries posicionais das estações que compõe 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). 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 normalmente estão 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. Ademais, 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 das placas litosféricas.

Adicionalmente, outros processos geodinâmicos locais ou regionais também exercem influência na movimentação das estações geodésicas, dentre eles: deformações crustais (MACIUK; SZOMBARA 2018; STALLER et al. 2018, KOWALCZYK; RAPINSKI, 2018), terremotos (MELGAR et al., 2015; KIM; BAE, 2017; POYRAZ et al. 2018), vulcões (SIGMUNDSSON et al., 2015; GEIRSSON et al., 2017), derretimento de geleiras (RAJNER, 2018), efeitos de carga oceânica e marés terrestres (BENEDITO; ALBARICI; TRABANCO, 2018; ALBARICI et al., 2019). Tais processos ocorrem a uma taxa específica em relação ao tempo e geram alterações espaço-temporais na posição (velocidades) dos pontos (coordenadas), com vários níveis de significância e magnitude (SAPUCCI; MONICO, 2001; SÁNCHEZ; DREWES, 2016).

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 temporais posicionais) que abrangem 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). 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, essas velocidades são estimadas através de séries temporais do ponto de interesse, com pelo menos dois anos cada, e que somadas compreendam todo o período da atualização temporal desejada

3.2 Revisão de literatura

3.2.1 Redes GNSS

Além de serem essenciais para a manutenção e realização de sistemas de referências, as redes GNSS disponibilizam uma infraestrutura geodésica de dados espaciais para utilização nacional ou global, possibilitando a investigação e monitoramento, de por exemplo, a mudança do nível médio dos mares e movimentos verticais na crosta terrestre, razão principal da implantação da rede SPRGN (*South Pacific Regional GNSS Network*), que foi uma resposta da Austrália às preocupações com o aquecimento global (GA, 2021).

De acordo com EPN (2021), uma rede GNSS se constitui em: estações de referência GNSS operando continuamente; centros de dados, provendo armazenamento e acesso aos dados GNSS; centro de análises dos dados GNSS; centros de produtos, responsáveis por gerar os produtos da rede; e, controle central, responsável pelo monitoramento diário e gerência da rede.

O número de redes GNSS vem aumentando mundialmente, visando apoiar posicionamentos geodésicos e investigações científicas. Elas podem ser: globais, como a *GFZ GNSS Station Network* (RAMATSCHI et al., 2019); continentais, como a europeia EPN (*EUREF Permanent Network*) (EUREF, 2021); nacionais, como a australiana ARGN (*Australian Regional GNSS Network*) (GA, 2021), a japonesa GEONET (*GPS Earth Observation Network*) (IMAKIHERE, 2010), a sul-africana TrigNet (NGI, 2021); ou regionais,

como a do estado de Oregon, nos Estados Unidos, ORGN (*Oregon Real Time GNSS Network*) (ORGN, 2021). Devido ao uso nesta pesquisa, será dado ênfase nas seguintes redes:

- NCN (*NOAA CORS Network*) - A rede de estações de referência de operação contínua (CORS - *Continuously Operating Reference Stations*) - gerenciada pelo NGS (*National Geodetic Survey*), uma agência do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) – disponibiliza dados GNSS para posicionamento, clima espacial e aplicações geofísicas ao longo dos Estados Unidos e alguns outros países (CORS, 2021). A rede CORS é um empreendimento cooperativo de múltiplos propósitos, envolvendo governo, organizações acadêmicas e privadas. As estações são operadas individualmente por seus respectivos proprietários, com cada agência compartilhando seus dados com o NGS, que por sua vez analisa e distribui os dados gratuitamente (CORS, 2021);
- IGS - O serviço GNSS internacional (*International GNSS Service*) oferece produtos GNSS gratuitos de alta qualidade desde 1994. Esses produtos possibilitam acesso ao sistema de referência global para aplicações científicas, educacionais e comerciais. O IGS opera uma rede global de estações GNSS (*IGS Network*), centros de dados, e centros de análises para fornecer dados que são essenciais para pesquisas em Geociências (IGS, 2021a); e,
- RBMC - A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS consiste em um conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho, que proporcionam, em tempo real ou uma vez por dia, observações com intervalo de rastreamento de 5 e 15 segundos respectivamente, para a determinação de coordenadas. Desde 30/08/2018 algumas estações da RBMC começaram a ser equipadas com receptores multiconstelação, possibilitando o rastreamento dos sinais das constelações Galileo (*European Global Navigation Satellite System*), BDS (*BeiDou Navigation Satellite System*), IRNSS (*Indian Regional Navigation Satellite System*), QZSS (*Quasi-Zenith Satellite System*) e SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), além de GPS e GLONASS. Ademais, a partir de 01/01/2020 a RBMC passou a disponibilizar dados com intervalo de rastreamento de 1 segundo no formato RINEX v3. Destaca-se que todas as estações da RBMC fazem parte da Rede SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo), cujas coordenadas finais apresentam precisão da ordem de ± 5 mm, sendo uma das redes mais precisas do mundo. Além disso, as observações coletadas pela RBMC contribuem para a densificação regional da rede operada pelo IGS, o que garante uma melhor precisão dos produtos do IGS (como as órbitas precisas) sobre o território brasileiro (IBGE, 2021a).

Adicionalmente, destaca-se que algumas estações integrantes das redes NCN e SIRGAS-CON (e conseqüentemente da RBMC) também integram a rede global *IGS Network*, utilizada nas realizações do ITRF.

3.2.2 ITRF

O ITRF consiste em um conjunto de pontos com suas respectivas coordenadas e velocidades, associados à uma determinada época, sendo uma realização do ITRS, como definido pela resolução número 2 da IUGG (*The International Union of Geodesy and Geophysics*), adotada em Viena, 1991 (IUGG, 1991; ITRF, 2021).

As técnicas de Geodésia Espacial que contribuem com a construção do ITRF são: SLR (*Satellite Laser Ranging*); GNSS; VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*); e DORIS (*Doppler Orbitography and Radio positioning Integrated by Satellite*). Essas técnicas são organizadas como serviços científicos na IAG (*International Association of Geodesy*) e chamadas pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) de TCs (*Technique Centers*), sendo eles: ILRS (*International Laser Ranging Service*) (PEARLMAN et al., 2002), IGS (DOW et al., 2009), IDS (*International DORIS Service*) (WILLIS et al., 2010), IVS (*International VLBI Service*) (SCHUH; BEHREND, 2012). Como nenhuma das técnicas citadas é capaz de prover todos os parâmetros de definição do referencial, o ITRF foi demonstrado como o mais acurado referencial disponível atualmente, agregando as forças das quatro técnicas de Geodésia Espacial que contribuem para sua construção e compensando suas fraquezas e erros sistemáticos (ALTAMIMI et al., 2016).

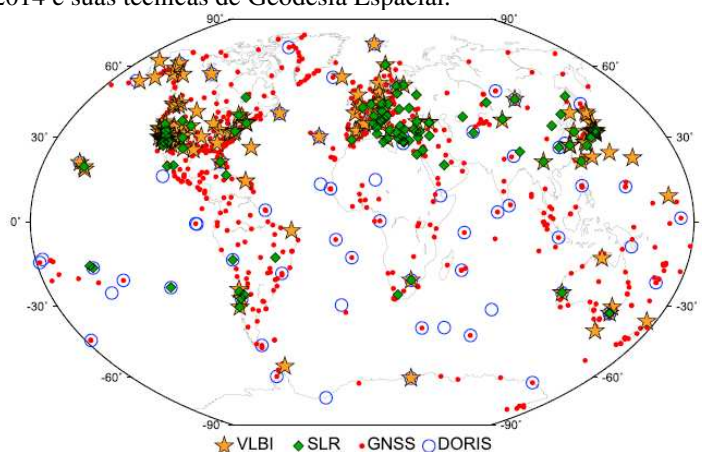
As realizações do ITRS anteriores ao ano 2000 recebem a denominação de ITRF-yy, com yy indicando os dois últimos dígitos do ano ao qual os dados mais recentes - que contribuíram na materialização do sistema de referência - foram obtidos. Após os anos 2000, a denominação passou a ser ITRF-yyyy. Treze realizações do ITRS já foram publicadas, sendo elas: ITRF88, ITRF-89, ITRF-90, ITRF-91, ITRF-92, ITRF-93, ITRF-94, ITRF-96, ITRF-97, ITRF2000, ITRF2005, ITRF2008 e ITRF2014. Vale destacar que já se encontra em desenvolvimento o ITRF2020, com previsão de divulgação de suas soluções no mês de setembro ou outubro de 2021 (ITRF, 2020).

O ITRF2014, realização do ITRS mais recente, foi fundamentado em uma modelagem que leva em consideração os movimentos não lineares das estações (o que inclui os movimentos sazonais de periodicidade anual e semestral) e deformações pós-sísmicas de grande magnitude,

particularmente os ocorridos na região de Maule no Chile em 2010 e na costa do Japão em 2011 (ALTAMIMI et al., 2016).

A origem do ITRF2014 é definida de forma que o parâmetro de translação na época 2010,0 seja zero e a taxa (*rate*) de translação em relação à origem média da série temporal de SLR do ILRS, também. A escala é definida de modo que não haja fator de escala (igual a zero) na época 2010,0 e a taxa (*rate*) da escala, em relação à média das escalas e taxas implícitas da série temporal de VLBI e SLR também seja nula. Quanto à orientação, ela é definida de forma que os parâmetros de rotação na época 2010,0 seja zero e que a taxa de rotação entre o ITRF2014 e ITRF2008 também seja zero. Essas condições foram aplicadas em um conjunto de 127 estações de referência, dispersas em 125 locais (ALTAMIMI et al., 2016). A Figura 1 mostra a disposição da rede do ITRF2014, classificada por técnica de obtenção das soluções espaciais.

Figura 1 - Rede ITRF2014 e suas técnicas de Geodésia Espacial.



Fonte: Altamimi et al., (2016).

Baseando-se no ITRF, o IGS determina suas próprias realizações do ITRS, chamadas de IGSyy e sua atualização IGbyy (onde yy são os dois últimos algarismos do ano de referência), que se fundamenta no ITRF de mesmo ano e é equivalente ao nível global (possui a mesma origem, orientação e escala do ITRF). Dessa forma, a transformação entre um ITRF e a realização IGS correspondente é zero (BLICK et al., 2014; REBISCHUNG; SCHMID, 2016).

Alguns referenciais geodésicos regionais como NAD83 (*North American Datum 1983*), SIRGAS (*Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas*), EUREF (*European Terrestrial Reference Frame*) e AFREF (*African Reference Frame*) possuem definição idêntica ao ITRS, sendo sua realização uma densificação regional do ITRF (SEEBER, 2003). Destaca-se que a diferença mais significativa entre alguns dos referenciais regionais e o ITRF/IGS diz respeito ao fato das velocidades locais serem dadas em relação à placa tectônica dominante que

o referencial engloba, e não à uma condição NNR (*No-Net-Rotation*), o que faz com que as velocidades das estações sejam minimizadas. Referenciais regionais que não estão restringidos pelo movimento de uma única placa tectônica estão mais estreitamente alinhados com o ITRF/IGS (BLICK et al., 2014).

No Brasil, adota-se oficialmente o SIRGAS2000, que é uma realização estática (as coordenadas são consideradas invariáveis no tempo) do ITRF2000 (época 2000,4), constituindo um referencial geodésico nacional moderno. Destaca-se que as realizações do SIRGAS são efetuadas por densificações nacionais da rede continental SIRGAS-CON, que servem como referenciais locais (SIRGAS, 2021b). Nesse sentido, as coordenadas SIRGAS2000 formam a base para todo posicionamento, mapeamento e levantamento dentro das fronteiras brasileiras e, portanto, o serviço de PPP (Posicionamento por Ponto preciso) para o Brasil, denominado IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – PPP) tem suas soluções atreladas também à esta realização (não exclusivamente). Tal serviço foi utilizado nesta pesquisa e será descrito na sequência.

3.2.3 PPP online

Várias universidades e centros de pesquisa têm lançado softwares e serviços para o processamento PPP online, de forma que os usuários necessitam apenas de fazer o *upload* de arquivos de observação GNSS, gerados por receptores de uma ou duas frequências, em formato padrão RINEX (*Receiver Independent Exchange*) ou comprimido (HATANAKA) para os servidores designados, e especificar o modo de processamento (estático ou cinemático). Os resultados do processamento normalmente ficam disponíveis para download na própria página de processamento e/ou são enviados para um endereço de email informado pelo usuário (GUO, 2014; ISIOYE; MOSES; ABDULMUMIN, 2019).

Dentre os serviços de PPP online disponíveis atualmente, pode-se destacar:

- APPS - *Automatic Precise Positioning Service*;
- GAPS - *GPS Analysis and Positioning Software*;
- MAGIC-PPP;
- CSRS-PPP - *Canadian Spatial Reference System – PPP*; e,
- IBGE-PPP - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – PPP.

As principais características dos serviços de PPP online supracitados são exibidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos serviços PPP online.

	APPS	GAPS	Magic-PPP	CSRS-PPP	IBGE-PPP
Desenvolvedor	Jet Propulsion Laboratory (JPL)	University of New Brunswick (UNB)	GMV Innovating Solutions	Natural Resources Canada (NRCan)	Natural Resources Canada (NRCan)
Web site	http://apps.gdps.net/	http://gaps.gge.unb.ca/	http://magicgnss.gmv.com/ppp	http://www.geod.nrcan.gc.ca/	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
Última versão	GIPSY 6.4	GAPS v6.0.0 r587	Magic GNSS	CSRS-PPP V3.32.0	CSRS-PPP v1.05/11216
Modo de processamento	Estático ou Cinemático	Estático ou Cinemático	Estático ou Cinemático	Estático ou Cinemático	Estático ou Cinemático
Dados de observação	Simple ou Dupla frequência	Simple ou Dupla frequência	Dupla frequência	Simple ou Dupla frequência	Simple ou Dupla frequência
Limitação para envio de arquivo	---	≤ 20 Mb	---	≤ 300 Mb	≤ 20 Mb
Constelações	GPS	GPS, Galileo e BeiDou	GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS	GPS e GLONASS	GPS e GLONASS
Produtos precisos dos satélites	JPL	IGS, NRCan	IGS, GMV	IGS, NRCan	IGS, NRCan, NGS

Fonte: O autor (2021).

O CSRS-PPP, lançado em 2003 pelo CGS (*Canadian Geodetic Survey*) do NRCan (*Natural Resources Canada*), utiliza órbitas e correções dos relógios dos satélites derivados de uma rede global de receptores para determinar posições acuradas. Essa estratégia se diferencia de outros serviços de PPP online pela utilização de posicionamento diferencial, isto é, utilizar estações próximas. O CSRS-PPP permite acurácia milimétrica para períodos de rastreo longos (maiores que 24h) no modo estático, mas uma acurácia centimétrica pode ser normalmente alcançada em uma hora (BANVILLE, 2020).

Adicionalmente ao acesso online, também é disponibilizado um aplicativo (PPP-direct) que permite ao usuário, após configuração (endereço de email, senha, e o modo de processamento – estático ou cinemático) processar arquivos de observação diretamente em seu computador, não sendo necessário acessar a página eletrônica (NRCan, 2021).

Vale destacar que em 20 de outubro de 2020 o CGS atualizou o CSRS-PPP para a versão 3, possibilitando a solução da ambiguidade como números inteiros (*ambiguity resolution - PPP-AR*) para dados coletados após 01 de janeiro de 2018. Dados coletados anteriormente a esta data serão processados normalmente com os produtos finais do IGS (NRCAN, 2021). Para mais informações sobre o CSRS-PPP e suas atualizações, consultar Banville (2020) e NRCAN (2021).

O IBGE-PPP, que é uma adaptação do CSRS-PPP (versão 1.05/11216) para utilização no Brasil, é um serviço online gratuito que possibilita ao usuário realizar o pós-processamento de dados GNSS, estando disponível desde abril de 2009 (IBGE, 2020).

De acordo com IBGE (2020), para processar os dados enviados pelos usuários, o IBGE-PPP utiliza de forma automática diversas informações e produtos (que são disponibilizados e atualizados constantemente por várias instituições), podendo-se destacar:

- órbitas e correções dos relógios dos satélites - que são disponibilizados pelo NRCan quando as observações GNSS são rastreadas em território brasileiro, ou as disponibilizadas pelo IGS quando as observações GNSS são rastreadas em qualquer outro território. Em ambas as situações as órbitas são ditas precisas, possuindo três categorias: final, rápida e ultrarrápida. Cada categoria está associada à uma precisão, e sua utilização depende do tempo decorrido entre o fim do rastreo e o processamento das informações GNSS;
- valores referentes ao desvio do centro de fase e suas variações - disponibilizados pelo IGS e pelo NGS, são utilizados para referenciar as observações ao Plano de Referência da Antena;

- correção dos efeitos derivados das marés oceânicas – obtidos utilizando o modelo FES2014b (*Finite Element Solutions*). Vale salientar que essa correção só é realizada se os dados GNSS foram rastreados a uma distância de 10 km de uma estação da RBMC. Informações adicionais sobre o modelo de carga oceânica ou seu cálculo podem ser consultadas em OSO (2021);
- modelos de maré terrestre – O IBGE modela os efeitos das marés terrestres de acordo com as recomendações estabelecidas em Petit e Luzum (2010);
- modelo de conversão de altitude hgeoHNOR2020 - para as transformações das altitudes geométricas (referenciadas ao elipsoide GRS80 – SIRGAS2000) em altitudes normais (referenciadas ao Datum Vertical Brasileiro (DVB)). Este modelo, que tomou como base o MAPGEO2015, começou a ser utilizado em 5 de agosto de 2021, inaugurando uma nova série de modelos melhor adaptados às altitudes vigentes na RAAP (Rede Altimétrica de Alta Precisão) do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) (IBGE, 2021b);
- dados meteorológicos de superfície – para o modelamento dos atrasos troposféricos são usados valores de pressão (Mb), umidade relativa (%) e temperatura (°C), calculados pelo modelo GPT2 (*Global Pressure and Temperature*). Alternativamente, fazendo uso de um valor predefinido para a umidade relativa, utiliza-se somente pressão e temperatura do modelo GPT. A pressão é ajustada levando-se em consideração a altura elipsoidal;
- modelo troposférico - através dos atrasos na componente úmida (modelo GPT2 ou modelo Hopfield-GPT), seca ou hidrostática (modelo GPT2 ou modelo Davis-GPT), e da função de mapeamento GMF (*Global Map Function*) ou GPT2, são calculadas as correções dos efeitos troposféricos;
- modelos e mapas globais da ionosfera – para arquivos de observações que possuem apenas a observável L1, parte dos efeitos decorrentes do atraso ou adiantamento da propagação dos sinais causados pela ionosfera serão corrigidos utilizando os mapas da ionosfera, chamados de IONEX (final e rápido) ou pelos modelos de ionosfera, que são enviados através das órbitas transmitidas (BRDC). Será utilizada a melhor correção disponível no momento do processamento, com os arquivos IONEX final tendo preferência sobre os IONEX rápido, que por sua vez tem preferência sobre os arquivos BRDC. Para observações com duas frequências (L1/L2), essas correções não são aplicadas, pois é possível realizar a combinação linear (L3) entre as observações, denominada “livre de ionosfera” (*ionospheric free signal* ou simplesmente *ion-free*), o que elimina os efeitos de primeira ordem da ionosfera.

Após o processamento, são disponibilizadas coordenadas no SIRGAS2000, tanto na época 2000,4 como na época do levantamento, e no ITRF (IGS), na época do levantamento. Originalmente as coordenadas estimadas são referenciadas à materialização do ITRF (IGS) referente às orbitas dos satélites, na época de coleta dos dados. Dessa forma, para referenciar tais coordenadas ao SIRGAS2000, é necessário que se efetue a compatibilização dos referenciais aplicando-se a transformação de Helmert, com seus respectivos parâmetros de transformação (SAPUCCI; MONICO, 2001; CARVALHO, 2015). Salienta-se que o conjunto de parâmetros utilizados pelo IBGE-PPP são os determinados e disponibilizados pelo próprio IBGE, estimados através de coordenadas de estações GNSS permanentes localizadas no continente Sul-Americano e presentes nas realizações ITRF e SIRGAS (IBGE, 2020). Como não são disponibilizadas as variações temporais destes parâmetros, não há possibilidades de atualização destes para a época de coleta dos dados.

IBGE (2020) destaca que a partir de 17 de maio de 2020 passou-se a utilizar um novo conjunto de parâmetros de transformação entre as materializações do ITRF (IGS) e o SIRGAS2000, o que acarretou alterações nas coordenadas, quando comparadas às determinadas com o conjunto de parâmetros utilizados anteriormente a esta data. Para mais informações sobre a transformação entre ITRF(IGS) e SIRGAS2000 no IBGE-PPP consultar Nascimento, Dal Poz e Freitas (2021a).

Para os casos em que a compatibilização é realizada entre as materializações do ITRF (IGS), aplica-se à transformação de Helmert os conjuntos de parâmetros disponibilizados em Petit e Luzum (2010), Altamimi, Collilieux e Métivier (2012), Altamimi et al. (2016) etc. Por fim, a atualização das coordenadas da época da coleta dos dados para a época 2000,4 acontece utilizando o modelo VEMOS2009.

Uma vez finalizado o processamento, o serviço disponibiliza um link para download de um arquivo no formato *.zip. Dentro deste arquivo se encontram outros cinco arquivos, que são listados na Tabela 2.

Tabela 2 - Arquivos disponíveis após o processamento no IBGE-PPP.

Extensão dos arquivos	Descrição
PDF	Relatório resumido dos resultados do processamento estático em SIRGAS.
SUM	Relatório detalhado do processamento.
POS	Estimativa das coordenadas e outros parâmetros calculados época a época, ao longo do tempo de rastreamento.
KML	Arquivo para a visualização dos pontos processados no <i>Google Earth</i> .
Leia-me	Informa o conteúdo de cada arquivo de saída do processamento.

Fonte: O autor (2021). Dados: IBGE (2020).

Devido à sua qualidade e praticidade, o IBGE-PPP vem sendo empregado na geração de séries temporais posicionais, como se pode observar em Nascimento (2016), Nascimento et al. (2017), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021), Nascimento, Dal Poz e Freitas (2021a, 2021b).

3.2.4 Séries temporais posicionais

Uma série temporal é definida como um conjunto de observações adquiridas sequencialmente no tempo ou qualquer conjunto de dados ordenados no tempo. Frequentemente supõe-se que uma série temporal é estacionária, ou seja, que ela se desenvolve de forma aleatória no tempo, mas varia em torno de uma média constante, mantendo uma forma de equilíbrio estável. Isso implica que a série pode ser descrita em função de sua média, autocorrelação ou variância (MORETTIN; TOLOI, 2006; BOX et al., 2015).

A análise de séries temporais é baseada em técnicas que permitam investigar e modelar dependências entre observações adjacentes da série, obtidas em momentos distintos e sucessivos (BOX et al., 2015).

Segundo Morettin e Toloi (2006), as séries temporais podem ser analisadas visando:

- a previsão de valores futuros de uma série temporal através dos valores passados e presentes, podendo esta previsão ser de curto ou de longo prazo;
- verificar o mecanismo gerador da série;
- descrever o comportamento da série temporal com gráficos, diagramas de dispersão, histogramas etc., verificando a existência de tendências ou sazonalidades; e,
- investigar periodicidades relevantes nos dados, com a finalidade de encontrar a frequência em que determinados ciclos acontecem. Geralmente utiliza-se a análise espectral dos dados.

Um tipo de série temporal muito importante na Geodésia é a denominada série temporal posicional. É definida como um conjunto de valores de posições (coordenadas) ordenadas no tempo e associadas à um referencial. Variadas metodologias podem ser utilizadas para construí-las ou obtê-las, dentre as quais destaca-se a implementada por Nascimento et al. (2017), que consiste na construção de séries temporais de informações posicionais (coordenadas cartesianas X, Y, Z; elipsoidais φ , λ , h e as precisões de ambas) a partir de dados GNSS das estações da RBMC em conjunto com o serviço online IBGE-PPP.

Como mencionado anteriormente, o IBGE-PPP fornece resultados tanto na materialização do ITRF(IGS) referente à época de coleta dos dados (atualmente IGb14, compatível e alinhado com o ITRF2014) quanto no SIRGAS2000. Adicionalmente, também são disponibilizadas as coordenadas em SIRGAS2000 na data de realização do sistema, época 2000,4 (IBGE, 2020).

As coordenadas estimadas no IBGE-PPP estão originalmente referenciadas à realização IGSyy/IGbyy vigente nas órbitas dos satélites na época do rastreamento, de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 - Realizações IGS adotadas no IBGE-PPP, de acordo com a data do levantamento.

Realização IGS	Data de rastreamento GNSS
IGS05	05/11/2006 a 16/04/2011
IGS08	17/04/2011 a 06/10/2012
IGb08	07/10/2012 a 28/01/2017
IGS14	29/01/2017 a 16/05/2020
IGb14	17/05/2020 a atualmente

Fonte: IBGE (2020).

A compatibilização entre as realizações ITRF (IGS) e a atualização das coordenadas são realizadas aplicando os procedimentos já descritos no capítulo 2, seção 2.3 da corrente pesquisa.

Uma vez de posse da série temporal posicional devidamente compatibilizada, pode-se realizar diversas investigações científicas, visando verificar, por exemplo, ruídos, sazonalidade e tendência. Sendo esta última definida como um padrão de decrescimento ou de crescimento de uma dada função em um dado período (CAÑADA, 2016). Nas séries temporais posicionais de observações GNSS, a tendência corresponde à velocidade da estação.

3.2.5 Modelos de velocidade

Existem diversos modelos de campo de velocidades para placas tectônicas disponíveis atualmente, tanto regionais quanto globais. Vários desses modelos utilizam a condição NNR, que considera a inexistência de torques resultantes na litosfera. Nessa condição, a interface litosfera/astenosfera além de ser considerada sem torques, também é considerada uniforme (suave). Isso seria verdade se a litosfera e a astenosfera possuísem espessuras idênticas sobre toda a sua extensão no globo terrestre, além de não haver variações laterais de viscosidade por toda essa interface estrutural (DEMETS et al., 1994).

Seguindo este conceito, as velocidades relativas das placas não são impactadas, o que é uma condição adicional para a definição de uma referência para movimentos de placas que não estão correlacionados a uma placa específica. Os modelos de velocidade mais empregados mundialmente podem ser consultados DeMets, et al. (1994), Altamimi, Sillard e Boucher (2002), Argus, Gordon e DeMets (2011), Drewes e Heidbach (2012), Drewes e Sánchez (2014), Carvalho (2015), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021). Devido ao uso nesta pesquisa, será dado ênfase aos quatro modelos de velocidades apresentados a seguir.

3.2.5.1 VEMOS

O modelo de velocidade denominado de VEMOS (Modelo de velocidade para o SIRGAS) é periodicamente atualizado pelo centro SIRGAS fundamentando-se em suas soluções de sistema regional de referência. Esse modelo representa médias anuais dos movimentos horizontais da superfície, possibilitando a atualização de coordenadas para uma época específica (SIRGAS, 2021a). Dos modelos VEMOS lançados até o momento, será dada ênfase ao VEMOS 2009, pela grande frequência de uso pela comunidade geodésica, e ao VEMOS 2017, modelo lançado mais recentemente:

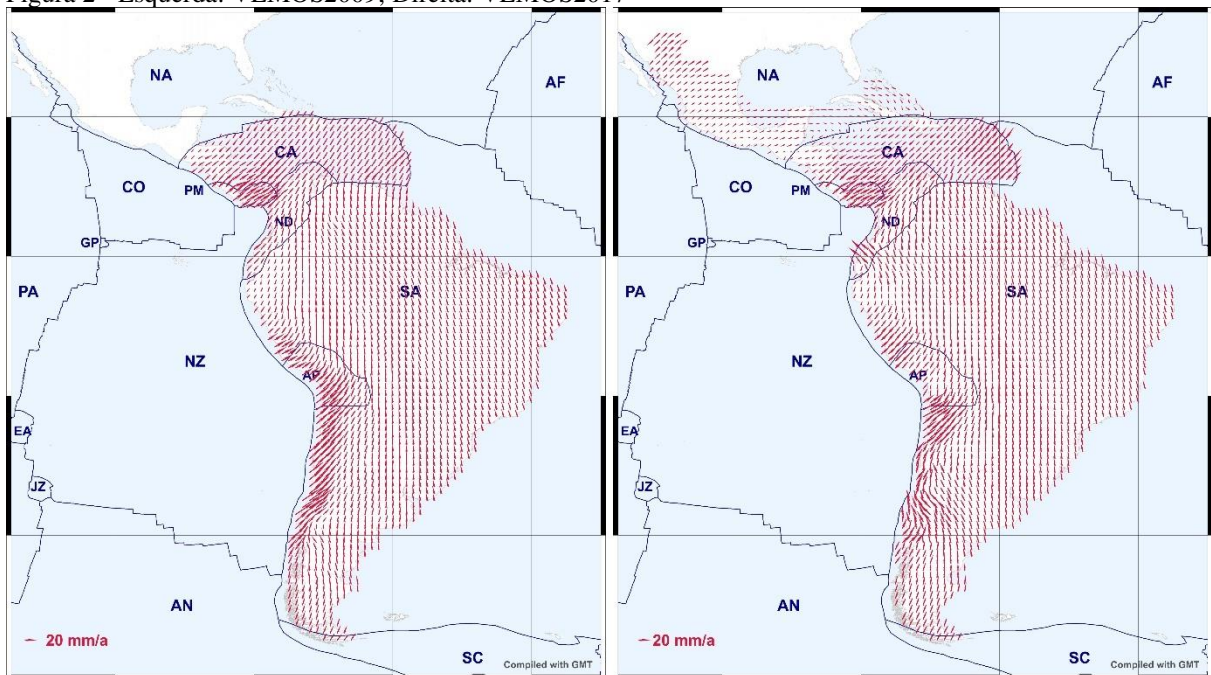
- VEMOS2009 - Tendo sido lançado em 2009, esse modelo considera velocidades de 496 estações, com 95 sendo referentes à solução multianual do SIRGAS (SIR09P01) e as demais sendo derivadas de campanhas de rastreamento com GPS. Este modelo cobre uma área que varia de 56°S a 20°N e compreendendo o período de 2 de janeiro de 2000 a 30 de junho de 2009. A obtenção do campo de velocidade da superfície foi realizada pelo método do elemento finito (FEM - *Finite Element Method*) e colocação por mínimos quadrados (LSC - *Least Squares Collocation*) associado a funções de covariância determinadas de forma empírica. As velocidades do VEMOS2009 são referenciadas ao

ITRF2005 e sua precisão nominal é de aproximadamente 1,5 mm/a (DREWES; HEIDBACH, 2012; SIRGAS, 2021a);

- VEMOS2017 - Este modelo considera velocidades de 515 estações geodésicas de 1 de janeiro de 2014 a 28 de janeiro de 2017. O campo de velocidade foi obtido pelo método de colocação por mínimos quadrados associado a funções de covariância determinadas de forma empírica. O VEMOS2017 abrange a região de 120°W, 55°S a 35°W, 32°N apresentando uma resolução espacial de 1 ° x 1 °. As velocidades determinadas neste modelo estão referenciadas ao ITRF2014, e possuem precisão de 1,0 mm/a na direção norte-sul e 1,7 mm/a na direção leste-oeste (SIRGAS, 2021a).

A Figura 2 apresenta os modelos de velocidade VEMOS2009 e VEMOS2017.

Figura 2 - Esquerda: VEMOS2009; Direita: VEMOS2017



Fonte: Drewes e Heidbach (2012); Drewes e Sánchez (2020).

Esses modelos de velocidade disponibilizam somente a atualização planimétrica das coordenadas geodésicas (ϕ , λ), uma vez que as variações altimétricas são principalmente decorrentes de movimentos locais, dificultando a modelagem regional (DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2015).

3.2.5.2 Modelo de velocidades NNR-NUVEL-1A e ITRF2000

O modelo de velocidades NUVEL-1A (DEMETS et al., 1994), é um o modelo geofísico amplamente utilizado pela comunidade científica desde sua publicação. Foi determinado por dados que representam a média dos movimentos de aproximadamente 10 placas tectônicas grandes e algumas de tamanhos menores, em diferentes períodos de tempo: os vetores de sismos consideram a média das direções das placas durante décadas a séculos; a média dos azimutes de falhas geológicas consideram centenas a milhares de anos; e as taxas de espalhamento representam a médias de 3,16 milhões de anos (DEMETS et al., 1994; ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002, DEMETS; GORDON; ARGUS, 2010).

O NUVEL-1A é uma recalibração do modelo NUVEL-1 (DEMETS et al., 1990), que possui um erro sistemático que faz com que as velocidades angulares das placas sejam maiores do que deveriam. A recalibração consiste em multiplicar as velocidades angulares do NUVEL-1 por uma constante α , igual a 0,9562 (DEMETS et al., 1994).

Através desse modelo relativo, foi derivado o modelo absoluto NNR-NUVEL-1A, referenciados ao manto profundo fixo, assumido como rígido ou com movimentos insignificantes em comparação ao das placas tectônicas. Para a geração de modelos absolutos, normalmente duas suposições são consideradas: as placas (implicitamente a litosfera) não apresentam NNR sobre o manto; e *hotspots*¹ não apresentam movimentos em relação ao manto, ou pelo menos movimentos negligenciáveis se comparados ao das placas tectônicas. Geralmente esses modelos são gerados estimando a rotação do polo de uma placa, de acordo com uma das suposições, e então a rotação dos polos das demais placas é derivada usando modelos relativos, pela subtração de vetores (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002).

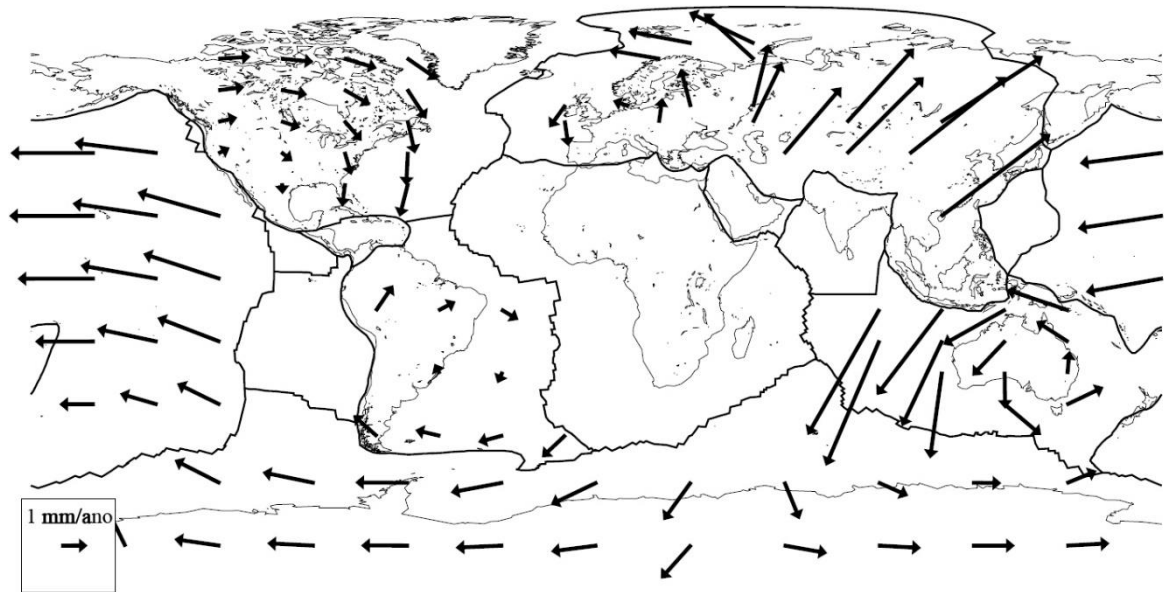
Por ser o modelo geofísico independente de dados geodésicos mais recente da época, o NNR-NUVEL-1A foi recomendado pelo ITRF *Working Group* (IGS, 2021b) como o modelo apropriado para a realização da condição de NNR do ITRF2000. Apesar de satisfazer a condição de NNR, o NNR-NUVEL-1A possui limitações, como a ausência de algumas placas menores e dados insuficientes de bordas de outras. Além disso, o modelo utiliza rotações médias de milhões de anos, o que pode não representar a taxa atual de movimento de algumas placas. Esses fatores podem resultar em alguns pequenos erros na realização da condição de NNR do ITRF (ALTAMIMI.; SILLARD; BOUCHER, 2002; DEMETS; GORDON; ARGUS, 2006).

¹ *Hotspots* são pontos de ascensão de fluxo térmico do manto terrestre, responsáveis pelo vulcanismo no interior de placas tectônicas (USGS, 2021; NOAA, 2021).

Nesse sentido, a taxa de orientação do ITRF2000 foi alinhada com o NUVEL-1A, sendo uma aplicação implícita da condição NNR. Esse procedimento é equivalente à minimização da taxa de rotação global entre ITRF2000 e NNR-NUVEL-1A (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002; JIN e ZHU, 2004).

Altamimi, Sillard e Boucher (2003) destacam que apesar do alinhamento da taxa de orientação possibilitar uma diferença de aproximadamente 1 mm/ano entre as velocidades do ITRF2000 e do NNR-NUVEL-1A, essa diferença pode ultrapassar os 3 mm/ano, como mostra a Figura 3. Essas diferenças são consequências das divergências entre os modelos em termos de movimento relativo das placas. A rotação absoluta dos polos predita pelo NNR-NUVEL-1A não são iguais àquelas que seriam estimadas usando as velocidades do ITRF2000. Além disso, enquanto a estimação da rotação do polo pelo ITRF2000 depende dos locais utilizados e do nível de rigidez da placa, o NNR-NUVEL-1A sempre apresenta a mesma rotação de polo para qualquer local da placa.

Figura 3 - Diferenças das velocidades entre ITRF2000 e NUVEL-1A.



Fonte: Altamimi, Sillard e Boucher (2003).

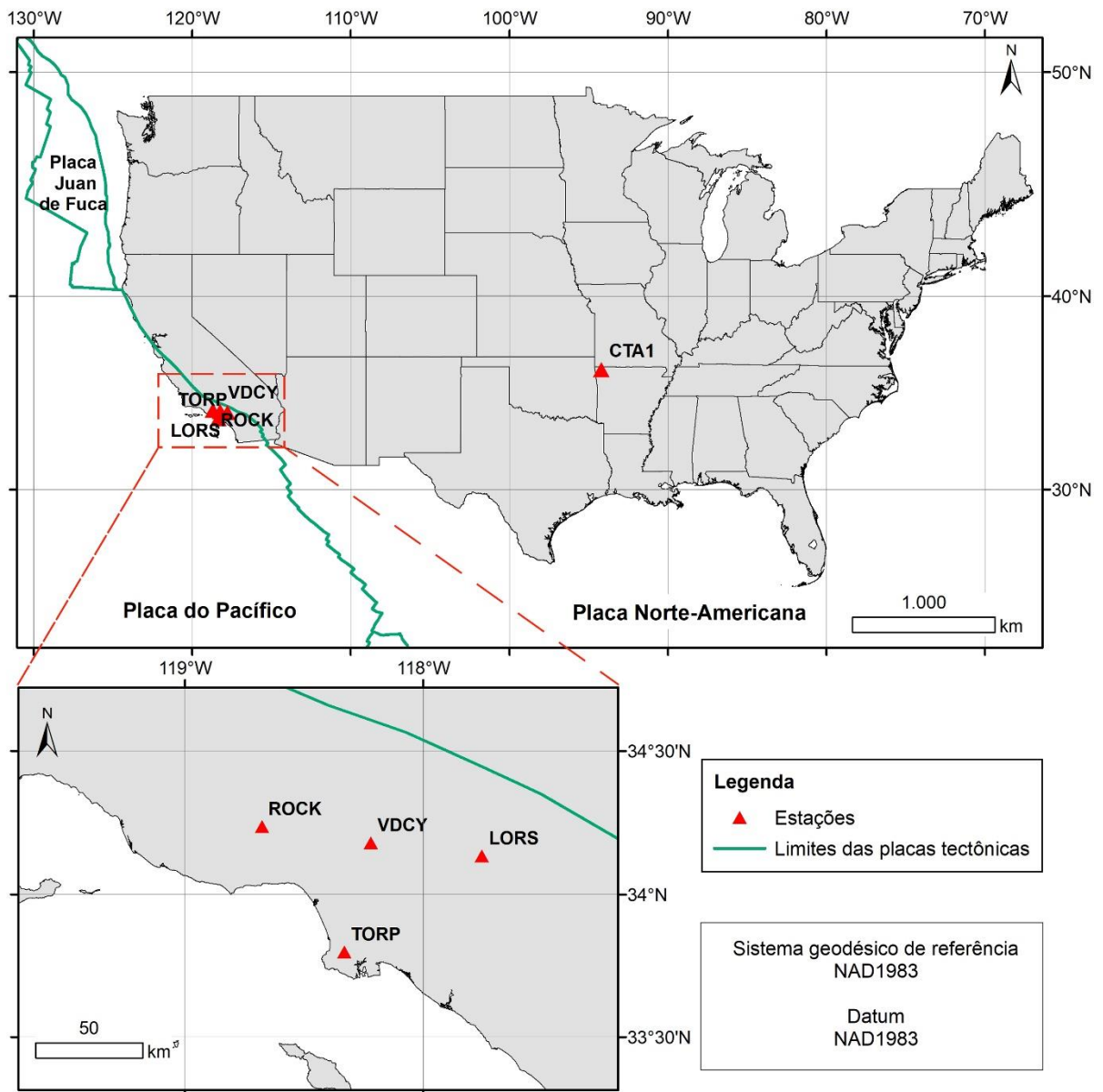
Cabe destacar que o objetivo de alinhar os modelos foi exclusivamente de aplicar implicitamente a condição de NNR no ITRF2000, e que as diferenças não comprometem sua consistência interna (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2003).

3.3 Materiais e métodos

3.3.1 Materiais

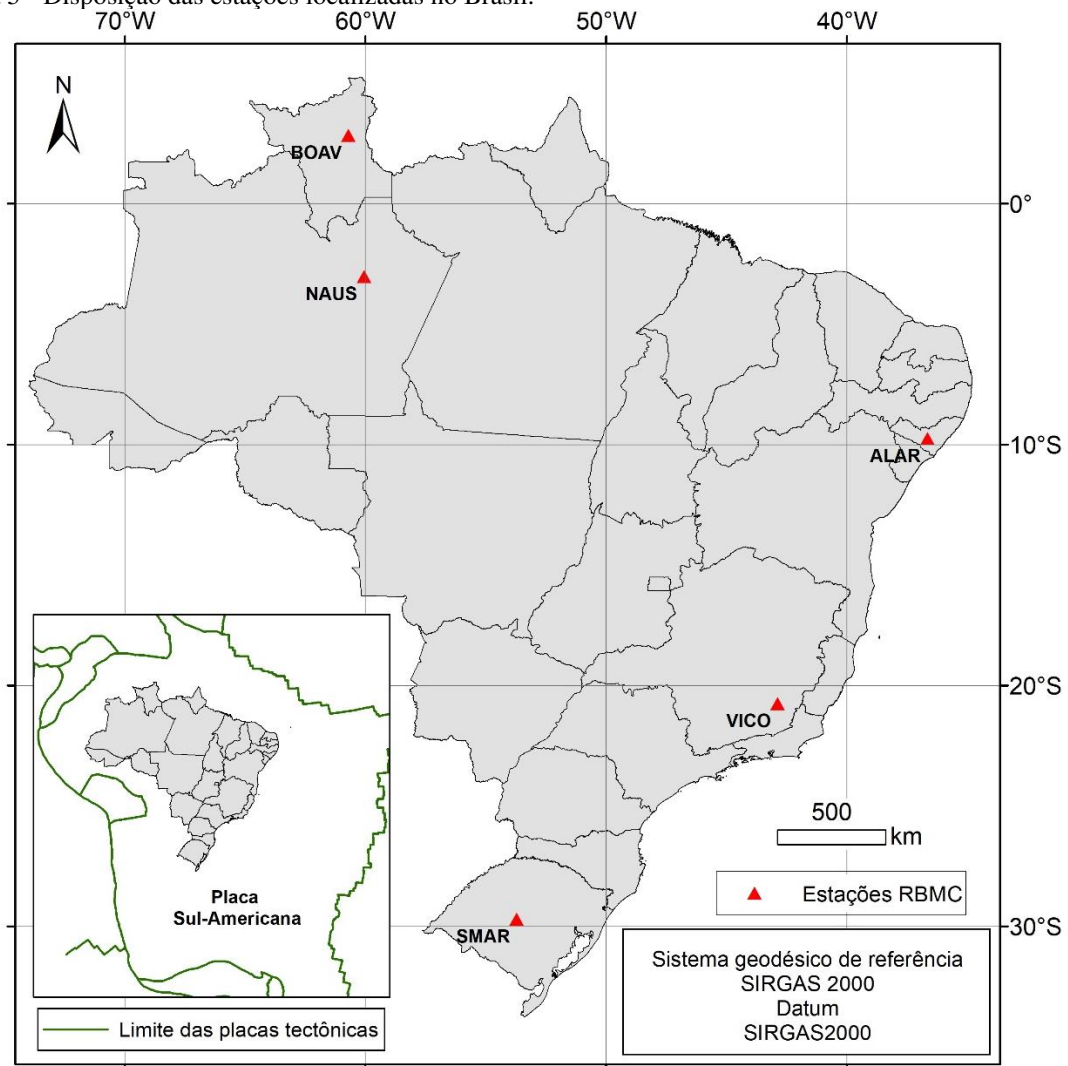
Para a realização dos experimentos foram utilizados dados de observação GNSS de dez estações: cinco delas localizadas nos Estados Unidos, sendo uma em Rogers - Arcansas (CTA1) e quatro no estado da Califórnia (região de alta atividade sísmica) em La Verne (LORS), Simi Valley (ROCK), Torrance (TORP) e Glendale (VDCY); e cinco no Brasil, em Arapiraca – Alagoas (ALAR), Boa Vista – Roraima (BOAV), Manaus - Amazonas (NAUS), Santa Maria – Rio Grande do Sul (SMAR) e Viçosa – Minas Gerais (VICO). A localização e disposição das dez estações podem ser visualizadas na Figura 4 e na Figura 5.

Figura 4 – Disposição das estações localizadas nos Estados Unidos.



Fonte: O autor (2021).

Figura 5 - Disposição das estações localizadas no Brasil.



Fonte: O autor (2021).

Informações adicionais sobre as estações selecionadas, assim como os períodos considerados em suas respectivas séries temporais posicionais estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Estações utilizadas e seus respectivos períodos de dados.

Estação	Rede	Município	País	Placa	Data inicial	Data final
ALAR	RBMC	Arapiraca, AL	Brasil	Sul-Americana	01/01/2012	31/12/2019
BOAV	RBMC	Boa Vista, RR	Brasil	Sul-Americana	01/01/2010	31/12/2019
CTA1	NCN	Rogers, AR	EUA	Norte-Americana	01/01/2010	31/12/2019
LORS	NCN	La Verne, CA	EUA	Pacífico	01/01/2012	31/12/2019
NAUS	RBMC	Manaus, AM	Brasil	Sul-Americana	01/01/2010	31/12/2019
ROCK	IGS	Simi Valley, CA	EUA	Pacífico	01/01/2012	31/12/2019
SMAR	RBMC	Santa Maria, RS	Brasil	Sul-Americana	01/01/2012	31/12/2019
TORP	NCN	Torrance, CA	EUA	Pacífico	01/01/2010	31/12/2019
VDCY	NCN	Glendale, CA	EUA	Pacífico	01/01/2012	31/12/2019
VICO	RBMC	Viçosa, MG	Brasil	Sul-Americana	01/01/2010	31/12/2019

Fonte: O autor (2021).

Além disso, os seguintes softwares foram utilizados:

- Software R (R CORE TEAM, 2021), para o preenchimento de dias faltantes das séries temporais posicionais
- Software SARI (SANTAMARÍA-GÓMEZ, 2019), para estimar as velocidades das estações através do estimador MIDAS.
- RINEXHub, para download dos dados de observação GNSS, processamento no PPP-IBGE, compatibilização de referencial das séries temporais posicionais e velocidades, além da atualização das coordenadas e cálculo das discrepâncias.

3.3.2 Metodologia

3.3.2.1 Implementação do software RINEXHub

Visando automatizar o processo de obtenção de dados de observação GNSS, edição de arquivos RINEX, processamento no IBGE-PPP, interpolação de velocidades VEMOS, compatibilização do referencial de coordenadas e velocidades, assim como atualização de coordenadas, implementou-se um programa computacional em linguagem C e Java orientada a objetos. Nomeado de RINEXHub, o programa está disponível, gratuitamente, no endereço <rinexhub.wordpress.com>.

O programa é dividido em abas, de forma a tornar o processo de geração de séries temporais posicionais sequencial e intuitivo. As abas “RBMC”, “NCN” e “MAGNET” permitem o download de dados das estações das respectivas redes de forma automática, bastando selecionar as estações desejadas (estações individuais ou grupos) e o período de interesse (de um dia a décadas). Salienta-se que a rede MAGNET (*Mobile Array of GPS for Nevada Transtension*) é operada pelo NGL (*Nevada Geodetic Laboratory*), que está em operação desde 2004, e possui atualmente 414 locações individuais (NBMG, 2021). Para mais informações sobre a rede MAGNET, consultar NBMG (2021) e Blewitt, Hammond e Kreemer (2018).

Na aba “TEQC”, pode-se descompactar os arquivos das estações, processo realizado com os softwares Zip e UnZip (do projeto INFO-ZIP) que são disponibilizados de forma gratuita em <www.infozip.org/>. Para a edição dos arquivos RINEX utiliza-se o software TEQC (*Translation, Editing and Quality Check*), que é acionado pela interface gráfica de forma automática. O TEQC é disponibilizado gratuitamente pela UNAVCO em

<www.unavco.org/software/dataprocessing/teqc/teqc.html>. Entre as opções de edição, destaca-se:

- remover observações referentes a satélites de constelações específicas (GPS, GLONASS, BEIDU e GALILEO);
- remover informações da portadora L2;
- remover períodos no início ou fim do arquivo (por exemplo, remover as 2 primeiras ou últimas horas do arquivo);
- corte de intervalo específico (por exemplo, salvar um arquivo contendo apenas as observações entre 10h e 13h); e,
- cortes múltiplos (por exemplo, de um arquivo de 24h gerar 12 arquivos de 2h cada).

Na aba “IBGE-PPP”, tem-se acesso a um aplicativo Java que estabelece conexão direta com os servidores do IBGE-PPP, permitindo ao usuário selecionar um diretório de seu computador e enviar todos os arquivos nele contido para processamento (no modo estático ou cinemático), bastando apenas fornecer um endereço de e-mail válido. Além de permitir o envio de inúmeros arquivos de forma simples e pouco trabalhosa, o aplicativo Java pode ser aberto mais de uma vez ao mesmo tempo, permitindo o processamento de arquivos em janelas em paralelo, limitando a eficiência à largura da banda da internet utilizada.

Salienta-se que após o processamento no IBGE-PPP o usuário receberá um e-mail com os resultados, entretanto, esses arquivos de resultado são os mesmos já salvos pelo programa no diretório escolhido.

Ainda na aba “IBGE-PPP” é disponibilizada a opção de descompactação dos arquivos de resultado *.zip, dando acesso aos arquivos *.sum e *.pos, de acordo com o método de processamento. Na sequência, pode-se extrair um arquivo *.txt contendo as informações posicionais disponíveis nos arquivos *.sum. Salienta-se que devido à formatação simplificada dos arquivos *.pos (apenas uma tabela com várias colunas) não há necessidade da extração das informações para um arquivo *.txt.. Adicionalmente, para o caso de séries temporais, há a opção de sinalizar dias faltantes inserindo “NA” (*Not Available*), “NaN” (*Not a Number*), um espaço ou um conjunto de caracteres qualquer nas linhas referentes a esses dias sem dados. Isso permite a manipulação da série para entrada em softwares como, por exemplo, R e MATLAB.

Na aba “CoordHub”, pode-se entrar com arquivos *.txt contendo coordenadas (cartesianas X, Y, Z ou elipsoidais ϕ , λ , h, assim como suas respectivas informações, como época e sistema de referência) e realizar as seguintes operações:

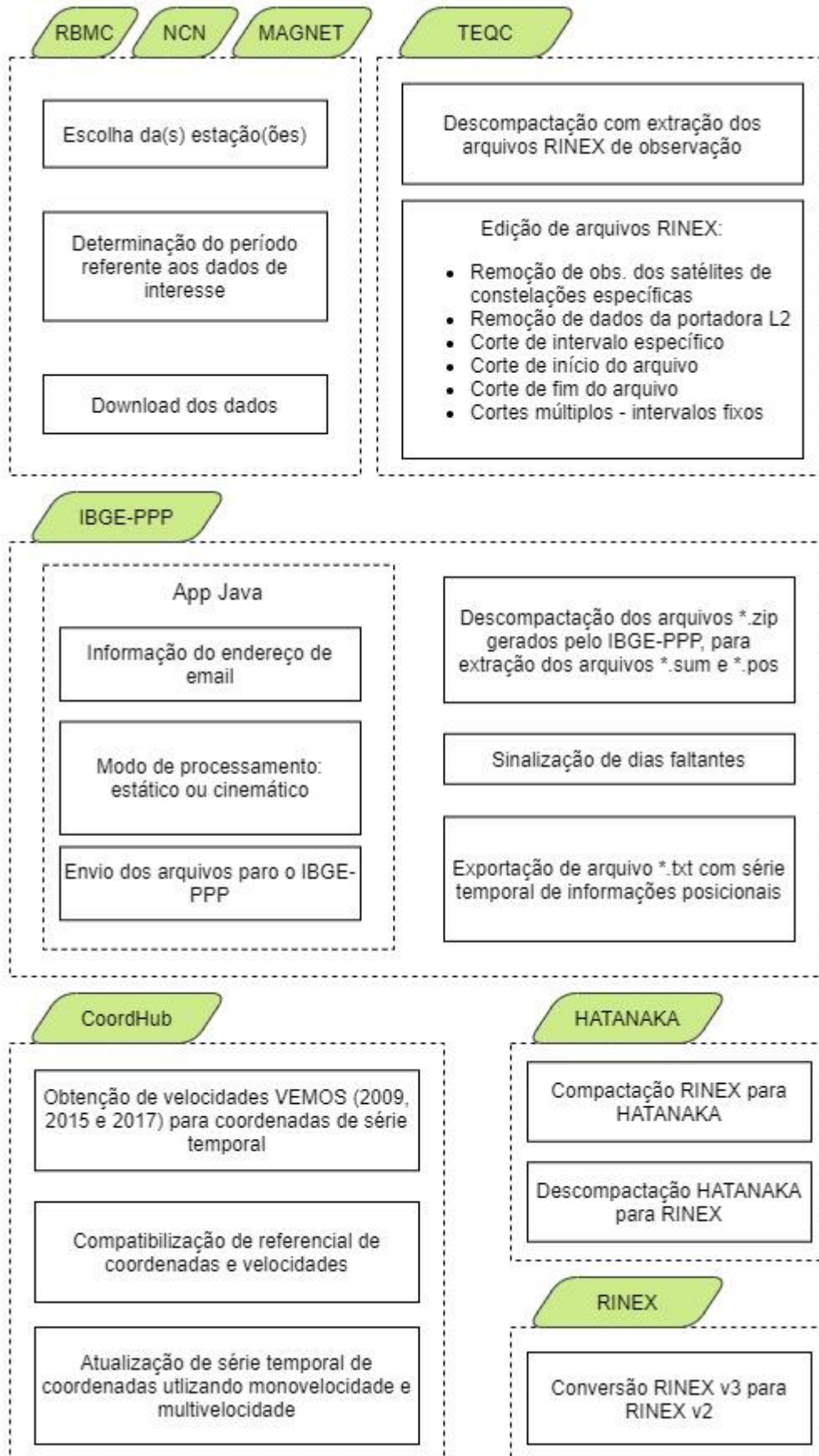
- obter as velocidades dos modelos VEMOS2009, VEMOS2015 e VEMOS2017 referentes às coordenadas de entrada. Este processo é realizado pela interpolação da grade dos modelos VEMOS (disponibilizados pelo SIRGAS) com base na metodologia descrita por Prol et al. (2014);
- compatibilizar todas as coordenadas contidas no arquivo (e suas respectivas velocidades) para um mesmo referencial;
- atualizar todas as coordenadas para uma data/época específica, utilizando monovelocidade ou multivelocidade. Neste caso, há também a opção de usar a multivelocidade com os três modelos VEMOS de forma automática.

Além de utilizar as velocidades dos modelos VEMOS já contidas no RINEXHub, o usuário pode entrar com suas próprias velocidades. No caso de monovelocidade, as velocidades são inseridas no arquivo *.txt junto com as respectivas coordenadas, e no caso de multivelocidade, pode-se digitar em tela ou inserir um *.txt separado, apenas com as velocidades e seus respectivos períodos de uso.

Adicionalmente, há duas abas com ferramentas que podem ser úteis de acordo com a origem dos dados de observações GNSS utilizados. A primeira, “HATANAKA”, permite comprimir e descomprimir arquivos entre este formato e o RINEX, processo que é realizado através do software RNXCMP, desenvolvido por Hatanaka (2008). A segunda aba, “RINEX”, permite converter os arquivos RINEX versão 3 para a versão 2. Este processo é realizado através do software GFZRNEX, desenvolvido por Nischan (2016).

Um esquema com o resumo das funcionalidades de cada aba do RINEXHub pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 - Abas do RINEXHub e suas respectivas funcionalidades.



Fonte: O autor (2021).

Com a finalidade de auxiliar os usuários, são disponibilizados no programa: um tutorial de utilização, um link para o descritivo das estações da RBMC, assim como links para os mapas das estações das redes RBMC e NCN.

3.3.2.2 Geração das séries temporais posicionais

Através do programa RINEXHub, foram adquiridos dados de observação GNSS (GPS e GLONASS) em formato RINEX, com período de rastreamento de 24 horas, que foram na sequência processados, em modo estático, no IBGE-PPP, obtendo assim as coordenadas estimadas na data do levantamento. Destaca-se que o IBGE-PPP começou a integrar GPS e GLONASS no processamento em 14 de agosto de 2011, dessa forma, observações realizadas em data anteriores consideram somente a constelação GPS no processamento (IBGE, 2020). Entretanto, Yigit et al. (2014), Ventorim e Dal Poz (2016) e Alcaay e Yigit (2017) salientam que a diferença obtida entre os resultados de processamentos GNSS e somente GPS não é significativa (de ordem milimétrica), para a seção de rastreamento utilizada (arquivos diários).

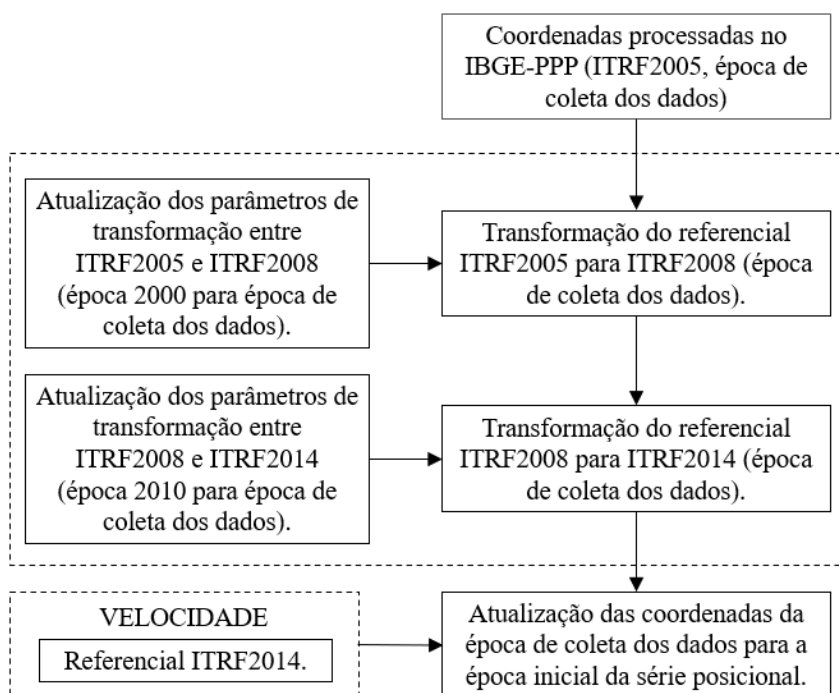
Após a obtenção das séries posicionais, notou-se que as coordenadas estavam referenciadas a pelo menos quatro realizações IGSyy-ECD/IGbyy-ECD (Época de Coleta dos Dados - ECD). Por conseguinte, efetuou-se a compatibilização entre os referenciais IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e ITRF2014-ECD. Esta materialização foi escolhida por ser a mais recente e 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 (IGS ACC, 2020; REBISCHUNG; SCHMID, 2016; REBISCHUNG, 2020), assim como o IGS08/IGb08 e o ITRF2008 (IGS ACC, 2020; WESTON; SOLER, 2012), e o IGS05 e o ITRF2005 (IGS ACC, 2020).

O procedimento de compatibilização entre referenciais se deu seguindo o rigor teórico evidenciado por Carvalho (2015), Almeida, Oliveira e Dal Poz (2016), Braga e Dal Poz (2017), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016), 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) como ilustrado no fluxograma da Figura 7, 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.

Figura 7 - Fluxograma exemplificando o procedimento completo para compatibilização de coordenadas do ITRF2005 para ITRF2014 e posterior atualização.



Fonte: O autor (2021).

Uma vez obtidas as séries temporais posicionais, observou-se que estas apresentavam alguns dias sem dados disponíveis. Considerando que SIRGAS (2021c) recomenda que velocidades sejam estimadas a partir de dados GNSS contínuos de pelo menos dois anos, foi necessário estimar valores aos dias sem dados.

No programa R (R CORE TEAM, 2021) existem diversos métodos que possibilitam o preenchimento de dados faltantes, dentre eles utilizou-se a função `na.interp()`, pertencente ao pacote `forecast` (HYNDMAN, 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 e cálculo das acurácias planimétricas e altimétricas.

3.3.2.3 Obtenção das velocidades e discrepâncias

Séries temporais posicionais normalmente apresentam sazonalidade, o que pode influenciar significativamente as velocidades estimadas. Isso é particularmente problemático para séries mais curtas em análises de mínimos quadrados devido à correlação entre os parâmetros sazonais e as velocidades (BLEWITT; LAVALLÉE, 2002; BLEWITT et al., 2016). Dessa forma, optou-se pelo uso do estimador MIDAS para o cálculo das velocidades, uma vez que ele é insensível à sazonalidade anual (BLEWITT et al., 2016).

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 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 a 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). 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 por meio do programa SARI (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 no endereço <<https://alvarosg.shinyapps.io/sari>>.

Nesse contexto, as velocidades foram estimadas em três processos, que são iguais para todas as séries. Entretanto, como cinco séries possuem períodos de dez anos e cinco possuem períodos de oito anos, os processos serão descritos separadamente para cada um dos períodos.

Para as séries com data inicial em 01/01/2010, ou seja, série completa com período de dez anos (referentes às estações BOAV, CTA1, NAUS, TORP e VICO):

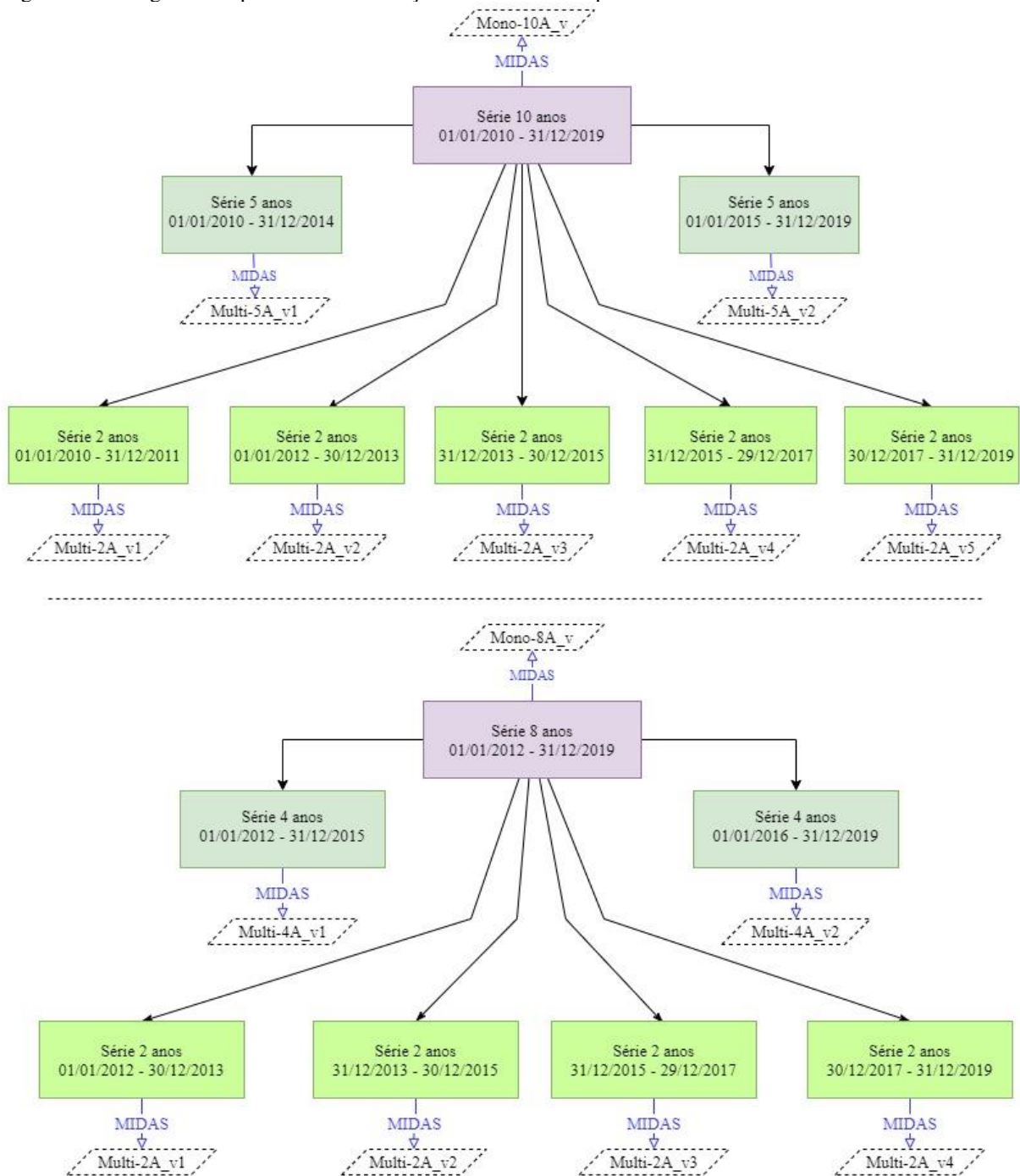
- i. primeiramente estimou-se a velocidade da série temporal completa de cada estação, ou seja, uma velocidade referente aos dez anos da série;
- ii. em seguida, dividiu-se a série completa ao meio, formando duas séries de cinco anos, e obtendo uma velocidade para cada metade; e
- iii. por fim, dividiu-se a série completa em cinco partes, de forma que cada parte compreenda um período de dois anos, obtendo-se desta forma, uma velocidade para cada quinta parte da série completa.

Para as séries com data inicial em 01/01/2012, ou seja, série completa com período de oito anos (referentes às estações ALAR, LORS, ROCK, SMAR e VDCY):

- i. primeiramente estimou-se a velocidade da série temporal completa de cada estação, ou seja, uma velocidade referente aos oito anos da série;
- ii. em seguida, dividiu-se a série completa ao meio, formando duas séries de quatro anos, e obtendo uma velocidade para cada metade; e
- iii. por fim, dividiu-se a série completa em quatro partes, de forma que cada parte compreenda um período de dois anos, obtendo-se desta forma, uma velocidade para cada quarta parte da série completa.

O fluxograma do processo de estimação das velocidades pode ser visualizado na Figura 8. Nos paralelogramos tracejados estão indicadas as velocidades estimadas, onde “Mono” e “Multi” se referem à monovelocidade e multivelocidade, respectivamente, o número que precede a letra “A” indica o número de anos da série posicional utilizada, e o número após a letra “v” indica de qual parte da série completa a velocidade foi estimada.

Figura 8 - Fluxograma do processo de estimação das velocidades para cada série.



Fonte: O autor (2021).

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 a discrepância planimétrica (conforme capítulo 2) e altimétrica (descrito na sequência).

Uma vez que a metodologia apresentada considera a atualização de coordenadas dentro do período das observações GNSS (de forma a estimar as multivelocidades), as coordenadas de

referências para o cálculo das discrepâncias devem 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 contexto, mostrou-se pertinente utilizar um único método de processamento para estimar as dez coordenadas de referência diretamente na época de interesse e com precisão conhecida.

Ebner e Featherstone (2008), que compararam as coordenadas de 46 pontos de uma rede de controle geodésico de tamanho moderado (~550 km x ~440 km) processadas com o software científico Bernese v5 e com o CSRS-PPP, recomendam o processamento pelo método PPP de arquivos com seis dias (144 horas) consecutivos de rastreamento (limite máximo de processamento atual do CSRS-PPP) para obter resultados comparáveis àqueles obtidos com o Bernese em rede. Dessa forma, optou-se por este método para a obtenção das coordenadas de referência.

Para cada estação, foram concatenados seis arquivos de observação no formato RINEX, com 24 horas cada. Assim como Cunha (2020), para gerar os arquivos, optou-se por utilizar três dias antes e dois dias depois do dia de referência, de forma que ele ficasse próximo ao meio do intervalo.

Como a RBMC disponibiliza dados de suas estações a partir de 01/01/2010, data inicial de três das séries utilizadas, não foi possível utilizar essa data como referência, devido à ausência dos dados dos três dias anteriores. Desse modo, a data tomada como referência foi o dia 04/01, tanto para as séries que começam em 2010 como para as que começam em 2012. Portanto, as observações dos arquivos de seis dias começam às 00h do dia 01/01 e terminam às 23h 59min e 45seg do dia 06/01. Após o processo de concatenação dos arquivos de cada estação, realizado pelo TEQC, eles foram processados no CSRS-PPP, obtendo assim as coordenadas de referência. Salienta-se que o CSRS-PPP foi utilizado devido ao IBGE-PPP processar arquivos com no máximo 48h de rastreamento.

As coordenadas selecionadas para serem atualizadas são referentes 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 sua respectiva data/época de referência (d_r/e_r). A atualização, assim como a estimação das velocidades, também seguiu três processos.

Para as séries com data inicial em 01/01/2010, ou seja, série completa com período de dez anos (referentes às estações BOAV, CTA1, NAUS, TORP e VICO):

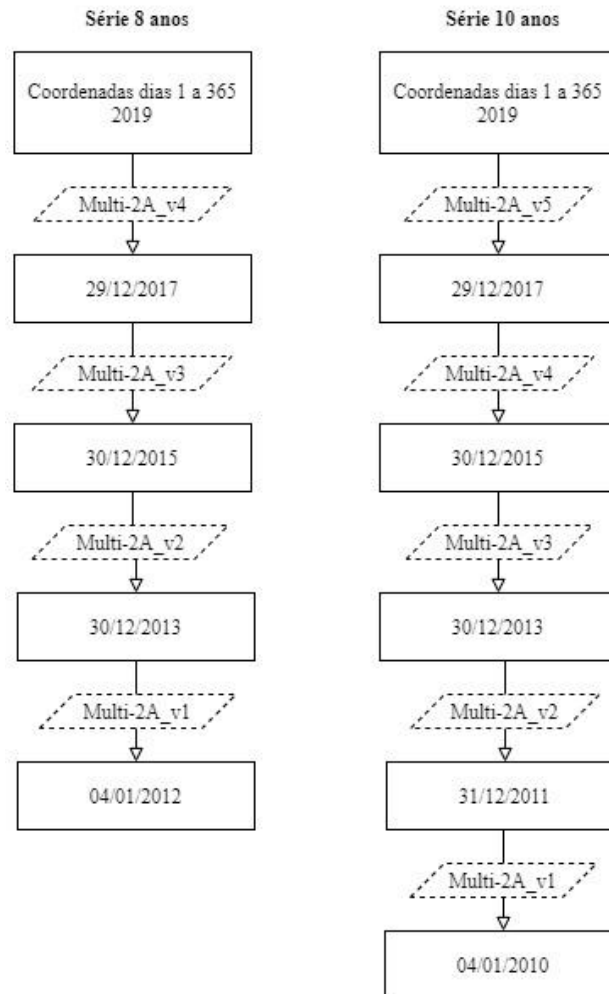
- i. inicialmente atualizou-se as 365 coordenadas com monovelocidade (estimada através da série de dez anos) diretamente para d_r/e_r .

- ii. na sequência, realizou-se a atualização com multivelocidade, utilizando as velocidades estimadas de cada metade da série inicial. Desse modo, as 365 coordenadas foram atualizadas para 01/01/2015, época 2015,00 utilizando a velocidade 5A_v2 e depois atualizadas para d_r/e_r utilizando a velocidade 5A_v1.
- iii. por fim, as 365 coordenadas foram atualizadas com multivelocidade, utilizando as velocidades estimadas através das séries de dois anos, para d_r/e_r . O processo é ilustrado pela Figura 9.

Para as séries com data inicial em 01/01/2012, ou seja, série completa com período de oito anos (referentes às estações ALAR, LORS, ROCK, SMAR e VDCY):

- i. inicialmente atualizou-se as 365 coordenadas com monovelocidade (estimada através da série de oito anos) diretamente para d_r/e_r .
- ii. na sequência, realizou-se a atualização com multivelocidade, utilizando as velocidades estimadas de cada metade da série inicial. Desse modo, as 365 coordenadas foram atualizadas para 01/01/2016, época 2016,00, utilizando a velocidade 4A_v2 e depois atualizadas para d_r/e_r utilizando a velocidade 4A_v1.
- iii. por fim, as 365 coordenadas foram atualizadas com multivelocidade, utilizando as velocidades estimadas através das séries de dois anos, para d_r/e_r . O processo é ilustrado pela Figura 9.

Figura 9 - Atualização das 365 coordenadas para dr/er , utilizando as Multi-2A.



Fonte: O autor (2021).

Para calcular as discrepâncias planimétricas aplicou-se os procedimentos descritos no capítulo 2, seção 2.4 desta pesquisa. A discrepância altimétrica, em metros, é dada pela Eq. (23).

$$\Delta h(\text{metros}) = h(\text{referência}) - h(\text{estimado}) \quad (23)$$

Destaca-se que os dois experimentos a seguir foram realizados obtendo séries temporais de 365 dias das discrepâncias calculadas para as dez estações, utilizando diferentes métodos de obtenção de velocidades para a atualização das coordenadas.

3.4 Resultados

As velocidades para as estações localizadas no Brasil, obtidas de acordo com a metodologia anteriormente descrita, referenciadas ao ITRF2014, assim como suas incertezas estão dispostas na Tabela 5 .

Tabela 5 - Velocidades estimadas pelo MIDAS para as séries das estações localizadas no Brasil.

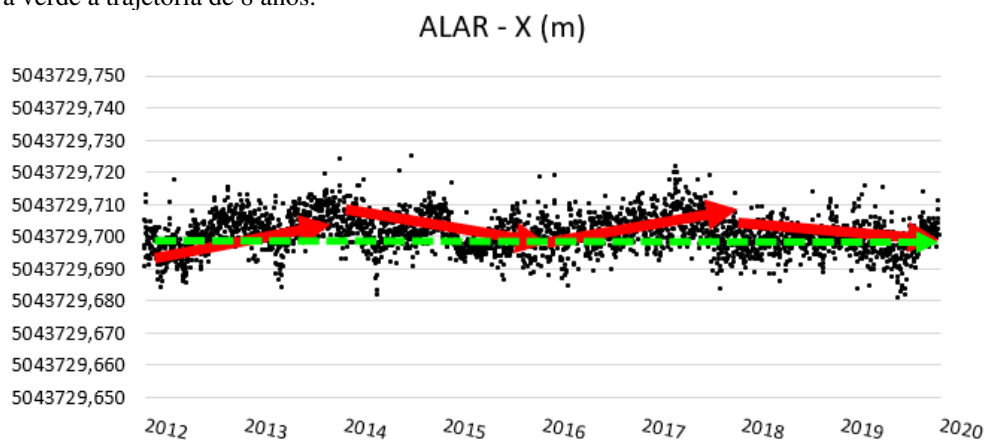
Estação	Velocidade	Componentes (mm/ano)		
		$V_x \pm \sigma_x$	$V_y \pm \sigma_y$	$V_z \pm \sigma_z$
ALAR	Mono-8A_v	-0,10 ± 0,39	-4,90 ± 0,35	12,51 ± 0,18
	Multi-4A_v1	-0,40 ± 0,62	-5,30 ± 0,57	12,71 ± 0,27
	Multi-4A_v2	-0,80 ± 0,63	-3,70 ± 0,49	12,11 ± 0,27
	Multi-2A_v1	4,35 ± 0,92	-6,80 ± 0,87	13,21 ± 0,37
	Multi-2A_v2	-4,40 ± 0,81	-2,40 ± 0,74	13,86 ± 0,46
	Multi-2A_v3	2,40 ± 1,10	-5,00 ± 1,06	9,91 ± 0,49
	Multi-2A_v4	-0,50 ± 0,90	-4,10 ± 0,68	13,61 ± 0,43
BOAV	Mono-10A_v	-2,70 ± 0,31	-3,40 ± 0,42	11,91 ± 0,18
	Multi-5A_v1	-3,40 ± 0,49	-2,30 ± 0,64	11,51 ± 0,24
	Multi-5A_v2	-2,10 ± 0,48	-4,20 ± 0,65	11,81 ± 0,27
	Multi-2A_v1	-6,55 ± 1,24	3,40 ± 1,53	9,76 ± 0,49
	Multi-2A_v2	-1,80 ± 0,86	-2,10 ± 1,04	13,11 ± 0,41
	Multi-2A_v3	-1,70 ± 0,77	-5,20 ± 1,04	14,71 ± 0,51
	Multi-2A_v4	-4,50 ± 0,96	2,25 ± 1,34	6,85 ± 0,44
NAUS	Multi-2A_v5	0,90 ± 0,83	-7,61 ± 1,25	12,11 ± 0,39
	Mono-10A_v	-4,40 ± 0,50	-1,63 ± 0,78	12,32 ± 0,20
	Multi-5A_v1	-4,90 ± 0,84	0,17 ± 1,01	10,62 ± 0,32
	Multi-5A_v2	-4,00 ± 0,71	1,00 ± 1,43	13,92 ± 0,24
	Multi-2A_v1	-6,87 ± 0,92	5,08 ± 1,23	11,06 ± 0,65
	Multi-2A_v2	8,13 ± 1,18	-8,84 ± 1,43	12,42 ± 0,45
	Multi-2A_v3	-5,10 ± 1,23	-13,84 ± 1,23	10,92 ± 0,76
SMAR	Multi-2A_v4	-9,84 ± 1,44	25,96 ± 2,45	11,68 ± 0,40
	Multi-2A_v5	-8,01 ± 0,79	7,00 ± 0,82	13,81 ± 0,40
	Mono-8A_v	1,40 ± 0,32	-5,80 ± 0,39	10,21 ± 0,34
	Multi-4A_v1	2,90 ± 0,67	-7,56 ± 0,82	10,11 ± 0,73
	Multi-4A_v2	1,80 ± 0,38	-5,00 ± 0,52	9,31 ± 0,40
	Multi-2A_v1	8,01 ± 1,16	-13,16 ± 1,58	5,55 ± 1,08
	Multi-2A_v2	-1,70 ± 0,70	-2,70 ± 0,82	15,91 ± 0,72
VICO	Multi-2A_v3	2,10 ± 0,62	-1,70 ± 0,82	6,05 ± 0,60
	Multi-2A_v4	1,60 ± 0,65	-5,15 ± 0,78	11,61 ± 0,59
	Mono-10A_v	0,90 ± 0,39	-7,00 ± 0,36	10,20 ± 0,24
	Multi-5A_v1	2,00 ± 0,48	-8,90 ± 0,46	9,20 ± 0,29
	Multi-5A_v2	-2,80 ± 0,89	-3,90 ± 0,62	12,10 ± 0,45
	Multi-2A_v1	3,10 ± 0,92	-9,00 ± 1,21	9,20 ± 0,67
	Multi-2A_v2	3,40 ± 0,66	-7,55 ± 0,60	10,20 ± 0,43
VICO	Multi-2A_v3	3,40 ± 0,88	-8,30 ± 0,90	9,80 ± 0,65
	Multi-2A_v4	1,30 ± 2,01	-6,60 ± 1,45	7,90 ± 0,76
	Multi-2A_v5	-5,05 ± 1,59	-4,20 ± 1,11	13,90 ± 0,74

Fonte: O autor (2021).

Em cada uma das cinco estações, nota-se que a incerteza da monovelocidade - sendo ela referente à série de 10 ou 8 anos - foi menor que a incerteza de todas as multivelocidades - de 5/4 anos ou 2 anos. Já as Multi-5A/4A só apresentaram incertezas menores que todas as Multi-2A na ALAR e BOAV, com as outras estações apresentando resultados sem padrão definido.

Em relação aos valores das velocidades, pode-se notar uma grande variação tanto entre as Multi-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 Mono-10A_v foi -4,40 mm/ano, bem próximo da Multi-5A_v1 (-4,90 mm/ano) e Multi-5A_v2 (-4,00 mm/ano), em contrapartida, a Multi-2A_v2 (8,13 mm/ano) e Multi-2A_v4(-9,84 mm/ano), apresentaram valores bem distintos. Isso é justificável devido às mudanças de trajetória das séries posicionais quando se analisa períodos mais curtos, ou seja, alterações pontuais ou periódicas que não seguem a tendência de longa duração acabam recebendo maior destaque quando se estima a velocidade de uma série de 2 anos, como pode ser observado na Figura 9, que mostra a série temporal posicional da componente X da estação ALAR.

Figura 10 - Amplificação das mudanças de trajetória em períodos curtos. Setas vermelhas indicam a trajetória de 2 anos e a verde a trajetória de 8 anos.



Fonte: O autor (2021).

A variação entre os valores das monovelocidades e das Multi-5A/4A foi relativamente menor, se comparado às Multi-2A. Apenas na NAUS (V_y) e VICO (V_x e V_y) a diferença foi maior que 2 mm/ano.

Esses valores indicam uma suavização da trajetória das estações em séries mais longas, proporcionando menores incertezas. Entretanto, as Multi-5A/4A podem se mostrar um meio termo entre um melhor ajuste da trajetória das Multi-2A e a suavização das Mono-10A/8A.

Considerando as estações localizadas nos Estados Unidos, pode-se observar na Tabela 6 suas velocidades com suas respectivas incertezas referenciadas ao ITRF2014, estimadas com a metodologia anteriormente descrita.

Tabela 6 - Velocidades estimadas pelo MIDAS para as séries das estações localizadas nos Estados Unidos.

Estação	Velocidade	Componentes (mm/ano)		
		$V_x \pm \sigma_x$	$V_y \pm \sigma_y$	$V_z \pm \sigma_z$
CTA1	Mono-10A_v	-14,31 \pm 0,28	0,70 \pm 0,54	-1,40 \pm 0,35
	Multi-5A_v1	-11,46 \pm 1,30	2,30 \pm 1,22	-0,60 \pm 0,88
	Multi-5A_v2	-14,31 \pm 0,21	-0,20 \pm 0,58	-1,30 \pm 0,34
	Multi-2A_v1	-4,10 \pm 2,77	5,60 \pm 2,79	2,20 \pm 1,93
	Multi-2A_v2	-14,71 \pm 2,70	1,55 \pm 2,30	0,40 \pm 1,68
	Multi-2A_v3	-18,61 \pm 1,91	3,20 \pm 1,72	-4,65 \pm 1,28
	Multi-2A_v4	-16,51 \pm 0,37	-10,46 \pm 0,66	2,80 \pm 0,47
	Multi-2A_v5	-14,06 \pm 0,30	4,90 \pm 0,80	-4,15 \pm 0,53
LORS	Mono-8A_v	-27,82 \pm 0,33	21,72 \pm 0,39	9,91 \pm 0,30
	Multi-4A_v1	-29,32 \pm 1,03	20,21 \pm 0,99	11,21 \pm 0,82
	Multi-4A_v2	-27,62 \pm 0,33	21,62 \pm 0,45	9,71 \pm 0,35
	Multi-2A_v1	-30,57 \pm 1,90	19,91 \pm 1,86	11,61 \pm 1,54
	Multi-2A_v2	-29,22 \pm 1,58	21,11 \pm 1,44	9,71 \pm 1,15
	Multi-2A_v3	-30,17 \pm 0,53	18,81 \pm 0,78	7,80 \pm 0,47
	Multi-2A_v4	-25,12 \pm 0,45	25,52 \pm 0,63	11,91 \pm 0,76
ROCK	Mono-8A_v	-28,60 \pm 0,31	26,30 \pm 0,36	14,10 \pm 0,29
	Multi-4A_v1	-30,50 \pm 0,96	26,40 \pm 0,97	14,15 \pm 0,83
	Multi-4A_v2	-28,60 \pm 0,33	26,10 \pm 0,39	14,40 \pm 0,31
	Multi-2A_v1	-33,20 \pm 2,17	28,90 \pm 1,95	13,05 \pm 1,76
	Multi-2A_v2	-30,80 \pm 1,21	24,60 \pm 1,43	13,00 \pm 1,10
	Multi-2A_v3	-30,55 \pm 0,54	23,90 \pm 0,62	13,35 \pm 0,48
	Multi-2A_v4	-27,00 \pm 0,53	28,90 \pm 0,62	15,70 \pm 0,60
TORP	Mono-10A_v	-29,22 \pm 0,34	27,52 \pm 0,41	15,01 \pm 0,30
	Multi-5A_v1	-29,62 \pm 1,05	27,42 \pm 1,05	16,21 \pm 0,77
	Multi-5A_v2	-29,02 \pm 0,32	27,22 \pm 0,38	14,91 \pm 0,27
	Multi-2A_v1	-24,32 \pm 2,57	34,47 \pm 2,16	13,31 \pm 1,74
	Multi-2A_v2	-33,92 \pm 2,10	25,32 \pm 1,91	18,81 \pm 1,53
	Multi-2A_v3	-29,57 \pm 1,26	29,42 \pm 1,41	11,91 \pm 1,19
	Multi-2A_v4	-30,92 \pm 0,52	24,42 \pm 0,68	13,81 \pm 0,49
	Multi-2A_v5	-27,32 \pm 0,53	30,52 \pm 0,68	16,31 \pm 0,54
VDCY	Mono-8A_v	-28,70 \pm 0,41	24,20 \pm 0,53	10,50 \pm 0,33
	Multi-4A_v1	-32,52 \pm 1,29	20,51 \pm 1,38	13,91 \pm 0,99
	Multi-4A_v2	-27,62 \pm 0,43	25,22 \pm 0,60	9,81 \pm 0,35
	Multi-2A_v1	-31,62 \pm 2,59	24,57 \pm 2,36	14,21 \pm 1,83
	Multi-2A_v2	-35,22 \pm 1,75	15,81 \pm 1,96	14,01 \pm 1,51
	Multi-2A_v3	-30,77 \pm 0,66	21,72 \pm 0,75	8,51 \pm 0,58
	Multi-2A_v4	-23,72 \pm 0,61	31,82 \pm 0,80	9,61 \pm 0,67

Fonte: O autor (2021).

Diferentemente das estações do Brasil, duas estações (CTA1 e TORP) apresentaram incertezas das velocidades Multi-5A_v2 menores que as da monovelocidade. Além disso, nas cinco estações as incertezas das Multi-5/4A_v2 ficaram próximas às da monovelocidade e menores que as das Multi-5/4A_v1. Adicionalmente, as incertezas das Multi-5/4A_v1 foram maiores que as incertezas da Multi-5/4A_v2, que por sua vez foram maiores que as da Multi-5/4A_v3. Essa diferença entre as incertezas das velocidades da primeira e segunda metade das séries pode ser explicada pelo fato das séries temporais posicionais das estações dos Estados Unidos utilizadas serem mais ruidosas até 2015 e mais homogêneas entre 2015 e 2020 (ver Apêndice). Nesse sentido, salienta-se que maiores investigações acerca dessas séries devem ser efetuadas considerando, por exemplo, uma estratégia de processamento mais robusta, fundamentada em softwares que possibilitem maior controle sobre os parâmetros de processamento no PPP.

A partir das velocidades estimadas deu-se início aos experimentos.

3.4.1 Experimento 1

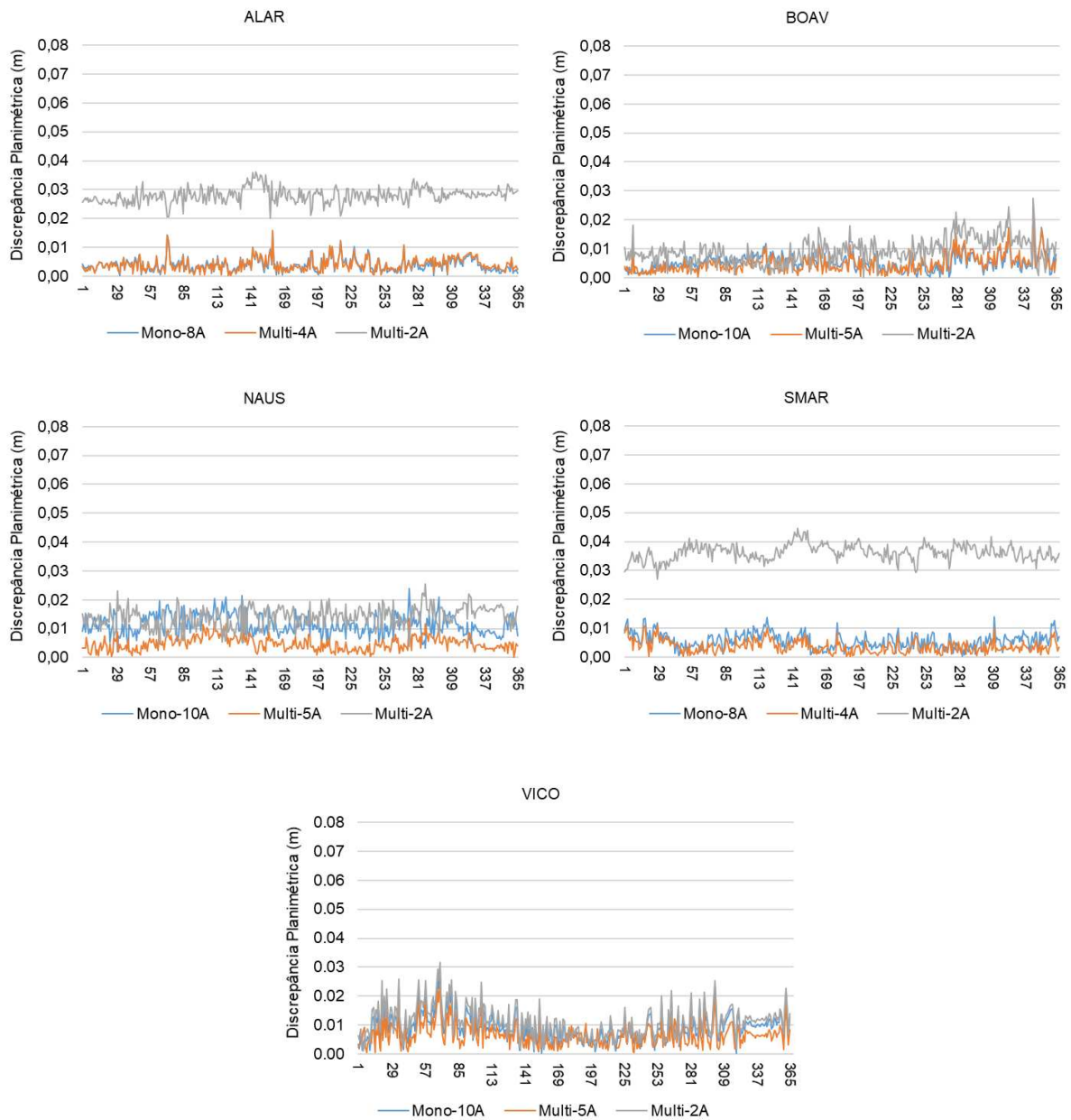
O Experimento 1 consiste na comparação das discrepâncias obtidas através da atualização das coordenadas utilizando monovelocidade (Mono-10A/8A) e multivelocidades (Multi-5A/4A e Multi-2A).

De forma a auxiliar a interpretação e o melhor entendimento dos gráficos, principalmente na comparação entre as diferentes estações, manteve-se o eixo vertical abrangendo o intervalo de 0 a 0,08m em todos os gráficos de discrepâncias planimétricas e de 0,08m a -0,08m para as discrepâncias altimétricas.

3.4.1.1 Discrepância planimétrica

As discrepâncias planimétricas obtidas pela atualização das coordenadas utilizando mono e multivelocidade estão dispostas na Figura 11 (estações do Brasil), onde se pode observar o pior desempenho relativo das discrepâncias obtidas com as Multi-2A nas estações ALAR e SMAR. Para as demais estações, os resultados com as Multi-2A não foram tão destoantes, apesar de perceptivelmente piores. As Mono-10A/8A e Multi-5A/4A apresentaram discrepâncias bem similares, com uma diferença mais evidenciada apenas na NAUS.

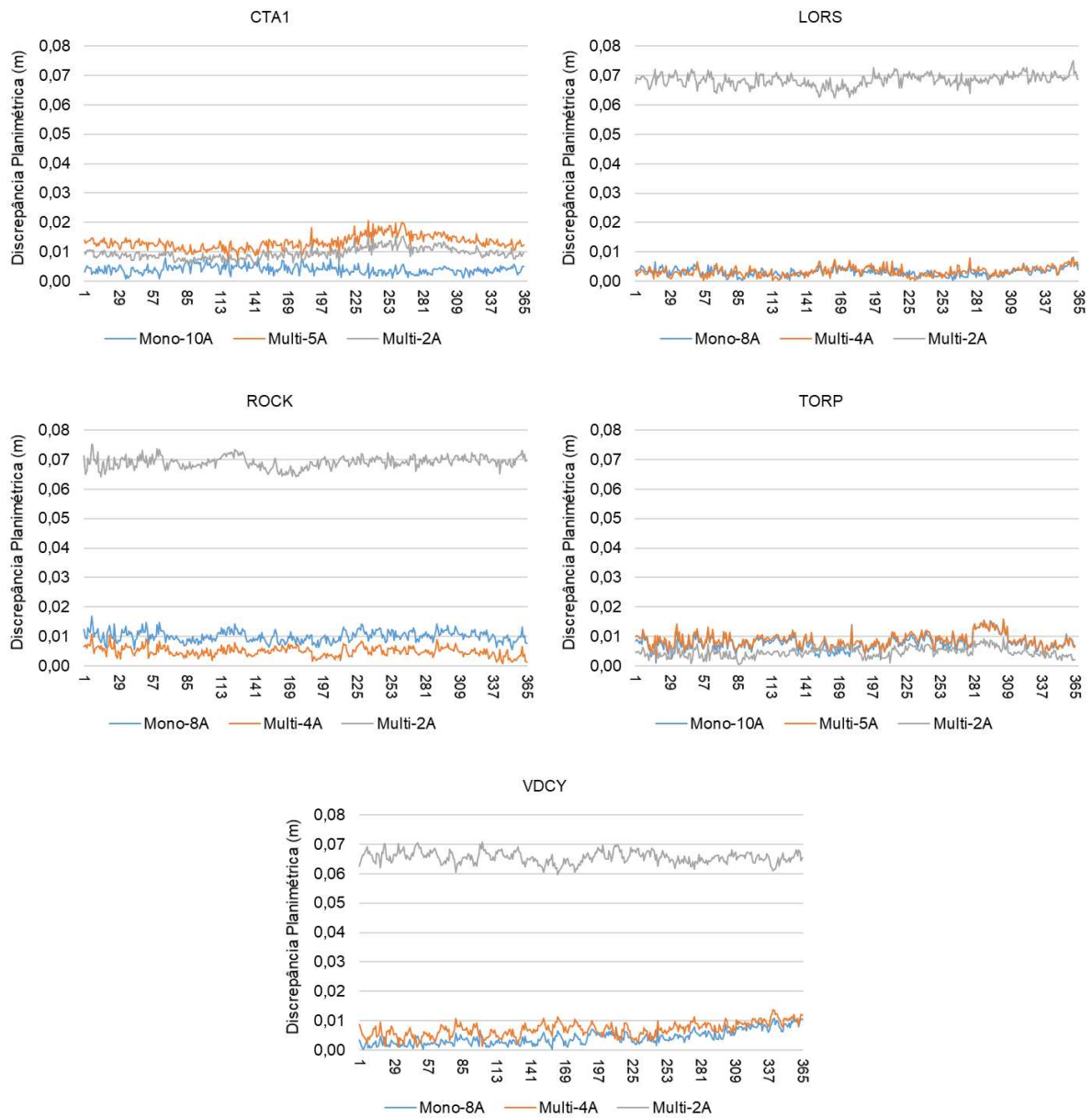
Figura 11 - Discrepância planimétrica obtida para as estações do Brasil utilizando mono e multivelocidade.



Fonte: O autor (2021).

Em relação às estações dos Estados Unidos, dispostas na Figura 12, as discrepâncias obtidas com as Multi-2A nas estações LORS, ROCK e VDCY (acima de 0,06 m) foram significativamente piores que as demais (abaixo de 0,02 m). Em relação às Mono-10A/8A e Multi-5A/4A houve uma separação um pouco mais clara nos resultados em relação às estações do Brasil.

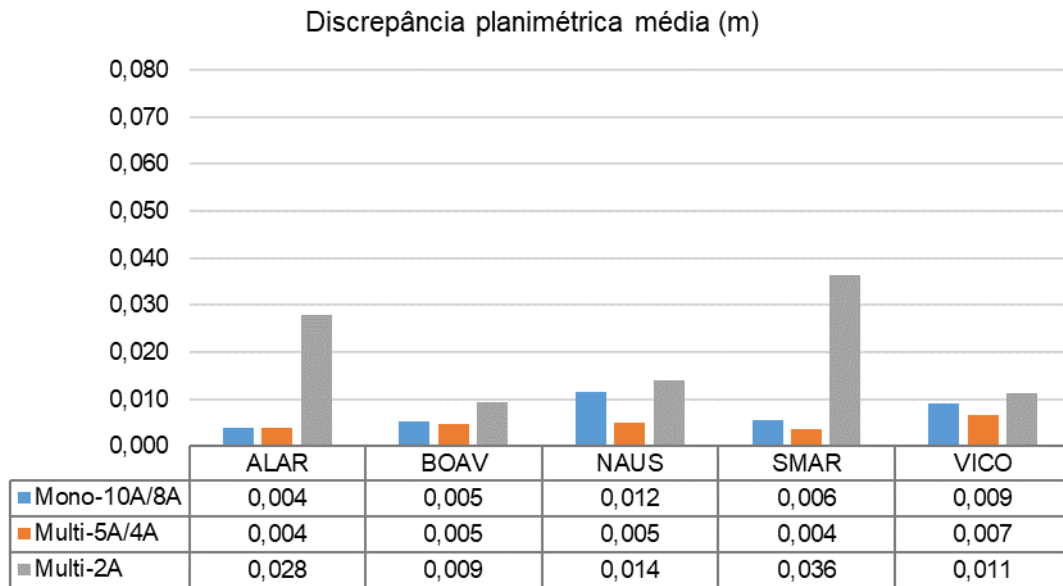
Figura 12 - Discrepância planimétrica obtida para as estações dos Estados Unidos utilizando mono e multivelocidade.



Fonte: O autor (2021).

De forma a auxiliar na análise da comparação entre os resultados obtidos com as mono e as multivelocidades, calculou-se a discrepâncias planimétricas médias para cada estação. Os resultados referentes às estações do Brasil são exibidos na Figura 13.

Figura 13 - Discrepância planimétrica média obtida para as cinco estações do Brasil.

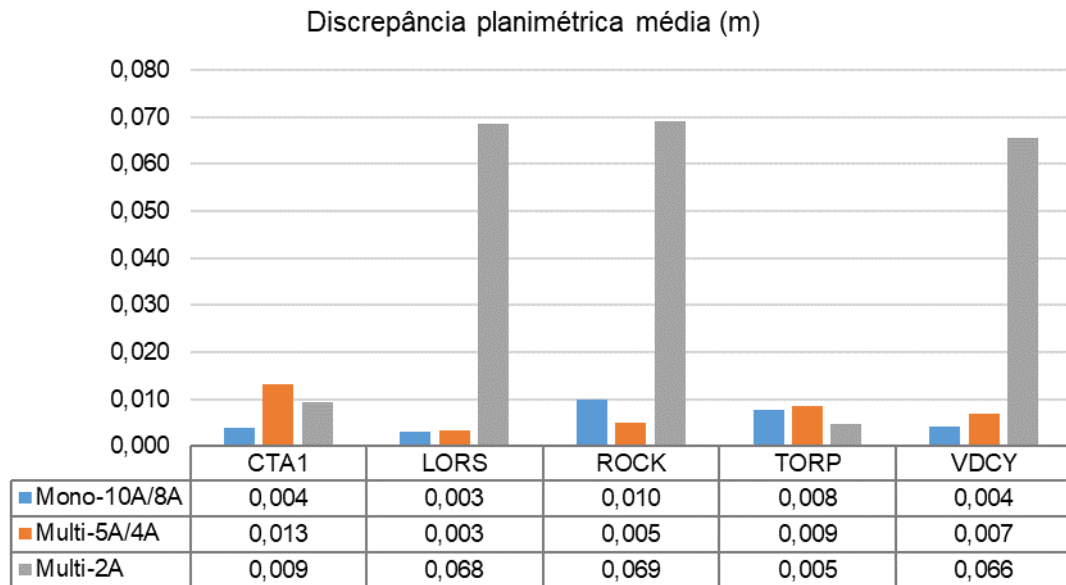


Fonte: O autor (2021).

As Multi-5A/4A apresentaram os melhores resultados de discrepância média, com destaque para a NAUS, 0,005 m contra os 0,012 m da Mono-10A/8A. Ademais, a maior discrepância média Multi-5A/4A obtida foi de apenas 0,007m, para a VICO. Entretanto, deve salientar que as diferenças entre as Mono-10A/8A e Multi-5A/4A não foram significativas, além de apresentar os mesmos valores na ALAR e BOAV.

Já para as estações dos Estados Unidos (ver Figura 14), os resultados foram inconclusivos, uma vez que as Multi-5A/4A foram melhores que as Mono-10A/8A na ROCK, iguais na LORS e piores na CTA1, TORP e VDCY. Além disso, as Multi-2A foram expressivamente piores que as Multi-5A/4A na LORS, ROCK e VDCY, mas melhor na CTA1 e TORP. Portanto nenhum padrão pôde ser notado, ainda que 4 das 5 estações estejam próximas geograficamente.

Figura 14 - Discrepância planimétrica média obtida para as cinco estações dos Estados Unidos.



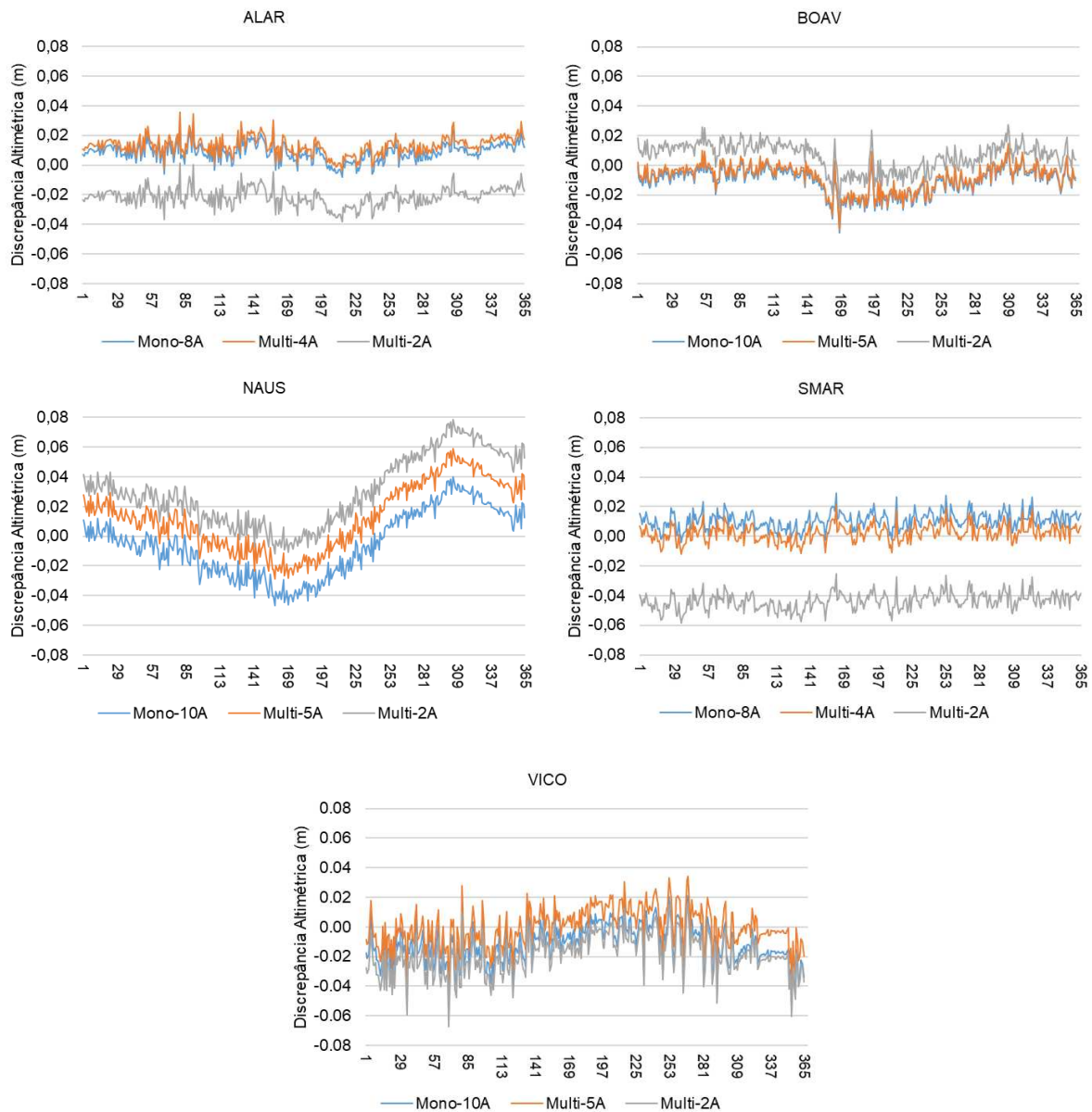
Fonte: O autor (2021).

Em geral, as discrepâncias obtidas utilizando as Multi-2A foram piores que as utilizando as Multi-5A/4A e Mono10A/8A. Adicionalmente ao efeito já explicado sobre a amplificação das variações de tendência nos períodos curtos, isso também pode ser explicado pelo fato de, teoricamente, o número de saltos que pode ser tolerado pelo MIDAS é $(T-1)/2$, onde T é o período da série temporal em anos. Portanto, como destaca Blewitt et al. (2016), três anos é o período mínimo para ser resistente a um único salto, podendo tolerar 17% de dados sendo *outliers*. Destacam ainda que, assintoticamente, a série temporal mais longa pode tolerar até 25% dos dados sendo *outliers*. Dessa forma, a utilização da Multi-2A pode resultar em discrepâncias planimétricas piores tanto por causa das características das séries posicionais como do método de estimação das velocidades utilizado.

3.4.1.2 Discrepância Altimétrica

Em relação às discrepâncias altimétricas, nas cinco estações do Brasil as Mono-10A/8A, Multi-5A/4A e Multi-2A exibiram um delineamento similar (ver Figura 15). Entretanto, as Multi-2A apresentaram uma diferença de nível, que é mais evidente na ALAR e SMAR.

Figura 15 - Discrepância altimétrica obtida para as estações do Brasil utilizando mono e multivelocidade.

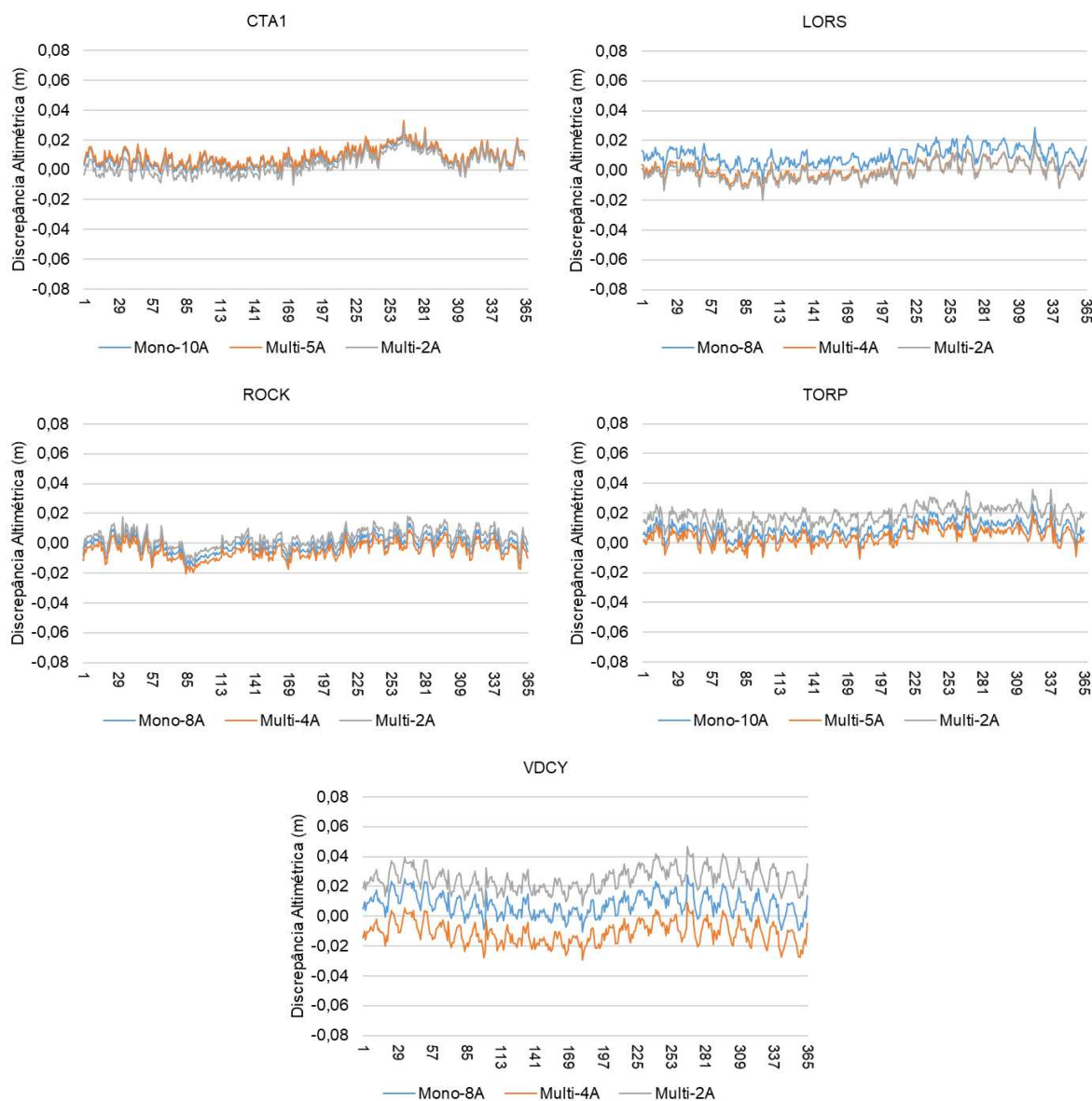


Fonte: O autor (2021).

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 anticorrelação entre a altitude geométrica e as cotas linimétricas do Rio Amazonas. Para mais informações sobre o do 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).

As discrepâncias altimétricas referente às estações dos Estados Unidos, estão dispostas na Figura 16.

Figura 16 - Discrepância altimétrica obtida para as estações dos Estados Unidos utilizando mono e multivelocidade.



Fonte: O autor (2021).

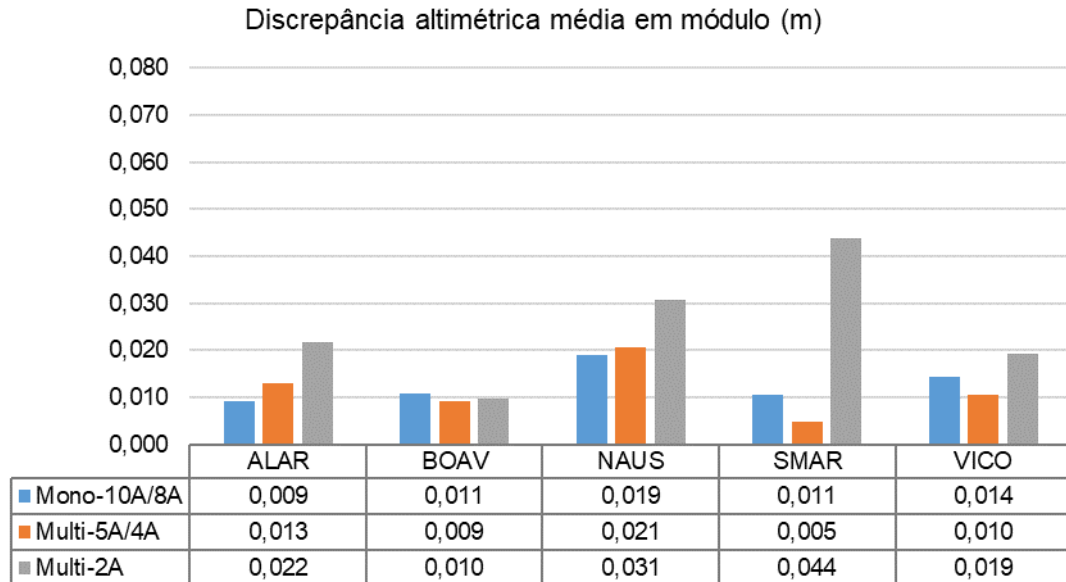
Assim como nas estações brasileiras, o delineamento das discrepâncias foi similar para as Mono-10A/8A, Multi-5A/4A e Multi-2A. Por outro lado, não houve uma diferença de nível significativa.

Como as discrepâncias altimétricas possuem valores positivos e negativos, calculou-se a discrepância média em módulo, visando uma análise numérica mais indicativa dos resultados.

Pelas discrepâncias médias das estações do Brasil (ver Figura 17), nota-se as Mono-10A/8A apresentaram os melhores resultados na ALAR e NAUS, enquanto na BOAV, SMAR e VICO as menores discrepâncias médias foram obtidas com as Multi-5A/4A. As Multi-2A

proporcionaram os piores resultados em quatro das cinco estações, superando apenas a Mono-10A na BOAV.

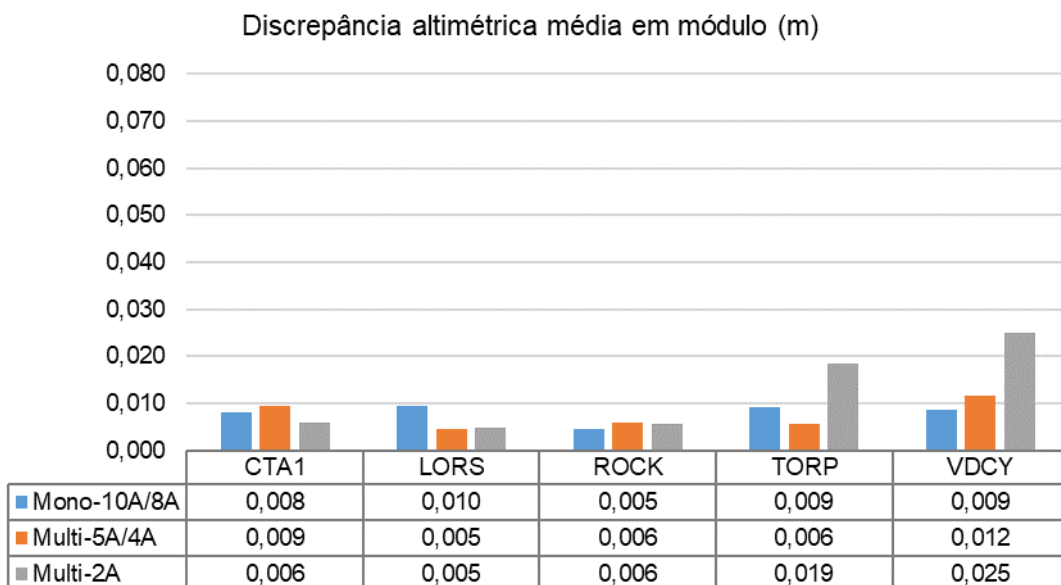
Figura 17 - Discrepância altimétrica média em módulo obtida para as estações do Brasil.



Fonte: O autor (2021).

As discrepâncias altimétricas médias para as estações dos Estados Unidos (ver Figura 18) apresentaram valores bem próximos, abaixo de 0,01 m, exceto para as Mono-2A que ficaram próximos dos 0,02 m.

Figura 18 - Discrepância altimétrica média em módulo obtida para as estações dos Estados Unidos.



Fonte: O autor (2021).

Na LORS, as Multi-4A e Multi-2A obtiveram a mesma discrepância média (0,005 m), na TORP a Multi-5A também foi melhor que a Mono-10A, mas nas outras três estações os resultados das Mono-10A/8A foram melhores. Assim como na planimetria, na altimetria não foi possível distinguir em quais situações as multivelocidades são mais indicadas que as monovelocidades.

Sánchez e Drewes (2016) afirmam que grandes terremotos podem causar mudanças nos movimentos lineares de estações e, conseqüentemente, alterar suas velocidades. Ademais, Castro, Ferreira e Freitas (2012) estudaram os impactos de um terremoto de magnitude 8,8 na escala Richter no Japão, e constataram alterações altimétricas em estações localizadas a 400km do epicentro. Segundo os dados do Centro de Terremotos do Sul da Califórnia (SCEDC - *Southern California Earthquake Center*), houve 10 terremotos de magnitude entre 5,09 e 7,10 (escala Richter) com epicentro em um raio de 400km das estações LORS, ROCK, TORP e VDCY no período das séries temporais utilizadas (01/01/2012 a 31/12/2019) (SCEDC, 2021). Blewitt et al., (2016) destaca que variações de velocidades nas estações, causadas por eventos como terremotos, podem problematizar a interpretação das velocidades MIDAS (gerando velocidades correspondentes ao pré-evento, por exemplo). No entanto, ao analisar as séries utilizadas (ver Apêndice), verificou-se que os efeitos sísmicos não causaram alterações significativas nas trajetórias, de forma que as velocidades geradas 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.

3.4.2 Experimento 2

Visando avaliar o desempenho das multivelocidades no processo de atualização de coordenadas frente à metodologia frequentemente empregada, obteve-se velocidades a partir de quatro modelos utilizados pela comunidade geodésica para comparação, sendo eles o NUVEL-1A (DEMETS et al., 1994), o ITRF2000 (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002), o VEMOS2009 (DREWES; HEIDBACH, 2012) e o VEMOS2017 (DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020). Devido aos melhores resultados obtidos no Experimento 1 para as velocidades Multi-5A/4A, o que as torna mais consistentes em relação às Multi-2A, optou-se pela utilização daquelas na comparação com os modelos selecionados.

Os modelos VEMOS são indicados para a atualização de coordenadas de estações situadas na área de cobertura SIRGAS e são frequentemente utilizados por profissionais e pesquisadores para obtenção das velocidades aplicadas a tal procedimento. Conseqüentemente,

utiliza-se frequentemente no Brasil o VEMOS2009, que é empregado pelo IBGE-PPP para atualizar coordenadas da época de coleta dos dados processados em seu sistema online para a época do referencial SIRGAS2000 (2000,4) (IBGE, 2020; SIRGAS, 2021c). Adicionalmente optou-se por utilizar também o VEMOS2017 por ser o modelo mais atual disponibilizado. Vale destacar que o VEMOS2015 não foi utilizado nas análises deste experimento devido ao fato dele ser válido somente para o período de março de 2010 a abril de 2015, como destacado por seus desenvolvedores (SÁNCHEZ; DREWES, 2016; SIRGAS, 2021a).

Considerando que os modelos VEMOS foram desenvolvidos visando a América Latina e o Caribe, sua cobertura não abrange os Estados Unidos (como mostra a Figura 2) e, portanto, tais modelos estarão presentes somente nas análises das estações brasileiras. Nesse sentido escolheu-se também os modelos de velocidade NUVEL-1A e ITRF2000.

A escolha do NUVEL-1A se justifica devido à sua ampla utilização desde sua publicação em 1994. Além disso, como destacam DeMets et al. (1994), modelos geofísicos baseados em médias de movimentação de placas ao longo de milhões de anos são referências úteis de comparação com médias de intervalos muito mais curtos, especialmente aquelas baseadas em observações geodésicas realizadas ao longo de uma década.

Quanto ao modelo de velocidades do ITRF2000, sua seleção está relacionada ao seu desenvolvimento a partir de observações de técnicas de Geodésia Espacial e alinhamento ao NUVEL-1A, além de fazer parte do referencial geodésico (ITRF2000) do qual o SIRGAS2000 (adotado oficialmente no Brasil) é uma densificação regional (IBGE, 2015).

As velocidades referentes aos modelos VEMOS foram obtidas através do software RINEXHub. Já as velocidades referentes ao ITRF2000 e NUVEL-1A foram obtidas pela *Plate Motion Calculator*, desenvolvida pela UNAVCO (*University NAVstar CONSORTIUM*), que calcula velocidades para qualquer localização na Terra com um ou mais modelos de movimento de placas (UNAVCO, 2021). Salienta-se que as velocidades estimadas com os modelos VEMOS 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). Na Tabela 7 estão dispostas as velocidades obtidas a partir dos quatro modelos para cada estação do Brasil.

Tabela 7 - Velocidades obtidas a partir dos modelos de velocidade ITRF2000, NUVEL-1A, VEMOS2009 e VEMOS2017 para as estações do Brasil.

Estação	Modelo	Velocidades (mm/ano)		
		V _x	V _y	V _z
ALAR	ITRF2000	-0,94	-4,65	11,88
	NUVEL-1A	-1,64	-5,50	11,54
	VEMOS2009	-0,90	-3,80	11,70
	VEMOS2017	-0,70	-4,60	12,80
BOAV	ITRF2000	-4,05	-1,62	11,48
	NUVEL-1A	-5,31	-2,39	10,49
	VEMOS2009	-3,50	-1,00	11,60
	VEMOS2017	-3,20	-1,10	11,80
NAUS	ITRF2000	-3,12	-2,49	11,53
	NUVEL-1A	-4,30	-3,11	10,55
	VEMOS2009	-4,80	-3,10	11,30
	VEMOS2017	-2,40	-2,20	12,90
SMAR	ITRF2000	1,50	-6,16	10,32
	NUVEL-1A	0,87	-6,12	9,61
	VEMOS2009	1,70	-5,80	10,80
	VEMOS2017	2,30	-6,70	11,90
VICO	ITRF2000	0,51	-5,72	11,33
	NUVEL-1A	-0,13	-6,14	10,84
	VEMOS2009	0,30	-5,40	11,70
	VEMOS2017	1,30	-5,20	12,00

Fonte: O autor (2021).

A partir das velocidades obtidas pode-se observar que não ocorre uma variação significativa nos valores das velocidades referentes aos quatro modelos para cada estação, com a maior diferença ocorrendo entre o VEMOS2009 e VEMOS2017 na estação NAUS (2,4 mm/ano na componente V_x).

Na Tabela 8 estão dispostas as velocidades obtidas a partir dos dois modelos para cada estação dos Estados Unidos.

Tabela 8 - Velocidades obtidas a partir dos modelos de velocidade ITRF2000, NUVEL-1A para as estações dos Estados Unidos.

Estação	Modelo	Velocidades (mm/ano)		
		V _x	V _y	V _z
CTA1	ITRF2000	-13,96	-1,26	-3,11
	NUVEL-1A	-14,31	-0,91	-2,67
LORS	ITRF2000	-30,45	25,59	12,58
	NUVEL-1A	-29,41	29,91	18,98
ROCK	ITRF2000	-29,92	26,35	12,96
	NUVEL-1A	-28,91	30,64	19,25
TORP	ITRF2000	-30,54	26,19	12,87
	NUVEL-1A	-29,49	30,43	19,24
VDCY	ITRF2000	-30,19	25,98	12,77
	NUVEL-1A	-29,16	30,28	19,12

Fonte: O autor (2021).

As velocidades obtidas a partir do ITRF2000 e NUVEL-1A para a CTA1 foram bem similares, com diferença de menos de 0,5 mm/ano para cada uma das três componentes. Por outro lado, para as outras quatro estações a diferença média nas componentes V_x, V_y e V_z foram de $\pm 1,03$ mm/ano, $\pm 4,29$ mm/ano e $\pm 6,35$ mm/ano, respectivamente.

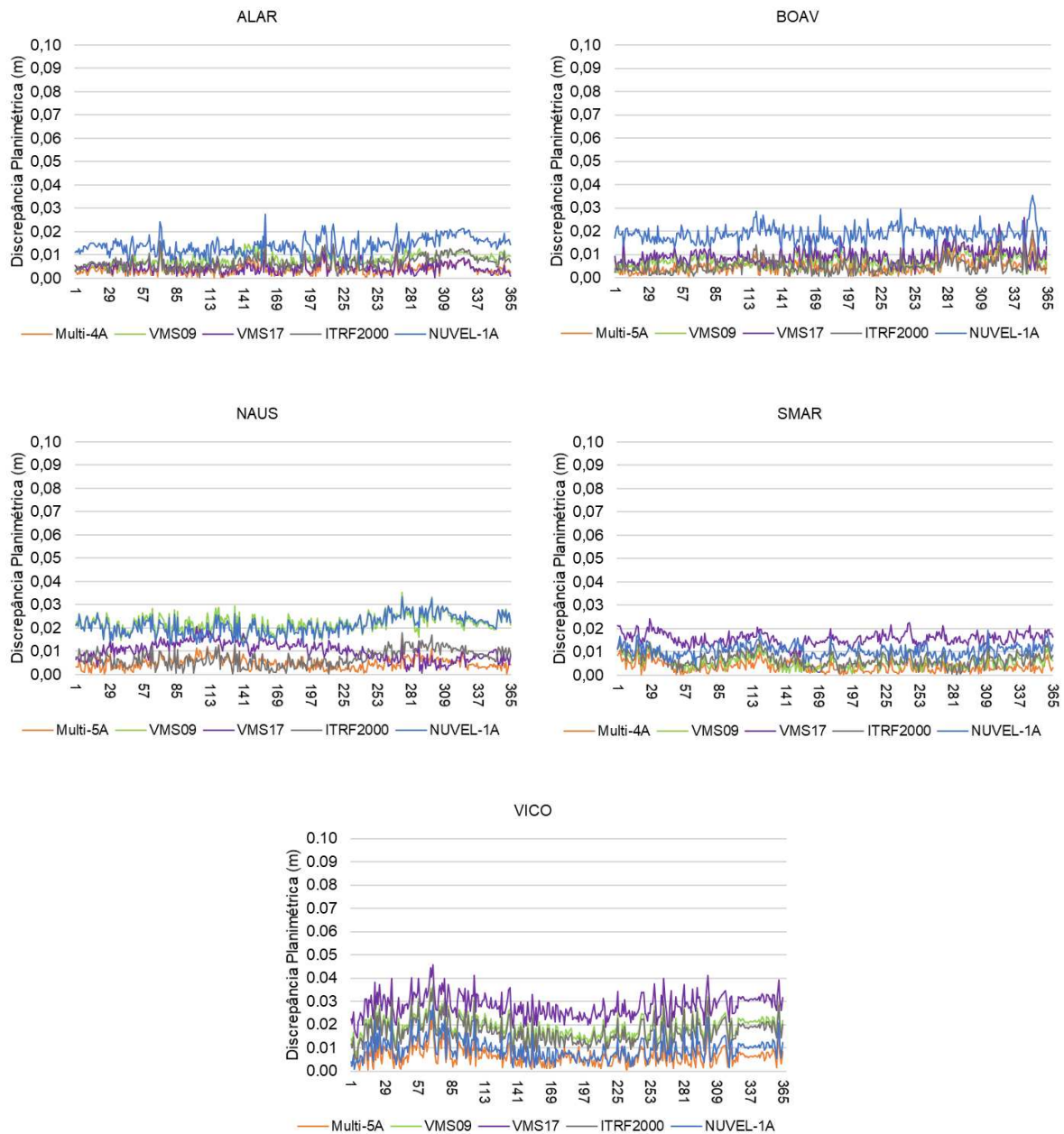
De posse das velocidades, realizou-se a atualização das coordenadas dos 365 dias do ano de 2019 para *dr/er* utilizando as monovelocidades dos modelos supracitados e comparou-se as discrepâncias com aquelas das atualizações utilizando as Multi-5A/4A, do Experimento 1.

Salienta-se que as discrepâncias altimétricas não serão analisadas, uma vez que os modelos VEMOS utilizados para comparação contemplam apenas a atualização de coordenadas planimétricas, já que as variações altimétricas são predominantemente locais e de difícil modelagem regional (DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2015). Adicionalmente, o NUVEL-1A também é um modelo horizontal (ALTAMIMI; SILLARD; BOUCHER, 2002).

De forma a auxiliar a interpretação visual das imagens, principalmente na comparação entre as diferentes estações, todos os gráficos presentes neste experimento possuem o eixo vertical abrangendo o intervalo de 0 a 0,10 m.

As discrepâncias planimétricas obtidas com os dados das estações do Brasil são exibidas na Figura 19.

Figura 19 – Discrepâncias planimétricas para as estações do Brasil obtidas através da atualização das coordenadas utilizando modelos de velocidades e multivelocidade.



Fonte: O autor (2021).

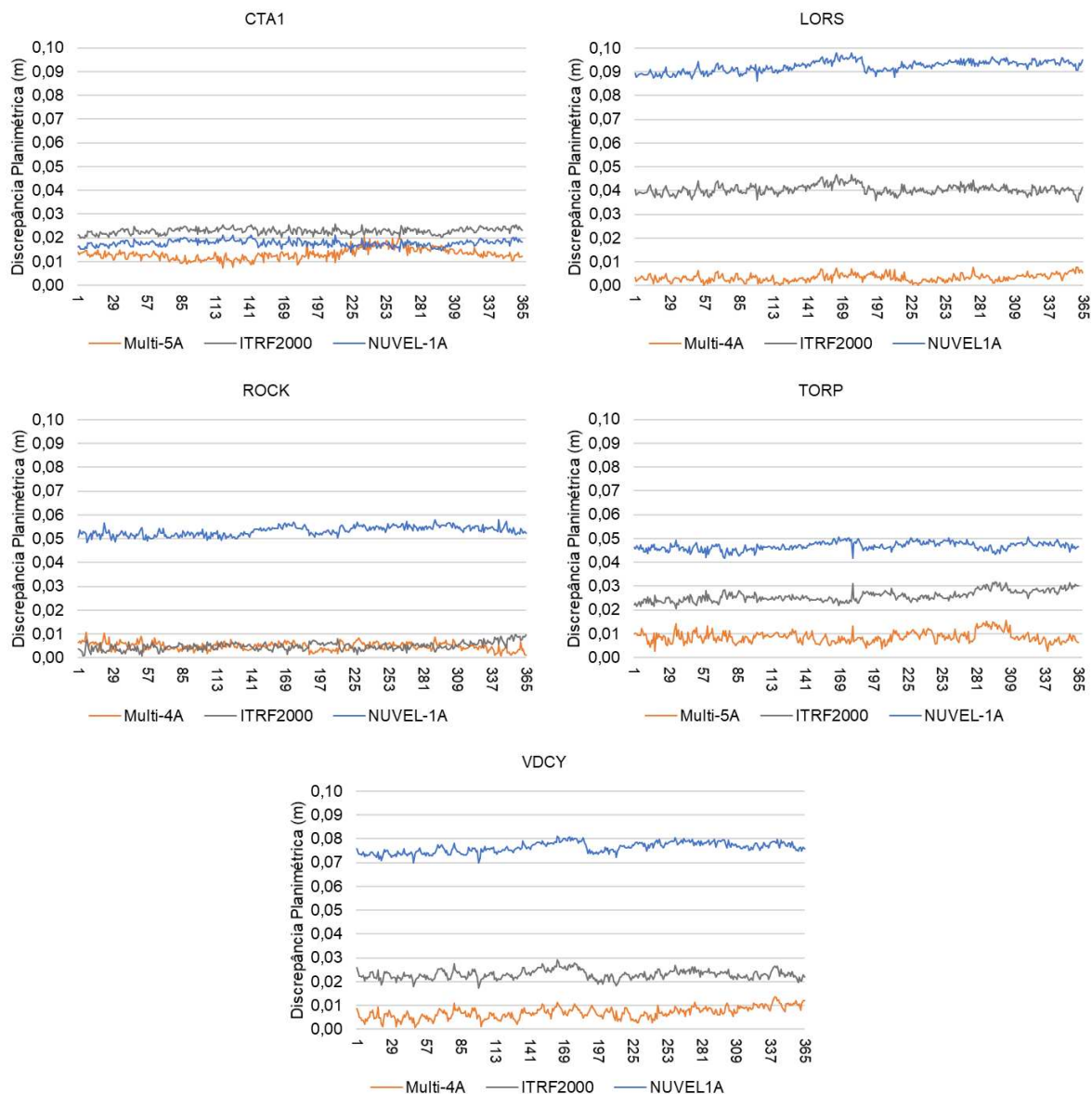
Na ALAR e BOAV as piores discrepâncias foram registradas com o NUVEL-1A, na NAUS com o VEMOS2009 e na SMAR e VICO com o VEMOS2017. O ITRF2000, por outro lado, apresentou os resultados mais consistentes entre os modelos.

As discrepâncias obtidas utilizando as Multi-5A/4A se mantiveram abaixo 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.

Em geral, para a ALAR, BOAV, NAUS e SMAR 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.

As discrepâncias planimétricas obtidas com os dados das estações dos Estados Unidos são exibidas na Figura 20.

Figura 20 - Discrepâncias planimétricas para as estações dos Estados Unidos obtidas através da atualização das coordenadas utilizando modelos de velocidades e multivelocity.



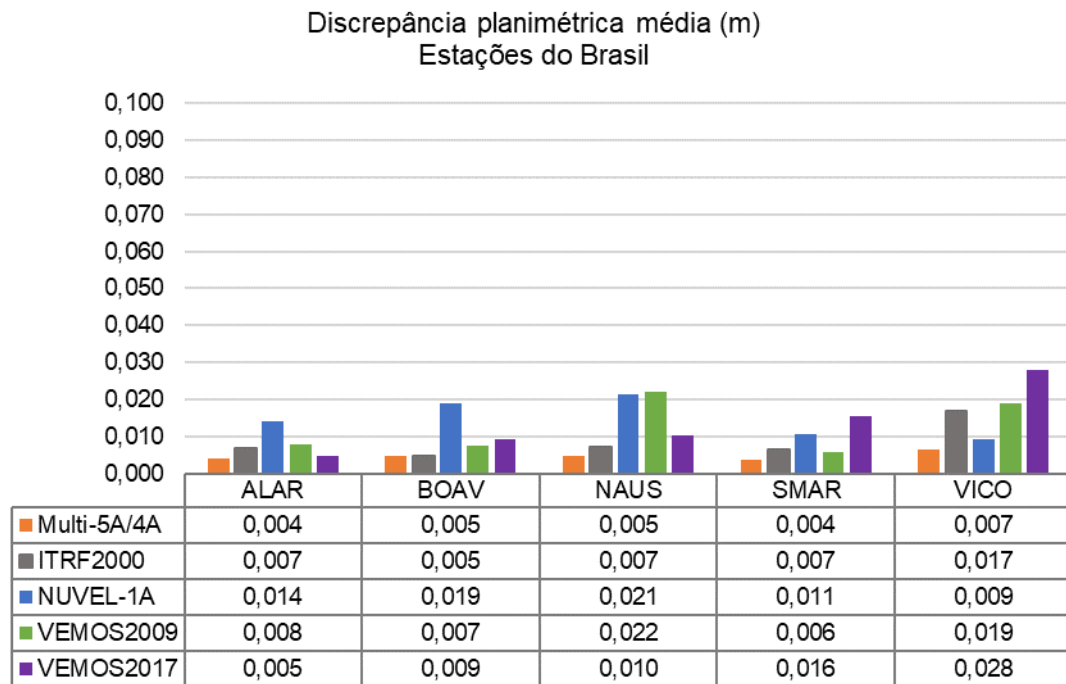
Fonte: O autor (2021).

Para as estações LORS, ROCK, TORP e VDCY pode-se notar um pior desempenho do NUVEL-1A, com as discrepâncias planimétricas variando entre 0,04 e 0,10 m. Esses resultados estão relacionados ao posicionamento dessas estações próximo à borda da placa do Pacífico

(ver Figura 4), região de alta atividade sísmica, o que faz com que os movimentos da placa nos últimos anos destoem da média de milhões de anos utilizado pelo NUVEL-1A. De fato, DeMets et al. (1994) destacam a aceleração no movimento da Placa do pacífico/Placa Norte-Americana na década de 1990, tomando como referência um ponto no Golfo da Califórnia. Na CTA1, localizada em uma região distante das bordas da Placa Norte-Americana o NUVEL-1A não só apresentou discrepâncias mais satisfatórias como também foi melhor que o ITRF2000.

De forma a auxiliar na análise da comparação entre os resultados obtidos com os modelos e as multivelocidades, calculou-se a discrepâncias planimétricas média para cada estação. Os resultados referentes às estações do Brasil estão dispostos na Figura 21.

Figura 21 - Discrepância planimétrica média referente às cinco estações do Brasil.



Fonte: O autor (2021).

O ITRF2000, mesmo sendo um modelo global, proporcionou uma discrepância média menor que o VEMOS2009 em quatro das cinco estações, sendo apenas 0,001 m pior na SMAR. Comportamento semelhante pode ser notado em comparação ao VEMOS2017, que só superou o ITRF2000 na ALAR, por uma diferença de 0,002 m.

As menores discrepâncias médias para as cinco estações foram obtidas através das Multi-5A/4A, havendo apenas um empate com o ITRF2000 na BOAV. Além disso, destaca-se que a discrepância média obtida com a multivelocidade para as estações variou apenas entre 0,004 e

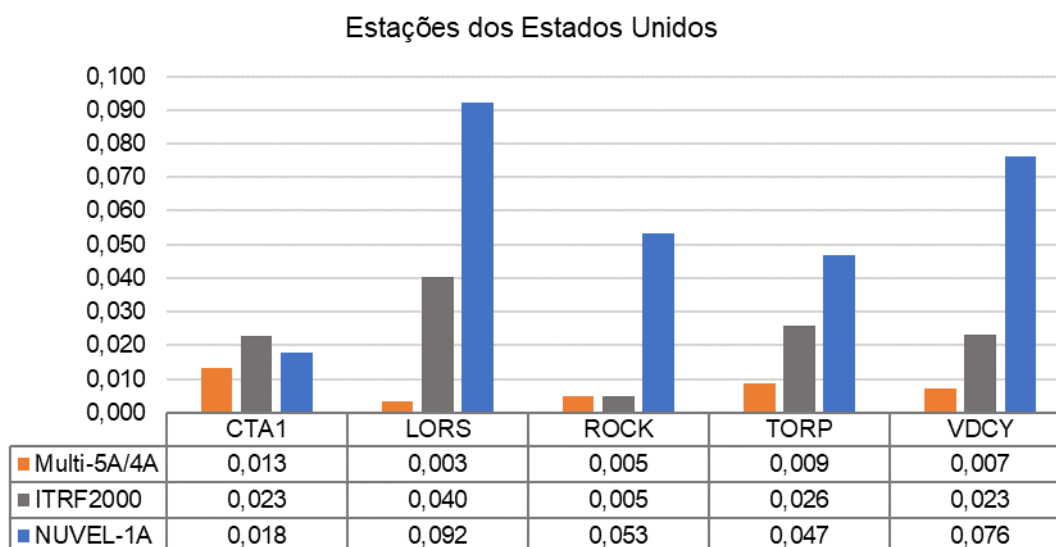
0,007 mm, contra a variação de 0,005 a 0,028 m do VEMOS2017; 0,007 a 0,022 m do VEMOS2009; 0,009 a 0,021 m do NUVEL-1A; e, 0,005 a 0,017 m do ITRF2000.

Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) testaram a compatibilização de referencial (com três conjuntos de parâmetros) e atualização de coordenadas (com 15 modelos de velocidades) para estações brasileiras. Em uma atualização de coordenadas de um período de aproximadamente 13 anos, o VEMOS2009 apresentou a 2ª melhor discrepância dentre os 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). Freitas, Dal Poz e Nascimento (2021) compararam a discrepância de 175 estações da RBMC, derivadas de reduções de coordenadas por períodos entre 10 e 19 anos, e constataram um melhor desempenho do VEMOS2009 em relação ao VEMOS2017 em 67,09% dos casos.

Portanto, mesmo comparado a um modelo de velocidade robusto como o VEMOS2009, que é empregado pelo IBGE-PPP, as Multi-5A/4A ainda mostraram desempenho superior nas cinco estações brasileiras analisadas.

As discrepâncias médias referentes às coordenadas atualizadas dos 365 dias das estações dos Estados Unidos estão dispostas na Figura 22.

Figura 22 - Discrepância planimétrica média referente às cinco estações dos Estados Unidos.



Fonte: O autor (2021).

Observando as discrepâncias médias obtidas fica mais uma vez evidente a pior performance do NUVEL-1A, pelos motivos anteriormente discutidos. O ITRF2000 apresentou resultados variados, com 5 mm de média para a ROCK e 4 cm para a LORS. Novamente nota-se a consistência das Multi-5A/4A, com discrepância média maior que 1 cm apenas na CTA1,

que possui a série temporal posicional mais ruidosa entre as estações analisadas (ver Apêndice), o que pode ter degradado a qualidade da estimação da velocidade.

3.5 Conclusões

Considerando os resultados obtidos, pôde-se observar que para as estações do Brasil as multivelocidades proporcionaram resultados planimétricos melhores (ou similares) quando comparados àqueles obtidos com as monovelocidades. Entretanto, esse cenário não se repetiu para as estações dos Estados Unidos. De forma geral, nas dez estações analisadas fica evidente a consistência dos resultados obtidos pelas Multi-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.

Quando comparada à modelos de velocidade amplamente utilizados pela comunidade acadêmica e por profissionais da área, a atualização com multivelocidade se mostrou eficaz, apresentando inclusive resultados melhores que os de modelos regionais como o VEMOS, utilizado pelo IBGE-PPP.

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, uma vez que 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 estes dois efeitos 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 automatizado 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.

Referências

ALBARICI, F. L.; GUIMARÃES, G. N.; TRABANCO, J. L.; SANTOS, M. Modelagem dos Efeitos Geodinâmicos que afetam as Medições Maregráficas e GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**. Uberlândia, MG, v. 71, n. 1, p. 75 – 98, 2019. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv71n1-46124>.

ALCAY, S.; YIGIT, C. O. Network based performance of GPS-only and combined GPS/GLONASS positioning under different sky view conditions. **Acta Geodaetica et Geophysica**, v. 52, n. 3, p. 345-356, 2017. DOI: 10.1007/s40328-016-0173-5.

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, 6., 2016, Recife. **Anais... Presidente Prudente - SP**, 2017. p. 543-550.

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**, 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, 54 pp., ISBN 978-3-86482-046-5, 2012.

ALTAMINI, Z. REBISCHUNG, P; MÉTIVIER, L; COLLILIEUX, X.. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**. 2016.

ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P.; BOUCHER, ITRF2000: A new release of the International Terrestrial Reference Frame for earth science applications, **Journal of Geophysical Research**, 107(B10), 2214. 2002. DOI: 10.1029/2001JB000561.

ALTAMIMI, Z.; SILLARD, P.; BOUCHER, C. The impact of a No-Net-Rotation Condition on ITRF2000. **Geophysical Research Letters**, VOL. 30, NO. 2, 1064, 2003. doi:10.1029/2002GL016279.

ARGUS, D.F., R.G. GORDON, and C.DEMETS, Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 12, No. 11, 13 pp.,2011. DOI: 10.1029/2011GC003751

BANVILLE, S. CSRS-PPP Version 3: Tutorial. Canadian Geodetic Survey, Surveyor General Branch, Natural Resources Canada. 2020. Disponível em: https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/sample_doc_filesV3/NRCan%20CSRS-PPP-v3_Tutorial%20EN.pdf. Acesso em jul. 2021.

BENEDITO, P. M. P.; ALBARICI, F. L.; TRABANCO, J. L. A. A influência da carga oceânica nos modelos de maré terrestre. **Revista Brasileira de Cartografia**. Uberlândia, MG, v. 70, n. 1, jan/mar, 2018. p. 114-135. DOI: 10.14393/rbcv70n1-45251.

Bevis, M., Alsdorf, D., Kendrick, E., Fortes, L. P., Forsberg, B., Smalley Junior, R. e Becker, J. "Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response". **Geophysical Research Letters**., 32 (16): 4. Acesso em 4 de junho de 2016, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL023491/abstract>.

BLEWITT, G.; D. LAVALLÉE. Effect of annual signals on geodetic velocity. **Journal of Geophysical Research**. 107(B7), 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.

BLEWITT, G.; HAMMOND, W. C. KREEMER, C.. Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science, *Eos*, 99, 2018. DOI:10.1029/2018EO104623. Disponível em: <https://eos.org/science-updates/harnessing-the-gps-data-explosion-for-interdisciplinary-science>. Acesso em: 30 mar. 2021.

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.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 2015, 709 p.

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.

BURCH, T. Data collection of WGS 84 information — or is it?. *GPS World*. 2016. Disponível em: <<https://www.gpsworld.com/data-collection-of-wgs-84-information-or-is-it/>>. Acesso em: set. de 2021.

CAÑADA, L. G. **Análisis de series temporales en estaciones permanentes GPS**. Tese de doutorado. Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2016.

CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana**. 188 f. 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, no 1, p.86-100, jan-mar, 2012.

CORS (2021). Continuously Operating Reference Stations. Estados Unidos. Disponível em: <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/>. Acesso em: 06 mar. 2021.

COSTA, S. M. A., MATOS, A. C. O. C. e BLITZKOW, D. “Validation of the Land Water Storage from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) with Gauge Data in the Amazon Basin.” **Boletim de Ciências Geodésicas** 18 (2): 262–81. doi:10.1590/S1982-21702012000200006. 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.

DEMETS, C., R. G. Gordon, D. F. Argus, and S. Stein, Current plate motions, **Geophysical Journal International**. 101, 425– 478, 1990.

DEMETS, C., R.G. GORDON, D.F. ARGUS, and S. Stein, Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions, **Geophysical Research Letters**. 21, 2191-2194, 1994. DOI: 10.1029/94GL02118.

DEMETS, C. ; GORDON, R. G. ; ARGUS, D. F. Moving beyond NUVEL-1A: The MORVEL estimates of geologically recent global plate motions. American Geophysical Union, Fall Meeting 2006, abstract id. G41A-05

DEMETS, C.; GORDON, R. G.; ARGUS, D. F. Geologically current plate motions, **Geophysical Journal International**, Volume 181, Issue 1, April 2010, Pages 1–80, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>

DOW, J., R. E. Neilan, and C. Rizos (2009), The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems, **Journal of Geodesy**. 83(3–4), 191–198, doi:10.1007/s00190-008-0300-3.

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, jul. 2012. DOI: https://doi.org/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

EBNER, R.; FEATHERSTONE, W. E. How well can online GPS PPP post-processing services be used to establish geodetic survey control networks? **Journal of Applied Geodesy**, v. 2, n. 3, p. 149-157, 2008.

EPN (2021). EUREF Permanent GNSS Network. Disponível em: <https://www.epncb.oma.be>. Acesso em: 27 fev. 2021.

EUREF (2021). EUREF Permanent Network. Disponível em: euref.eu/euref_epn.html. Acesso em jul. 2021.

FREITAS, K. X. S., DAL POZ, W. R., e NASCIMENTO, L. A.. Avaliação do Impacto da Compatibilização de Referencial das Velocidades na Redução de Coordenadas no PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, vol. 73, n. 1, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv73n1-55416>.

GEOSCIENCE AUSTRALIA (2021). Applying geoscience to Australia's most important challenges. Global Navigation Satellite System Networks. Austrália. Disponível em: <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/gnss-networks>. Acesso em: 25 mar. 2021.

GEIRSSON, H.; D'OREYE, N.; MASHAGIRO, N.; SYAUSWA, M.; CELLI, G.; KADUFU, B.; SMETS, B.; KERVYN, F. Volcano-tectonic deformation in the Kivu Region, Central Africa: Results from six years of continuous GNSS observations of the Kivu Geodetic Network (KivuGNet). **Journal of African Earth Sciences**. Elsevier, Ny, v. 134, 2017. p. 809-823. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.013>.

GUO, Q. Precision comparison and analysis of four online free PPP services. **GPS Solutions**. Heidelberg, BE, v. 19, n. 4, p. 537–544, 11 de out. 2014. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s10291-014-0413-5>. Acesso em 21 de dez.2020.

HATANAKA, Y. . A Compression Format and Tools for GNSS Observation Data, **Bulletin of the Geographical Survey Institute**, 55, 21-30. 2008 Disponível em: <http://www.gsi.go.jp/ENGLISH/Bulletin55.html>. Acesso em 21 jan. 2021.

HYNDMAN, R. J. Package 'forecast': Forecasting Functions for Time Series and Linear Models. Version 8.14. 2021. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/article/view/v027i03>. Acesso em: 29 abr. 2021.

IBGE (2015). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 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). Disponível em: http://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/nota_tecnica_termino_periodo_transicao_sirgas2000.pdf. Acesso em: 03 out. 2020.

IBGE (2020). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do usuário - IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS. Versão: maio 2020. Editor: Coordenação de Geodésia - Diretoria de Geociências. Brasil. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 16 set. 2020.

IBGE (2021a). 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/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html>. Acesso em: 14 mar. 2021.

IBGE (2021b). INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA-PPP (IBGE-PPP). Modelo para conversão de altitudes geométricas (dadas pelos GNSS) em altitudes físicas (compatíveis com o Datum Vertical do SGB). 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/10855-modelo-de-ondulacao-geoidal.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 09 aug. 2021.

IGS (2021a). International GNSS Service. Disponível em: <http://www.igs.org/about>. Acesso em: 11 jan. 2021.

IGS (2021b). International GNSS Service. Reference Frame Working Group Charter and Members. Disponível em: <https://kb.igs.org/hc/en-us/articles/202036033-Reference-Frame-Working-Group-Charter-and-Members>. Acesso em: 09 ago. 2021.

IMAKIHERE, T. GEONET: Nationwide GPS array of Japan. **Geospatial World**, 2010.

ISIOYE, O. A.; MOSES, M.; ABDULMUMIN, L. Comparative Study of Some Online GNSS Post-Processing Services at Selected Permanent GNSS Sites in Nigeria. **IntechOpen**. 2019. DOI: 10.5772/intechopen.79924.

ITRF (2020). INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME. Call for participation. Disponível em: http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/CFP-ITRF2020.pdf. Acesso em: mai. 2020

ITRF (2021). INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME. Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/ITRF/itrf.html>. Acesso em: 26 fev. 2021.

IUGG (1991). INTERNATIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHYSICS. Resolution on the Conventional Terrestrial Reference System. Disponível em: <https://www.iers.org/IERS/EN/Science/Recommendations/resolutionCTRS.html;jsessionid=26E8EB6378A697B639D2F9E1D5C268C2.live2>. Acesso em 25 ago. 2020

JEKELI, C. **Geometric reference systems in geodesy**. Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Sciences, OST – Ohio State University, 209 p., 2012.

JIN, S. & ZHUA, W. A revision of the parameters of the NNR-NUVEL-1A plate velocity model. **Journal of Geodynamics - J GEODYNAMICS**. 38. 85-92. 10.1016/j.jog.2004.03.004. 2004.

KIM, S. K.; BAE, T. S. Long-Term GNSS Analysis for Local Geodetic Datum After 2011 Tohoku Earthquake. **The Journal Of Navigation**, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463317000595>.

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

KOWALCZYK, K.; RAPINSKI, J. Verification of a GNSS Time Series Discontinuity Detection Approach in Support of the Estimation of Vertical Crustal Movements. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 149, 2018. p. 1-15. DOI: <https://www.mdpi.com/2220-9964/7/4/149>.

MACIUK, K., SZOMBARA, S. Annual crustal deformation based on GNSS observations between 1996 and 2016. **Arabian Journal of Geosciences**. 11, 667. 2018. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4022-4>

MELGAR, Diego & Crowell, Brendan & Geng, J. & Allen, Richard & Bock, Yehuda & Riquelme, Sebastian & Hill, Emma & Protti, Marino & Ganas, Athanassios. Earthquake magnitude calculation without saturation from the scaling of peak ground displacement: GPS PGD SCALING. **Geophysical Research Letters**. 2015. 42. n/a-n/a. 10.1002/2015GL064278.

MOREIRA, D. M. **Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica**. MS diss., Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2010.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de Séries Temporais**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2006.

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>. Acesso em: 17 set. 2020.

NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. 2016. 73 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa. Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Viçosa, MG, 2016.

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, p. 150-165, 2017.

NASCIMENTO, L. A. **Análise temporal do efeito da carga hidrológica nas deformações em estações GNSS localizadas na Amazônia brasileira**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2021.

NBMG (2021). NEVADA BUREAU OF MINES AND GEOLOGY. Geodesy & Tectonics. Disponível em: <https://nbgm.unr.edu/Research/Geodesy.html>. Acesso em: 30 mar. 2021.

NGI (2021). National Geio-Spatial Information. TrigNet - continuously operating GNSS network. Disponível em: <http://www.ngi.gov.za/index.php/what-we-do/geodetic-and-control-survey-services/37-trignet-continuously-operating-gnss-network>. Acesso em jul. 2021.

NISCHAN, T. (2016): GFZRNX - RINEX GNSS Data Conversion and Manipulation Toolbox. **GFZ Data Services**. DOI: 10.5880/GFZ.1.1.2016.002

NOAA (2021). National Oceanic and Atmospheric Administration. Ocean Exploration. What is a hotspot volcano?. Disponível em: <https://oceanexplorer.noaa.gov/facts/volcanic-hotspot.html?fbclid=IwAR1BMwUhi9-S5dLOOId20Hy9xvU0zeI8WINuAEHV3HZW72wcMmY5QFJf3dg>. Acesso em: 20 jul. 2021.

NOLL, C. (2014). SLR, GNSS, VLBI, and DORIS Networks: ILRS+IGS+IVS+IDS. NASA Goddard Space Flight Center. United States of America.

NRCAN (2021a). NATURAL RESOURCES CANADA. CSRS-PPP Online Computation. Disponível em: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geomatics/geodetic-reference-systems/toolsapplications/10925>. Acesso em: 20 jan. 2021.

NRCAN (2021b). NATURAL RESOURCES CANADA. Precise Point Positioning. Disponível em: <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>. Acesso em: 20 jul. 2021.

ORGN (2021). Oregon Real-time GNSS Network. Disponível em: <https://www.oregon.gov/odot/ORGN/Pages/about-us.aspx>. Acesso em: jul. 2021.

OSO (2021). Onsala Space Observatory. OCEAN tide loading provider. Disponível em: <<http://holt.oso.chalmers.se/loading/>>. Acesso em: 21 mai. 2021.

PEARLMAN, M. R.; J. J. DEGNAN; J. M. BOSWORTH, The International Laser Ranging Service, **Advances in Space Research**. 30(2), 135–143. 2002.

PETIT, G; LUZUM, B (eds.). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). IERS Technical. Note No. 36. IERS Conventions. Frankfurt am Main, 2010. Disponível em: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Acesso em: 16 fev. 2021.

POYRAZ, A. S.; Teoman, U.; Kahraman, M. ; Turkelli, N. ; Samut Cambaz, M. ; Komec Mutlu, A.; Rost, S. ; Houseman, G. ; Thompson, D. ; Cornwell, D.; Utkucu, M.; Gulen, L.. New constraints on micro-seismicity and stress state in the western part of the North Anatolian Fault Zone: Observations from a dense seismic array. (2015). **Tectonophysics**. 190-201.

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**. Uberlândia, n. 66/3, p. 569-579, 2014.

R CORE TEAM (2021). R: The R Project for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <http://www.Rproject.org/>. Acesso em: 07 mar. 2021.

RAJNER, M. Detection of ice mass variation using GNSS measurements at Svalbard. **Journal of Geodynamics**, v. 121, 2018. p. 20-25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2018.06.001>.

RAMATSCHI, M; BRADKE, M; NISCHAN, T; MÄNNEL, B. GNSS data of the global GFZ tracking network. V. 1. GFZ Data Services, 2019. doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2020.001

RAMOS, M. P.; **Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas no PPP**. 2015. 114 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa. Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica, Viçosa, MG, 2015.

RAMOS, DAL POZ e CARVALHO, 2016. Análise Das Possibilidades De Transformação De Referencial E Atualização De Coordenadas Estimadas Pelo PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 22, n. 3, 2016.

RAMOS, M. DE P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Determinação de Velocidades das Estações da RBMC com Uso do Software SARI . **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 2, p. 453-469, 6 abr. 2021.

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.

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.

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, Vol 152. 2020. DOI: 10.1007/1345_2020_91.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, Alvaro. SARI: interactive GNSS position time series analysis software. **GPS Solutions**, v. 23, n. 2, p. 52, 2019. DOI. 10.1007/s10291-019-0846-y

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações. **Revista Brasileira de Geofísica**. Presidente Prudente-SP, v.18, n.2, pp.161-172, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2000000200005>.

SCEDC (2021). Southern California Earthquake Center. Caltech.Dataset. DOI:10.7909/C3WD3xH1. Disponível em: <https://service.scedc.caltech.edu/eq-catalogs/radius.php>. Acesso em 03 mai. 2021.

SCHUH H., and D. BEHREND (2012), VLBI: A fascinating technique for geodesy and astrometry. **Journal of Geodynamics**. 61, 68–80, DOI:10.1016/j.jog.2012.07.007.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods and applications**. 2nd ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003.

SEN, P. K.. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**. 63, 1379–1389. 1968.

SIGMUNDSSON, F., et al.. Segmented lateral dyke growth in a rifting event at Bárðarbunga volcanic system, Iceland, **Nature**, 517, 191– 195. 2015.

SIRGAS (2021a). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Modelo de velocidade para o SIRGAS. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model>. Acesso em: 28 fev. 2021.

SIRGAS (2021b). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Sistema de Referência Geocêntrico. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-definition/>. Acesso em: 29 fev. 2021.

SIRGAS (2021c). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Uso de velocidades no processamento de dados GNSS. 2021c. Disponível em: <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/using-velocities-gnss>. Acesso em: 01 mar.. 2021.

STALLER, A., Álvarez-Gómez, José.Antonio., Luna, M.P., Béjar-Pizarro, M., Gaspar-Escribano, J.M., Martínez-Cuevas, S., Crustal motion and deformation in Ecuador from cGNSS time series, **Journal of South American Earth Sciences**. 2018. DOI: 10.1016/j.jsames.2018.05.014.

TERRINHA, Pedro. 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, Maio de 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**. 12, 85–91. 1950.

UNAVCO (2021). Plate Motion Calculator. Disponível em: <http://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html> . Acesso em: 19 set 2020

USGS (2021). U.S. Geological Survey. Hotspots: Mantle thermal plumes. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/gip/dynamic/hotspots.html>. Acesso em: 19 jul. 2021.

WESTON, N. D. e SOLER, T. Rigorous Geodetic Positioning in the Americas. In: FIG REGIONAL CONFERENCE, 8, 2012. Montevideo, Uruguay, **Anais...** Montevideo. 2012. p. 1-13.

WILLIS, P., et al.. The International DORIS Service: Toward maturity. **Advances in Space Research**. 45(12), 1408–1420. 2010. DOI:10.1016/j.asr.2009.11.018.

VENTORIM, B. G; DAL POZ, W. R. Avaliação do desempenho dos sistemas GPS e GLONASS no posicionamento por ponto preciso online, combinados e individualmente. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 22, n. 2, p. 264-281. Abr–jun 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000200015>.

YIGIT, C. O.; GIKAS, V.; ALCAY, S.; CEYLAN, A. Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS postprocessed PPP. **Survey Review**, v. 46, n. 336, p. 155-166, 2014. DOI: 10.1179/1752270613Y.00000000068

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**. 2014. 105 f. Tesis (Doctor en Ciencias Físicas). Escuela Técnica Superior de Ingenieros em Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad Politécnica de Madri. Madri, 2014.

4 CONCLUSÕES GERAIS E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve como um dos objetivos avaliar o impacto da compatibilização do referencial de velocidades no processo da atualização de coordenadas no PPP. Analisando dados de 175 estações da RBMC processados utilizando o IBGE-PPP, pôde-se verificar que a compatibilização de referencial das velocidades se mostrou eficaz. Das 1513 coordenadas obtidas para cada velocidade, em 62,92% dos casos a VEMOS2009-CCR apresentou as menores discrepâncias, seguida pela VEMOS2017-CCR com 29,54%, VEMOS2009-SCR com 7,21% e VEMOS2017-SCR com 0,33%.

Considerando apenas os resultados de velocidades CCR dos dois modelos, o VEMOS2009 apresentou 67,09% das menores discrepâncias, e o VEMOS2017 32,91%. Para as velocidades SCR, a superioridade do VEMOS2009 foi ainda mais expressiva, possuindo 93,62% das menores discrepâncias, contra 6,28% do VEMOS2017.

Em relação à diminuição das discrepâncias após a compatibilização de referencial das velocidades, verificou-se que, para o VEMOS2009, 85,86% das coordenadas apresentaram uma redução na discrepância após a atualização. Já para o VEMOS2017 essa diminuição ocorreu em 98,61% das coordenadas. Entretanto, vale destacar que a maior porcentagem de discrepâncias diminuídas pelo VEMOS2017 não necessariamente significa discrepâncias menores que as do VEMOS2009 (seja CCR ou SCR).

Na comparação da metodologia apresentada nesta pesquisa com a metodologia empregada pelo IBGE-PPP para a atualização das coordenadas, as discrepâncias obtidas com a velocidade VEMOS2009-CCR apresentaram melhores resultados em relação ao IBGE-PPP em 100% das coordenadas analisadas. Já a VEMOS2017-CCR apresentou resultados variados, com melhor performance que o IBGE-PPP nas estações ALAR, BOAV e ROGM, e pior nas estações SMAR e VICO, com as estações SALU e TOPL apresentando alternância. Já as velocidades SCR apresentaram majoritariamente resultados piores que os do IBGE-PPP.

Outro objetivo desta pesquisa foi avaliar o potencial da realização do procedimento de atualização temporal de coordenadas 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. Foram analisados dados de 10 estações GNSS, sendo cinco localizadas no Brasil e cinco nos Estados Unidos.

Considerando as cinco estações do Brasil, as Multi-5A/4A apresentaram os melhores resultados de discrepância planimétrica média, com destaque para a NAUS, 0,005 m contra os 0,012 m da Mono-10A/8A. Ademais, a maior discrepância planimétrica média Multi-5A/4A obtida foi de apenas 0,007 m, para a VICO. Entretanto, deve salientar que as diferenças entre as Mono-10A/8A e Multi-5A/4A não foram significativas, além de apresentar os mesmos valores na ALAR e BOAV.

Já para as estações dos Estados Unidos, os resultados planimétricos foram inconclusivos, uma vez que as Multi-5A/4A foram melhores que as Mono-10A/8A na ROCK, iguais na LORS e piores na CTA1, TORP e VDCY. Além disso, as Multi-2A foram expressivamente piores que as Multi-5A/4A na LORS, ROCK e VDCY, mas melhor na CTA1 e TORP. Portanto nenhum padrão pôde ser notado, ainda que 4 das 5 estações estejam próximas geograficamente.

Em relação à altimetria, os resultados foram mistos, com as multivelocidades sendo melhores em três das estações do Brasil e apenas duas dos Estados Unidos. Nas dez estações analisadas fica evidente a consistência dos resultados obtidos pelas Multi-5A/4A, majoritariamente milimétrica (ordem de grandeza similar às precisões das coordenadas oriundas do processamento de arquivos de 24 horas de rastreamento (L1/L2) e em modo estático no IBGE-PPP), seja em uma atualização de 8 ou 10 anos, em estações localizadas perto ou distantes das bordas das placas ou sob fortes efeitos de cargas hidrológicas.

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.

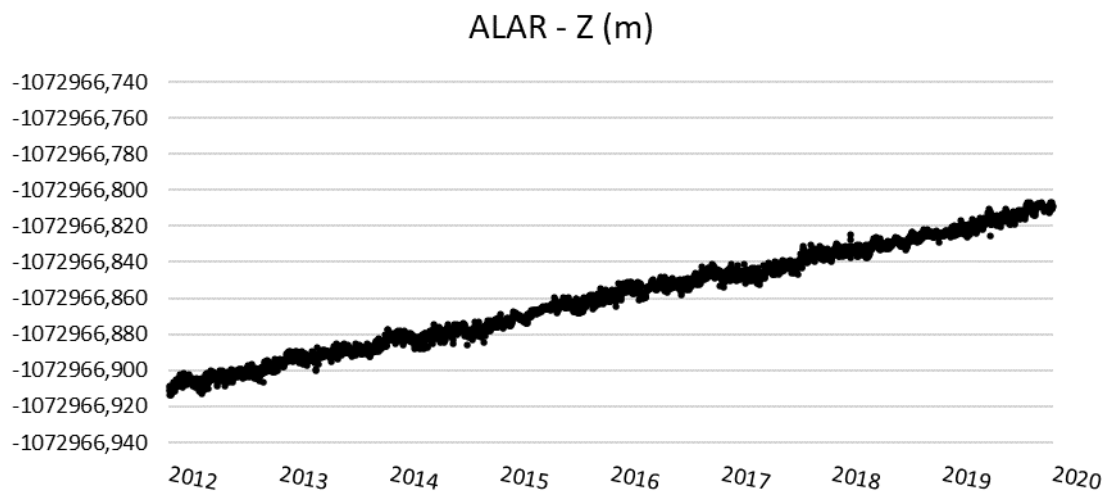
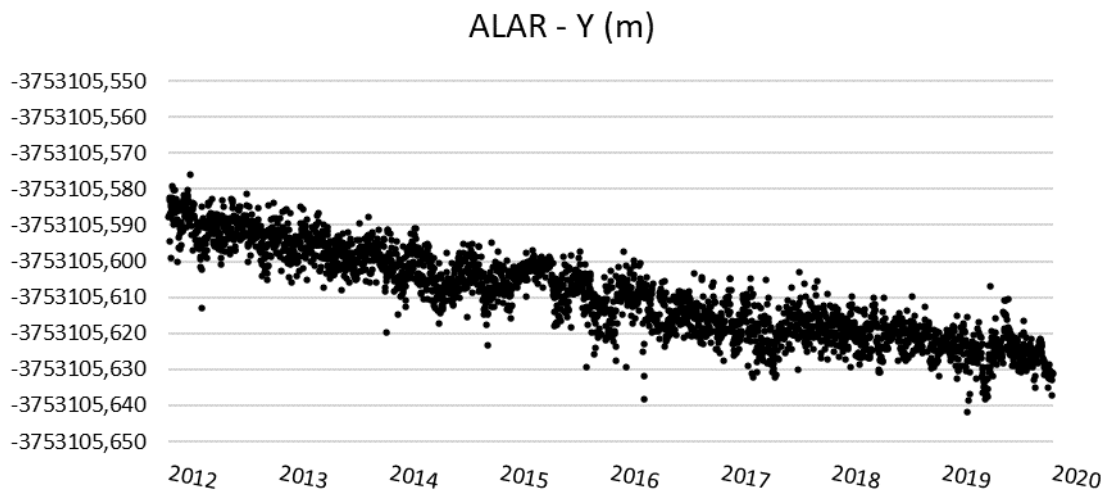
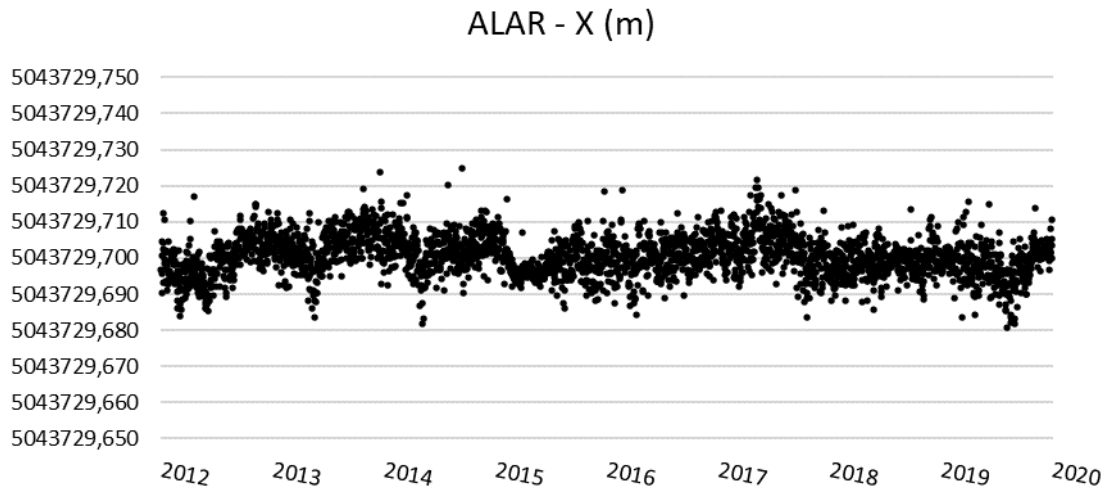
Ademais, destaca-se a potencialidade do software RINEXHub como ferramenta de suporte às investigações científicas, uma vez que permite a geração e manipulação de séries temporais posicionais, assim como a atualização de coordenadas de forma eficiente e eficaz.

Para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam desenvolvidos procedimentos metodológicos fundamentados em técnicas estatísticas robustas, fundamentadas 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

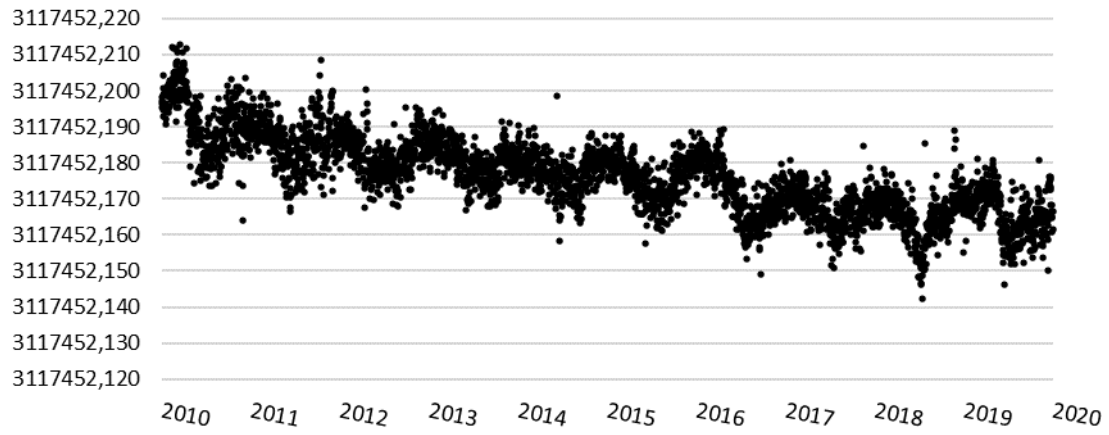
Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) podem conduzir a resultados significativos na análise das séries e estimação das velocidades. Por fim, recomenda-se ainda considerar nos experimentos estações GNSS localizadas em bordas de outras placas tectônicas ou localizadas em regiões com movimentos significativos de placas de gelo, como ilhas no Ártico.

APÊNDICE

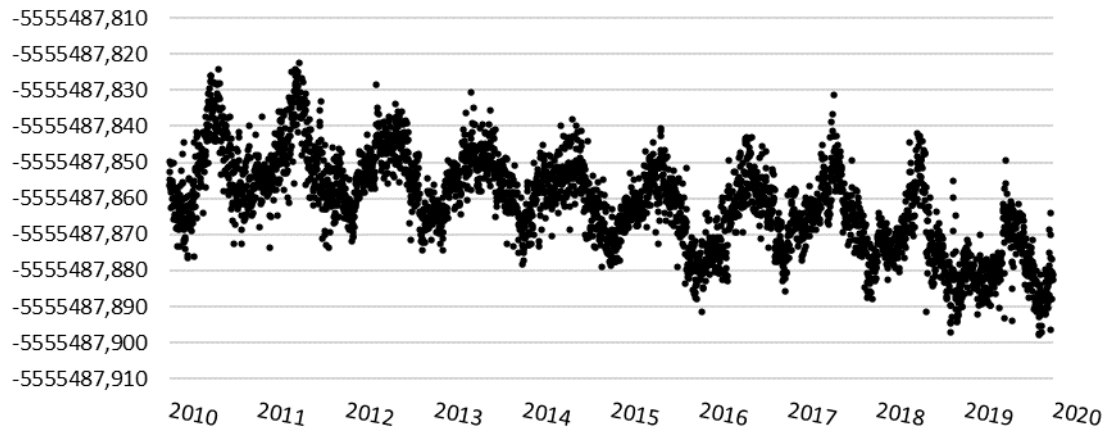
Séries temporais posicionais das coordenadas cartesianas.



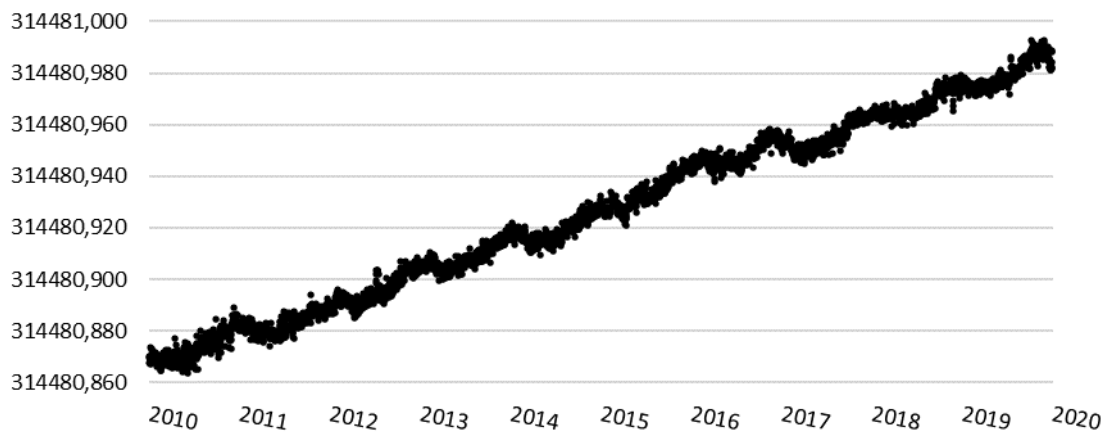
BOAV - X (m)



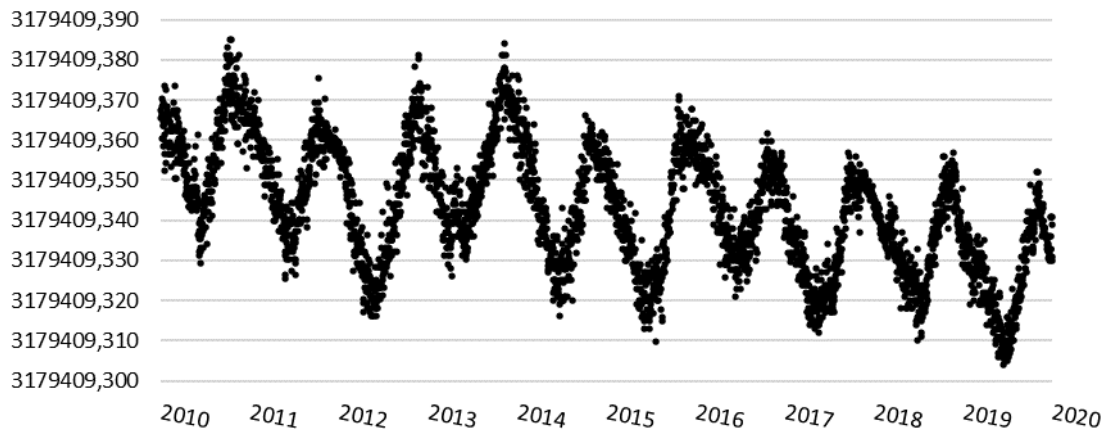
BOAV - Y (m)



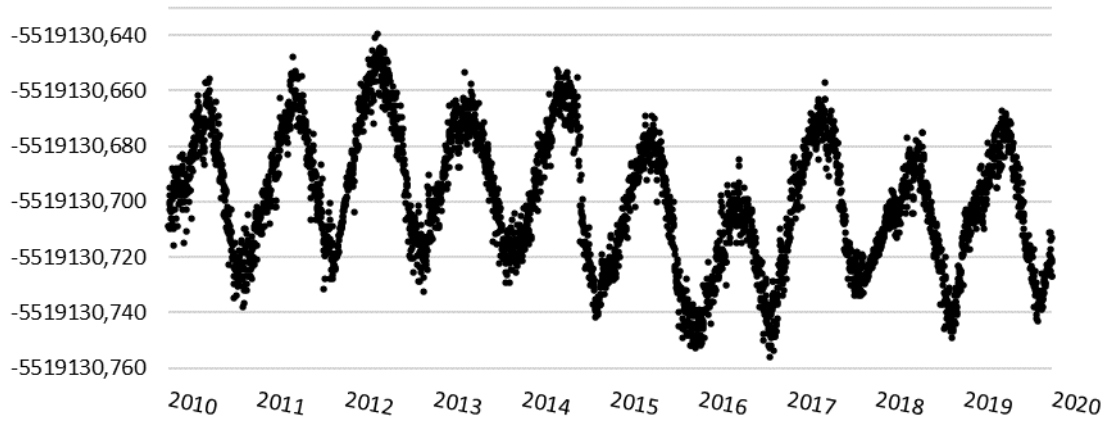
BOAV - Z (m)



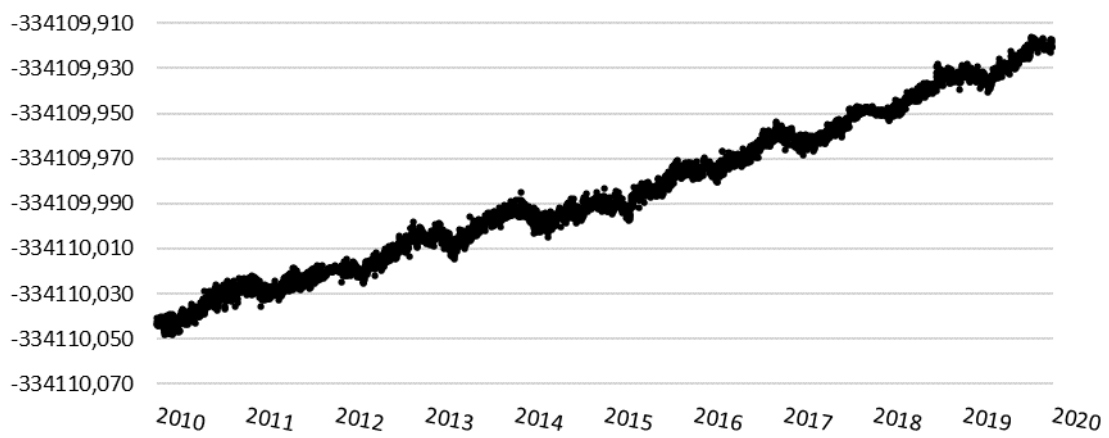
NAUS - X (m)

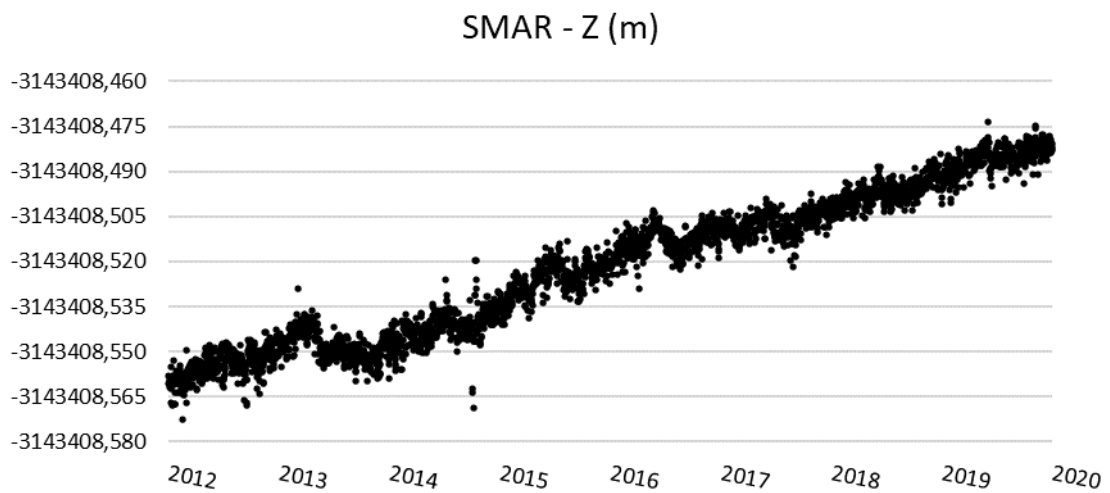
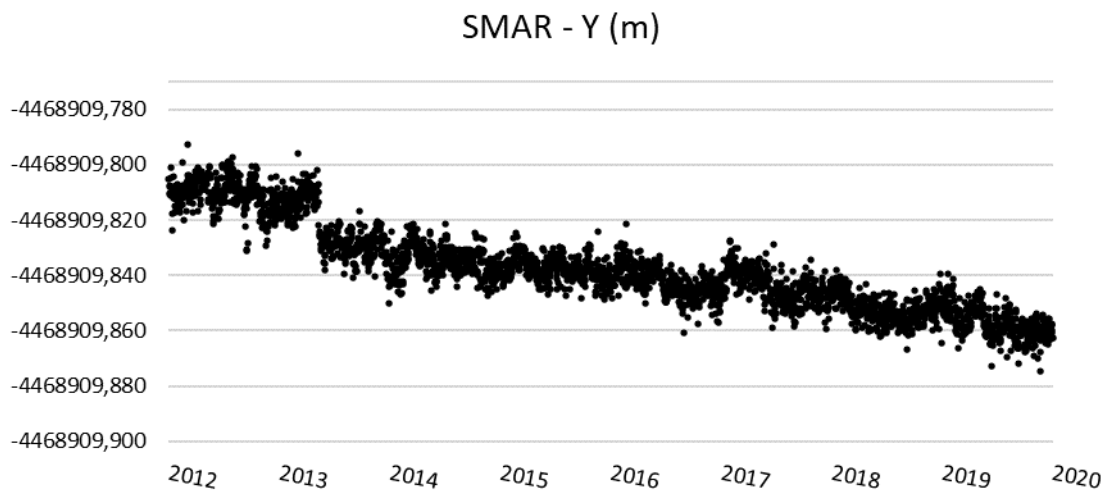
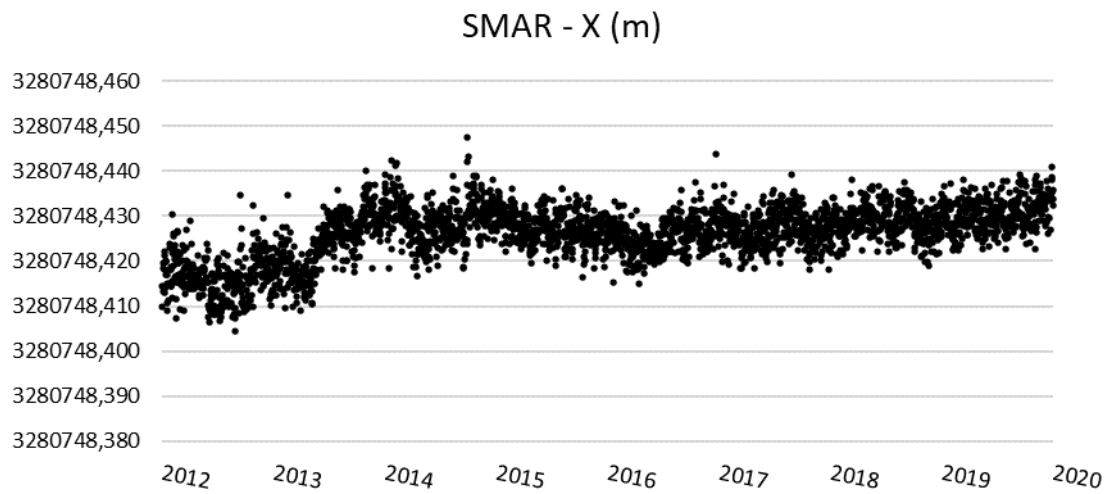


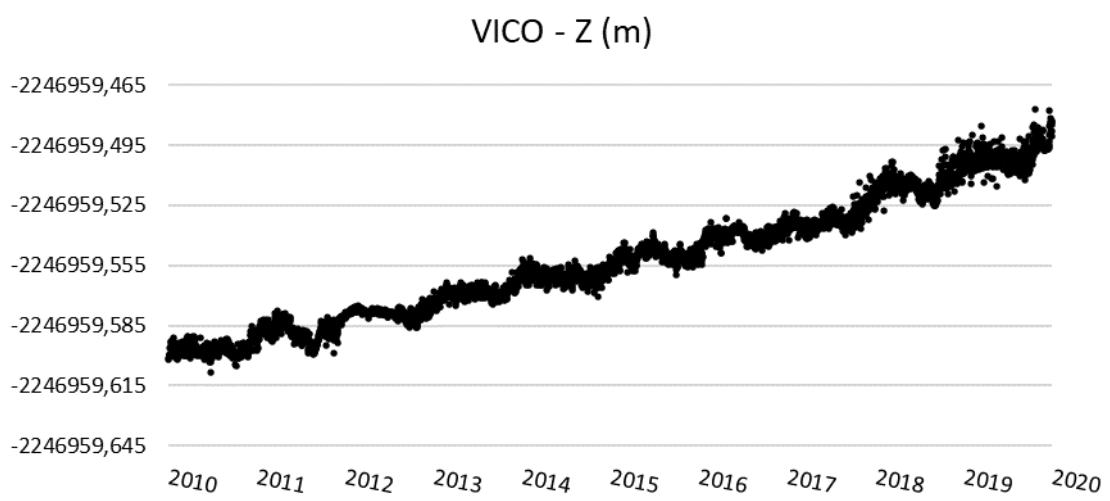
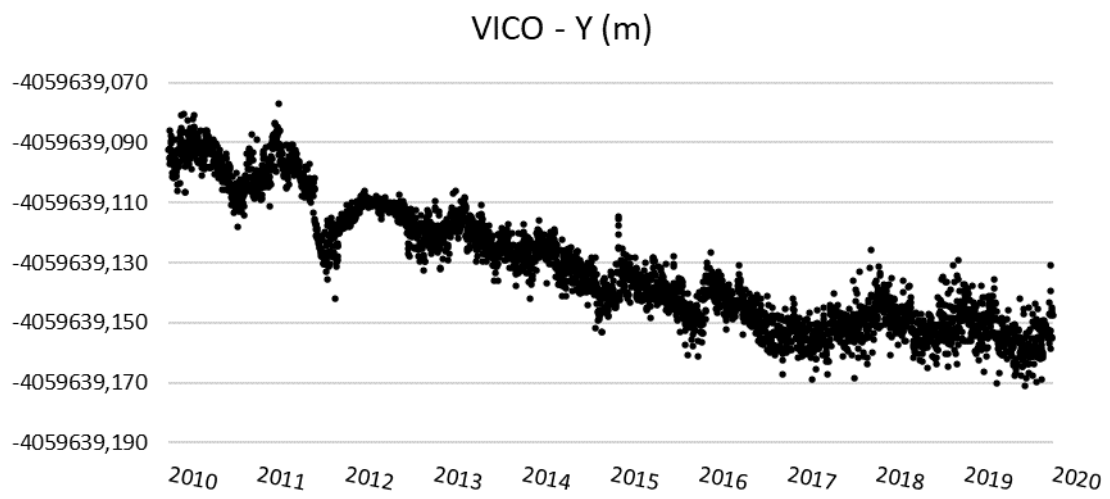
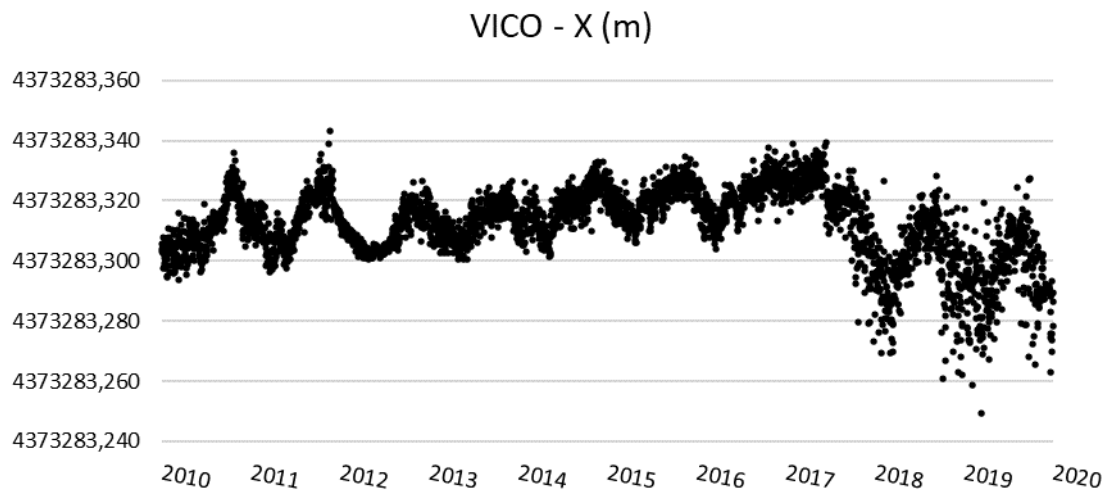
NAUS - Y (m)

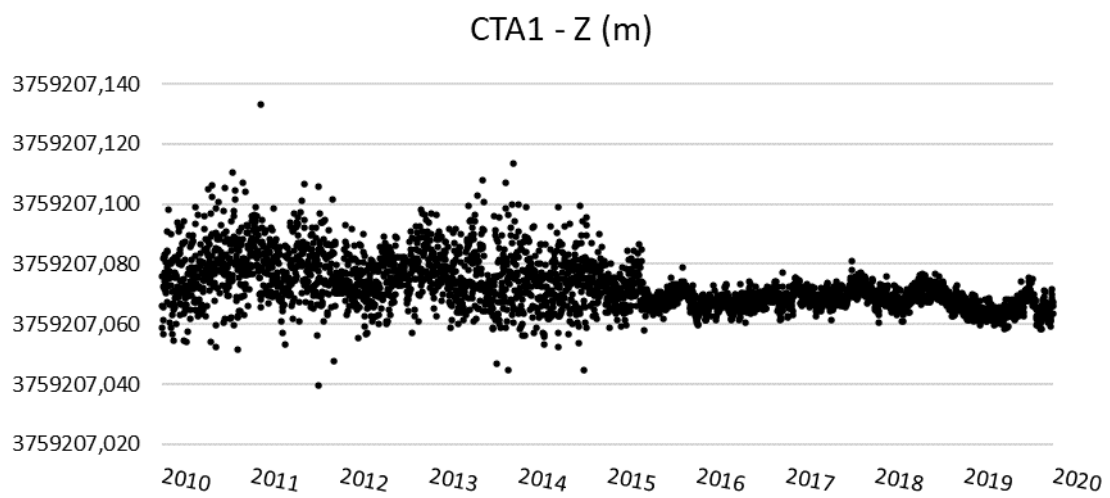
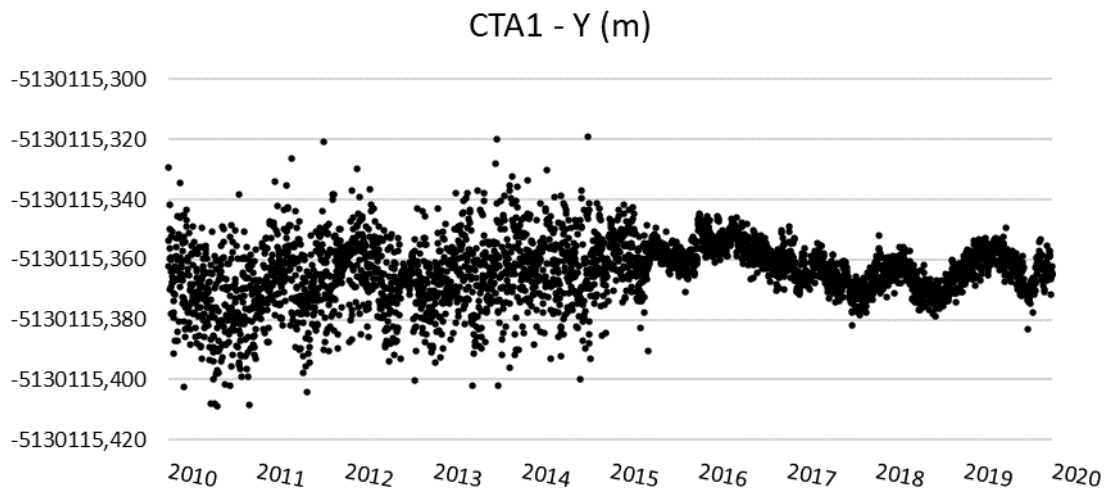
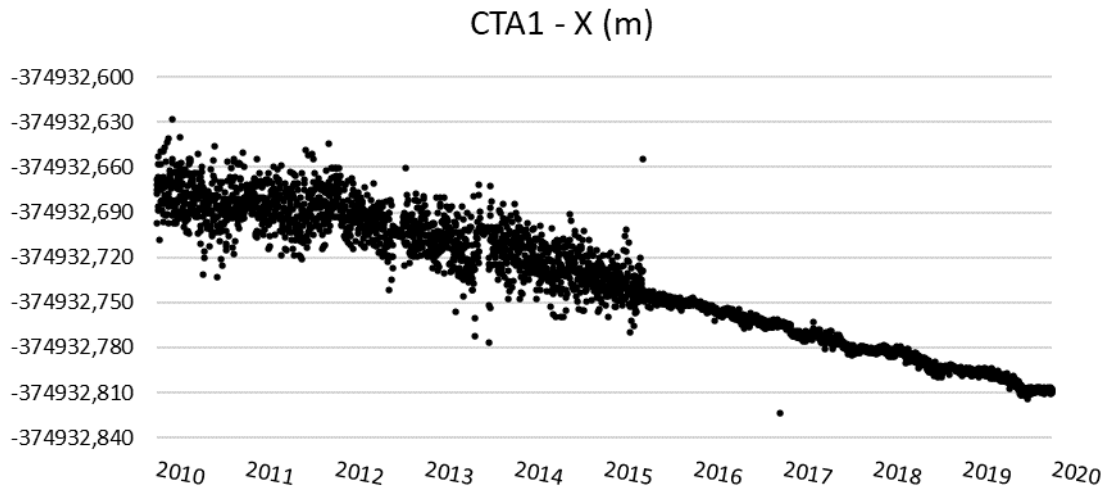


NAUS - Z (m)

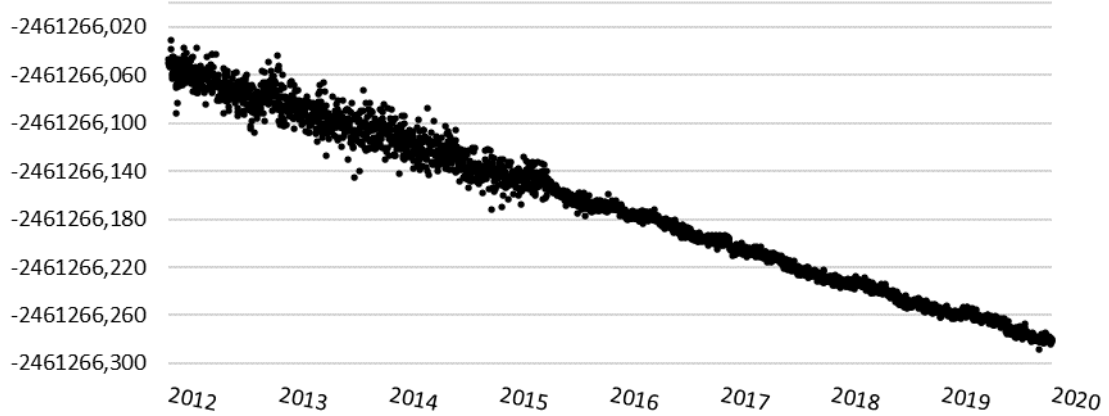




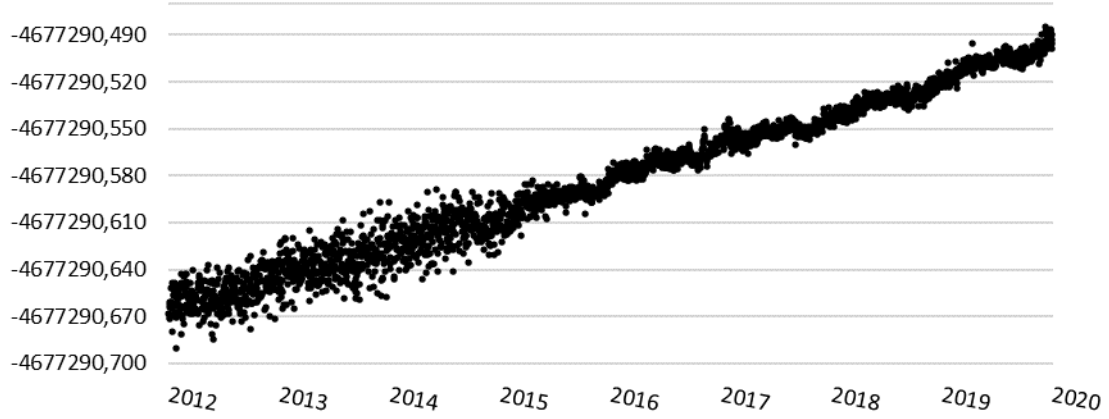




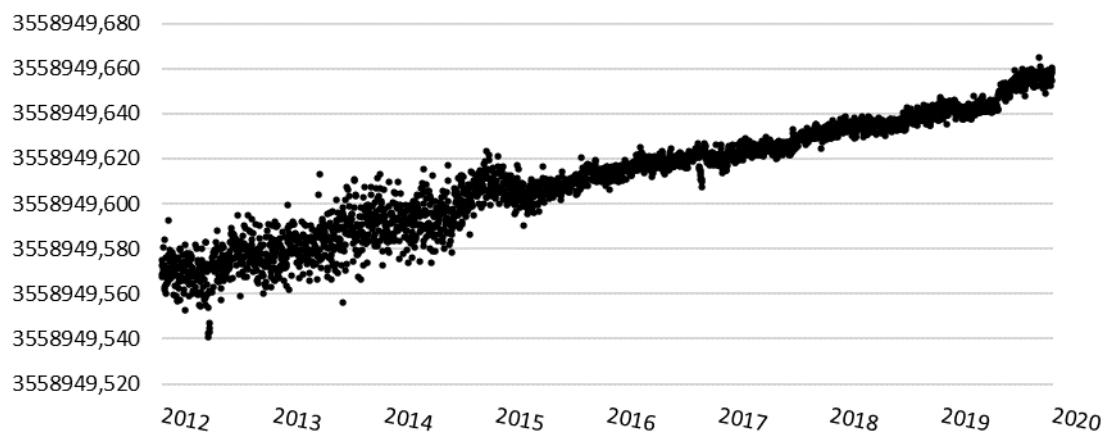
LORS - X (m)

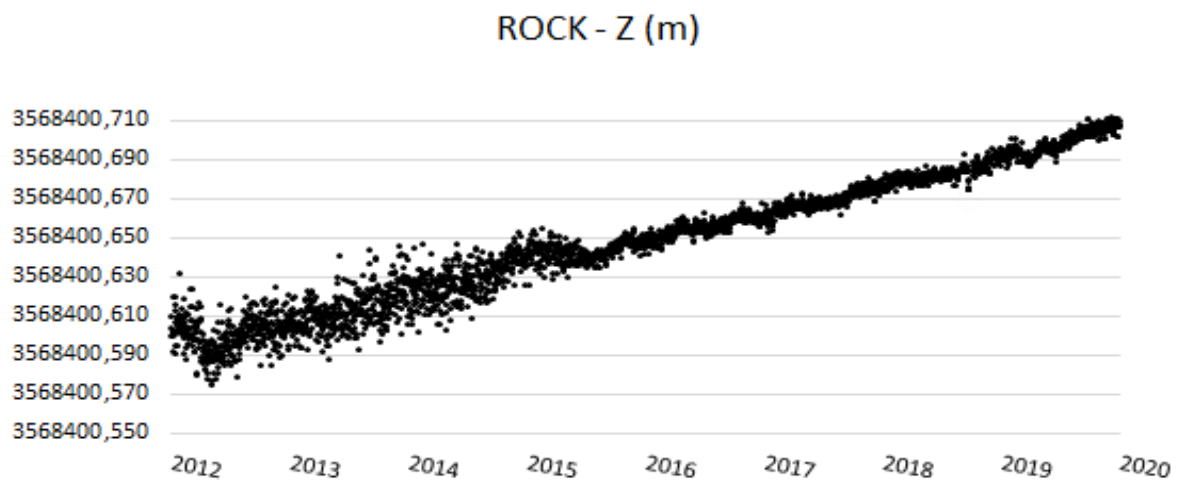
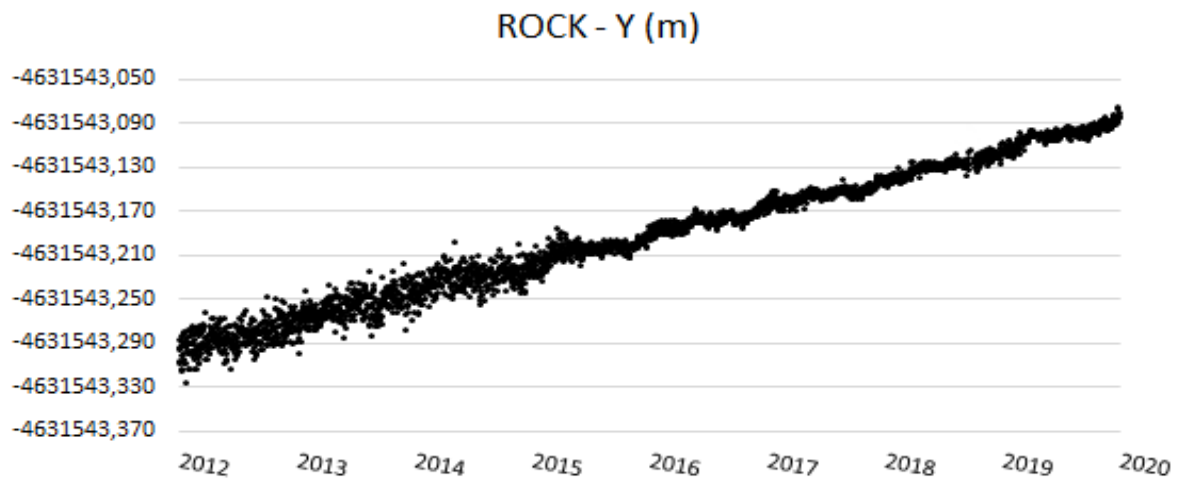
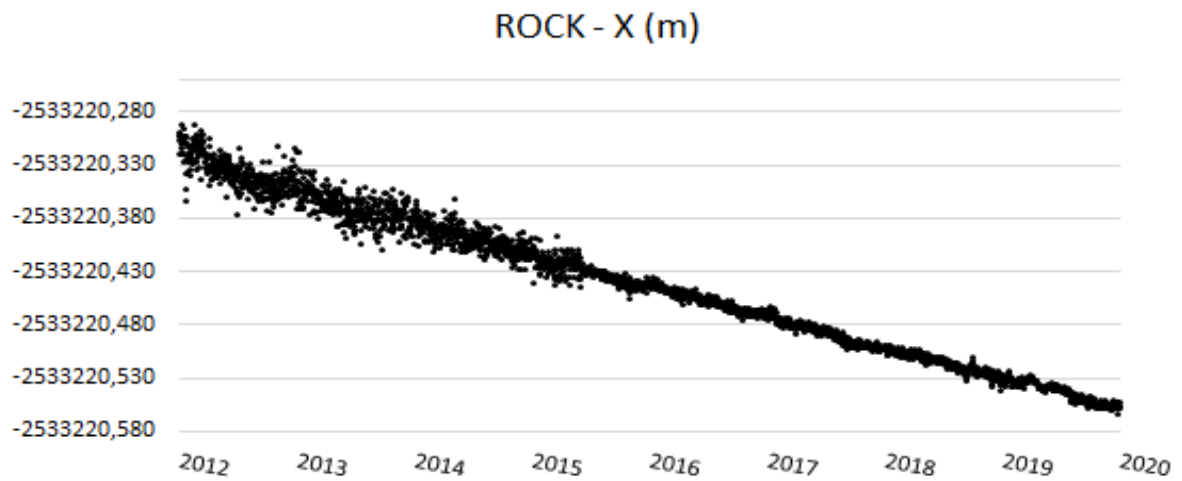


LORS - Y (m)

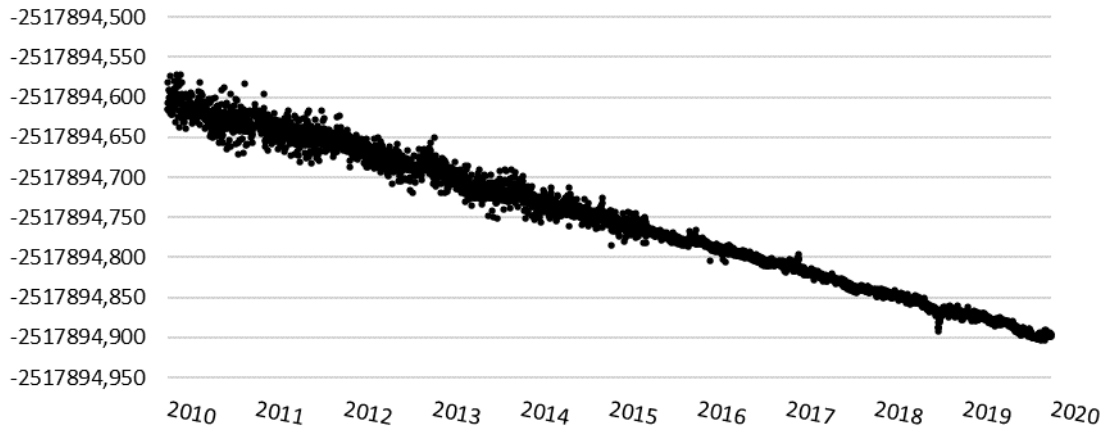


LORS - Z (m)

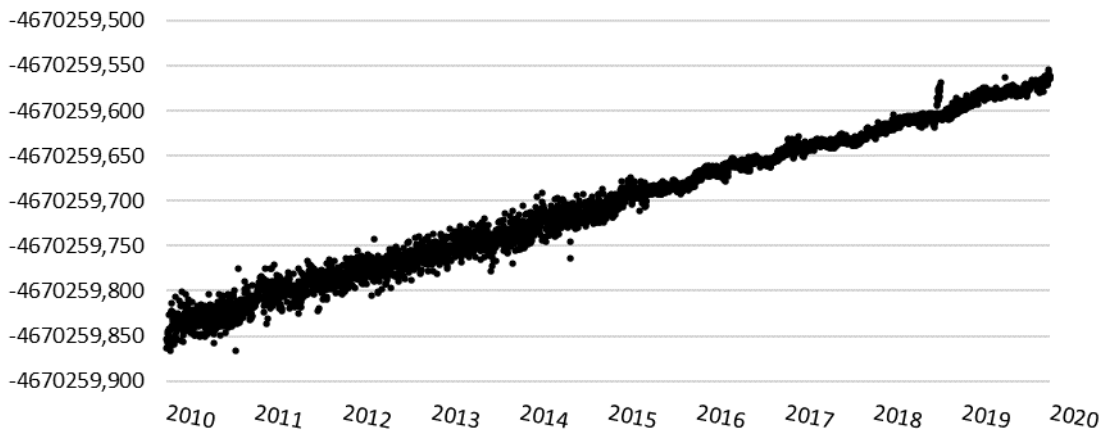




TORP - X (m)



TORP - Y (m)



TORP - Z (m)

