

MARCONY DE PAULO RAMOS

PROPOSTAS METODOLÓGICAS RELACIONADAS À OBTENÇÃO DE VELOCIDADES E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS NO PROCESSO DE COMPATIBILIZAÇÃO DE ÉPOCA E DE REFERENCIAIS GEODÉSICOS

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

Orientador: William Rodrigo Dal Poz

Coorientador: Alessandro Salles Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2022**

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

T

R175p
2022
Ramos, Marcony de Paulo, 1986-
Propostas metodológicas relacionadas à obtenção de velocidades e propagação de incertezas no processo de compatibilização de época e de referenciais geodésicos / Marcony de Paulo Ramos. - Viçosa, MG, 2022.

1 tese eletrônica (108 f.): il. (algumas color.).

Orientador: William Rodrigo Dal Poz.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Civil, 2022.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.646>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Sistema de Posicionamento Global. 2. Satélites artificiais em navegação. 3. Krigagem. 4. Geodésia. I. Dal Poz, William Rodrigo, 1975-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

CDD 22. ed. 526.1

Bibliotecário(a) responsável: Bruna Silva CRB-6/2552

MARCONY DE PAULO RAMOS

**PROPOSTAS METODOLÓGICAS RELACIONADAS À OBTENÇÃO DE
VELOCIDADES E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS NO PROCESSO DE
COMPATIBILIZAÇÃO DE ÉPOCA E DE REFERENCIAIS GEODÉSICOS**

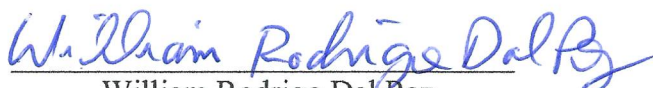
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de outubro de 2022.

Assentimento:



Marcony de Paulo Ramos
Autor



William Rodrigo Dal Poz
Orientador

AGRADECIMENTOS

Mais uma vez não quero pedir, quero somente agradecer! Primeiramente a Deus, por estar sempre presente realizando benção em minha vida.

À minha mãe Terezinha, pelo apoio e por acreditar sempre em mim; ao meu pai José Geraldo (em memória); Aos irmãos e amigos, Deny, Denilson, Edinilson, Enilson, Hermindo (em memória), Eny, Sabino, Patrícia e Marcos, pela força; A todos da minha família, sem vocês está conquista não teria tanto valor.

A minha esposa e companheira, pela motivação e por me fazer determinado a cada etapa da tese. Devo muito a você minha querida.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, por aprimorar meus conhecimentos e acreditar no meu potencial.

À PROQUALI-UFJF, pelas as bolsas de apoio à qualificação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

A todos os professores, em especial ao orientador Prof. William e coorientador Prof. Alessandro, pela grande contribuição neste trabalho. Tal qual, aos professores participantes das bancas de Seminário, Qualificação e Defesa: Prof. Afonso, Prof. Daniel, Prof. Éder, Profa. Heloisa e Prof. Ítalo.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, muito obrigado pelo companheirismo e parceria.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta conquista.

RESUMO

RAMOS, Marcony de Paulo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2022. **Propostas metodológicas relacionadas à obtenção de velocidades e propagação de incertezas no processo de compatibilização de época e de referenciais geodésicos.** Orientador: William Rodrigo Dal Poz. Coorientador: Alessandro Salles Carvalho.

Este trabalho teve como objetivo a elaboração e apresentação de metodologias para um maior rigor no processo de compatibilização de época e de referencial de coordenadas estimadas pelo GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Englobando a determinação de velocidades de estações GNSS, a obtenção de modelo de velocidade para placa Sul-Americana (Brasil) e a avaliação do efeito da propagação das incertezas no processo de mudança de referencial bem como a atualização de coordenadas - precisão final das coordenadas estimadas. Inicialmente é proposta uma metodologia para determinação de velocidades de estações GNSS considerando tendência, sazonalidade e ruídos em séries temporais de coordenadas, pós-processadas no serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - *Precise Point Positioning*). O método foi aplicado em 94 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), cujo período de investigação foi de 01/01/2012 a 29/12/2018. As modelagens das séries temporais de coordenadas e a obtenção das velocidades foram executadas no *software* SARI (*Señales y Análisis de Ruido Interactivo*) e apresentou-se como um *software* com grande potencial na modelagem e obtenção de velocidades a partir de séries temporais de coordenadas obtidas com uso do GNSS no Brasil. E também foi percebido que o efeito da sazonalidade nas velocidades das estações GNSS, não influenciou na componente planimétrica das velocidades, ou seja, caso a sazonalidade seja negligenciada na determinação de velocidades de estações do GNSS, isto não trará perdas significativas nos resultados (no Brasil). Seguidamente, foi proposta uma segunda metodologia com intenção de obter um modelo de velocidade para a atualização de coordenadas no Brasil, foi desenvolvida uma metodologia na geração de um modelo de velocidade a partir do interpolador geoestatístico krigagem ordinária, com uso das velocidades de estações obtidas a partir de séries temporais de coordenadas GNSS (metodologia de determinação supracitada). O modelo de velocidade obtido apresentou resultados relevantes na atualização de coordenadas no Brasil. Os valores médios de discrepâncias planimétricas, na atualização de coordenadas, entre os modelos comparados foram 4,4 cm, 1,3 cm, 2,0 cm e 3,0 cm com relação aos modelos GSRM2014 (MMP),

ITRF2014 (MMP), VEMOS2009 e VEMOS2017, respectivamente. Isto evidencia a grande semelhança entre o modelo elaborado e o ITRF2014 (MMP). Os resultados foram melhores que o modelo de velocidade VEMOS2017 (*Velocity Model of SIRGAS - 2017*) e similar aos modelos ITRF2014 (MMP) e ao VEMOS2009. É possível concluir que a krigagem ordinária se mostrou um interpolador com grande potencial na modelagem superficial de velocidades de estações GNSS no Brasil. Por fim, com propósito de avaliar as precisões das coordenadas após o processo de compatibilização de época e de referencial, foi apresentada a terceira metodologia, que objetivou avaliar as precisões das coordenadas após a realização da propagação de incertezas nas mesmas no processo de mudança de referencial e atualização de coordenadas. Com isto, foi possível observar que o processo de compatibilização modificou os valores de precisões das coordenadas, que eram, em média, de 1,8 mm e 0,8 mm nas componentes este (e) e norte (n) no Sistema Geodésico Local (SGL), respectivamente, passassem para 18,5 mm e 20,2 mm nas componentes (e) e (n), respectivamente. Os resultados, após a aplicação dessa metodologia, apresentaram degradação das incertezas das coordenadas, porém, tudo indica que mais realistas. Ou seja, tendo em vista que a propagação das incertezas na compatibilização (época e referencial) normalmente não é considerada em aplicações geodésicas, as precisões das coordenadas são subestimadas. Diante das elucidações das propostas metodológicas e dos resultados obtidos, são percebidas as potencialidades destas aplicações na obtenção de velocidades de estações GNSS, na determinação de modelo de velocidade e na propagação de incertezas no processo de compatibilização de época e de referencial no GNSS.

Palavras-chave: GNSS. Séries temporais. Modelo de velocidade. Krigagem. Propagação de incertezas.

ABSTRACT

RAMOS, Marcony de Paulo, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October 2022. **Methodological proposals related to obtaining velocities and propagation of uncertainties in the process of compatibilizing time and geodetic references.** Adviser: William Rodrigo Dal Poz. Co-adviser: Alessandro Salles Carvalho.

The objective of this work was the elaboration and presentation of methodologies for greater rigor in the process of matching the epoch and the reference of coordinates estimated by the GNSS (Global Navigation Satellite System). Comprising the determination of velocity of GNSS stations, obtaining a velocity model for the South American plate (Brazil) and the evaluation of the effect of the propagation of uncertainties in the process of change of reference as well as the update of coordinates - final precision of the estimated coordinates. Initially, a methodology is proposed to determine the velocity of GNSS stations considering trend, seasonality and noise in time series of coordinates, post-processed in the IBGE-PPP (Brazilian Institute of Geography and Statistics - Precise Point Positioning) online service. The method was applied in 94 stations of the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems), whose investigation period was from 01/01/2012 to 12/29/2018. The modeling of the time series of coordinates and the obtaining of velocities were performed in the software SARI (Señales y Análisis de Ruido Interactivo) and presented itself as a software with great potential in the modeling and obtaining of velocities from the time series of coordinates obtained with use of GNSS in Brazil. It was also noticed that the effect of seasonality on the velocity of GNSS stations did not influence the planimetric component of velocity, that is, if seasonality is neglected in the determination of velocity of GNSS stations, this will not bring significant losses in the results (in Brazil). Then, a second methodology was proposed with the intention of obtaining a velocity model for updating coordinates in Brazil, a methodology was developed to generate a velocity model from the geostatistical interpolator krigagem ordinary, using the station velocities obtained at from time series of GNSS coordinates (determination methodology mentioned above). The velocity model obtained showed relevant results in updating coordinates in Brazil. The average values of planimetric discrepancies, in the coordinate update, between the compared models were 4.4 cm, 1.3 cm, 2.0 cm and 3.0 cm in relation to the models GSRM2014 (MMP), ITRF2014 (MMP), VEMOS2009 and VEMOS2017, respectively. This highlights the great similarity between the model developed and the ITRF2014 (MMP). The results were better than the

VEMOS2017 velocity model (Velocity Model of SIRGAS - 2017) and similar to the ITRF2014 (MMP) and VEMOS2009 models. It is possible to conclude that ordinary kriging proved to be an interpolator with great potential in surface modeling of GNSS station velocity in Brazil. Finally, with the purpose of evaluating the accuracies of the coordinates after the process of matching the epoch and the frame of reference, the third methodology was presented, which aimed to evaluate the accuracies of the coordinates after carrying out the propagation of uncertainties in the same in the process of changing the frame of reference. and coordinate update. With this, it was possible to observe that the compatibilization process modified the coordinate precision values, which were, on average, 1.8 mm and 0.8 mm in the east (e) and north (n) components in the Local Geodetic System (SGL), respectively, changed to 18.5 mm and 20.2 mm in components (e) and (n), respectively. The results, after the application of this methodology, showed degradation of the uncertainties of the coordinates, however, everything indicates that they are more realistic. In other words, considering that the propagation of the uncertainties in the compatibility (time and frame of reference) is normally not considered in geodetic applications, the precisions of the coordinates are underestimated. In view of the elucidation of the methodological proposals and the results obtained, the potential of these applications in obtaining GNSS station velocity, in the determination of velocity model and in the propagation of uncertainties in the process of compatibilization of time and reference in the GNSS are perceived.

Keywords: GNSS. Time Series. Velocity Model. Kriging. Uncertainty Propagation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

Figura 1 – Principais ferramentas do software SARI.....	32
Figura 2 – Porcentagem de dados RINEX das estações selecionadas no estudo, no período de 01/01/2012 a 29/12/2018.....	35
Figura 3 – Fluxograma da metodologia realizada nesta pesquisa.	36
Figura 4 - Discrepância entre as velocidades obtidas no experimento Vel_{TSR} com os valores obtidos na realização SIRGAS-CON (Vel_{SIRP01}), valores em (mm/ano).	42
Figura 5 – Vetores resultantes das velocidades planimétricas do experimento Vel_{TSR} (vetores azuis) e Vel_{SIRP01} (vetores vermelhos) das 94 estações da RBMC.....	43

CAPÍTULO 2

Figura 1 - Representação das estações da RBMC utilizadas na pesquisa com seus respectivos vetores de velocidade (em mm/ano).....	60
Figura 2 – Principais passos metodológicos da pesquisa.	62
Figura 3 – Histogramas e envelopes simulados dos dados da pesquisa: a) histograma Ve ; b) histograma Vn ; c) envelope simulado Ve ; d) envelope simulado Vn	65
Figura 4 – Resultado da interpolação por krigagem ordinária. (a) componente “ Ve ”; (b) componente “ Vn ”.	65
Figura 5 – Precisão da interpolação por krigagem ordinária. (a) componente “ Ve ”; (b) componente “ Vn ”.	66
Figura 6 – Grade de velocidade determinado para o território brasileiro a partir do interpolador de krigagem ordinária em mm/ano (vetores resultantes).	68
Figura 7 – Vetores de discrepâncias resultantes entre os modelos: (a) ITRF2014 (MMP) X $MV_{Krigagem}$; (b) GSRM (MMP) X $MV_{Krigagem}$; (c) VEMOS2017 X $MV_{Krigagem}$	69

CAPÍTULO 3

Figura. 1 Síntese do processo de compatibilização de referencial e época realizados neste trabalho. ..	94
Figura 2 - Fluxograma da metodologia realizada nesta pesquisa.	96

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1 – Intervalo de tempo para aquisição dos dados.	34
Tabela 2 - Velocidades das 94 estações da RBMC analisadas nesta pesquisa a partir dos três experimentos (Vel _T , Vel _{TS} e Vel _{TSR}).	38
Tabela 3 - Discrepância entre as velocidades a partir dos experimentos em (mm/ano).....	40
Tabela 4 - Estatísticas básicas dos índices espectrais do experimento VTSR.....	41
Tabela 5 - Precisões médias das velocidades de cada experimento em (mm/ano).....	41

CAPÍTULO 2

Tabela - 1 – Resultado estatístico dos modelos de semivariogramas teóricos analisados na pesquisa. NOTA: <i>Tausq</i> se refere ao efeito pepita; <i>Sigma</i> consiste no valor do patamar menos o efeito pepita; <i>Phi</i> se refere ao alcance (range); <i>Kappa</i> é o valor numérico para o parâmetro adicional de suavização da função de correlação; <i>SQR</i> é soma de quadrado dos resíduos.	64
Tabela - 2 – Resultado estatístico dos modelos de semivariogramas teóricos obtido através da validação cruzada. NOTA: R^2 (coeficiente de determinação) expressa à proporção da variação de uma medida (variável resposta) que é explicada pela variação de outra (variável explanatória); <i>RMSE</i> (Raiz do Erro Quadrático Médio), onde o erro retorna à unidade de medida do modelo.	65
Tabela 3 – Estatística básica dos vetores resultantes entre $MV_{Krigagem}$ e os modelos GSRM 2014(MMP), ITRF2014 (MMP) e VEMOS2017.....	70
Tabela 4 - Discrepância planimétrica entre as coordenadas atualizadas e as coordenadas dos descritivos de RBMC em metros.....	71

CAPÍTULO 3

Tabela 1: Data de início e fim dos últimos sete (7) referenciais utilizados pelo IGS.....	83
Tabela 2 - Parâmetros de transformação de referencial disponibilizados pelo ITRF.....	84
Tabela 3 - Síntese das simulações realizadas.	97
Tabela 4 - Parâmetros de transformação de referencial entre ITRF2014 e ITRF2000, nas épocas 2010 e 2020,5.	98
Tabela 5 - Parâmetros de transformação de referencial do ITRF2014 para ITRF2008 e ITRF2005, na época 2020,5.	98
Tabela 6 - Estatística das precisões das coordenadas após a compatibilização de referencial e época para as quatro (4) maneiras pesquisadas, expressas em (mm) - precisões apresentadas no SGL (σ_e e σ_n).	99

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADF - *Augmented Dickey-Fuller*
APKIM - *Actual Plate Kinematics Model*
CGPS - *Continuous GPS*
CORS - *Continuously Operating Reference Stations*
DGFI - *Deutsche Geodätische Forshungsinstitu*
DORIS - *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*
EKF - *Extended Kalman Filter*
GEODVEL - *Geodesy Velocity*
GNSS - *Global Navigation Satellite System*
GSRM - *Global Strain Rate Model*
HS2 - *Hot Spot2*
IBGE- *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*
IERS - *International Earth Rotation and Reference Systems*
IGN– *Institute Géographique National*
IGS - *International GNSS Service*
ITRF - *International Terrestrial Reference Frame*
ITRS - *International Terrestrial Reference System*
J - *Jacobiana*
KPSS - *Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin*
MIDAS - *Median Interannual Difference Adjusted for Skewness*
MLE - *Maximum-Likelihood Estimation*
MMP - *Modelo de Movimento de Placa*
MMQ - *Método dos Mínimos Quadrados*
MORVEL - *Mid Ocean Ridge Velocity*
MVC - *Matriz de Variância e Covariância*
NUVEL - *Northwestern University Velocity*
PMC - *Plate Motion Calculator*
PPP - *Precise Point Positioning*
PT - *Parâmetros de Transformação*
RBMC - *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GNSS*
REVEL - *Recent Velocities*
RINEX - *Receiver Independent Exchange Format*
RTS - *Rauch Tung Striebel*
SARI - *Señales y Análisis de Ruido Interactivo*
SGL - *Sistema Geodésico Local*
SIRGAS - *Sistema de Referência para as Américas*
SLR - *Satellite Laser Ranging,*
UKF - *Unscented Kalman Filter*
UNAVCO- *University NAVSTAR Consortium*
VEMOS- *Velocity Model of SIRGAS*
VLBI - *Very Long Baseline Interferometry*

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	13
1. CONSIDERAÇÕES E MOTIVAÇÃO	13
2. OBJETIVOS	21
3. CONTEÚDO DO TRABALHO.....	22
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO 1. GERAÇÃO DE MODELO DE VELOCIDADE PARA UMA PORÇÃO DA PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA – BRASIL	26
1.1 Introdução	27
1.2 Séries temporais de coordenadas GNSS.....	29
1.2.1 Análise de séries temporais no SARI	31
1.3 Materiais e métodos.....	34
1.3.1 Materiais	34
1.3.2 Métodos	35
1.4 Resultados e Discussão.....	38
1.5 Considerações finais e conclusões.....	44
Referências	45
CAPÍTULO 2. MODELO DE VELOCIDADE PARA UMA PORÇÃO DA PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA – BRASIL.....	50
2.1. Introdução.....	52
2.2. Modelo de Velocidade de Placa Tectônica.....	54
2.2.1. Estatística Espacial	55
2.2.2. Modelos de movimento de placa (MMP).....	57
2.2.3. VEMOS2017	59
2.3. Materiais e Métodos	60
2.3.1. Materiais	60
2.3.2. Métodos	61
2.4. Resultados e Discussão.....	63
2.5. Conclusão	71
Referências	72
CAPÍTULO 3. PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS NO PROCESSO DE COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAIS E ÉPOCA DE COORDENADAS GNSS.....	78

3.1.	Introdução.....	79
3.2.	Compatibilização de referenciais e época	82
3.2.1.	Compatibilização de referencial	83
3.2.2.	Compatibilização de época das coordenadas e mudança de referencial das velocidades	87
3.3.	Sistema Geodésico Local	89
3.4.	Materiais e Métodos	91
3.4.1.	Materiais	91
3.4.2.	Métodos	91
3.5.	Resultados e Discussão	97
3.6.	Considerações Finais e Conclusões.....	100
	Referências	102
	CONCLUSÕES GERAIS	105

INTRODUÇÃO GERAL

1. CONSIDERAÇÕES E MOTIVAÇÃO

A partir da evolução das tecnologias de geodésia espacial percebeu-se a importância da mudança na concepção dos sistemas de referência. Esses sistemas utilizam-se dos referenciais geocêntricos, que têm origem no centro de massa da Terra, denominados referenciais modernos. Nos referenciais modernos, as posições observadas dos marcos geodésicos fixados na superfície sólida da Terra são afetadas por deslocamentos associados a efeitos geofísicos (deformações tectônicas, efeitos de carga do oceano, dentre outros) (PETIT e LUZUM, 2010). Por isso, é necessário considerar a época¹, ao conceber a realização de tais sistemas de referências. Ou seja, ao realizar o pós-processamento das observáveis GNSS (*Global Navigation Satellite System*), tornou-se usual a execução da atualização das coordenadas para a época da realização do referencial desejado (compatibilização de época). O SIRGAS2000 (Sistema de Referência para as Américas 2000) tem sua realização na época 2000,4. Segundo SIRGAS (2022a), o SIRGAS2000 corresponde à segunda campanha do sistema, que foi conduzida entre os dias 10 a 19 de maio de 2000. Ressalta-se que este é o sistema de referência oficial do Brasil.

Atualmente, o referencial das coordenadas dos satélites GNSS é o IGB14 (*International GNSS Service* 2014), que teve sua adoção a partir de 17/05/2020. Segundo IGS (2022a), os produtos IGS estão referenciados ao IGB14, que é derivado do ITRF2014, ou seja, os produtos IGS também são alinhados ao ITRF2014. A cada nova versão do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*), é necessário que o IGS altere o referencial de seus produtos. Neste ínterim, cumpre salientar que uma nova versão do ITRF foi disponibilizada em 15/04/2022, e corresponde ao ITRF2020 (IGS, 2022b) e segundo IGS (2022c), o IGS pretende mudar os referenciais dos seus produtos do IGB14 (atualmente) para o IGS20, começando com os produtos da semana GPS 2230 (02/10/2022). Salienta-se que o IGS20 estará intimamente relacionado ao ITRF2020.

Desta forma, atualmente, no caso do PPP (*Precise Point Positioning*) as coordenadas obtidas no processamento de observáveis GNSS são referenciadas ao IGB14 na época da coleta dos dados. Assim, ao obter coordenadas no PPP (IGB14_{época dos dados}) e utilizá-las no Brasil, é necessário que as coordenadas tenham seu referencial e época compatibilizados com

¹ A data (época) da realização do SIRGAS. Exemplo: SIRGAS 2000, época 2000,4.

o SIRGAS2000 época 2000.4. Frisa-se que o SIRGAS funciona como uma densificação do ITRF2000 nas Américas (SIRGAS, 2022a), ou seja, o SIRGAS2000 é alinhado ao ITRF2000.

Para realizar a compatibilização de referencial geodésico pode-se usar a transformação de *Helmert* generalizada, que considera as velocidades das estações, os parâmetros de transformação e as suas variações no tempo, salienta-se que a atualização das coordenadas é incluída nessa transformação. Os parâmetros da transformação de *Helmert* generalizada são compostos por 14 parâmetros, sendo: - três parâmetros que representa a translação entre os referenciais (T_x , T_y e T_z) e suas respectivas variações temporais (\dot{T}_x , \dot{T}_y e \dot{T}_z); um fator de escala entre os referenciais (D) e sua respectiva variação temporal (\dot{D}); - três parâmetros de rotação entre os referenciais (R_x , R_y e R_z) e suas respectivas variações temporais (\dot{R}_x , \dot{R}_y e \dot{R}_z).

Os parâmetros da transformação de *Helmert* generalizada são utilizados para compatibilizar as realizações do ITRS (*International Terrestrial Reference System*), ou seja, para compatibilização dos ITRF's. Eles podem ser usados para comparar dados ou resultados expressos em duas realizações ITRS diferentes (IGN, 2022a).

Há também a possibilidade de atualizar os parâmetros de transformação para a época de interesse para, em seguida, atualizar as coordenadas com a transformação de *Helmert* (7 parâmetros)². Esta é a metodologia recomendada pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems*) (IGN, 2022b).

Evidencia-se que é de extrema importância a disponibilização das precisões (desvios padrão) obtidas no processo de estimação destes parâmetros. Para um melhor entendimento foi apresentada pela Tabela 1 os parâmetros de *Helmert* generalizada para a mudança do referencial do ITRF2020 para o ITRF2014. Neste caso, os parâmetros foram estimados na época 2015,0. Assim, no rigor, são válidos para esta época.

Tabela 1: Parâmetros de transformação para mudança de referencial do ITRF2020 para ITRF2014.

Parâmetros ⇒	T_x mm	T_y mm	T_z mm	D ppb	R_x Mas	R_y Mas	R_z Mas
Varição Temporal ⇒	\dot{T}_x mm/a	\dot{T}_y mm/a	\dot{T}_z mm/a	\dot{D} ppb/a	\dot{R}_x mas/a	\dot{R}_y mas/a	\dot{R}_z mas/a
ITRF14⇒ITRF08 (época 2010,0)	$-1,4 \pm 0,2$	$-0,9 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,2$	$-0,42 \pm 0,03$	$0,00 \pm 0,007$	$0,00 \pm 0,006$	$0,00 \pm 0,007$
	$0,0 \pm 0,2$	$-0,1 \pm 0,2$	$0,2 \pm 0,2$	$0,00 \pm 0,03$	$0,00 \pm 0,007$	$0,00 \pm 0,006$	$0,00 \pm 0,007$

Fonte: IGN (2022c).

² Ressalta-se que os 7 parâmetros deverão estar na mesma época das coordenadas de origem (época da coleta dos dados). Os parâmetros são atualizados da época nos quais foram estimados para a época das coordenadas de origem com uso das variações temporais dos parâmetros (*rates*).

É importante atentar que as translações e variações temporais (\vec{T} e $\vec{\dot{T}}$) são disponibilizadas em unidade linear (mm ou cm), enquanto o fator de escala (D e \dot{D}) é dado em “ppb” (partes por bilhão – 1×10^{-9}) e, por fim, as rotações (\vec{R} e $\vec{\dot{R}}$) são dadas em miliarcosegundo - “mas” (0,001”). Este último, normalmente, é transformado em radianos, e, para isto, é necessária a transformação para graus ($1/60 * 1/60 = 1/3600$), os quais, depois, são transformados para radianos ($\pi/180^\circ$).

Os parâmetros de transformação são utilizados para a compatibilização de referencial, este processo afeta as precisões das coordenadas devido às precisões (incertezas) dos elementos envolvidos nos processos de transformação de referencial. Ou seja, ao realizar a compatibilização de referencial, é de grande importância a realização da propagação de incertezas neste processo. Para isto, é importante que os parâmetros de *Helmert* sejam acompanhados de suas precisões e que seja realizada a propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial.

No caso da atualização das coordenadas, ou seja, coordenadas com os mesmos referenciais e em épocas distintas (exemplo: SIRGAS2000_{época_qualquer} \rightarrow SIRGAS2000_{época 2000.4}), são utilizadas as velocidades da estação GNSS e também as taxas (*rates*) dos parâmetros de transformação para a realização da transformação de referencial das velocidades. Destaca-se que, no processo de compatibilização de época, também é importante que seja realizada a propagação de incertezas. Para isto, é necessário que as velocidades da estação sejam acompanhadas de suas respectivas precisões. Deste modo, é possível ter acesso às precisões das coordenadas após todo o processo de compatibilização de referencial e de época.

Todas as coordenadas estimadas em qualquer método de levantamento devem ser acompanhadas de suas respectivas precisões, desta forma, ao realizar a transformação de referencial e a atualização das coordenadas (envolvendo inúmeros parâmetros estimados em outros processos), espera-se que, as coordenadas ao final destes passos tenham suas incertezas influenciadas pelas transformações e atualizações. Porém, isto não é percebido nos processos de compatibilização de referencial e época no Brasil, isto é, as precisões das coordenadas antes e após a transformação e a atualização são iguais. Ou seja, a propagação de incertezas é negligenciada na realização da transformação de referencial e na atualização de coordenadas, fazendo com que as coordenadas após a compatibilização em referencial e época sejam superestimadas.

Isto pode ser percebido em diversos serviços de processamento por PPP, por exemplo, no IBGE-PPP³. No IBGE-PPP as precisões das coordenadas são mantidas após a transformação de referencial e atualização de coordenadas, tendo em vista que os parâmetros de transformações utilizados, bem como, as velocidades da estação, não possuem (ou não são disponibilizados) suas incertezas.

Tendo em vista a importância do tema supracitado, vários pesquisadores realizaram trabalhos a este respeito: Chiu e Shih (2014) avaliaram as incertezas das coordenadas da rede geodésica de Taiwan no processo de compatibilização de referencial e época. Na época da publicação do trabalho, o referencial geodésico de Taiwan estava referenciado ao ITRF94, o que levou, em parte, os autores a concluírem que as incertezas propagadas pelos Parâmetros de Transformação (PT) são mais significativas do que as das coordenadas e velocidades. Por sua vez, Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015) realizaram as transformações de referencial, de forma sequencial (ITRF2008 até ITRF2000), e compatibilização de época das coordenadas de estações do GNSS no território brasileiro com estimativa de incertezas. Já Soler, Han e Weston (2016) realizaram a compatibilização de referencial e época entre o referencial geodésico NAD83 (*North American Datum*), época 2010 e o ITRF2008, época 2005, utilizando uma abordagem matemática rigorosa no processo de compatibilização e na propagação de incertezas. Por seu turno, Puente e Folgueira (2019) fizeram análises de propagação de incertezas na transformação de referencial para coordenadas em diferentes posições geodésicas. Os autores concluíram que as incertezas dos PT só são perceptíveis nas coordenadas propagadas, se as coordenadas a serem transformadas têm incertezas melhores que 10 mm. Por fim, Smith (2020) desenvolveu uma pesquisa com o interesse de verificar e avaliar a influências das precisões dos PT, das coordenadas e das velocidades de estações no processo de propagação de incertezas na compatibilização de referencial e época. Sobre este estudo, deve-se salientar que o autor considerou os valores dos parâmetros de translação e escala, e suas respectivas incertezas, nulos no processo de compatibilização de referencial e na propagação de incertezas.

Deste modo, uma das propostas deste trabalho (Capítulo 3) é a aplicação de uma metodologia para avaliar as incertezas das coordenadas (obtidas no posicionamento absoluto - PPP), a partir da propagação de incertezas nas etapas de transformação de referencial e atualização de coordenadas, considerando todas as precisões dos elementos utilizados.

³ Este serviço *on-line* e gratuito é utilizado para o pós-processamento de dados GNSS e foi concebido através da parceria entre a Coordenação de Geodésia do IBGE e o *Canadian Geodetic Survey* (CGS), do *Natural Resources Canada* (NRCan), e faz uso do *software* GPSPACE, bem como das órbitas precisas do CGS (IBGE, 2022).

Conforme já exposto, para realização da propagação de incertezas na atualização das coordenadas é necessário dispor das precisões das velocidades da estação GNSS. Isto pode ser obtido a partir de dados de coordenadas e precisões obtidas com uso do GNSS, onde são confeccionadas séries temporais de coordenadas. A partir destas séries temporais ajustadas, é possível determinar as velocidades de cada estação e suas respectivas precisões. Salienta-se que o modelo de velocidade utilizado pelo IBGE-PPP (VEMOS2009) não dispõe das precisões das velocidades, o que impossibilita a propagação de incertezas das velocidades na atualização de coordenadas.

Vários trabalhos foram realizados nesta temática, como é o caso de Goudarzi *et al.* (2013), que desenvolveram um *software* que realiza a determinação e as análises de séries temporais, a partir das quais são feitos os testes estatísticos (média, variância e etc.), a determinação e a remoção de *outliers* e saltos, além da análise de ruídos. Nesse contexto, Santamaria-Gomez (2019) criou um *software* de análise de séries temporais de coordenadas GNSS, cujo nome é SARI (*Señales y Análisis de Ruido Interactivo*).

Já Wang (2019), por sua vez, determinou ruídos de séries temporais utilizando o estimador de máxima verossimilhança, além de ter apresentado a importância e o valor prático da análise de ruído. Hackl (2012), por seu turno, realizou análises de ruídos coloridos em séries temporais obtidas a partir de dados GPS. Por fim, Cañada (2016) realizou a análise de série temporal de coordenadas de estações GPS obtidas a partir do PPP. Em seu trabalho, Cañada (2016) estudou a tendência, as variações sazonais e o tipo de ruído para determinar o modelo teórico que melhor se ajustaria aos dados da série temporal.

Ramírez-Zelaya *et al.* (2021), realizaram a comparação entre o posicionamento absoluto e o relativo na determinação de velocidades de estações GNSS e também analisaram a convergência de séries temporais de coordenadas GNSS, além de aplicarem técnicas de estatísticas e de filtragem de dados para verificar o comportamento da série. Wang (2022), criou uma metodologia para analisar séries temporais de coordenadas GNSS afetadas por ruídos correlacionados ao tempo, na determinação das velocidades para um intervalo de confiança de 95%.

Alinia *et al.* (2017) realizaram análises de séries temporais de coordenadas de 14 estações GPS (*Global Positioning System*), com uso do *software* Bernese para a determinação de velocidades em Ontário e Quebec, no Canadá. Foram utilizadas técnicas de máxima verossimilhança na análise de ruídos (lei de potência e ruídos brancos), tendência linear e as incertezas associadas.

De acordo com os trabalhos supracitados, é possível perceber que a determinação de velocidades a partir de dados GNSS está sendo realizada com muita frequência, principalmente com uso do PPP, com o objetivo de obter velocidades em um referencial atual. Assim, também foi proposta uma metodologia de determinação de velocidades de estações (Capítulo 1) da RBMC com uso do *software* SARI – referenciada ao ITRF2014, a partir de séries temporais com análise de sazonalidades e ruídos. Nesta etapa também são estimadas as incertezas das velocidades, que foram utilizadas no processo de propagação de incertezas no processo de compatibilização de época.

Quando não há a possibilidade de determinação das velocidades das estações a partir de séries temporais de coordenadas GNSS, é possível a obtenção a partir de modelos de velocidades. Destaca-se que a rede SIRGAS disponibiliza as velocidades de suas estações (velocidades obtidas das soluções multianuais), porém, quando não há disponibilidade é recomendada a obtenção a partir de levantamentos GNSS contínuos, que tenham um período mínimo de dois anos. Caso contrário, as velocidades podem ser obtidas a partir de um modelo de deformação de superfície ou um modelo de velocidade.

Dessa forma, é oportuno notar que a determinação de um modelo de velocidade acurado é de muita importância na realização da compatibilização de época, uma prática que passou a ser utilizada após o estabelecimento dos referenciais modernos.

Para isso, há vários modelos disponíveis, tais como NUVEL (*Northwestern University Velocity*) (1 e 1A), APKIM2005 (*Actual Plate Kinematics Model*), REVEL2000 (*Recent Velocities*), dentre outros. Outras informações podem ser adquiridas em UNAVCO (2022). Para a placa tectônica Sul-Americana (Brasil) são disponibilizados, ao menos, 18 modelos de velocidades, existem modelos globais e também regionais, e uns utilizam a condição NNR⁴ (*no-net-rotation*).

O projeto SIRGAS disponibiliza o VEMOS (*Velocity Model of Sirgas*), que se trata de um modelo de velocidade para o SIRGAS (SIRGAS2022b). Os primeiros modelos foram determinados a partir de dados geológicos, geofísicos e partir dos cálculos de taxas das variações e do azimute do deslocamento de cada placa. Já os modelos atuais foram calculados a partir da combinação de dados de geodesia espacial (VLBI - *Very Long Baseline Interferometry*, SLR - *Satellite Laser Ranging*, DORIS - *Doppler Orbitography and*

⁴ (NNR) é o movimento de cada placa em relação à média ponderada de todas as velocidades das placas tectônicas. Às vezes, é chamado de movimento absoluto da placa, pois parece representar, aproximadamente, os movimentos das placas de superfície em relação ao núcleo da Terra.

Radiopositioning Integrated by Satellite, GNSS). Alguns desses modelos foram determinados somente a partir de dados de GNSS.

A determinação de um modelo de velocidade pode ser realizada a partir da determinação dos componentes do vetor de *Euler* (vetor geocêntrico de rotação). O movimento relativo de uma placa tectônica é descrito por um vetor de rotação. O módulo do vetor de *Euler* é proporcional à velocidade angular no extremo do vetor, localizado na crosta terrestre. Este ponto é denominado de polo de *Euler* (ou polo de rotação) (LARSON *et al.*, 1997).

Uma vez determinados os componentes do vetor de *Euler* é possível, também, determinar a componente do vetor velocidade de qualquer ponto a partir de suas coordenadas. Outra maneira de determinar um modelo de velocidade é por meio de velocidades (obtidas de séries temporais de coordenadas GNSS) e utilizando interpoladores geoestatísticos, por exemplo, podem ser obtidos os modelos de velocidade (de acordo com a extensão das estações analisadas), como é o caso de Luna *et al.* (2017), que determinaram um modelo de velocidade para o Equador a partir do interpolador geoestatístico krigagem.

Nesse ínterim, conforme Drewes e Sánchez (2017), é importante considerar padrões regionais de deformações e não apenas globais. Os autores pontuam, ainda, que os modelos devem ser atualizados após qualquer evento de deformação abrupto e que deve apresentar resolução espacial suficiente para refletir todos os efeitos regionais.

Vários são os trabalhos realizados na determinação de modelos de velocidade regionais. Podem ser citados os trabalhos de: Zamora (2014), que fez a determinação de modelo de velocidade para Costa Rica; Goudarzi *et al.* (2017), que efetuaram estudos para avaliar deformação de superfície terrestre no leste de Canadá; Souza (2013), que gerou a modelagem do movimento da placa tectônica Sul-Americana; Perez *et al.* (2003), que elaboraram a estimativa da velocidade para placa Sul-Americana utilizando dados de GPS; Sánchez *et al.* (2016), que efetuaram o estudo da deformação da costa da América Latina após o terremoto de 2010, bem como o modelo cinemático de superfície; Salamanca (2016), que preparou uma modelagem da deformação da costa continental do Norte dos Andes e, ainda; Luna *et al.* (2017), que determinaram um modelo de velocidade para o Equador; Ren *et al.* (2021), determinaram um modelo de campo de velocidade para o continente chinês; Hamling *et al.* (2022), realizaram a determinação de um campo de deformação dinâmica para a Nova Zelândia.

A partir dos trabalhos citados é possível perceber uma tendência à regionalização na determinação de modelos de velocidade. Desta forma, vários estudos foram realizados na determinação de modelos de velocidade da placa tectônica Sul América a partir de observáveis GNSS, dentre os quais pode-se citar: Perez (2002); Carvalho (2015); Costa (2001); Silva *et al.* (2008) e Souza (2013).

Silva *et al.* (2008) afirmam que mesmo que os resultados encontrados em seu trabalho estejam de acordo com os resultados obtidos em trabalhos similares, torna-se necessário dispor de um período maior de observáveis GNSS. Ainda, afirmam que quanto maior for o período de investigação, mais confiável será o resultado, sendo um período de cinco anos o apropriado para iniciar estudos de geodinâmica.

Os modelos de velocidade são a base para calcular coordenadas de qualquer ponto a qualquer momento a partir de uma rede de referência dependente do tempo (posição e velocidade) (DREWES e SÁNCHEZ, 2017).

Zamora (2014), nesse sentido, utilizou a colocação por mínimos quadrados na determinação de modelo de velocidade para o Equador. Em seu trabalho, informou que para a utilização desta técnica de interpolação é necessária uma condição mínima, qual seja, a utilização de, pelo menos, 30 estações.

Lau, Coleman e Hoa (2021), realizaram a determinação do deslocamento de placa tectônica a partir de técnicas do PPP no Vietnã, com o uso de dados do GNSS (rede CORS - *Continuously Operating Reference Stations*). Jagoda (2021), realizou a determinação dos elementos do pólo de *Euler* das cinco principais placas tectônicas a partir de velocidades de estações GNSS referenciadas ao ITRF2014.

Diante do apresentado, é possível perceber a relevância na obtenção de um modelo de velocidade regional e acurado (Capítulo 2). Desta forma, foi proposta uma metodologia para geração de um modelo de velocidade para o Brasil (placa Sul-Americana) referenciado ao atual sistema de referência dos produtos do IGS (IGb14 - ITRF2014).

Sendo assim, este trabalho tem como propósito desenvolver e aplicar metodologias relacionadas à obtenção de velocidades e propagação de incertezas no processo de compatibilização de época e de referencial no GNSS. Salienta-se que, para esta finalidade, foram propostas algumas metodologias: determinação de velocidades e incertezas de estações GNSS a partir de séries temporais de coordenadas GNSS (considerando tendência, sazonalidade e ruídos); determinação de modelo de velocidade para a placa Sul-Americana

(Brasil) utilizando interpolador geoestatístico; e, por fim, análise da propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial e de época.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é investigar sobre o processo de compatibilização de referencial e de épocas de coordenadas GNSS, principalmente no que diz respeito às velocidades de estações GNSS, modelos de velocidade e propagação de incertezas no processo de compatibilização.

Com o propósito de atingir o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

- i. Estimar velocidades de estações GNSS a partir de análises de séries temporais das coordenadas, considerando tendência, sazonalidade e ruídos de lei de potência para placa Sul-Americana, em séries temporais com mais de 4 anos de dados com amostragem diária.
- ii. Determinar de um modelo de velocidade para a placa Sul-Americana (porção que o Brasil ocupa) com a utilização do interpolador geoestatístico (krigagem ordinária).
- iii. Realizar a propagação de incertezas do processo de compatibilização de épocas e de referencial de coordenadas GNSS para serem aplicadas no Brasil, verificando o efeito da mudança de referencial e da atualização de coordenadas nas precisões das coordenadas GNSS.
- iv. Apresentar, de forma detalhada, os processos necessários para realizar a atualização de coordenadas e a mudança de referencial, bem como a propagação de incertezas necessárias nesta tarefa.
- v. Efetuar a determinação das precisões dos parâmetros de *Helmert* entre o ITRF2014 e o ITRF2000.

3. CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho aborda, de modo geral, o estudo acerca da eficiência e dos efeitos do processo de compatibilização de época (atualização de coordenadas) e de referencial (mudança de referencial) de coordenadas GNSS, em aplicações no Brasil. A Tese está dividida em cinco (5) tópicos, conforme é apresentado:

- i. INTRODUÇÃO GERAL – apresenta uma introdução geral do trabalho, com foco na contextualização e motivação do trabalho desenvolvido e os objetivos do trabalho.
- ii. CAPÍTULO 1: DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES DAS ESTAÇÕES DA RBMC COM USO DO SOFTWARE SARI - teve como propósito determinar as velocidades e incertezas de estações pertencentes à RBMC, a partir de séries temporais de coordenadas GNSS, com análise de sazonalidades e ruídos no *software* SARI.
- iii. CAPÍTULO 2: GERAÇÃO DE MODELO DE VELOCIDADE PARA UMA PORÇÃO DA PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA – BRASIL - teve como objetivo a determinação de um modelo de velocidade para o Brasil utilizando o interpolador geoestatístico (krigagem ordinária).
- iv. CAPÍTULO 3: PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS NO PROCESSO DE COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAIS E ÉPOCA DE COORDENADAS GNSS – teve como propósito mostrar o efeito da propagação de incertezas no processo de compatibilização de época e de referencial em coordenadas GNSS.
- v. CONCLUSÕES GERAIS – são apresentadas as considerações finais e recomendações para futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALINIA, H. S.; TIAMPO, K. F.; JAMES T. S. GPS coordinate time series measurements in Ontario and Quebec, Canada. **Journal of Geodesy**, v. 91, n. 6, p. 653-683, 2017. DOI. 10.1007/s00190-016-0987-5

CAÑADA, L. G. **Análisis de series temporales en estaciones permanentes GPS**. 2016. 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**. 2015. Tese Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV. Viçosa-MG, 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**, v. 21, n. 3, p. 590-609, 2015.

CHIU, Y. H.; SHIH, P. T.Y. National datum uncertainty due to reference frame transformation: case study for the geodetic datum of Taiwan. **Journal of Surveying Engineering**, v. 140, n. 3, p. 05014002, 2014.

COSTA, S. M. A. Estimativa do Campo de Velocidades a partir das Estações da RBMC. In: **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, Departamento de Geodésia. Rio de Janeiro, 2001 <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2004-2000/3100-estimativa-do-campo-de-velocidades-a-partir-das-estacoes-da-rbmc>> Acesso em: 24 out. 2019.

DREWES, H; SÁNCHEZ, L. The varying surface kinematics in Latin America: VEMOS2009, 2015, and 2017. In: **Symposium SIRGAS2017**. 2017.

GOUDARZI, M. A.; BAVILLE, S. Application of PPP with ambiguity resolution in earth surface deformation studies: a case study in eastern Canada. **Survey Review**, v. 50, n. 363, p. 531-544, 2017.

GOUDARZI, M. A.; COCARD, M.; SANTERRE, R. EPC: Matlab software to estimate Euler pole parameters. **GPS Solutions**, v. 18, n. 1, p. 153-162, 2013.

HACKL, M. **GPS Analysis: Strain Transients, and Colored Noise**. 2012. Dissertação de mestrado da Universitst Munchen. Munchen, 2012.

HAMLING, I. J.; WRIGHT, T. J.; HREINSDÓTTIR, S.; WALLACE, L. M. A snapshot of New Zealand's dynamic deformation field from Envisat InSAR and GNSS observations between 2003 and 2011. **Geophysical Research Letters**, p. 1-10, 2022.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **Transformation Parameters between ITRF Solutions**. < <https://itrf.ign.fr/en/solutions/transformations>>. Acesso em: 04 mai. 2022a.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **Transformation parameters from ITRF2020 to past ITRFs**.< https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020_TRFs.txt>. Acesso em: 04 mai. 2022b.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **ITRF2014** <<https://itrf.ign.fr/en/solutions/itrf2020>>. Acesso em: 08 abr. 2022c.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS**. < <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2022.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **Chronology of IGS Reference Frame Usage**. < <http://acc.igs.org/igs-frames.html> >. Acesso em: 24 jan. 2022a.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **ITRF2020 is available on line.** < <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008187.html>>. Acesso em: 18 abr. 2022b.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **Upcoming switch to IGS20/igs20.atx and repro3 standards.** < <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008234.html>>. Acesso em: 13 set. 2022c.

JAGODA, M. Determination of Motion Parameters of Selected Major Tectonic Plates Based on GNSS Station Positions and Velocities in the ITRF2014. **Sensors**, v. 21, n. 16, p. 5342, 2021.

LARSON, K.M.; FREYMUELLER, J.T.; PHILIPSEN, S. Global Plate Velocities from Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. B5, p. 9961-9981, 1997.

LAU, N. N.; COLEMAN, R.; HOA, H. M. Determination of tectonic velocities of some continuously operating reference stations (CORS) in: Vietnam 2016-2018 by using precise point positioning. **Vietnam Journal of Earth Sciences**, v. 43, n. 1, p. 1-12, 2021.

LUNA, M. P.; STALLER, A.; TOULKERIDIS, T.; PARRA, H. Methodological approach for the estimation of a new velocity model for continental Ecuador. **Open Geosciences**, v. 9, n. 1, p. 719-734, 2017. DOI. 10.1515/geo-2017-0054

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning. **The South American Plate Case**, v. 2, n. 2, p. 90-99, 2003. DOI. 10.5081/jgps.2.2.90

PEREZ, J. A. S. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizadas na Plana Sul-Americana: Estimadas a partir do processamento de dados GPS.** 2002. 166f. Dissertação da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2002.

PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS conventions (2010).** BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES SEVRES (FRANCE), 2010.

PUENTE, V.; FOLGUEIRA, M. ITRS/GCRS transformation: Uncertainty propagation analysis and short-term modelling of IAU 2006/2000A developments. **Advances in Space Research**, v. 63, n. 5, p. 1792-1802, 2019.

RAMÍREZ-ZELAYA, J.; ROSADO, B.; BARBA, P.; GÁRATE, J.; BERROCOSO, M. Analysis of Different GNSS Data Filtering Techniques and Comparison of Linear and Non-Linear Times Series Solutions: Application to GNSS Stations in Central America for Regional Geodynamic Model Determination. In: **Engineering Proceedings.** Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021. Vol. 5, No. 1, p. 29.

RAMOS, M. P. **Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas no PPP.** 99f. 2015. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) da UFV. Viçosa, 2015.

REN Y.; WANG J.; WANG H.; LIAN L.; HOU Y.; WANG Y. Construction of Velocity Field in Chinese Mainland Based on Local Seamless Delaunay Triangulation with Inverse Distance Weighting Method. **Geomatics and Information Science of Wuhan University.** V.46, n.7, p. 1071-1080, 2021.

SALAMANCA, G. E. D. **Modelagem da deformação da crosta continental do Norte dos Andes através de inversão de dados sísmicos e geodésicos**. 2016. 221f. Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal deformation and surface kinematics after the earthquakes in Latin America. **J Journal of Geodynamics**, v. 102, p. 1-23, 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

SILVA, A. L.; COSTA, S. M. A. Análises e resultados do centro de processamento SIRGAS - IBGE. **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**. Recife-PE, 2008.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **SIRGAS2000**. <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-realizations/sirgas2000/>>. Acesso em: 24 jan. 2022a.

SISTEMA DE REFERENCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **VEMOS: Modelo de velocidade para o SIRGAS**. < <https://www.sirgas.org/pt/velocity-model/>>. Acesso em: 28 abr. 2022b.

SMITH, D. **On the Propagation of Formed Error Estimates of Euler Pole Parameters into Modernized NSRS Coordinates**. Silver Spring – MD: NOAA Technical Memorandum NOS NGS 85, 2020.

SOLER, T.; HAN, J. Y.; WESTON, N. D. Variance–covariance matrix of transformed GPS positions: Case study for the NAD 83 geodetic datum. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 1, p. 04015004, 2016.

SOUZA, W. O. **Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana por meio de dados VLBI e GNSS**. 2013. 177f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) da UFPE. Recife, 2013.

UNIVERSITY-GOVERNED CONSORTIUM (UNAVCO). **Plate Motion Calculator**. <<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>>. Acesso em: 24 jan. 2022.

WANG, G. The 95% Confidence Interval for GNSS-Derived Site Velocities. **Journal of Surveying Engineering**, v. 148, n. 1, p. 04021030, 2022.

WANG, L; HERRING, T. Impact of estimating position offsets on the uncertainties of GNSS site velocity estimates. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2019. DOI. 10.1029/2019jb017705

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. 105f. Tese da Universidade Politécnica de Madri. Madri, 2014.

CAPÍTULO 1. DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADES DAS ESTAÇÕES DA RBMC COM USO DO *SOFTWARE* SARI

Velocities Determination of RBMC Stations Using the SARI Software

Resumo: Devido ao aperfeiçoamento da precisão do posicionamento com GNSS e à instalação de grandes redes de operação contínua, longas séries temporais de coordenadas GNSS agora são amplamente utilizadas para conhecer uma variedade de processos de deformação da Terra. Logo, uma tarefa que passou a ser muito utilizada é a determinação de velocidades de estações das redes de monitoramento contínuo, tendo diversas aplicações na geodésia. As componentes de velocidades de uma estação podem ser determinadas de modo simplificado, como resultado de uma regressão linear simples, assumindo que o comportamento da velocidade de uma estação responde a um modelo linear. Porém, para obter precisão melhor, é importante considerar que a velocidade da estação não esteja relacionada apenas à tendência, mas também em função da sazonalidade e de ruídos. É comum pressupor a presença de ruídos brancos em uma série temporal de coordenadas GNSS, porém, é importante estudar ruídos da lei de potência para determinar o tipo de ruído em cada série. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo realizar a determinação de velocidades das estações considerando tendência, sazonalidade e tipos de ruídos presentes nas séries. Os estudos foram realizados a partir de 94 estações pertencentes à RBMC, pós-processadas no serviço online IBGE-PPP e análises das séries de coordenadas executada no *software* SARI. Os resultados mostram que não há diferenças significativas na obtenção das velocidades planimétricas das estações quando é negligenciada a sazonalidade, bem como mostram que as análises de ruídos não afetam as velocidades das estações analisadas nesta pesquisa.

Palavras-chave: GNSS. SARI. Séries temporais. Modelo de velocidade.

Abstract: Lengthy GNSS (Global Navigation Satellite System) coordinate time series are now widely used to assess a variety of Earth deformation processes due to the improvement of GNSS accuracy and the installation of large networks of continuous operation. Therefore, a task that has come to be widely used is the determination of station velocity of the continuous monitoring networks, having several applications in geodesy. The velocity

components of a station can be determined in a simplified way, as a result of a simple linear regression, assuming that the behavior of a station's velocity responds to a linear model. However, to obtain more precision, it is critical to consider that the velocity of the season is not only related to the trend, but also as a function of seasonality and noise. It is common to assume the presence of white noise in a time series of GNSS coordinates, however, it is important to study power-law noise to determine the type of noise in each series. Thus, this study aimed to determine the velocity of stations considering trends, seasonality, and types of noise present in the series. The studies were carried out from 94 stations belonging to RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of the GNSS Systems), post-processed in the IBGE-PPP (Brazilian Institute of Geography and Statistics - Precise Point Positioning) online service and analyzes of the series of coordinates performed in the SARI (*Señales y Análisis de Ruido Interactivo*) software. The results indicate no significant differences in obtaining the planimetric velocity of the stations when seasonality is neglected. The research also conveys that the noise analysis does not affect the velocities of the stations analyzed.

Keywords: GNSS. SARI. Time Series. Velocity Model.

1.1 Introdução

As velocidades das estações GNSS são obtidas por meio da análise de séries temporais de coordenadas GNSS. Estas séries temporais contêm sinais induzidos pela deformação da Terra, mas também por erros sistemáticos (tendência), em diferentes escalas de tempo, desde a deformação das marés sub-diárias até a deformação interanual de carregamento de superfície e rotação da placa tectônica secular (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019).

Segundo Silva e Costa (2008), a metodologia aplicada na determinação do deslocamento horizontal de cada estação baseia-se na condição de linearidade do movimento das placas tectônicas. Essa condição também é utilizada em modelos geofísicos de movimento de placas. Segundo Zamora (2014), as componentes de velocidades de uma estação podem ser determinadas relativamente de forma fácil, como resultado de uma regressão linear simples, assumindo que o comportamento da velocidade de uma estação responde a um modelo linear. O autor ressalta que é necessário obter o vetor posição em função do tempo (séries temporais de coordenadas GNSS) para realizar o ajuste pelo método dos mínimos quadrados (MMQ).

Alguns autores consideram que a velocidade da estação não está relacionada apenas à tendência (modelo linear), mas também com a sazonalidade e ruídos (HE et al., 2017; CHOUSIANITIS et al., 2013; KLOS; BOS; BOGUSZ, 2018; BOCK et al., 2016; BOGUSZ et al., 2016; LUNA et al., 2017; NIKOLAIDIS, 2002). Salienta-se que grande parte destes trabalhos teve por finalidade a determinação dos tipos de ruídos e sazonalidade presentes no movimento da estação, em que é necessária uma análise mais detalhada de todos os fatores que afetam as séries temporais de coordenadas GNSS.

Segundo He et al. (2019), o modelo mais comum para descrever as propriedades estocásticas dos ruídos nas séries temporais de coordenadas GNSS é a combinação entre os ruídos de cintilação (*flicker* – ruído rosa) e branco. Já Berthier et al., 2019 estudaram, a partir de séries temporais de coordenadas GNSS, os efeitos da sazonalidade na determinação de velocidade vertical de estação GNSS para analisar a deformação induzida por carga sazonal.

Vários são os trabalhos realizados com intuito de determinar a tendência das séries temporais com maior acurácia (BENOIST et al., 2020; WILLIAMS et al., 2004; SANTAMARÍA- GÓMEZ et al., 2011; BOS et al., 2020). Neste íterim, Santamaría-Gómez (2019) implementou o *software* SARI para realizar o processamento de séries temporais de dados GNSS e permitir aos usuários visualizarem séries temporais de posições GNSS, removerem interativamente *outliers* e descontinuidades, bem como ajustar modelos e salvar os resultados. Mazzotti et al. (2020) realizaram diversas análises em séries temporais de coordenadas GNSS com intuito de verificar a eficiência de diversos *softwares* na determinação de velocidade de estações, sendo o *software* SARI aquele que obteve resultados mais satisfatórios.

Para que seja possível obter as séries de coordenadas obtidas com GNSS são necessárias estações GNSS de monitoramento contínuo. Dessa forma, serão utilizados dados GNSS da RBMC, que possui todas as estações pertencentes à placa tectônica Sul-Americana, a qual é alvo de estudo para esta pesquisa. Diversos trabalhos foram realizados com intuito de determinação de velocidades de estações presentes nessa placa, mas poucos realizaram análise de ruído e sazonalidade nas séries temporais de coordenadas obtidas com GNSS (SOUZA, 2013; PEREZ, 2002; PEREZ; MONICO; CHAVES, 2003; SÁNCHEZ; DREWES, 2016; SALAMANCA, 2016; CARVALHO, 2015; COSTA, 2001; SILVA; COSTA, 2008). Quando não é possível realizar a determinação de velocidade de estações GNSS pode-se utilizar modelo de velocidade, o SIRGAS atualiza continuamente, desde 2003, o VEMOS (*Velocity Model of SIRGAS*). Já foram lançando quatro versões do VEMOS que são: VEMOS2003

(referenciado ao ITRF2000 - *International Terrestrial Reference Frame 2000*); VEMOS2009 (referenciado ao ITRF2015); VEMOS2015 (referenciado ao ITRF2008); e o mais atual sendo o VEMOS2017 (referenciado ao ITRF2014). O VEMOS2017 que foi derivado de velocidades pontuais de 515 estações geodésicas de 01/01/2014 a 28/01/2017. De acordo com Drewes e Sánchez (2020), os melhores valores de incerteza acontecem na região mais estável da placa Sul-Americana.

Portanto, este trabalho teve como propósito determinar as velocidades de 94 estações pertencentes à RBMC (processadas no serviço online IBGE-PPP) a partir de séries temporais com análise de sazonalidades e ruídos no *software* SARI.

1.2 Séries temporais de coordenadas GNSS

Uma série temporal pode ser definida como uma sequência de observações tomadas no tempo ou qualquer conjunto de dados ou variáveis ordenadas no tempo (MORETTIN; TOLOI, 2006). De acordo com Box, Jenkins e Reinsel (2008), uma das principais peculiaridades no desenvolvimento de modelos de séries temporais é a suposição de alguma forma de equilíbrio estatístico. Um pressuposto particular desse tipo é o da estacionariedade. Geralmente, uma série temporal estacionária pode ser descrita de maneira útil por sua média, variância e função de autocorrelação ou por sua variação média e função de densidade espectral.

Os efeitos presentes nas séries temporais podem ser removidos mediante o ajustamento de uma função adequada aos dados. O vetor de resíduos do processo de ajustamento corresponde aos efeitos considerados no modelo matemático da série filtrada. A escolha do modelo matemático apropriado geralmente é feita com base no conhecimento de algumas hipóteses, ou seja, considera-se que a série esteja isenta de deslocamento, tendência e efeitos de natureza cíclica (NIKOLAIDIS, 2002).

A utilização e análise de séries temporais por pesquisadores de geociências vêm sendo cada vez mais empregadas como, por exemplo: no monitoramento de deformação da crosta; na eliminação de efeitos sazonais de coordenadas GPS (*Global Positioning System*); no monitoramento de ruídos em dados de monitoramento de barragens; na análise de multicaminho dos sinais GNSS em estações de monitoramento contínuo; na verificação de influência na carga hidrológica na altitude geométrica; na estimativa de tendências e na determinação de velocidade de estações (GEIRSSON, 2003; ROSA, 2008; LIMA, 2012;

ALVES et al., 2013; NASCIMENTO, 2016; DIDOVA et al., 2016; ALINIA; TIAPO; JAMES, 2017).

A análise da série temporal possibilita extrair características de eventos que ocorrem no decorrer do tempo, tornando possível identificar os fatores que, de alguma maneira, regem o comportamento delas (ROSA, 2008). Isto evidencia a potencialidade das análises de séries temporais no tocante às técnicas para a verificação de tendência, sazonalidade e ruído (CAÑADA, 2016). A tendência é definida como um padrão de crescimento ou decrescimento da função em certo período de tempo. A tendência nas séries temporais de coordenadas GNSS corresponde à velocidade da estação.

A sazonalidade representa o comportamento periódico da série temporal, ou seja, quando as similaridades na série ocorrem após intervalos de tempo básicos. A sazonalidade pode ser estimada mediante o ajuste de uma função que melhor descreva o comportamento da série. De modo geral, uma série apresenta comportamento cíclico onde os métodos empregados procuram encontrar um modelo que a represente. Desta forma, o ajuste de uma função trigonométrica apontaria características importantes, como amplitude e frequência dos ciclos (MORETTIN; TOLOI, 2006). Para realizar o ajuste da série, algumas técnicas podem ser utilizadas, como: filtro de Kalman, *wavelet* (ondeletas), transformação de Fourier e o MMQ, além da integração entre alguns dos métodos supracitados (ROSA, 2008; SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019).

Com relação ao ruído, é comum pressupor a presença apenas de ruídos brancos em uma série temporal de coordenadas GNSS, com objetivo de simplificar as análises. Porém, vários estudos são realizados com objetivo de obter as tendências das séries temporais com precisão melhor. O estudo do espectro de potência (k) é usado para determinar o tipo de ruído em cada série. Assim, o modelo de ruído de lei de potência é ruído branco (*white*) quando k igual a zero ($k=0$); o ruído de cintilação (*flicker*) quando k igual a -1, e k igual a -2 é ruído de passeio aleatório (*random walk*) (WANG; HERRING, 2019).

Segundo Klos et al. (2018), o ruído começa a se tornar mais importante que os sinais periódicos (sazonalidade) para séries temporais com mais de 9 anos. Ou seja, os sinais periódicos são mais importantes para escalas de tempo curtas, enquanto o ruído estocástico desempenha um papel significativo quando a duração da série temporal aumenta.

O estudo do espectro de potência (k) tem sido usado para determinar o tipo de ruído em cada série. Vários estudos determinam a presença de ruído correlacionado com o tempo e seu efeito na estimativa da incerteza da série. Segundo Santamaría-Gómez (2019), o modelo

de análise de ruído com lei de potência e o ruído branco são as que melhor descrevem as características de ruído nas três componentes de séries temporais de coordenadas GNSS.

Conforme Caporali (2003), a densidade espectral de potência das séries temporais é usada para inferir sobre a variação da mudança na inclinação (tendência) e identificar, com base no conhecimento dos índices espectrais, o tipo de ruído presente na série. Portanto, é possível considerar os ruídos na modelagem matemática utilizada na determinação das velocidades e, deste modo, melhorar a precisão desta estimativa. A partir dessas séries temporais ajustadas (após as análises de tendência, sazonalidade e ruídos), é possível obter as velocidades das estações.

1.2.1 Análise de séries temporais no SARI

O SARI foi desenvolvido na linguagem de programação R sob a estrutura interativa do pacote Shiny R. Ele representa um conjunto de ferramentas de análise interativas de séries temporais de coordenadas obtidas com GNSS que foi criado com foco na visualização em série e processamento de sinais usando MMQ, filtro de Kalman e análise de ruído estocástico do MLE (*Maximum-Likelihood Estimation*) (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019).

O *software* pode ser utilizado em um computador local ou remotamente a partir de um servidor público da Web acessível em <https://alvarosg.shinyapps.io/sari/>. A vantagem da última opção é que o usuário não precisa se preocupar com os próprios recursos de computação. O SARI utiliza uma interface interativa baseada em navegador para visualizar séries de dados, ajustar modelos multiparâmetros e analisar os resíduos (SANTAMARÍA-GÓMEZ, 2019).

De acordo com Santamaría- Gómez (2019), o *software* está orientado para séries temporais diárias e semanais de posição GNSS, porém, qualquer outra série de dados pode ser analisada, desde que seja utilizado o formato tabulado consistente. O SARI disponibiliza dois métodos de ajustamento: o método dos mínimos quadrados (MMQ) e filtro de Kalman.

O ajustamento pelo MMQ usa o algoritmo clássico de Gauss-Newton. Santamaría-Gómez (2019) afirma que, a precisão dos parâmetros estimados no MMQ é fornecida assumindo que os resíduos são aleatórios e independentes, possuindo distribuição normal. Salienta-se que as duas últimas hipóteses não são geralmente satisfeitas quando ocorre a presença de ruído relacionado ao tempo na série. Já o método de ajustamento pelo filtro de Kalman foi implementado em dois tipos diferentes: o EKF (*Extended Kalman Filter*) e o UKF

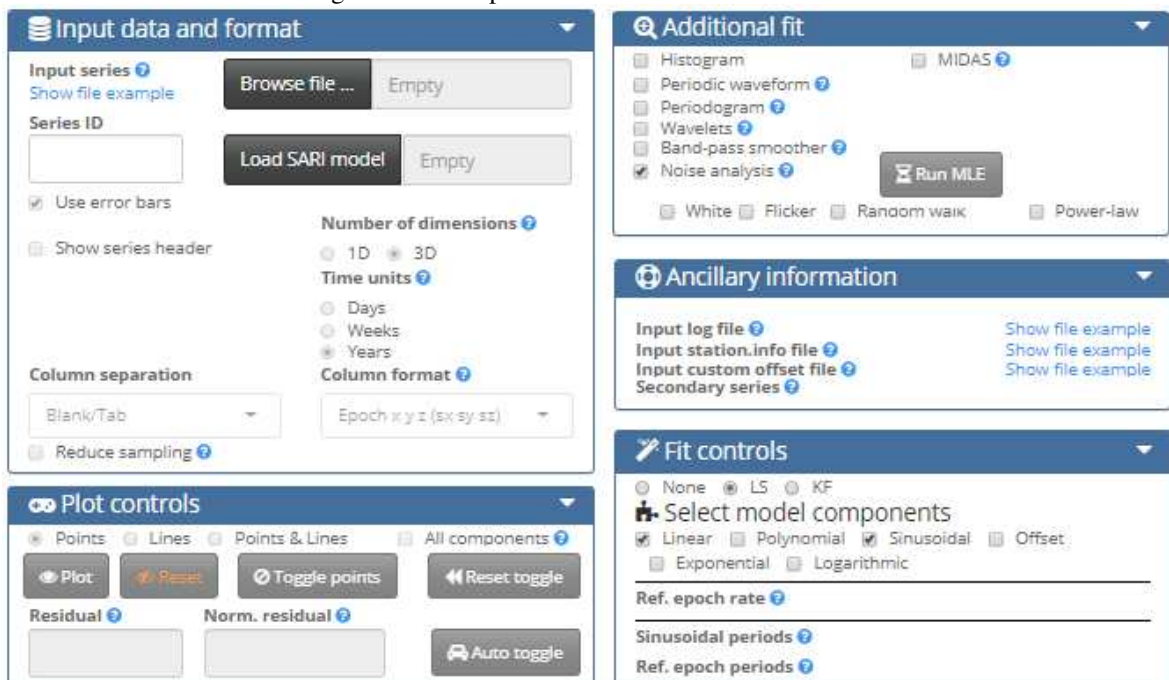
(*Unscented Kalman Filter*). Segundo Santamaría- Gómez (2019), ambas as implementações de filtro Kalman são baseadas no algoritmo RTS (*Rauch Tung Striebel*) (RAUCH; TUNG; STRIEBEL, 1965).

O *software* tem cinco abas de ferramentas principais, que são:

- Dados e formato de entrada: entrada dos arquivos, definição dos formatos e redução da amostragem da série.
- Controles de plotagem: plota a série e realiza a interação para remoção de *outliers*.
- Informações auxiliares: entrada de arquivos auxiliares relativos às séries temporais. Por exemplo, uma série secundária ou um arquivo de descontinuidade.
- Controles de ajuste: métodos de ajustamento da série e os componentes do modelo.
- Ajuste adicional: ferramentas importantes no ajustamento de séries temporais.

A Figura 1 ilustra as principais ferramentas do *software* SARI. Salienta-se que a figura não corresponde ao formato real do SARI; apenas foi organizado com esta configuração para um melhor entendimento.

Figura 1 – Principais ferramentas do software SARI.



Fonte: Adaptada de Santamaría- Gómez (2019).

A aba de ajustes adicionais do SARI possui algumas ferramentas importantes, a saber: (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019):

- a) MIDAS (Median Interannual Difference Adjusted for Skewness): é um estimador de tendências automatizado, tendo sido implementado com base na descrição de Blewitt et al. (2016);
- b) Histograma dos resíduos: realiza avaliação de estacionariedade usando os testes ADF (Augmented Dickey-Fuller) e KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin);
- c) Periodic waveform: É estimada a partir da série residual assumindo a estacionariedade da série temporal;
- d) Periodograma: utiliza o periodograma de Lomb-Scargle e, no caso de amostragem irregular da série, o período de Nyquist é definido por Eyer e Bartholdi (1999).
- e) Wavelet: calcula o produto interno da série e a wavelet de Morlet com valor complexo na qual é dimensionada e representada com frequência central igual a 2π radianos, conforme descrito em Keitt (2008);
- f) band-pass smoother: Foi implementado com base na descrição de Vondrák (1977). Aceita dois períodos de entrada: o passa-baixo e o passa-alta. Esta ferramenta reduz a variabilidade em torno dos períodos escolhidos, a partir de observações amostradas de forma irregular, não preenchidas, não interpoladas e incertas ou de amostras uniformes com intervalos de erros variáveis;
- g) Análise de ruídos (*noise analysis*): Foi implementado conforme Williams (2003) e Bos *et al.* (2013). As análises de ruídos são estimadas por meio da MLE e possuem quatro processos estocásticos: ruído branco, ruído de cintilação, ruído de passeio aleatório e ruído da lei de potência. A lei de potência é uma generalização dos outros três processos e, portanto, não é possível estimar a lei de potência com oscilação ou passeio aleatório, mas é compatível com o ruído branco.

O SARI possui uma vasta possibilidade de processamento de séries temporais de forma interativa. Salienta-se que o tempo de processamento aumenta consideravelmente para séries longas, com alta amostragem e modelos de ruído complexos. Séries longas podem ser

ajustadas, mas o benefício interativo é perdido. Portanto, para economizar tempo de processamento, é altamente recomendável reduzir a amostragem da série ao mínimo necessário (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019). Santamaría-Gómez (2019) recomenda amostragem semanal nas análises de séries temporais longas de coordenadas obtidas com GNSS.

1.3 Materiais e métodos

1.3.1 Materiais

A pesquisa foi realizada utilizando dados da RBMC coletados por receptores localizados em território brasileiro e pertencente à placa tectônica Sul-Americana. Foram utilizados dados diários de observáveis GNSS, no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), de 94 estações, no período de 01/01/2012 a 29/12/2018, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalo de tempo para aquisição dos dados.

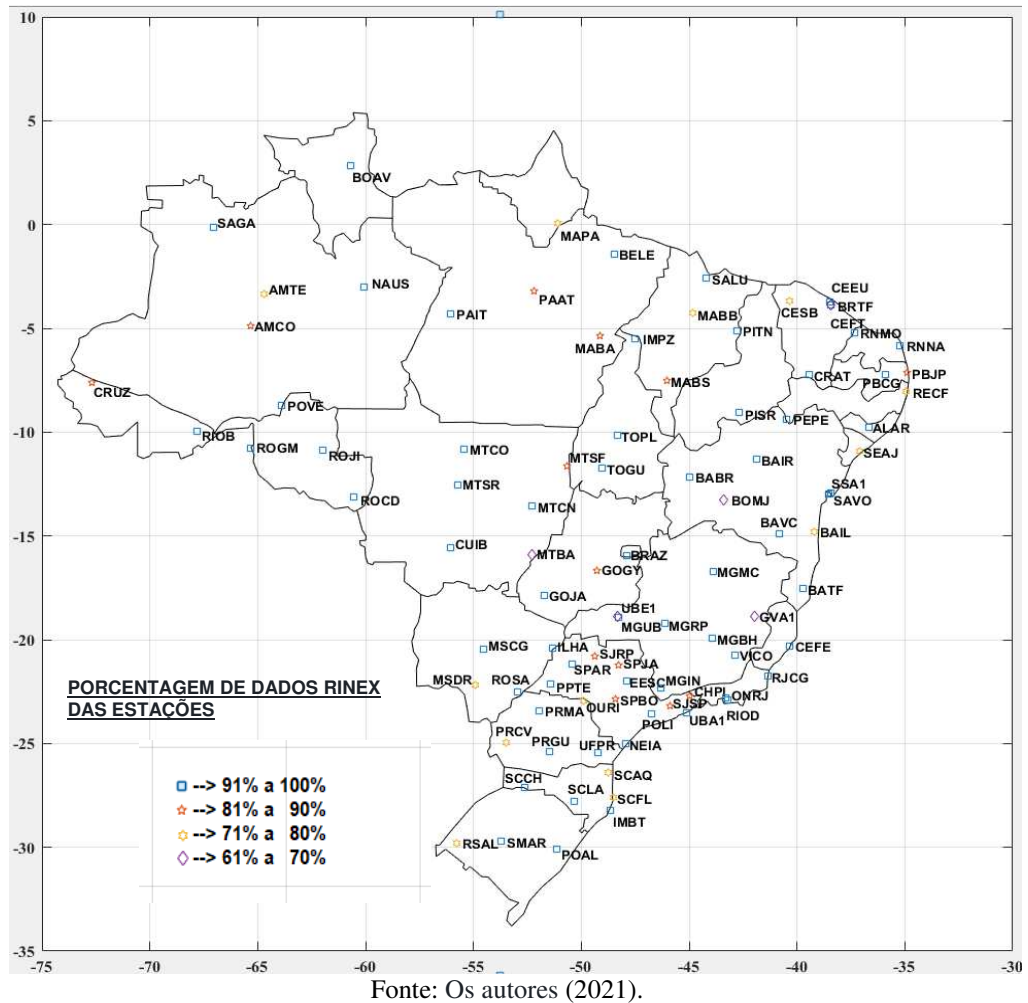
	Datas	Semana GPS	Época	Época média	Total de dias	Total de Semanas
Início	01/01/2012	1669	2012,00 (000/365)	2015,50	2554	365
Fim	29/12/2018	2033	2018,99 (363/365)			

Fonte: Os autores (2021).

É importante destacar que os resultados obtidos no IBGE-PPP, de acordo com o período de dados processados (Tabela 1) estão referenciados à três materializações distintas: IGS08 (17/04/2011 a 06/10/2012), IGb08 (07/10/2012 a 28/01/2017) e IGS14 (29/01/2017 a 16/05/2020) (IBGE, 2017).

O critério utilizado na escolha das estações foi de acordo com a disponibilidade de dados. Foram escolhidas todas as estações com, pelo menos, quatro anos de dados para o período supracitado. Ressalta-se que a distribuição geográfica das estações não é homogênea, sendo possível perceber algumas regiões com poucas estações e outras com alta densidade. As estações utilizadas nesta pesquisa são apresentadas na Figura 2, onde também são apresentadas as porcentagens de dados de observação das estações utilizadas.

Figura 2 – Porcentagem de dados RINEX das estações selecionadas no estudo, no período de 01/01/2012 a 29/12/2018.

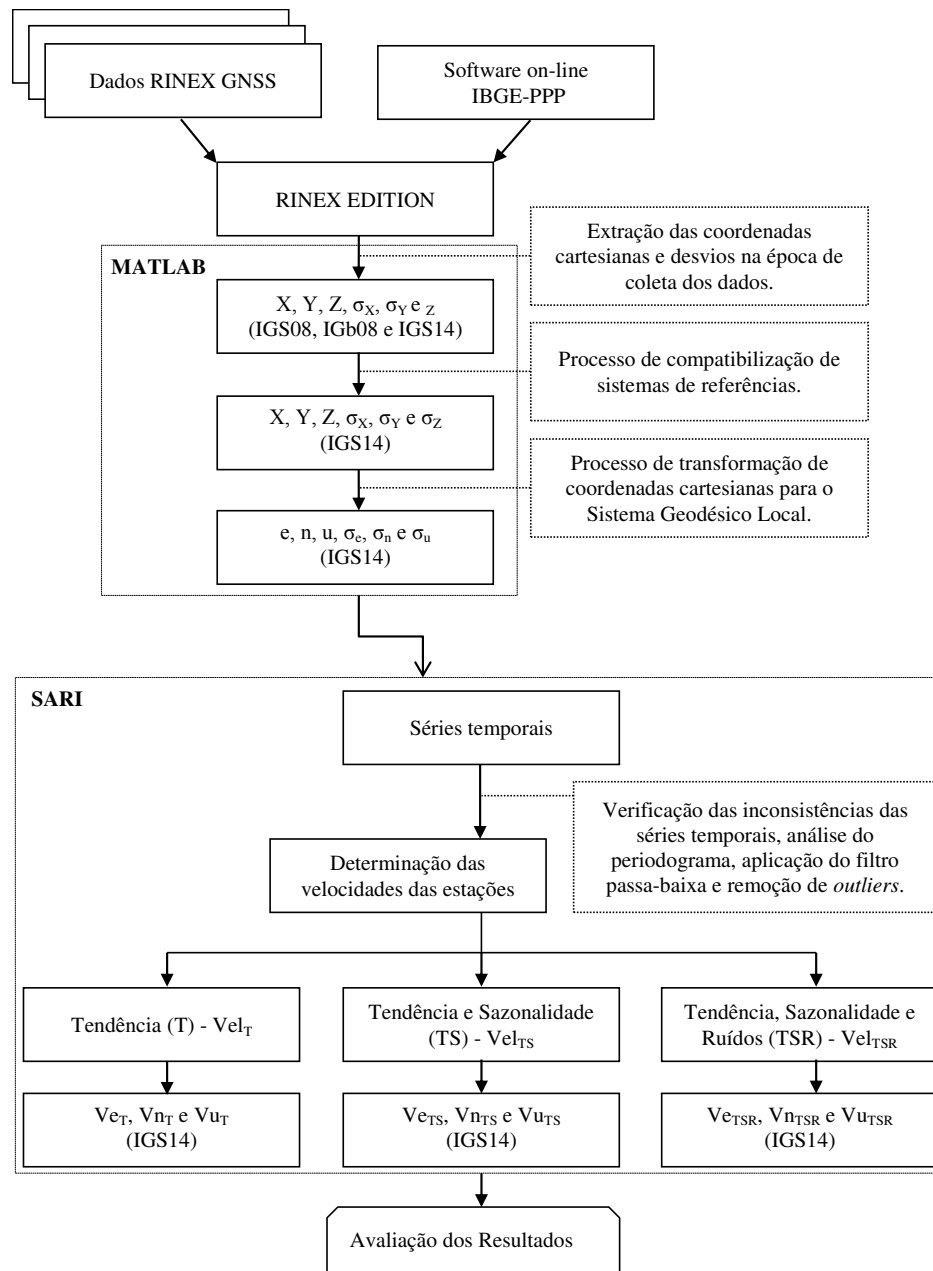


Além do *software* SARI e do serviço online IBGE-PPP, também foram utilizados o *softwares* Matlab (versão 2012b) e o RINEX EDITION (NASCIMENTO et al., 2017).

1.3.2 Métodos

Os principais passos metodológicos empregados nesta pesquisa são representados pela Figura 3. Os arquivos no formato RINEX (24 h) foram pós-processados pelo método de PPP, modo estático, pelo serviço *on-line* IBGE-PPP com suporte do *software* RINEX EDITION (NASCIMENTO et al., 2017), que auxiliou na realização dos *downloads* e processamentos dos arquivos no formato RINEX, bem como na realização das extrações das informações dos arquivos de processamentos, de forma semiautomatizada.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia realizada nesta pesquisa.



Fonte: Os autores (2021).

Depois do pós-processamento dos dados GNSS, foram realizadas as compatibilizações dos referenciais das coordenadas para a atual materialização do IGS (IGS14). É importante frisar que, ao término do processamento, foram obtidas as coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivas precisões (X , Y , Z , σ_x , σ_y e σ_z) para todas as estações analisadas. Essas coordenadas e precisões foram transformadas para o SGL (Sistema Geodésico Local - e , n , u , σ_e , σ_n e σ_u). Estes processamentos foram realizados a partir de rotinas implementadas no *software* Matlab (versão 2012b).

As coordenadas diárias estimadas para cada componente no SGL durante um período representam as séries temporais das estações, ou seja, cada estação gerou três séries temporais.

Após a etapa de determinação das coordenadas no SGL, foram realizados três experimentos para determinação das velocidades das estações, nos quais as séries temporais foram ajustadas com uso do *software* SARI pelo MMQ. Por fim, foram salvos os arquivos de cada um dos três processamentos para posterior análise dos resultados, as três soluções realizadas com o programa SARI são:

- i. Solução 1: considerando apenas a tendência da série temporal (Vel_T);
- ii. Solução 2: considerando a Solução 1 mais efeitos sazonais (Vel_{TS}); e
- iii. Solução 3: considerando a Solução 2 mais efeitos de ruídos (Vel_{TSR}).

Segundo Santamaria-Gómez (2019), não apenas a tendência e sazonalidade precisam ser analisadas em uma série de coordenadas GNSS, mas também as propriedades do ruído, sendo o método de estimativa de máxima verossimilhança (MLE) amplamente utilizado para esse tipo de análise. Sendo assim, os índices espectrais (k) dos ruídos da lei de potência foram calculados usando-se a estimativa de máxima verossimilhança no experimento Vel_{TSR} .

Ao realizar o processamento das séries de coordenadas obtidas com GNSS, inicialmente foram carregados os dados das séries e selecionado o tipo de ajuste relativo a cada experimento. Em seguida foi realizada a remoção de *outliers*. Salienta-se que a detecção de *outlier* é uma parte importante, uma vez que eles podem interferir na obtenção das velocidades de estações GNSS e dificultar as análises de outros sinais nas séries temporais (GEIRSSON, 2003). Os *outliers* podem ser causados, dentre outros fatores, pela presença de arquivos de dados com falhas.

Nesta pesquisa, os *outliers* foram removidos depois de plotar o periodograma dos resíduos e realizar a aplicação do filtro passa-baixa de Vondrák (1977), conforme recomendado por Santamaría- Gómez (2019). Após a combinação do uso do periodograma e do filtro passa-baixa, foi realizado, de forma interativa, a remoção dos *outliers* de acordo com as características de cada série temporal. Ressalta-se que o SARI realiza, de forma automática, o novo processamento posteriormente à exclusão dos *outliers*.

Para Klos, Bos e Bogusz (2018), os ruídos têm influência significativa na incerteza das velocidades. Os autores ainda afirmam que qualquer sinal sazonal ou periodicidade residual

não modelado e removido adequadamente, moverá a parte estocástica para um ruído muito mais correlacionado, fazendo com que as incertezas sejam superestimadas. Além disso, a solução Vel_{TSR} apresentou as menores discrepâncias dimensionais médias, quando comparado com a solução multianual do SIRGAS-CON realização SIR17P01 (época 2015). Dessa forma, assumindo-se que as velocidades obtidas pelo experimento Vel_{TSR} correspondem aos valores mais confiáveis para as estações, este experimento foi comparado com os demais. A realização SIR17P01 está associada à época de referência de 17/04/2011 até 28/01/2017, alinhado também ao IGS14. Maiores informações podem ser obtidas em (SÁNCHEZ; DREWES, 2020) ou no *site* do SIRGAS (<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/coordinates/multi-year-solutions/>).

1.4 Resultados e Discussão

Inicialmente, serão apresentadas as velocidades das 94 estações analisadas nesta pesquisa e obtidas a partir dos três experimentos realizados (Vel_T , Vel_{TS} e Vel_{TSR}), conforme apresenta a Tabela 2.

Tabela 2 - Velocidades das 94 estações da RBMC analisadas nesta pesquisa a partir dos três experimentos (Vel_T , Vel_{TS} e Vel_{TSR}).

(continua)

	Vel_T - (mm/ano)			Vel_{TS} - (mm/ano)			Vel_{TSR} - (mm/ano)		
	Ve_T	Vn_T	Vu_T	Ve_{TS}	Vn_{TS}	Vu_{TS}	Ve_{TSR}	Vn_{TSR}	Vu_{TSR}
ALAR	-4,07 ± 0,04	12,71 ± 0,02	0,20 ± 0,06	-4,09 ± 0,04	12,69 ± 0,02	0,18 ± 0,06	-4,13 ± 0,25	12,66 ± 0,34	0,14 ± 0,38
AMCO	-3,18 ± 0,07	11,80 ± 0,05	0,23 ± 0,16	-3,14 ± 0,06	11,77 ± 0,04	0,01 ± 0,09	-3,18 ± 0,23	11,78 ± 0,56	-0,02 ± 0,67
AMTE	-5,91 ± 0,09	11,56 ± 0,08	2,45 ± 0,31	-5,99 ± 0,08	11,53 ± 0,07	2,76 ± 0,16	-6,00 ± 0,29	11,50 ± 0,67	2,71 ± 1,63
BABR	-3,11 ± 0,04	12,96 ± 0,04	3,65 ± 0,09	-3,16 ± 0,04	13,02 ± 0,04	3,37 ± 0,08	-3,18 ± 0,25	13,02 ± 0,48	3,38 ± 0,50
BAIL	-3,17 ± 0,08	13,71 ± 0,06	-0,07 ± 0,13	-3,17 ± 0,08	13,70 ± 0,06	-0,11 ± 0,13	-3,24 ± 0,46	13,67 ± 0,67	-0,11 ± 1,14
BAIR	-5,04 ± 0,05	12,29 ± 0,04	1,53 ± 0,07	-5,07 ± 0,05	12,29 ± 0,04	1,43 ± 0,07	-5,10 ± 0,36	12,28 ± 0,45	1,41 ± 0,62
BATF	-2,65 ± 0,07	13,11 ± 0,04	-1,97 ± 0,20	-2,65 ± 0,06	13,12 ± 0,04	-1,99 ± 0,19	-2,70 ± 0,49	13,08 ± 0,50	-1,67 ± 1,51
BAVC	-4,50 ± 0,03	13,64 ± 0,02	0,54 ± 0,06	-4,57 ± 0,03	13,64 ± 0,02	0,43 ± 0,06	-4,72 ± 0,31	13,72 ± 0,57	0,40 ± 0,79
BELE	-4,36 ± 0,04	13,36 ± 0,03	1,95 ± 0,10	-4,41 ± 0,04	13,29 ± 0,03	1,64 ± 0,08	-4,43 ± 0,22	13,26 ± 0,35	1,63 ± 0,50
BOAV	-4,06 ± 0,03	12,20 ± 0,04	1,19 ± 0,09	-4,04 ± 0,03	12,18 ± 0,03	1,18 ± 0,06	-4,08 ± 0,19	12,20 ± 0,31	1,20 ± 0,75
BOMJ	-4,71 ± 0,07	12,93 ± 0,06	3,33 ± 0,14	-4,80 ± 0,06	12,95 ± 0,06	3,04 ± 0,11	-4,82 ± 0,36	12,96 ± 0,74	3,04 ± 0,65
BRAZ	-1,96 ± 0,05	12,34 ± 0,03	-1,01 ± 0,12	-2,01 ± 0,05	12,32 ± 0,03	-1,01 ± 0,10	-2,05 ± 0,60	12,28 ± 0,54	-1,03 ± 1,25
BRTF	-4,46 ± 0,05	14,54 ± 0,04	1,83 ± 0,08	-4,60 ± 0,05	14,47 ± 0,04	1,37 ± 0,08	-4,61 ± 0,29	14,48 ± 0,78	1,42 ± 0,82
CEEU	-5,76 ± 0,05	12,20 ± 0,04	0,27 ± 0,06	-5,80 ± 0,05	12,20 ± 0,04	0,20 ± 0,05	-5,84 ± 0,28	12,21 ± 0,38	0,18 ± 0,40
CEFE	-3,84 ± 0,05	13,06 ± 0,04	1,35 ± 0,07	-3,86 ± 0,05	13,08 ± 0,04	1,30 ± 0,07	-3,89 ± 0,26	13,08 ± 0,46	1,28 ± 0,49
CEFT	-5,76 ± 0,07	12,62 ± 0,05	-1,41 ± 0,08	-5,77 ± 0,07	12,65 ± 0,05	-1,42 ± 0,08	-5,84 ± 0,49	12,56 ± 0,77	-1,55 ± 0,58

(continua)

	Vel _T - (mm/ano)			Vel _{TS} - (mm/ano)			Vel _{TSR} - (mm/ano)		
	Ve _T	Vn _T	Vu _T	Ve _{TS}	Vn _{TS}	Vu _{TS}	Ve _{TSR}	Vn _{TSR}	Vu _{TSR}
CESB	-4,60 ± 0,07	13,28 ± 0,06	-3,19 ± 0,12	-4,64 ± 0,07	13,30 ± 0,06	-3,34 ± 0,10	-4,68 ± 0,36	13,28 ± 0,66	-3,37 ± 0,68
CHPI	-3,62 ± 0,05	12,65 ± 0,03	1,24 ± 0,09	-3,64 ± 0,05	12,69 ± 0,03	1,09 ± 0,08	-3,70 ± 0,31	12,69 ± 0,50	1,06 ± 0,44
CRAT	-4,98 ± 0,07	13,28 ± 0,05	-0,25 ± 0,11	-5,01 ± 0,07	13,26 ± 0,05	-0,33 ± 0,10	-5,04 ± 0,44	13,26 ± 0,37	-0,37 ± 0,98
CRUZ	-2,91 ± 0,06	10,96 ± 0,05	-1,98 ± 0,12	-2,90 ± 0,05	10,94 ± 0,05	-1,99 ± 0,09	-2,92 ± 0,37	10,92 ± 0,48	-2,06 ± 0,71
CUIB	-0,91 ± 0,06	11,00 ± 0,06	0,16 ± 0,12	-0,92 ± 0,06	11,05 ± 0,05	-0,14 ± 0,09	-0,96 ± 0,55	11,02 ± 1,09	-0,18 ± 0,79
EESC	-4,19 ± 0,04	12,35 ± 0,03	0,73 ± 0,08	-4,20 ± 0,04	12,35 ± 0,03	0,52 ± 0,07	-4,22 ± 0,30	12,33 ± 0,52	0,49 ± 0,78
GOGY	-3,71 ± 0,05	12,32 ± 0,06	3,89 ± 0,14	-3,72 ± 0,05	12,36 ± 0,05	3,62 ± 0,11	-3,74 ± 0,38	12,34 ± 0,49	3,62 ± 1,04
GOJA	-3,14 ± 0,05	11,83 ± 0,04	-1,27 ± 0,09	-3,14 ± 0,05	11,84 ± 0,04	-1,41 ± 0,07	-3,17 ± 0,30	11,82 ± 0,47	-1,42 ± 0,56
GVA1	-3,69 ± 0,08	13,00 ± 0,05	0,20 ± 0,14	-3,78 ± 0,08	13,00 ± 0,05	-0,09 ± 0,13	-3,83 ± 0,64	12,98 ± 0,92	-0,07 ± 1,63
ILHA	-2,65 ± 0,03	12,47 ± 0,04	0,10 ± 0,11	-2,66 ± 0,03	12,45 ± 0,04	0,30 ± 0,10	-2,71 ± 0,30	12,44 ± 0,47	0,28 ± 0,87
IMBT	-3,63 ± 0,05	12,49 ± 0,03	-0,54 ± 0,06	-3,65 ± 0,05	12,51 ± 0,03	-0,52 ± 0,06	-3,79 ± 0,45	12,47 ± 0,60	-0,61 ± 0,72
IMPZ	-4,41 ± 0,04	12,59 ± 0,03	-1,17 ± 0,08	-4,43 ± 0,04	12,59 ± 0,03	-1,33 ± 0,06	-4,44 ± 0,19	12,57 ± 0,28	-1,34 ± 0,53
MABA	-3,03 ± 0,05	12,37 ± 0,03	-1,17 ± 0,11	-3,04 ± 0,05	12,37 ± 0,03	-1,29 ± 0,07	-3,09 ± 0,31	12,36 ± 0,34	-1,30 ± 0,75
MABB	-2,76 ± 0,07	13,01 ± 0,05	1,67 ± 0,15	-2,85 ± 0,07	12,97 ± 0,05	1,06 ± 0,12	-2,88 ± 0,38	12,97 ± 0,51	1,07 ± 0,81
MABS	-5,28 ± 0,07	12,22 ± 0,04	2,56 ± 0,16	-5,33 ± 0,07	12,21 ± 0,04	2,30 ± 0,13	-5,39 ± 0,30	12,21 ± 0,38	2,29 ± 1,30
MAPA	-3,90 ± 0,06	13,01 ± 0,04	-0,01 ± 0,12	-3,92 ± 0,06	12,98 ± 0,04	-0,27 ± 0,09	-3,94 ± 0,32	12,94 ± 0,48	-0,32 ± 0,54
MGBH	-5,26 ± 0,04	12,19 ± 0,03	2,93 ± 0,10	-5,28 ± 0,04	12,20 ± 0,03	2,83 ± 0,09	-5,43 ± 0,46	12,17 ± 0,58	2,94 ± 1,00
MGIN	-3,49 ± 0,03	13,06 ± 0,03	1,05 ± 0,07	-3,51 ± 0,03	13,08 ± 0,03	0,95 ± 0,06	-3,53 ± 0,26	13,08 ± 0,42	0,94 ± 0,55
MGMC	-4,03 ± 0,03	13,79 ± 0,04	5,34 ± 0,06	-4,06 ± 0,03	13,81 ± 0,04	5,25 ± 0,06	-4,08 ± 0,25	13,80 ± 0,48	5,23 ± 0,50
MGRP	-3,07 ± 0,04	12,44 ± 0,03	2,88 ± 0,10	-3,09 ± 0,04	12,45 ± 0,03	2,70 ± 0,09	-3,14 ± 0,24	12,43 ± 0,51	2,69 ± 0,79
MGUB	-3,53 ± 0,03	12,54 ± 0,03	2,36 ± 0,08	-3,56 ± 0,03	12,58 ± 0,03	2,05 ± 0,07	-3,56 ± 0,27	12,59 ± 0,40	2,01 ± 0,60
MSCG	-2,32 ± 0,04	12,55 ± 0,06	-3,43 ± 0,12	-2,29 ± 0,04	12,67 ± 0,06	-3,57 ± 0,11	-2,33 ± 0,33	12,65 ± 0,62	-3,62 ± 1,16
MSDR	-3,10 ± 0,05	11,40 ± 0,05	-2,09 ± 0,12	-3,10 ± 0,05	11,40 ± 0,05	-2,07 ± 0,10	-3,13 ± 0,35	11,36 ± 0,54	-2,10 ± 0,89
MTBA	-2,99 ± 0,05	12,75 ± 0,05	-0,09 ± 0,16	-2,99 ± 0,05	12,89 ± 0,04	-0,44 ± 0,11	-3,03 ± 0,36	12,87 ± 0,55	-0,45 ± 0,65
MITCN	-3,63 ± 0,04	13,60 ± 0,04	1,56 ± 0,10	-3,64 ± 0,04	13,66 ± 0,04	1,16 ± 0,07	-3,68 ± 0,22	13,68 ± 0,50	1,16 ± 0,50
MITCO	-3,50 ± 0,04	12,90 ± 0,04	3,02 ± 0,10	-3,50 ± 0,04	12,92 ± 0,04	2,79 ± 0,06	-3,65 ± 0,18	12,93 ± 0,47	2,90 ± 0,69
MTSF	-3,74 ± 0,05	12,76 ± 0,03	1,21 ± 0,10	-3,74 ± 0,05	12,82 ± 0,03	1,20 ± 0,06	-3,76 ± 0,24	12,81 ± 0,40	1,17 ± 0,60
MTSR	-4,20 ± 0,05	13,00 ± 0,04	0,53 ± 0,13	-4,21 ± 0,05	13,01 ± 0,03	0,21 ± 0,09	-4,25 ± 0,27	13,01 ± 0,34	0,20 ± 0,71
NAUS	-4,21 ± 0,07	13,55 ± 0,08	1,34 ± 0,24	-4,19 ± 0,07	13,42 ± 0,07	0,77 ± 0,13	-4,25 ± 0,34	13,43 ± 1,35	0,73 ± 1,56
NEIA	-1,58 ± 0,05	11,90 ± 0,04	1,39 ± 0,19	-1,58 ± 0,05	11,92 ± 0,04	1,39 ± 0,19	-1,58 ± 0,38	11,89 ± 0,54	1,40 ± 3,92
ONRJ	-2,88 ± 0,05	13,34 ± 0,04	4,11 ± 0,08	-2,91 ± 0,05	13,38 ± 0,04	4,00 ± 0,07	-3,11 ± 0,42	13,40 ± 0,82	3,88 ± 0,72
OURI	-2,13 ± 0,05	12,06 ± 0,04	-3,85 ± 0,11	-2,17 ± 0,09	12,01 ± 0,04	-3,85 ± 0,09	-2,18 ± 0,45	12,02 ± 0,64	-3,93 ± 0,95
PAAT	-4,18 ± 0,07	13,10 ± 0,04	0,97 ± 0,20	-4,23 ± 0,10	13,09 ± 0,04	0,96 ± 0,10	-4,22 ± 0,27	13,10 ± 0,43	0,95 ± 0,80
PAIT	-3,41 ± 0,05	12,90 ± 0,05	2,41 ± 0,19	-3,45 ± 0,09	12,91 ± 0,05	2,42 ± 0,14	-3,45 ± 0,30	12,92 ± 0,41	2,09 ± 1,64
PBCG	-5,29 ± 0,05	11,83 ± 0,03	0,27 ± 0,05	-5,33 ± 0,08	11,81 ± 0,03	0,26 ± 0,04	-5,33 ± 0,19	11,82 ± 0,37	0,24 ± 0,40
PBJP	-4,56 ± 0,07	14,51 ± 0,07	1,41 ± 0,14	-4,62 ± 0,13	14,46 ± 0,07	1,42 ± 0,12	-4,62 ± 0,42	14,48 ± 0,75	1,32 ± 1,13
PEPE	-4,71 ± 0,05	12,80 ± 0,04	0,69 ± 0,09	-4,78 ± 0,18	12,84 ± 0,04	0,67 ± 0,07	-4,86 ± 0,33	12,86 ± 0,57	0,54 ± 0,91
PISR	-4,65 ± 0,06	13,00 ± 0,03	1,11 ± 0,11	-4,69 ± 0,08	13,00 ± 0,03	1,10 ± 0,09	-4,69 ± 0,30	13,01 ± 0,30	0,97 ± 0,87
PITN	-3,89 ± 0,04	12,68 ± 0,03	1,02 ± 0,08	-3,92 ± 0,07	12,66 ± 0,03	1,02 ± 0,05	-3,93 ± 0,22	12,66 ± 0,40	0,86 ± 0,49
POAL	-2,97 ± 0,05	11,85 ± 0,04	-0,71 ± 0,08	-2,99 ± 0,12	11,91 ± 0,03	-0,71 ± 0,06	-3,06 ± 0,38	11,91 ± 0,53	-0,79 ± 0,76
POLI	-1,31 ± 0,05	13,74 ± 0,07	-1,78 ± 0,11	-1,33 ± 0,08	13,79 ± 0,07	-1,77 ± 0,09	-1,35 ± 0,57	13,77 ± 0,68	-2,01 ± 1,00
POVE	-3,01 ± 0,04	12,54 ± 0,04	1,05 ± 0,12	-2,97 ± 0,16	12,63 ± 0,06	0,92 ± 0,06	-2,88 ± 0,23	12,59 ± 0,42	0,81 ± 0,65
PPTE	-3,05 ± 0,03	12,27 ± 0,03	-1,07 ± 0,08	-3,06 ± 0,04	12,30 ± 0,03	-1,07 ± 0,05	-3,07 ± 0,23	12,31 ± 0,39	-1,18 ± 0,75
PRCV	-3,33 ± 0,05	13,97 ± 0,06	0,56 ± 0,10	-3,38 ± 0,10	13,96 ± 0,07	0,67 ± 0,09	-3,38 ± 0,49	13,98 ± 0,63	0,61 ± 0,87
PRGU	-4,51 ± 0,04	12,27 ± 0,04	-0,08 ± 0,08	-4,55 ± 0,22	12,46 ± 0,07	-0,20 ± 0,07	-4,71 ± 0,48	12,41 ± 0,83	-0,11 ± 0,83
PRMA	-2,23 ± 0,05	13,39 ± 0,03	-1,27 ± 0,07	-2,25 ± 0,05	13,39 ± 0,04	-1,27 ± 0,07	-2,25 ± 0,32	13,41 ± 0,43	-1,42 ± 0,69
RECF	-3,80 ± 0,06	14,91 ± 0,06	-2,37 ± 0,10	-3,86 ± 0,13	14,93 ± 0,05	-2,37 ± 0,08	-3,88 ± 0,46	14,93 ± 0,65	-2,38 ± 0,62
RIOB	-1,93 ± 0,07	10,69 ± 0,03	0,28 ± 0,13	-1,91 ± 0,05	10,72 ± 0,08	0,31 ± 0,08	-1,93 ± 0,08	10,67 ± 0,34	0,05 ± 0,86
RIOD	-4,57 ± 0,04	11,92 ± 0,05	1,52 ± 0,11	-4,57 ± 0,05	11,94 ± 0,05	1,52 ± 0,09	-4,57 ± 0,34	11,92 ± 0,88	1,47 ± 1,03
RJCG	-4,63 ± 0,04	12,10 ± 0,03	0,78 ± 0,07	-4,69 ± 0,10	12,09 ± 0,03	0,77 ± 0,05	-4,70 ± 0,27	12,10 ± 0,50	0,69 ± 0,45
RNMO	-4,56 ± 0,08	15,93 ± 0,05	-2,32 ± 0,08	-4,65 ± 0,17	15,91 ± 0,06	-2,38 ± 0,08	-4,67 ± 0,40	15,89 ± 0,41	-2,37 ± 0,47
RNNA	-3,06 ± 0,04	12,18 ± 0,03	-0,65 ± 0,09	-3,15 ± 0,15	12,36 ± 0,31	-0,59 ± 0,08	-2,95 ± 0,32	12,07 ± 0,53	-0,78 ± 0,78
ROCD	-3,16 ± 0,04	11,63 ± 0,03	0,06 ± 0,09	-3,18 ± 0,15	11,74 ± 0,13	0,02 ± 0,05	-3,28 ± 0,28	11,63 ± 0,44	-0,14 ± 0,48
ROGM	-1,59 ± 0,04	10,94 ± 0,04	-1,11 ± 0,12	-1,59 ± 0,03	11,01 ± 0,03	-1,13 ± 0,07	-1,59 ± 0,26	11,02 ± 0,32	-1,32 ± 0,77
ROJI	-2,69 ± 0,03	12,82 ± 0,03	3,36 ± 0,10	-2,67 ± 0,12	12,92 ± 0,10	3,19 ± 0,06	-2,77 ± 0,23	12,85 ± 0,36	3,23 ± 0,52
ROSA	-3,29 ± 0,03	11,46 ± 0,03	-2,27 ± 0,08	-3,31 ± 0,06	11,46 ± 0,04	-2,27 ± 0,06	-3,32 ± 0,32	11,44 ± 0,43	-2,33 ± 0,67
RSAL	-3,62 ± 0,06	10,71 ± 0,06	-1,42 ± 0,11	-3,65 ± 0,09	10,76 ± 0,06	-1,40 ± 0,09	-3,66 ± 0,61	10,77 ± 0,75	-1,46 ± 0,87
SAGA	-4,10 ± 0,05	11,31 ± 0,03	-0,32 ± 0,10	-4,08 ± 0,06	11,20 ± 0,03	-0,33 ± 0,07	-4,08 ± 0,26	11,21 ± 0,24	-0,55 ± 0,65
SALU	-4,28 ± 0,06	13,23 ± 0,04	0,70 ± 0,08	-4,33 ± 0,23	13,30 ± 0,14	0,70 ± 0,07	-4,47 ± 0,59	13,19 ± 0,48	0,55 ± 0,64
SAVO	-4,28 ± 0,05	13,08 ± 0,04	0,58 ± 0,05	-4,35 ± 0,21	13,17 ± 0,07	0,57 ± 0,05	-4,45 ± 0,21	13,13 ± 0,45	0,50 ± 0,37
SCAQ	-3,05 ± 0,06	12,30 ± 0,06	-0,72 ± 0,10	-3,08 ± 0,10	12,35 ± 0,06	-0,64 ± 0,09	-3,09 ± 0,50	12,36 ± 0,65	-0,68 ± 0,89
SCCH	-2,15 ± 0,04	11,63 ± 0,04	-0,16 ± 0,07	-2,17 ± 0,08	11,63 ± 0,06	-0,18 ± 0,06	-2,19 ± 0,43	11,61 ± 0,57	-0,18 ± 0,60
SCFL	-3,90 ± 0,06	12,15 ± 0,06	0,82 ± 0,12	-3,89 ± 0,05	12,17 ± 0,08	0,85 ± 0,10	-3,90 ± 0,36	12,20 ± 0,61	0,76 ± 0,85
SCLA	-3,06 ± 0,04	12,09 ± 0,04	0,81 ± 0,07	-3,10 ± 0,05	12,06 ± 0,19	0,92 ± 0,06	-3,08 ± 0,29	11,90 ± 0,49	0,98 ± 0,58
SEAJ	-4,64 ± 0,06	11,93 ± 0,05	-1,97 ± 0,09	-4,71 ± 0,11	11,88 ± 0,04	-1,98 ± 0,08	-4,70 ± 0,37	11,88 ± 0,59	-2,11 ± 0,60
SJRP	-3,40 ± 0,03	12,06 ± 0,03	-0,15 ± 0,07	-3,45 ± 0,08	12,09 ± 0,04	-0,16 ± 0,06	-3,45 ± 0,27	12,11 ± 0,40	-0,54 ± 0,66
SJSP	-3,99 ± 0,07	12,61 ± 0,05	-2,87 ± 0,12	-4,02 ± 0,10	12,62 ± 0,04	-2,90 ± 0,10	-4,04 ± 0,50	12,62 ± 0,98	-3,04 ± 0,88
SMAR	-2,39 ± 0,03	11,70 ± 0,05	-1,43 ± 0,09	-2,43 ± 0,13	11,78 ± 0,09	-1,39 ± 0,08	-2,50 ± 0,28	11,71 ± 0,48	-1,37 ± 1,00
SPAR	-3,77 ± 0,04	12,03 ± 0,03	-1,91 ± 0,07	-3,79 ± 0,14	12,09 ± 0,05	-1,72 ± 0,06	-3,88 ± 0,31	12,06 ± 0,45	-2,29 ± 0,92

(conclusão)

	Vel _T - (mm/ano)			Vel _{TS} - (mm/ano)			Vel _{TSR} - (mm/ano)		
	Ve _T	Vn _T	Vu _T	Ve _{TS}	Vn _{TS}	Vu _{TS}	Ve _{TSR}	Vn _{TSR}	Vu _{TSR}
SPBO	-2,86 ± 0,06	12,45 ± 0,04	0,04 ± 0,13	-2,88 ± 0,07	12,40 ± 0,04	0,14 ± 0,10	-2,89 ± 0,39	12,41 ± 0,50	0,12 ± 0,94
SPJA	-3,66 ± 0,05	12,13 ± 0,04	-0,81 ± 0,10	-3,70 ± 0,10	12,15 ± 0,05	-0,83 ± 0,07	-3,73 ± 0,41	12,13 ± 0,89	-0,94 ± 0,91
SSA1	-6,33 ± 0,05	12,83 ± 0,03	-1,00 ± 0,07	-6,39 ± 0,16	12,82 ± 0,06	-0,88 ± 0,06	-6,45 ± 0,37	12,86 ± 0,54	-1,24 ± 0,51
TOGU	-3,69 ± 0,03	13,10 ± 0,04	2,15 ± 0,09	-3,73 ± 0,11	13,10 ± 0,06	2,07 ± 0,05	-3,78 ± 0,27	13,14 ± 0,46	1,88 ± 0,66
TOPL	-3,89 ± 0,06	12,19 ± 0,05	1,77 ± 0,13	-3,93 ± 0,36	12,51 ± 0,24	1,93 ± 0,10	-3,57 ± 0,21	12,31 ± 0,40	1,39 ± 0,75
UBA1	-2,40 ± 0,04	15,09 ± 0,07	-1,94 ± 0,10	-2,44 ± 0,09	15,15 ± 0,08	-1,91 ± 0,08	-2,45 ± 0,36	15,17 ± 0,70	-2,11 ± 0,72
UBE1	-4,45 ± 0,18	12,20 ± 0,10	-2,49 ± 0,35	-4,60 ± 0,28	12,28 ± 0,11	-2,44 ± 0,26	-4,58 ± 0,66	12,26 ± 0,94	-3,26 ± 2,90
UFPR	-3,54 ± 0,03	12,92 ± 0,04	0,53 ± 0,07	-3,59 ± 0,15	13,01 ± 0,04	0,51 ± 0,05	-3,66 ± 0,36	12,99 ± 0,50	0,47 ± 0,58
VICO	-4,70 ± 0,06	10,95 ± 0,04	0,06 ± 0,13	-4,75 ± 0,10	10,98 ± 0,04	0,05 ± 0,11	-4,75 ± 0,39	10,97 ± 0,84	0,12 ± 1,34

Fonte: Os autores (2021).

As velocidades obtidas pelo experimento Vel_{TSR} foi comparado com os demais. Os valores médios de discrepâncias entre os experimentos Vel_{TSR} e Vel_T são -0,06 mm/ano, 0,00 mm/ano e -0,15 mm/ano nas componentes (e), (n) e (u), respectivamente. Já quando comparado o experimento Vel_{TSR} e Vel_{TS}, os para as componentes (e), (n) e (u) são -0,03 mm/ano, -0,02 mm/ano e -0,08 mm/ano, respectivamente. É possível perceber que não há uma variação significativa entre as velocidades obtidas pelos diferentes experimentos (Vel_{TSR} e Vel_{TS}), bem como, pelos experimentos Vel_T e Vel_{TS} nas componentes planimétricas, conforme pode ser observado a partir da Tabela 3.

Tabela 3 - Discrepância entre as velocidades a partir dos experimentos em (mm/ano).

	Vel _{TS} - Vel _T			Vel _{TSR} - Vel _T			Vel _{TSR} - Vel _{TS}		
	ΔVe	ΔVn	ΔVu	ΔVe	ΔVn	ΔVu	ΔVe	ΔVn	ΔVu
Média	-0,03	0,02	-0,07	-0,06	0,00	-0,15	-0,03	-0,02	-0,08
Máximo	0,04	0,31	0,31	0,32	0,14	0,30	0,36	0,08	0,33
Mínimo	-0,14	-0,13	-0,61	-0,23	-0,18	-0,76	-0,20	-0,29	-0,81

Fonte: Os autores (2021).

Assim, pode-se inferir que o efeito da sazonalidade na determinação de velocidades planimétricas de estação GNSS na placa Sul-Americana (Brasil) não apresentou grandes variações quando processado no SARI.

Ressalta-se que o efeito da sazonalidade na componente (u) deve ser analisado com mais atenção, visto que o comportamento periódico desta componente é mais acentuado em relação às componentes (e) e (n). Isto confirma as afirmações de Berthier et al. (2019), que informa a importância de avaliar estimativas de velocidade da componente (u), visto que as águas superficiais (rios) não são incluídas nos modelos de carregamento hidrológico, considerando apenas a neve e a umidade do solo.

Algumas análises estatísticas dos índices espectrais (k) dos ruídos da lei de potência estimadas por MLE são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatísticas básicas dos índices espectrais do experimento V_{TSR} .

Componente		k médio	σ k -médio	Máximo	Mínimo
V_{TSR}	e (este)	-0,90	0,05	-0,60	-1,17
	n (norte)	-1,18	0,03	-0,97	-1,47
	u (up)	-0,99	0,05	-0,79	-1,51

Fonte: Os autores (2021).

A partir da Tabela 4 é possível perceber, de acordo com os índices espectrais médios ($k_{médio}$), que os ruídos e as leis de potência presentes nas séries de coordenadas obtidas com GNSS são ruídos de cintilação ($k \cong -1$, *flicker*) e são semelhantes em todas as componentes. Logo, pode-se inferir que a área de estudos está sujeita a ruídos idênticos, já que as três componentes possuem a combinação de ruídos brancos combinados com ruídos de cintilação (ruídos da lei de potência).

Também é percebido que as precisões das coordenadas nos experimentos Vel_T e Vel_{TS} são mais otimistas quando comparados com experimento Vel_{TSR} , conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Precisões médias das velocidades de cada experimento em (mm/ano).

	Vel_T			Vel_{TS}			Vel_{TSR}		
	σ_{Ve}	σ_{Vn}	σ_{Vu}	σ_{Ve}	σ_{Vn}	σ_{Vu}	σ_{Ve}	σ_{Vn}	σ_{Vu}
Média	0,05	0,04	0,11	0,08	0,05	0,09	0,35	0,54	0,84
Máximo	0,18	0,10	0,35	0,18	0,12	0,26	0,66	1,35	3,92
Mínimo	0,03	0,02	0,05	0,03	0,02	0,04	0,18	0,24	0,37

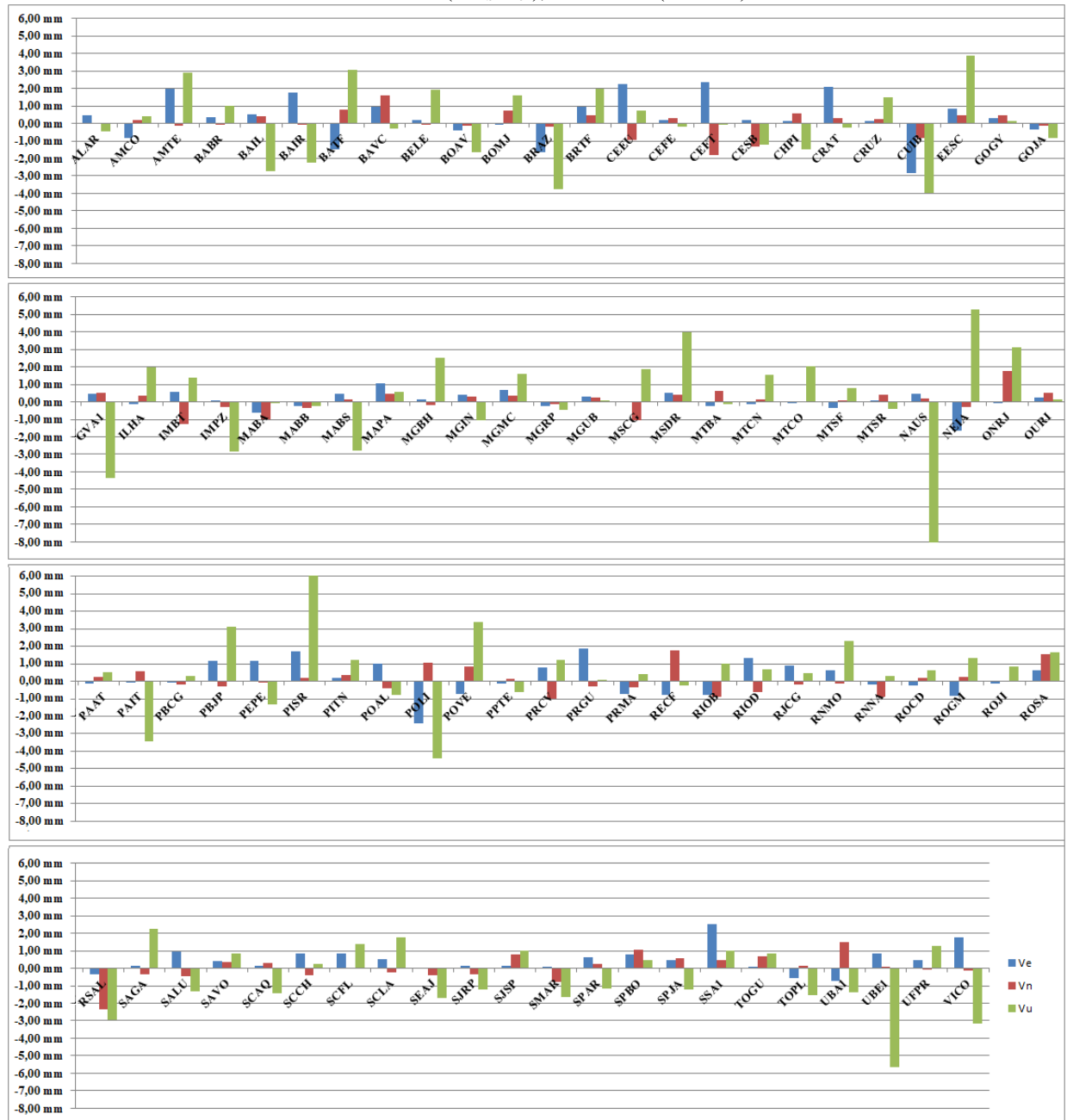
Fonte: Os autores (2021).

Ao realizar as análises das precisões entre os experimentos Vel_T e Vel_{TS} com o experimento Vel_{TSR} , é possível perceber que os valores de precisão são, em média, 4, 10 e 7 vezes maiores nas componentes (e), (n) e (u), respectivamente. Ressalta-se que, de acordo com Klos, Bos e Bogusz (2018), qualquer sinal sazonal ou periodicidade residual não modelado e removido adequadamente, moverá a parte estocástica para um ruído muito mais correlacionado, fazendo com que as incertezas sejam superestimadas, ou seja, pode-se inferir que os valores de precisão das velocidades sejam superestimados quando comparado com as precisões obtidas no experimento que realiza análises de ruídos (Vel_{TSR}).

Em seguida, foram comparadas as velocidades obtidas no experimento Vel_{TSR} com os valores da realização SIRGAS-CON (SIR17P01, época 2015). As discrepâncias entre os

valores de velocidades obtidas entre o experimento Vel_{TSR} e a realização SIRGAS-CON (Vel_{SIRP01}) são apresentadas na Figura 4.

Figura 4 - Discrepância entre as velocidades obtidas no experimento Vel_{TSR} com os valores obtidos na realização SIRGAS-CON (Vel_{SIRP01}), valores em (mm/ano).



Fonte: Os autores (2021).

Os valores médios de discrepâncias absolutas obtidas a partir da Figura 4 nas componentes (e), (n) e (u) são 0,69 mm/ano, 0,50 mm/ano e 1,68 mm/ano, respectivamente. As discrepâncias máximas obtidas em cada componente foram 2,82 mm/ano, 2,37 mm/ano e

Com relação à Figura 5, é possível perceber que as velocidades de algumas estações apresentam resultados com diferenças consideráveis entre os métodos de determinação de velocidade de estações, não sendo possível regionalizar os resultados encontrados. É importante acentuar que os valores de Vel_{SIRP01} foram obtidas a partir de soluções semanais do SIRGAS-CON, já os valores de Vel_{TSR} foram obtidas a partir de posições diárias das estações.

1.5 Considerações Finais e Conclusões

Este trabalho apresenta técnicas de determinação de velocidades de estação GNSS para placa tectônica Sul-Americana a partir dos dados da RBMC, pós-processadas no IBGE-PPP e análises das séries temporais de coordenadas executada no *software* SARI.

Inicialmente, é possível afirmar que o *software* SARI apresenta-se como um *software* com grande potencial na realização de análises de séries temporais de coordenadas obtidas com uso do GNSS, por apresentar fidelidade em suas aplicações, uma vez que os ruídos que afetaram as séries temporais de coordenadas obtidas com GNSS, estudados nesta pesquisa, foram ruídos brancos e ruídos de cintilação (ruídos da lei de potência), o que confirma com os resultados de Wang; Herring (2019); Santamaría-Gómez (2019); Benoist et al. (2020); He et al. (2019) e Bos et al. (2020). Isto mostra a eficiência do *software* SARI na determinação dos ruídos de lei de potência por meio da estimativa MLE. O *software* tem uma interface gráfica de fácil interação, e a entrada e saída de dados são realizadas de forma simples e eficientes. Os dados gráficos são interativos, sendo possível, e de maneira eficiente, a identificação e retirada de *outliers* das séries.

É possível perceber a estabilidade da placa tectônica Sul-Americana na porção analisada nesta pesquisa, visto que todas as componentes, analisadas separadamente, apresentam valores semelhantes. Estes dados reforçam os resultados obtidos em Sánchez e Drewes (2020), que afirmam que as únicas áreas estáveis da América Latina são o escudo das Guianas, Brasil e Atlântico. Outro fator importante identificado nesta pesquisa é com relação à análise da sazonalidade: pode-se afirmar que, quando a sazonalidade é negligenciada na determinação de velocidades planimétricas das estações da RBMC, as alterações não são

significativas. O mesmo não ocorre nas componentes (u), que possuem comportamentos periódicos mais acentuados.

Por fim, verifica-se que os ruídos que afetaram as séries temporais de coordenadas GNSS, estudados nesta pesquisa, foram ruídos brancos e ruídos de cintilação (ruídos da lei de potência), o que confirma com os resultados de Wang e Herring (2019); Santamaría-Gómez (2019); Benoist et al. (2020); He et al. (2019); Bos et al. (2020). Também é possível perceber que os ruídos não afetaram nos valores das velocidades das estações, o que corrobora a afirmação de Klos et al. (2018), que informam que os ruídos só começam a se tornar mais importantes que os sinais periódicos para séries com mais de 9 anos. Nesta pesquisa foram analisados 7 anos de dados da determinação das velocidades das estações. Porém, foi notada uma depreciação significativa nas precisões das velocidades das estações quando comparada com os experimentos que não aplicaram as análises de ruídos. Contudo, conforme supracitado, qualquer sinal sazonal ou periodicidade residual não modelado e removido adequadamente, moverá a parte estocástica para um ruído muito mais correlacionado, fazendo com que as incertezas sejam superestimadas.

Referências

- ALINIA, H. S.; TIAMPO, K. F.; JAMES T. S. GPS coordinate time series measurements in Ontario and Quebec, Canada. **Journal of Geodesy**, v. 91, n. 6, p. 653-683, 2017. DOI. 10.1007/s00190-016-0987-5
- ALVES, D. B. M.; SOUZA, E. M.; KANESHIRO, V. Y.; SOUZA, J. S. Análise de séries temporais de multicaminho em estações de monitoramento contínuo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19 - p.353-373, 2013. DOI. 10.1590/s1982-21702013000300001
- BENOIST, C., COLLILIEUX, X., REBISCHUNG, P., ALTAMIMI, Z., JAMET, O., MÉTIVIER, L., BEL, L. Accounting for spatiotemporal correlations of GNSS coordinate time series to estimate station velocities. **Journal of Geodynamics**, 2020. DOI. 10.1016/j.jog.2020.101693
- BERTHIER, A., NICOLAS, J., VERDUN, J., BOY, J. P. MSA Analysis Of Seasonal Loading-Induced Deformation From GNSS Time Series. In: 27th IUGG General Assembly – 8 – 18 July 2019. Montreal, Canada. **Poste...** Montreal, Canada, 2019.
- 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

BOCK, Y.; DIEGO M. Physical applications of GPS geodesy: a review. **Reports on Progress in Physics**, 2016. DOI. 10.1088/0034-4885/79/10/106801

BOGUSZ, J.; KLOS, A.; GRUSZCZYNSKA, M.; GRUSZCZYNSKI, M. Towards reliable velocities of permanent GNSS stations. **Reports on Geodesy and Geoinformatics**, v. 100, p.17-26, 2016. DOI. 10.1515/rgg-2016-0003

BOS, M. S.; FERNANDES, R. M. S.; WILLIAMS, S. D. P.; BASTOS, L. Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. **Journal of Geodesy**, v. 87, n. 4, p. 351-360, 2013. DOI. 10.1007/s00190-012-0605-0

BOS, M. S., MONTILLET, J. P., WILLIAMS, S. D., FERNANDES, R. M. Introduction to Geodetic Time Series Analysis. In *Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences*. In: **Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences**. Springer, Cham, 2020. p. 29-52. DOI. 10.1007/978-3-030-21718-1

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time series analysis** – Forecasting and control. Fourth Edition. Madison, Wisconsin: Ed. Wiley, 2008. DOI. 10.1002/9781118619193

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

CAPORALI, A. Average strain rate in the Italian crust inferred from a permanent GPS network–I. Statistical analysis of the time-series of permanent GPS stations. **Geophysical Journal International**, v. 155, n. 1, p. 241-253, 2003. DOI. 10.1046/j.1365-246x.2003.02034.x

CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana**. 2015. Tese Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV. Viçosa-MG, 2015.

CHOUSIANITIS, K. GANAS, A; PAPANIKOLAOU, M, ARGYRAKIS, P; DRAKATOS, G; MAKROPOULOS, K. Time series analysis of the NOANET CGPS stations. **Bulletin of the Geological Society of Greece**, Chania, v. XLVII, 2013. DOI. 10.12681/bgsg.11078

COSTA, S. M. A. Estimativa do Campo de Velocidades a partir das Estações da RBMC. In: **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, Departamento de Geodésia. Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2004-2000/3100-estimativa-do-campo-de-velocidades-a-partir-das-estacoes-da-rbmc>>. Acesso em: 24 out. 2019.

DIDOVA, O.; GUNTER, B.; RIVA, R.; KLESS, R.; ROESE-KOERNER, L. An approach for estimating time-variable rates from geodetic time series. **Jornal de Geodésia**, 2016. DOI. 10.1007/s00190-016-0918-5

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L. Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017. Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), **IGS RNAAC SIRGAS**, supplement to: SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America. **International Association of Geodesy Symposia Series**, v. 152, p. 01-12, 2020. DOI. 10.1007/1345_2020_91

EYER, L.; BARTHOLDI, P. Variable stars: which Nyquist frequency?. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 135, n. 1, p. 1-3, 1999. DOI. 10.1051/aas:1999102

GEIRSSON, H. **Continuous GPS measurements in Iceland 1999 – 2002**. 2003. Dissertação de mestrado em Ciência Geofísica. University of Iceland for the degree of Master of Science in Geophysics. Reykjavík, 2003.

HE, X.; MONTILLET, JEAN-PHILIPPE; FERNANDES, RUI; BOS, MACHIEL; YUF, KEGEN; HUA, XIANGHONG; JIANG, WEIPING. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. **Journal of Geodynamics**, v. 106, p. 12-29, 2017. DOI. 10.1016/j.jog.2017.01.004

HE, X., BOS, M. S., MONTILLET, J. P.; FERNANDES, R. M. S. Investigation of the noise properties at low frequencies in long GNSS time series. **Journal of Geodesy**, 93(9), 1271-1282, 2019. DOI. 10.1007/s00190-019-01244-y

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual do usuário aplicativo online IBGE-PPP**. Rio de Janeiro: 2017. Brasil, 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2020.

KEITT, T. H. Coherent ecological dynamics induced by large-scale disturbance. **Nature**, v. 454, n. 7202, p. 331-334, 2008. DOI. 10.1038/nature06935

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

KLOS, A; BOS, M. S.; BOGUSZ, J. Detecting time-varying seasonal signal in GPS position time series with different noise levels. **GPS Solutions**, v. 22, n. 1, p. 21, 2018. DOI: 10.1007/s10291-017-0686-6

LIMA, J. N. Análise do ruído das séries temporais GNSS. **3º Encontro Nacional de Geodesia Aplicada**. Lisboa, Portugal, 18 e 19 de Outubro de 2012.

LUNA, M. P.; STALLER, A.; TOULKERIDIS, T.; PARRA, H. Methodological approach for the estimation of a new velocity model for continental Ecuador. **Open Geosciences**, v. 9, n. 1, p. 719-734, 2017. DOI. 10.1515/geo-2017-0054

MAZZOTTI, S.; DEPREZ, A.; HENRION, E.; MASSON, C.; MASSON, F.; MENUT, J.; MÉTOIS, M.; NOCQUET, J.; ROLLAND, L.; SAKIC, P.; SOCQUET, A.; SANTAMARÍA-

GÓMEZ, A.; VALTY, P.; VERGNOLE, M.; VERNANT, P. **Comparative analysis of synthetic GNSS time series-Bias and precision of velocity estimations**. Research Report, RESIF. 2020.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. C. **Análise de séries temporais**. Vol. 2ª edição. São Paulo: Blucher, 2006.

NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. 2016. 73f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) da UVF. Viçosa, 2016.

NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. D. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, no1, p.150-165, jan - mar, 2017. DOI. 10.1590/s1982-21702017000100010

NIKOLAIDIS, R. **Observation of Geodetic and Seismic with the Global Positioning System**. 2002. 190f. Tese de doutorado da University of California. San Diego, 2002.

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning. **The South American Plate Case**, v. 2, n. 2, p. 90-99, 2003. DOI. 10.5081/jgps.2.2.90

PEREZ, J. A. S. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizadas na Plana Sul-Americana: Estimadas a partir do processamento de dados GPS**. 2002. 166f. Dissertação da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2002.

RAUCH, H. E.; TUNG, F.; STRIEBEL, C. T. Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems. **AIAA Journal**, v. 3, n. 8, p. 1445-1450, 1965. DOI. 10.2514/3.3166

ROSA, G. P. S. **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**. 2008. 106f. Dissertação (mestrado em Ciências Cartográficas) da UNESP, Presidente Prudente. Presidente Prudente, de 2008.

SALAMANCA, G. E. D. **Modelagem da deformação da crosta continental do Norte dos Andes através de inversão de dados sísmicos e geodésicos**. 2016. 221f. Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal deformation and surface kinematics after the earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**. v. 102, p. 1-23, 2016. DOI. 10.1016/j.jog.2016.06.005

SÁNCHEZ, L; DREWES, H. Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America. In: **International Association of Geodesy Symposia**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2020. p. 01-12. 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

SANTAMARÍA- GÓMEZ, A., BOUIN, M. N., COLLILIEUX, X., WÖPPELMANN, G. Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 116, n. B1, 148-227, 2011. DOI. 10.1029/2010jb007701

SILVA, A. L.; COSTA, S. M. A. Análises e resultados do centro de processamento SIRGAS - IBGE. In: II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 8 a 11 de setembro de 2008. Recife-PE. **Anais...** Recife-PE, 2008.

SOUZA, W. O. **Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana por meio de dados VLBI e GNSS**. 2013. 177f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) da UFPE. Recife, 2013.

VONDRÁK, J. Problem of smoothing observational data II. **Bull. Astron. Inst. Czechoslov.** v. 28, n. 2, p. 84 - 89, 1977.

WANG, L; HERRING, T. Impact of estimating position offsets on the uncertainties of GNSS site velocity estimates. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2019. DOI. 10.1029/2019jb017705

WILLIAMS, S.; BOCK, Y.; FANG, P.; JAMASON, P.; NIKOLAIDIS, R.M.; PRAWIRODIRDJO, L.; MILLER, M.; JOHNSON, D.J. Error analysis of continuous GPS position time series. **J. Geophys. Res.**, v. 109, n. B18, B03412, 2004. DOI. 10.1029/2003jb002741

WILLIAMS, S. D. P. CATS: GPS coordinate time series analysis software. **GPS solutions**, v. 12, n. 2, p. 147-153, 2008. DOI. 10.1007/s10291-007-0086-4

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.

CAPÍTULO 2. GERAÇÃO DE MODELO DE VELOCIDADE PARA UMA PORÇÃO DA PLACA TECTÔNICA SUL-AMERICANA – BRASIL

Generation of a velocity model for a portion of the South American tectonic plate - Brazil.

Resumo: As técnicas de geodésia espacial são ferramentas importantes para a determinação de deformações regionais da superfície que se originam devido a movimentos tectônicos, expandindo assim, o conhecimento dos processos dinâmicos das placas tectônicas. Dentre as diversas formas de determinação de modelo de movimento, destaca-se a determinação do modelo de movimento de placa (MMP - vetor de rotação ou vetor de Euler) e a determinação a partir de interpolação de velocidades de estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Na determinação do vetor de rotação, assume-se o comportamento similar de toda a placa tectônica, o que normalmente não é observado na prática visto que há diversos trabalhos com tendência à regionalização na modelagem superficial. Tendo em vista a importância do conhecimento de um modelo de velocidade regional acurado, por ser indispensável na atualização de coordenadas GNSS, esta pesquisa teve como objetivo a obtenção de um modelo de velocidade a partir de interpolador geoestatístico (Krigagem ordinária) para a placa Sul-Americana (porção que o Brasil ocupa na placa), a partir do qual as velocidades das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) - pós-processadas no serviço online IBGE-PPP, foram obtidas através de análises de séries temporais de coordenadas GNSS considerando-se tendência, sazonalidade e ruídos (7 anos de dados). É possível concluir, a partir da pesquisa, que a krigagem ordinária se mostrou um interpolador com grande potencial na modelagem superficial, uma vez que foi responsável pela estimativa dos resultados que proporcionaram menores valores de discrepâncias em comparação com os modelos de velocidade GSRM2014 (MMP) e VEMOS2017 e VEMOS2009, alcançando resultados similares ao ITRF2014 (MMP) na realização da atualização de coordenadas no Brasil. Os resultados mostram que, em média, a discrepância planimétrica na atualização de coordenadas de 62 estações da RBMC foi de 1,6 cm, 4,4 cm, 1,3 cm, 2,0 cm e 3,0 cm para os modelos $MV_{KRIGAGEM}$, GSRM 2014 (MMP), ITRF2014 (MMP), VEMOS2009 e VEMOS2017, respectivamente.

Palavras-chave: Modelo de Velocidade. GNSS. Krigagem.

Abstract: Spatial geodesy techniques are important tools for the determination of regional surface deformations that originate due to tectonic movements, thus expanding the knowledge of the dynamic processes of tectonic plates. Among the different ways of determining the motion model, we highlight the determination of the plate motion model (PMM - rotation vector or Euler vector) and the determination from the interpolation of GNSS (Global Navigation Satellite) station velocity. System). In determining the rotation vector, the similar behavior of the entire tectonic plate is assumed, which is not normally observed in practice since there are several works with a tendency to regionalization in surface modeling. Considering the importance of knowing an accurate plate tectonic velocity model, as it is essential for updating GNSS coordinates, this research aimed to obtain a velocity model from a geostatistical interpolator (ordinary kriging) for the South American plate (portion that Brazil occupies on the plate), from which the velocity of the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems) stations - post-processed in the IBGE-PPP online service, were obtained through analyzes of time series of GNSS coordinates considering trend, seasonality and noise (7 years of data). It is possible to conclude, from the methodology used, that ordinary kriging proved to be an efficient interpolator in surface modeling, since it was responsible for estimating the best results compared to the GSRM2014 (MMP), VEMOS2017 and VEMOS2009 velocity models, achieving similar results to ITRF2014 (MMP) in carrying out the update of coordinates in Brazil. The results show that, on average, the planimetric discrepancy in the coordinate update of 62 RBMC stations was 1.6 cm, 4.4 cm, 1.3 cm, 2.0 cm and 3.0 cm for the models MVKRIGAGEM, GSRM 2014 (MMP), ITRF2014 (MMP), VEMOS2009 and VEMOS2017, respectively.

Keywords: Velocity Model. GNSS. Kriging.

2.1. Introdução

As técnicas de geodésia espacial permitem uma profunda compreensão dos processos espaciais e temporais de deformação da crosta terrestre, expandindo significativamente, assim, o conhecimento dos processos dinâmicos em placas tectônicas (BÜRGMANN; THATCHER; BICKFORD, 2013). A determinação de um modelo de velocidade pode ser realizada, segundo Sánchez *et al.* (2018), por meio da interpolação matemática de velocidades pontuais. Ou seja, a partir de velocidades das estações GNSS, advindas das análises de séries temporais e de outras técnicas de determinação, são aplicadas técnicas de interpolação para obtenção do modelo. Outra maneira de realizar a modelagem do movimento da placa tectônica é a determinação de modelo de movimento de placa (*plate motion model* – MMP).

O MMP é determinado a partir da obtenção dos elementos do polo de Euler (vetor de rotação ou vetor de Euler). Alguns MMP são determinados por técnicas de geodésia espacial, enquanto outros são a partir de dados geológicos e geofísicos. Todavia, existem modelos globais e também regionais, e uns utilizam a condição NNR (*No-Net-Rotation*). NNR é o movimento de cada placa em relação à média ponderada de todas as velocidades das placas tectônicas do mundo (UNAVCO, 2022a).

Há vários MMP disponíveis, tais como NUVEL (*Northwestern University Velocity*) (1 e 1A), APKIM2005 (*Actual Plate Kinematics Model*), REVEL2000 (*Recent Velocities*), dentre outros. Outras informações podem ser adquiridas em UNAVCO (2020b), mas é preciso destacar que todos os MMP disponíveis em UNAVCO (2022b) são modelos globais.

O SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) disponibiliza o modelo de velocidade regional VEMOS (*Velocity Model of SIRGAS*) para a atualização das coordenadas na área de abrangência do SIRGAS. Nesse sentido, conforme Drewes e Sánchez (2017), é importante considerar padrões regionais de deformações e não apenas globais. Os autores pontuam, ainda, que os modelos devem ser atualizados após qualquer evento de deformação abrupto e que deve apresentar resolução espacial suficiente para refletir todos os efeitos regionais.

Vários são os trabalhos realizados na determinação de modelos de velocidade de placa. Podem ser citados os trabalhos de: Zamora (2014), que fez a determinação de campo de velocidade para Costa Rica; Goudarzi e Baville (2017), que efetuaram estudos para avaliar

deformação de superfície terrestre no leste de Canadá; Souza (2013), que gerou a modelagem do movimento da placa tectônica Sul-Americana; Perez, Monico e Chaves (2003), que elaboraram a estimativa da velocidade para placa Sul-Americana utilizando dados de GPS; Sánchez e Drewes (2016), que efetuaram o estudo da deformação da costa da América Latina após o terremoto de 2010, bem como o modelo cinemático de superfície; Salamanca (2016), que preparou uma modelagem da deformação da costa continental do Norte dos Andes; e, ainda, Luna *et al.* (2017) e Sanches *et al.* (2018), que determinaram um campo de velocidade para o Equador.

Há outros trabalhos mais atuais, como: Tsanovski e Danchev (2019), que elaboraram a determinação de um campo de velocidade horizontal para o território da Bulgária por intermédio de dados do GNSS (velocidades de estações); Mironov, Suchilin e Rogozhin (2019), que quantificaram as deformações da crosta em Moscou usando dados do GNSS. Sánchez e Drewes (2020), que realizaram o monitoramento geodésico da deformação variável da superfície na América Latina usando dados do GNSS e técnicas de colocação de mínimos quadrados no processamento; Funderburk e Oguntuase (2019), que estudaram a variabilidade espacial do deslocamento vertical e horizontal através de análise de séries temporais das estações de monitoramento da rede ativa CORS; Li, Ching e Chen (2019), que produziram um modelo de deformação usando o método de interpolação krigagem em Taiwan; Ansari e Bae (2020), que avaliaram a análise de deformação e o padrão de deformação na Coreia do Sul com dados do GNSS; Ren, Lian e Wang (2021), que propuseram um método de obtenção de deformações sísmicas em séries temporais de estações GNSS para serem utilizadas na determinação de campo de velocidade GNSS; e Manevich *et al.* (2021), que modelaram o campo de velocidade horizontal usando redes neurais artificiais e desenvolveram um modelo de velocidade na Rússia.

De acordo com os trabalhos supracitados é possível perceber o uso frequente de dados GNSS na determinação de modelos de movimento das placas tectônicas. Também é possível observar uma tendência à regionalização na determinação desses modelos. Dessa forma, vários estudos foram realizados na determinação de modelos de deformação para o Brasil (placa tectônica Sul-América) a partir de observáveis GNSS, dentre os quais pode-se citar: Perez (2002); Carvalho (2015); Costa (2001); Silva e Costa (2008); Drewes e Heidbach (2012); e Souza (2013). Ressalta-se que, segundo Sánchez e Drewes (2020), o Brasil está em uma área estável da placa tectônica Sul-Americana.

Conforme já mencionado, a UNAVCO (2022b) disponibiliza uma aplicação *online* para o cálculo de velocidades de estações, por meio da qual são disponibilizados diversos MMP que contemplam a placa tectônica Sul-Americana: cerca de 18 modelos, além dos modelos regionais obtidos apenas para a porção que o Brasil ocupa na placa Sul-Americana.

Segundo Ramos (2015), o Brasil não possui um modelo de velocidade preferível na realização da atualização das coordenadas, já que cada região do Brasil (sul, sudeste, norte, nordeste e centro-oeste) possui um modelo mais acurado. Porém, salienta-se que o serviço online IBGE-PPP emprega o VEMOS2009 para esta finalidade. Nesse sentido, tendo em vista a importância de um modelo de velocidade mais acurado na realização da atualização de coordenadas GNSS e a necessidade contínua de melhoramento e atualização dos modelos de movimento das placas tectônicas, este trabalho teve como objetivo a determinação de um modelo de velocidade para o Brasil utilizando o interpolador geoestatístico de krigagem ordinária na interpolação de velocidades de estações GNSS obtidas a partir de séries temporais de coordenadas GNSS (considerando tendência, sazonalidade e ruídos). As velocidades utilizadas neste trabalho foram estimadas no Capítulo 1 (RAMOS; DAL POZ; CARVALHO, 2021). Com o objetivo de comparar os resultados obtidos com o uso da krigagem ordinária, outras velocidades foram calculadas com uso dos modelos ITRF2014 (MMP), GSRM2014 (MMP), VEMOS2009 e do VEMOS2017.

2.2. Modelo de Velocidade de Placa Tectônica

A constante necessidade de obter acurácia na modelagem do movimento das placas tectônicas e o avanço tecnológico das técnicas de geodésia espacial fizeram com que o número de estudos realizados na determinação de modelos de velocidade crescesse muito nos últimos tempos. Normalmente, estes estudos são realizados em regiões com maiores instabilidades, como: bordas de placas tectônicas (TSANOVSKI; DANCHEV, 2019; KAFTAN *et al.*, 2019); regiões com falhas geológicas e tectônicas (MIRONOV; SUCHILIN; ROGOZHIN, 2019); estudos de monitoramento de deformações (SÁNCHEZ; DREWES, 2020); e regiões susceptíveis a terremotos ou após seu acontecimento (LI; CHING; CHEN, 2019). O que corrobora com a afirmação de Drewes e Sánchez (2017), que recomendam considerar padrões regionais no movimento e não apenas globais na determinação de modelos de movimento de placa.

Para realizar a determinação dos modelos é necessária a obtenção de velocidades de vários pontos pertencentes à placa tectônica estudada. Para este fim, normalmente são utilizadas velocidades de estações GNSS. Estas velocidades são obtidas após análises de séries temporais de dados GNSS. Segundo Sánchez *et al.* (2018), o modelo de velocidade pode ser elaborado a partir da interpolação matemática de velocidades pontuais. Após a determinação das velocidades, são aplicadas técnicas de interpolação para a criação dos modelos de velocidade.

Nesse contexto, conforme Bogusz *et al.* (2014), a krigagem é usual para a interpolação de velocidades obtidas de estações de monitoramento contínuo do GNSS. Ainda segundo Bogusz *et al.* (2014), é o melhor método de interpolação, uma vez que se configura como um interpolador que foi desenvolvido para estimar e prever dados espaciais a partir de análise de regressão.

2.2.1. Estatística Espacial

A estatística espacial diferencia-se da estatística tradicional devido, principalmente, à consideração da localização (a posição no espaço), isto é, ao conjunto de métodos de análise de dados desenvolvidos para trabalhar de acordo com a perspectiva geográfica. Na estatística espacial são analisados, em especial, três tipos de dados: pontuais (determinação de padrões); de área (regressão e distribuição conjunta); e de superfície (interpolação e medidas de incerteza) (CÂMARA *et al.*, 2004). Este último, de forma geral, também é conhecido como geoestatística. A geoestatística se utiliza de amostras de campo regular ou irregularmente distribuídas, obtidas, por exemplo, por meio de estações GNSS de redes ativas, coleta ou medição de certa variável de interesse para a realização de interpolação.

Para que a superfície interpolada (representada na forma de grade regular) se aproxime do fenômeno estudado de forma realista, é necessário modelar sua variabilidade espacial. Nesse âmbito, um interpolador que trata de modelar efeitos locais e globais com eficiência é a krigagem (CAMARGO; FUKS; MONTEIRO, 2004).

A krigagem é um processo de estimativa de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou no tempo a partir de valores adjacentes considerados como interdependentes pelo semivariograma. O termo krigagem foi cunhado pela escola francesa de geoestatística, em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano e pioneiro na aplicação de técnicas

estatísticas em avaliação mineira, Daniel G. Krige (LANDIM, 2006). Segundo Li, Ching e Chen (2019), a krigagem foi desenvolvida por Georges Matheron, mas o trabalho de Krige foi publicado em 1951 e os primeiros trabalhos de Matheron foram realizados após sua viagem à África do Sul, quando conheceu Krige em 1960 (LANDIM, 2006).

Um fator relevante da krigagem é que sua ponderação é feita a partir de uma análise espacial, baseada no semivariograma experimental, e que leva em consideração as características espaciais das variáveis regionalizadas. Ela utiliza distâncias ponderadas onde os pesos adequados são obtidos a partir do semivariograma, representativo da média das diferenças ao quadrado dos valores irregularmente distribuídos a intervalos de distâncias especificados (*lags*) (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Segundo Landim (2006), uma vez conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, é possível interpolar valores em qualquer posição, sem tendência e com variância mínima, utilizando a krigagem. Este método fornece, além dos valores estimados, a precisão associada a tal estimação, o que o distingue dos demais algoritmos à disposição (VILELA, 2004).

Após a confecção dos semivariogramas dos valores experimentais, é necessário ajustar um modelo matemático (semivariograma teórico) que represente o mais próximo possível a configuração dos mesmos. Existem várias funções que se ajustam aos semivariogramas experimentais, porém, alguns modelos têm satisfeito a maioria das suas aplicações, quais sejam: esférico, exponencial, gaussiano e linear (STURARO, 2015; VIEIRA, 2000).

A eficiência do interpolador é avaliada pela qualidade das estimativas que ele produz, sendo a validação cruzada bastante utilizada como uma técnica prévia para determinar quais dos métodos proporcionam os melhores resultados. Ela consiste na omissão de um ponto amostral do conjunto de dados inicial, estimando-se o seu valor e usando os demais pontos restantes. Este processo é realizado sucessivamente para cada um dos pontos amostrais remanescentes (SILVA, 2015). Nesse ínterim, salienta-se que, normalmente, são testados vários modelos matemáticos (esférico, linear, etc.) e também é realizada uma inspeção visual. Os resultados estatísticos da validação cruzada são: erro médio, desvio padrão do erro, coeficientes de determinação (R^2), Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e etc.

A partir dos valores das estatísticas é escolhido o modelo matemático que mais se adequa aos dados coletados. Depois de realizada a escolha do modelo matemático

(semivariograma teórico), é feita a interpolação dos dados para gerar a grade do modelo de velocidade.

Ao aplicar a krigagem, algumas pressuposições devem ser satisfeitas. Um exemplo é a normalidade dos dados (componentes velocidades das estações: V_e e V_n). Para verificar tais pressuposições, é necessário realizar as análises exploratórias dos dados, processo por meio do qual é possível utilizar-se da estatística descritiva para o conjunto de dados. Assim, os dados são analisados sem considerar a posição geográfica de cada amostra coletada. Em contrapartida, os dados podem ser analisados sob a ótica da geoestatística, na qual as posições de cada amostra são consideradas na análise – análise exploratória espacial. Segundo Oliveira (2003), para diagnosticar o comportamento espacial de amostras são realizadas análises estatísticas descritivas e espaciais, as quais estão inseridas num contexto mais amplo da análise exploratória.

Na análise descritiva são avaliadas as diversas características, das quais se destacam: média, mediana; mínimo; máximo; amplitudes; variância; desvio padrão; e teste de normalidade. Já na análise exploratória espacial são analisadas: presença de tendência; existência de correlação; e etc. Outro fator importante a ser analisado é o padrão de distribuição espacial das amostras, que pode ser disperso (uniforme), aleatório ou agrupado (agregado). Esta avaliação pode ser feita a partir da Função K de Ripley. Segundo Câmara e Carvalho (2004), para se ter informação mais efetiva para o padrão espacial em escalas maiores, o melhor método a ser utilizado é o da função K de Ripley. Depois de realizar as etapas supracitadas é possível à determinação de um modelo de velocidade de uma determinada placa tectônica, outra maneira de realizar a modelagem do movimento de placa tectônica é a determinação de modelo de movimento de placa (*plate motion model* – PMM ou MMP). Salienta-se que nesta pesquisa os MMP serão utilizados apenas para validar o modelo de velocidade desenvolvido.

2.2.2. Modelos de movimento de placa (MMP)

Para Drewes (1982), os parâmetros de uma placa correspondem às coordenadas do pólo de rotação e a velocidade de rotação. Segundo Souza (2013), uma maneira de descrever a movimentação na superfície terrestre se dá através dos vetores de rotação de Euler, também conhecidos por vetores geocêntricos de rotação ($\vec{\Omega}$). Segundo Sarsito, Pradipta e Andreas

(2018), a determinação dos polos de Euler é uma contribuição geodésica para a determinação geocinemática da Terra, assumido sua superfície como esférica.

Também é necessário pressupor outras considerações, como: a Terra é um corpo rígido que gira em torno de seu eixo; a superfície da mesma é coberta por um conjunto de placas tectônicas; e o movimento relativo de uma placa num determinado sistema de coordenadas é descrito pelo vetor de rotação geocêntrico de Euler (SOUZA, 2013).

Existem vários MMP disponíveis para realizar a determinação das velocidades das estações e são disponibilizados, ao menos, 18 modelos para calcular o movimento da placa tectônica Sul Americana, que são: APKIM2000; APKIM2005-DGFI (*Deutsche Geodätische Forschungsinstitu*); APKIM2005-IGN (*APKIM2005 – Institute Géographique National*); CGPS 2004 (*Continuous GPS 2004*); GEODVEL 2010 (*Geodesy Velocity 2010*); GSRM v1.2 2004 (*Global Strain Rate Model 2014*); HS2-NUVEL 1A (*Hot Spot2 Northwestern University Velocity model 1A*); HS3-NUVEL 1A (*Hot Spot3 NUVEL 1A*); ITRF2000-AS&B; ITRF2000-D&A; ITRF2014 (MMP); ITRF2008 (MMP); NNR-MORVEL56; GSRM v2.1(2014); MORVEL 2010 (*Mid Ocean Ridge Velocity 2010*); NUVEL 1; NUVEL 1A e REVEL-2000 (UNAVCO, 2020b).

Os modelos clássicos foram determinados a partir de dados geológicos, geofísicos e por meio dos cálculos de taxas de variações, bem como pelo azimute do deslocamento de cada placa. Já os modelos mais modernos foram calculados a partir da combinação de dados de geodésia espacial (VLBI - *Very Long Baseline Interferometry*, SLR - *Satellite Laser Ranging*, DORIS - *Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*, GNSS) (RAMOS, 2015).

Um dos MMP mais atuais, pertencente à ferramenta de cálculo online PMC (*Plate Motion Calculator*) - UNAVCO (*University NAVSTAR Consortium*), trata-se do modelo de velocidade ITRF2014 (MMP), que foi concebido utilizando-se observáveis das quatro técnicas de geodésia espacial (VLBI, SLR, GNSS e DORIS). Estes modelam com precisão as trajetórias reais da estação, resultando em um modelo mais robusto (ALTAMIMI; XAVIER; LAURENT, 2016). Salienta-se que o modelo mais atual pertencente ao PMC-UNAVCO é o GSRM v2.1 2014 (MMP). Ambos os modelos MMP ITRF2014 e o GSRM2014 foram selecionados para comparação com o modelo de velocidade gerado com o uso da krigagem ordinária. Esses modelos, quando obtido no PMC-UNAVCO, estimam as velocidades na

condição NNR. Vale lembrar que, segundo Altamimi et al. (2017), as materializações ITRS (*International Terrestrial Reference System*) satisfazem, implicitamente, a condição de NNR aplicada à superfície da Terra, ou seja, ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) impõe a condição NNR para movimentos horizontais, o que significa que o *datum* não está vinculado a nenhuma placa tectônica específica. Outro modelo que foi utilizado para fins de comparação foi o VEMOS2017 e VEMOS2009, que será descrito na próxima seção.

2.2.3. VEMOS2009 e VEMOS2017

O modelo de velocidade para o SIRGAS, denominado VEMOS, é continuamente atualizado. A primeira versão foi lançada em 2003 (VEMOS2003), a segunda em 2009 (VEMOS2009), a terceira em 2015 (VEMOS2015) e a mais recente em 2017 (VEMOS2017). Maiores informações podem ser obtidas no site do SIRGAS (<https://www.sirgas.org/pt/velocity-model/>).

O VEMOS2009 foi elaborado usando o método do elemento finito e colocação por mínimos quadrados com funções de covariância empiricamente determinadas, com velocidades pontuais de 496 estações geodésicas de 2 de janeiro de 2000 a 30 de julho de 2009. As incertezas das velocidades são de aproximadamente 1,5 mm/ano (SIRGAS, 2022).

Já o VEMOS2017 foi derivado de velocidades pontuais inferidas em 515 estações geodésicas de 1 de janeiro de 2014 a 28 de janeiro de 2017 usando o método de colocação por mínimos quadrados com funções de covariância empiricamente determinadas. Este modelo descreve o atual deslocamento na América Latina e no Caribe e dá continuidade ao modelo de movimento de placa tectônica representado pelo VEMOS2015, válido de 14 de março de 2010 a 11 de abril de 2015. O VEMOS2017 cobre a região de 120°W, 55°S a 35°W, 32°N com uma resolução espacial de 1° x 1°. A incerteza média do VEMOS2017 é avaliada em $\pm 1,0$ mm/a na direção norte-sul e $\pm 1,7$ mm/a na direção leste-oeste. Os valores máximos de incerteza (até ± 15 mm/a) ocorrem nas zonas afetadas por fortes terremotos (na área de Maule, na parte norte do Chile, Equador e Costa Rica). Os melhores valores de incerteza (cerca de $\pm 0,1$ mm/a) acontecem na parte leste, onde se encontra a região mais estável da placa Sul-Americana (SIRGAS, 2022).

O VEMOS2017 fornece os resultados referenciados ao IGS14 (ITRF2014)

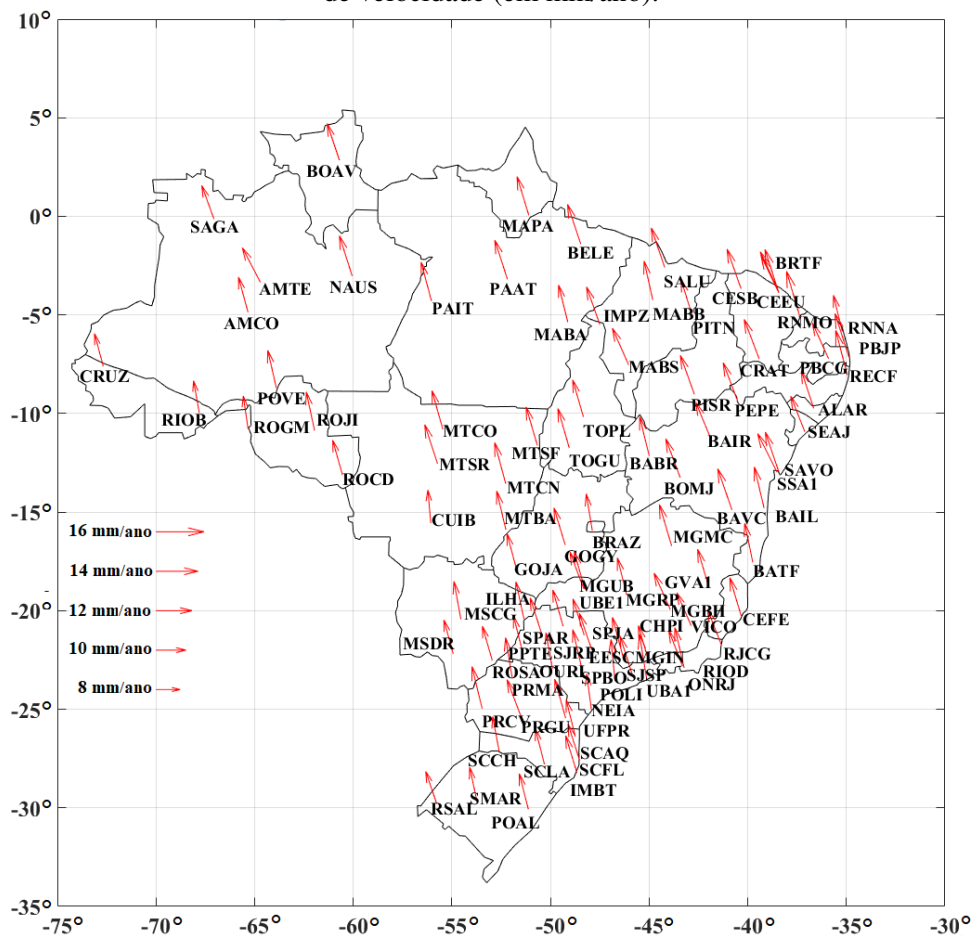
(DREWES; SÁNCHEZ, 2020; SÁNCHEZ; DREWES, 2020). Assim, como os resultados comparativos foram realizados considerando o ITRF2014, optou-se em utilizar o VEMOS2017, evitando os efeitos de propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial. Além disso, conforme supracitado, o VEMOS2017 descreve a atual deformação na América Latina.

2.3. Materiais e Métodos

2.3.1. Materiais

A pesquisa foi realizada na placa Sul-Americana na porção que está localizado o território brasileiro. Foram utilizadas velocidades de 94 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), como ilustra a Figura 1.

Figura 1- Representação das estações da RBMC utilizadas na pesquisa com seus respectivos vetores de velocidade (em mm/ano).



Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

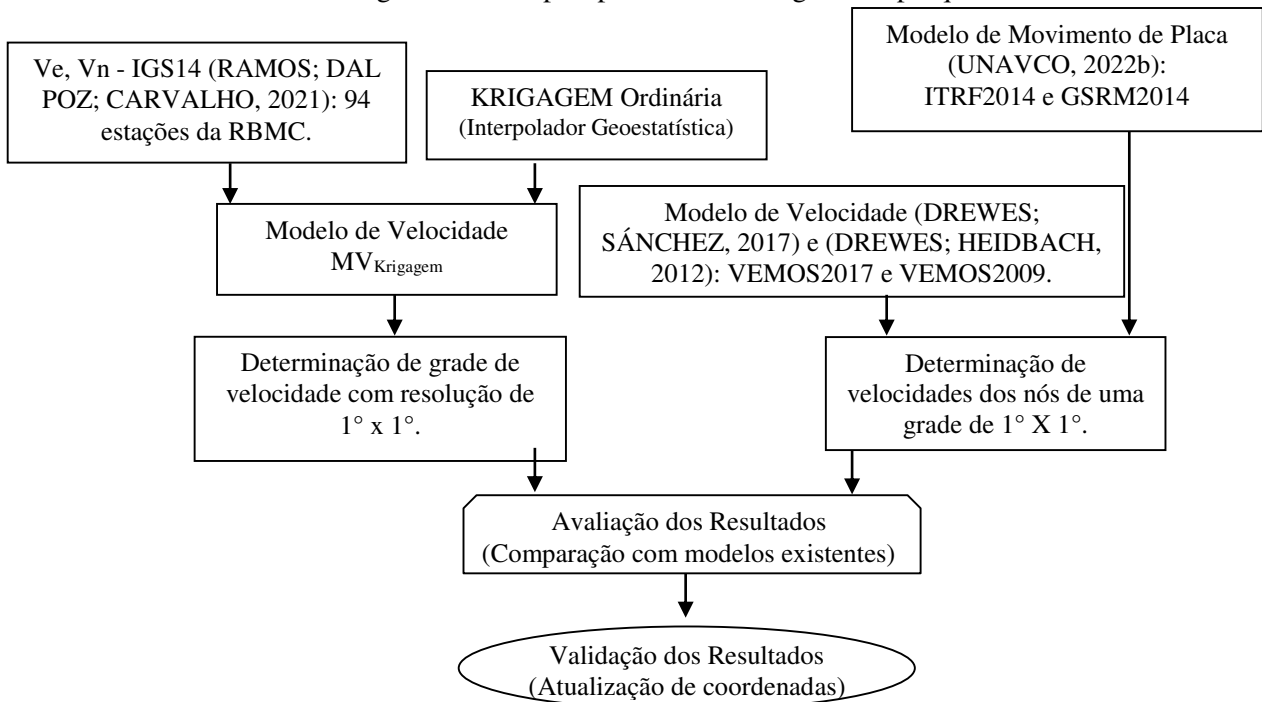
As velocidades das estações GNSS foram obtidas utilizando o aplicativo *online* SARI (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019), por meio do qual foram realizadas análises de séries temporais de coordenadas GNSS considerando-se tendência, sazonalidade e ruídos. O intervalo de tempo para aquisição dos dados foi de 01/01/2012 a 29/12/2018. Foram escolhidas todas as estações com, pelo menos, cinco anos de dados para o período supracitado, sendo utilizados dados diários de observáveis GNSS no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*). Destaca-se que as velocidades foram obtidas de Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021) e estão referenciadas ao IGS14 (ITRF2014). Essas velocidades foram utilizadas no processo de interpolação por krigagem.

Além do SARI, foram utilizados os seguintes *softwares* na elaboração deste trabalho: IBGE-PPP na realização do pós-processamento dos dados do GNSS; RINEX EDITION (NASCIMENTO *et al.*, 2017) que auxiliou na realização dos *downloads* e pós-processamentos dos dados GNSS, bem como na realização das extrações das informações dos arquivos de processamentos; *software* R na realização das análises estatísticas e na interpolação dos dados de velocidade; e Matlab (versão 2012b) na confecção das figuras.

2.3.2. Métodos

Na realização desta pesquisa foi necessária, inicialmente, a determinação das velocidades das 94 estações pertencentes à RBMC, que foram obtidas a partir das análises de séries temporais de coordenadas GNSS, realizadas no *software* SARI, que realiza análises de séries temporais aplicando filtro de Kalman ou ajustamento pelo método dos mínimos quadrados e também realiza análise de ruídos (ruído branco – *white noise*, ruído de cintilação - *flicker noise*, ruído de passeio aleatório - *random walk noise* e ruído da lei de potência - *power law noise*). Detalhes sobre o procedimento de estimativa das velocidades (V_e e V_n) das 94 estações da RBMC utilizadas neste trabalho são descritos em Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021). Os principais passos metodológicos empregados nesta pesquisa são representados pela Figura 2.

Figura 2– Principais passos metodológicos da pesquisa.



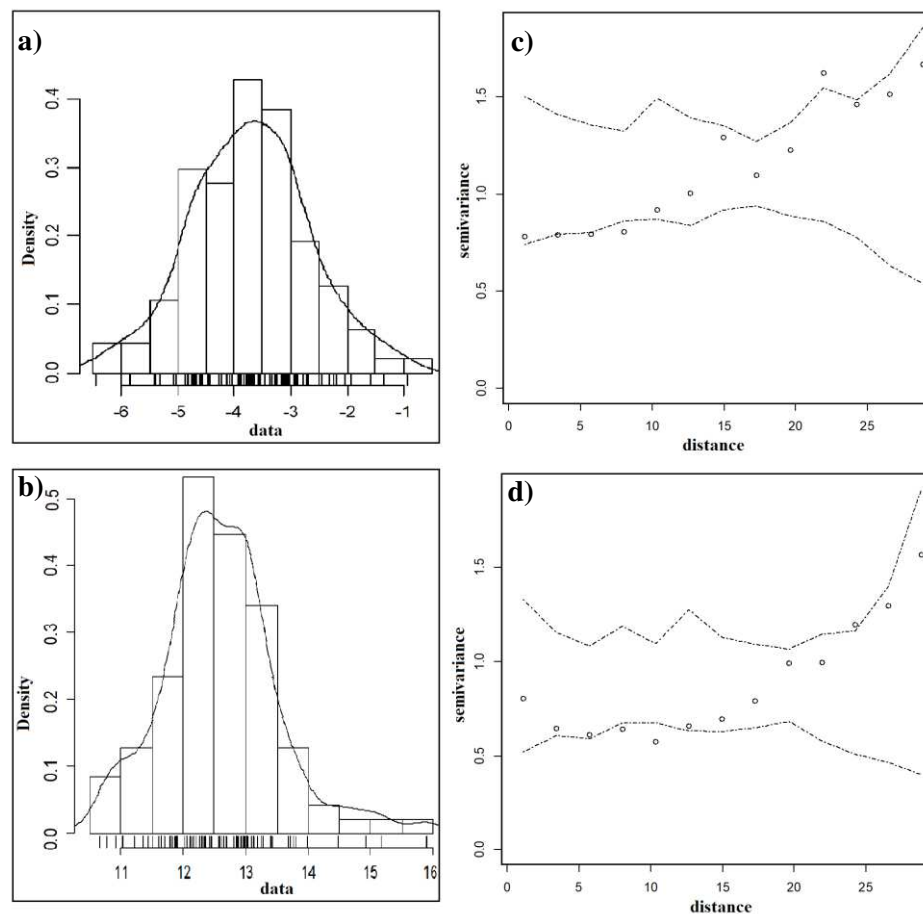
Fonte: Elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

Após serem determinadas as velocidades das estações da RBMC (RAMOS; DAL POZ; CARVALHO, 2021), o próximo passo foi a realização de análises estatísticas dos dados (análises exploratórias) e a utilização do interpolador geoestatístico, que consistiu em determinar um modelo de velocidade utilizando krigagem ordinária como interpolador. Nesta etapa foi criado o modelo de velocidade ($MV_{Krigagem}$), com a utilização do *software* R (pacote GeoR). Ainda, foi determinada uma grade regular ($1^\circ \times 1^\circ$) com os valores de velocidade obtidos a partir do $MV_{Krigagem}$. Em seguida, para fins de comparação, foram obtidas as velocidades de uma grade regular com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$ para os modelos ITRF2014 (MMP), GSRM2014 (MMP), VEMOS2009 e VEMOS2017. Na sequência, foram calculadas as discrepâncias planimétricas entre os três modelos supracitados em relação ao modelo obtido pelo interpolador geoestatístico. Também foram realizadas as atualizações das coordenadas de 62 estações da RBMC com os quatro (4) modelos de velocidades utilizados nesta pesquisa, sendo outra maneira de testar o desempenho do modelo de velocidade para fins de validação dos resultados.

2.4. Resultados e Discussão

Nesta pesquisa foi utilizada a interpolação por krigagem ordinária na determinação de um campo de velocidade para a placa Sul-Americana, porção que o Brasil ocupa. Antes da utilização das técnicas de geoestatística, foram realizadas algumas análises exploratórias dos dados. Segundo Oliveira (2003), para certificar a existência de uma estrutura de dependência espacial nos dados de pesquisa, deve-se elaborar histogramas, regressões e envelopes simulados. Segundo Fernandes (2019), o envelope simulado é um método da análise de diagnóstico realizado de forma gráfica e utilizado para avaliar a veracidade da hipótese referente à distribuição de probabilidade assumida para a variável resposta em um modelo de regressão. Inicialmente, foram elaborados envelopes simulados e os histogramas conforme ilustra a Figura 3.

Figura 3 – Histogramas e envelopes simulados dos dados da pesquisa: a) histograma Ve; b) histograma Vn; c) envelope simulado Ve; d) envelope simulado Vn.



Fonte: Elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir da Figura 3 foi percebido que os histogramas apresentaram distribuição de probabilidade próxima à distribuição normal (Figura 3a e Figura 3b), e também, que a maioria dos pontos ficaram dentro dos envelopes simulados (Figura 3c e Figura 3d). Assim, foi possível concluir que as velocidades das estações GNSS analisadas possuem distribuição normal e dependência espacial.

Em seguida, foram realizadas as análises dos semivariogramas experimentais, em que foi possível constatar a condição de isotropia dos dados, visto que, ao criar os semivariogramas experimental nas direções 0°, 45°, 90° e 135° e também o semivariograma unidirecional (isotrópico), conforme analisado em Viola *et al.* (2010), não foram percebidas diferenças significativas entre os semivariogramas. Neste caso, foi realizada a determinação dos semivariogramas isotrópicos para as componentes este (e) e norte (n) no sistema geodésico local (SGL).

A partir do semivariograma experimental foram estudados cinco modelos de semivariogramas teóricos (Gaussiano, Exponencial, Matérn e Esférico) para identificar qual modelo teórico melhor se ajusta ao semivariograma experimental. Segundo Oliveira (2003), o método de ajuste de semivariogramas teóricos a semivariogramas experimentais é denominado de método das aproximações sucessivas, pois o processo de ajuste finaliza quando as discrepâncias entre os valores experimentais e teóricos forem mínimas. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir dos modelos teóricos testados.

Tabela - 1 – Resultado estatístico dos modelos de semivariogramas teóricos analisados na pesquisa. NOTA: *Tausq* se refere ao efeito pepita; *Sigma* consiste no valor do patamar menos o efeito pepita; *Phi* se refere ao alcance (range); *Kappa* é o valor numérico para o parâmetro adicional de suavização da função de correlação; *SQR* é soma de quadrado dos resíduos.

Modelos Teóricos	Ve - este (Ve - SGL)					V - norte (Vn - SGL)				
	Tausq	Sigma	Phi	Kappa	SQR	Tausq	Sigma	Phi	Kappa	SQR
Exponencial	0,5826	1178,402	31950,6690	1	44,23	0,3880	2823,97	95350,05	0,5	68,24
Esférico	0,0395	1,070	2,2939	1	339,02	0,3952	416,90	21490,34	0,5	68,17
Gaussiano	0,7260	1,205	23,8893	1	37,81	0,5385	468,59	664,81	0,5	24,89
Matérn	0,3246	0,922	2,9629	2,13	167,47	0,5254	29076,35	9460,47	1	28,93

Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

Para escolher o melhor semivariograma experimental, além dos resultados estatísticos dos modelos de semivariogramas teóricos (Tabela 1), também foi realizada a validação cruzada, para melhor tomada de decisão. A Tabela 2 apresenta os resultados da validação cruzada obtidos, salientando-se que foram analisados os modelos: Exponencial, Esférico, Gaussiano e Matérn.

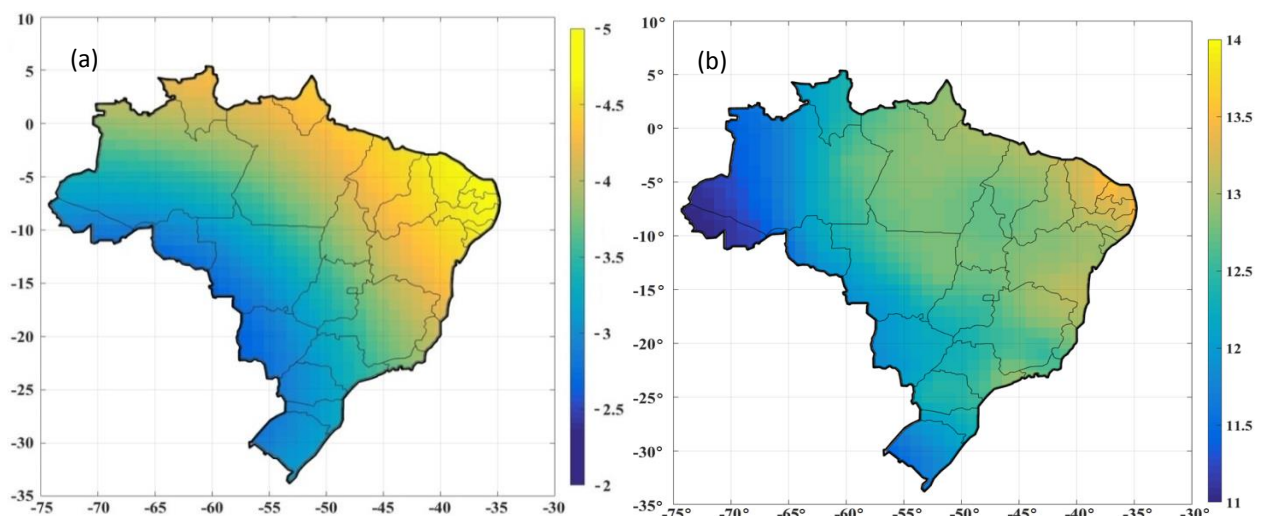
Tabela - 2– Resultado estatístico dos modelos de semivariogramas teóricos obtido através da validação cruzada. NOTA: R^2 (coeficiente de determinação) expressa à proporção da variação de uma medida (variável resposta) que é explicada pela variação de outra (variável explanatória); $RMSE$ (raiz do erro quadrático médio), onde o erro retorna à unidade de medida do modelo.

MODELO	V_este (Ve - SGL)		V_norte (Vn - SGL)	
	R^2	RMSE(m)	R^2	RMSE(m)
Exponencial	0,753	0,886	0,700	0,828
Esférico	1,268	1,042	0,705	0,828
Gaussiano	0,780	0,882	0,594	0,809
Matérn	0,499	0,901	0,627	0,813

Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir das Tabelas 1 e 2, foi possível perceber que os modelos teóricos que mais se ajustaram ao semivariograma experimental foram o modelo Gaussiano e o Esférico para as componentes Ve e Vn, respectivamente. Os critérios de escolha foram às análises de R^2 e $RMSE$ (validação cruzada – Tabela 2). Também foram analisados os valores de SQR e a relação $Tausq$ e $Sigma$ (estatística do semivariograma teórico – Tabela 1). Ou seja, pela Tabela 2, foram escolhidos os valores de R^2 mais próximos de 1 (um) e menor $RMSE$, no caso foram selecionados: componente Ve (Gaussiano – R^2 : 0,78 e $RMSE$: 0,882); e componente Vn (Esférico – R^2 : 0,705 e $RMSE$: 0,828). Porém, para a componente Ve os valores dos modelos Exponencial e Esférico foram similares, assim, foi analisado a Tabela 01, verificando os valores de SQR (menor valor) e relação $Tausq$ e $Sigma$ (menor diferença) para a componente Vn os valores foram: Esférico - SQR : 68,17 e a diferença entre $Tausq$ e $Sigma$ é 416,50. Após a escolha dos modelos, foi realizada a interpolação utilizando-se a krigagem ordinária para cada uma das componentes, conforme é ilustrado pela Figura 4.

Figura 4 – Resultado da interpolação por krigagem ordinária. (a) componente “Ve”; (b) componente “Vn” - em milímetros.

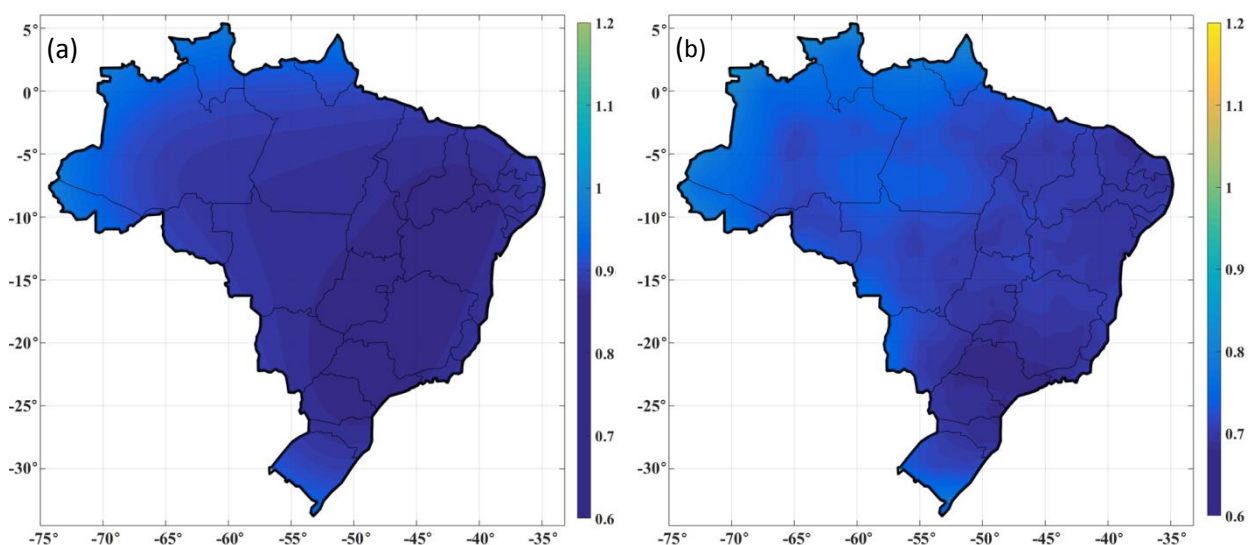


Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir da Figura 4 é possível perceber que as componentes V_e e V_n não apresentam variações abruptas nos seus valores, as variações são predominantemente na direção SO (sudoeste) para NO (nordeste). Os valores máximos e mínimos nas componentes do SGL são: -2,59 mm/ano e -4,65 mm/ano na componente (V_e); 13,50 mm/ano e 11,28 mm/ano na componente (V_n). Também é possível perceber a partir da Figura 4, que em ambos os mapas os maiores valores de velocidade estão localizados na parte mais oriental do Brasil e que os menores valores de velocidades estão localizados nas partes ocidental e meridional do território brasileiro. Ressalta-se que as velocidades das estações GNSS analisadas na pesquisa possuem um padrão de distribuição quanto à magnitude das velocidades. Quando são analisadas as Figuras 4(a) – V_e e Figura 4(b) – V_n , percebe-se que os valores com maiores velocidades (em módulo) estão situados, predominantemente, na região nordeste do Brasil. Já os valores com menores velocidades (em módulo) encontram-se na direção sudoeste do mapa. A única diferença é que os maiores valores da componente V_n (Figura 4 (a)) estão mais disperso na região nordeste do Brasil.

Foram elaborados mapas com as precisões da interpolação por krigagem ordinária para as velocidades interpoladas. A figura 5 ilustra a precisão (mm) da interpolação para as duas componentes interpoladas.

Figura 5 – Precisão da interpolação por krigagem ordinária. (a) componente “ V_e ”; (b) componente “ V_n ” - em milímetros.



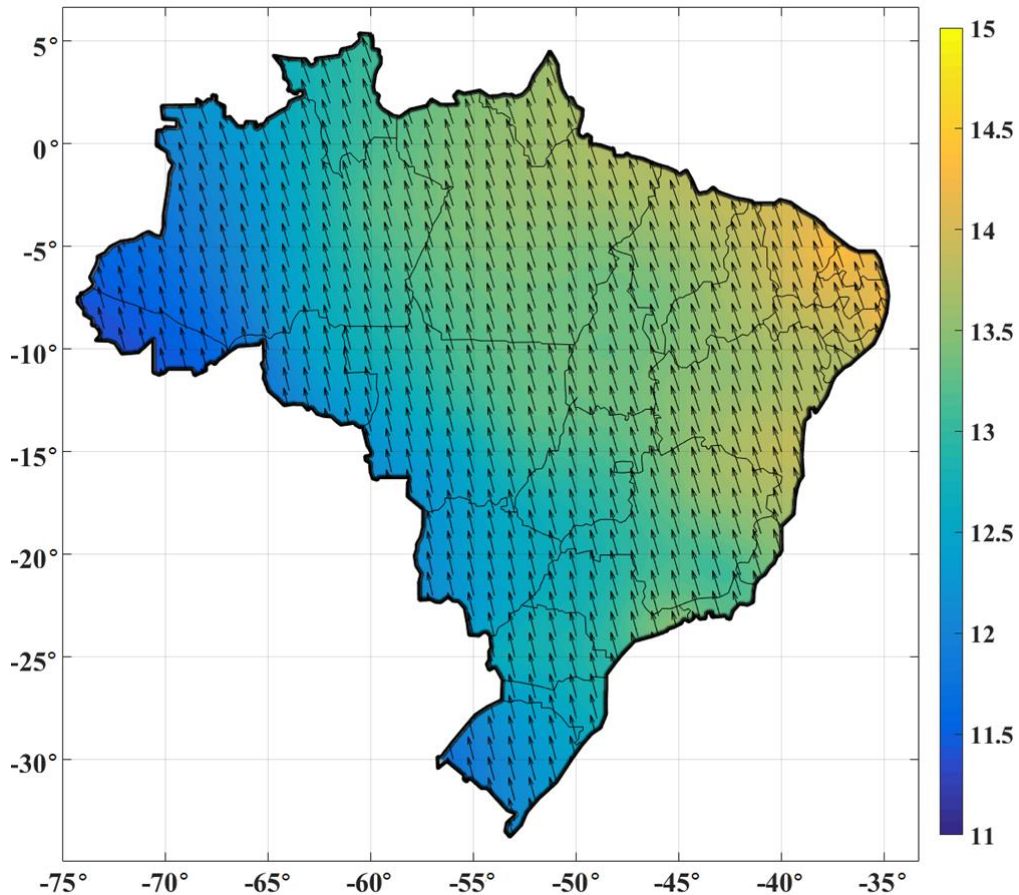
Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir da Figura 5 é possível perceber que o interpolador em ambas as componentes de velocidades (V_e e V_n) possui precisões menores na região norte do Brasil. Isto devido ao baixo número de estações (maior região do Brasil) e a distribuição irregular das estações (vide Figura 1) na região.

Por fim, foi gerada uma grade regular com resolução de $1^\circ \times 1^\circ$ com os valores de velocidade obtidos através da interpolação, onde foi criado o modelo de velocidade MV_{Krigagem} , (Lat , $Long$, V_n e V_e). Esta resolução ($1^\circ \times 1^\circ$) foi determinada de acordo com Rui e Stamps (2019), que informam que a resolução espacial dos dados de observação com pontos amostrados deve ser, no máximo, a metade do espaçamento médio entre os pares de pontos mais próximos. Nesta pesquisa, foram obtidos 94 pares de distâncias e a média dos valores foi de aproximadamente 94 km ($\sim 0,9^\circ$). Portanto, a grade não poderá ter espaçamento menor que ($0,9^\circ$). Assim, ressalta-se que esta metodologia é adequada para regiões onde a distribuição de estações GNSS que não apresenta uma distribuição uniforme, que é o caso das estações da RBMC utilizadas no trabalho, uma vez que foi utilizada a função K de Ripley e foi constatada que as estações da RBMC utilizadas possuem distribuição espacial agregada.

O modelo de velocidade desenvolvido é ilustrado na Figura 6, que representa a modelagem da superfície cinemática do território brasileiro (vetores resultantes).

Figura 6 – Grade de velocidade determinado para o território brasileiro a partir do interpolador de krigagem ordinária em mm/ano (vetores resultantes).



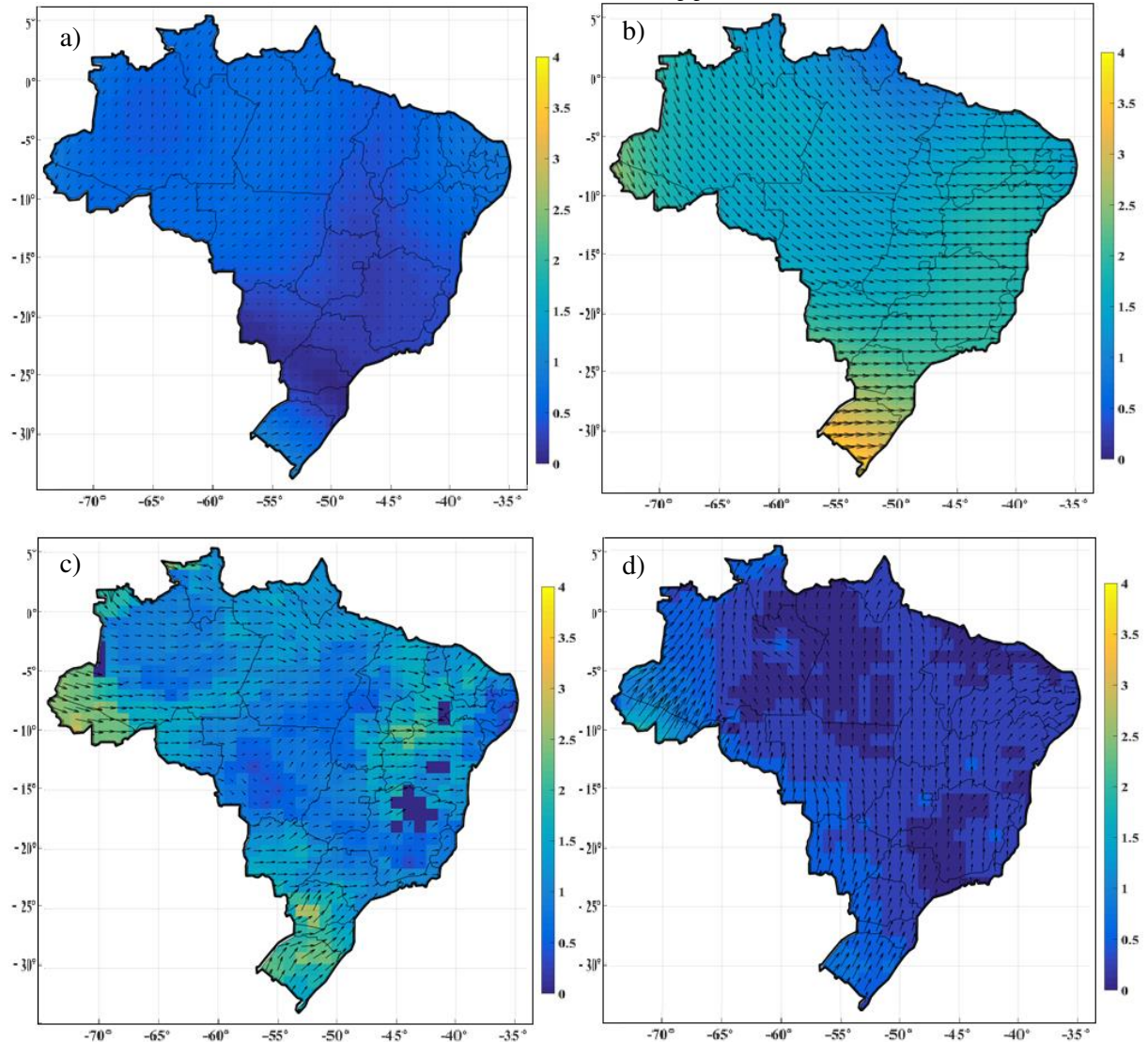
Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir da Figura 6 é possível perceber que há um decréscimo das velocidades na direção NE para SO, o que sintetiza os resultados obtidos e apresentados na Figura 4. Outro ponto que deve ser destacado é que a região nordeste do Brasil é aquela com os maiores valores de velocidades das estações do GNSS. Destaca-se também a pequena variação de velocidade na região sul do País. Os valores máximos e mínimos de velocidades resultantes são e 14,28 mm/ano e 11,64 mm/ano, respectivamente. Isso representa uma variação da velocidade resultante de apenas 0,026 m.

Em seguida, com o objetivo de avaliar o modelo de velocidade $MV_{Krigagem}$, foi realizada a comparação entre dois modelos de movimento de placas disponibilizados no aplicativo online PMC-UNAVCO, que são os modelos ITRF2014 (MMP) e GSRM2014 (MMP). Também foi comparado com o modelo de velocidade VEMOS2017, modelo disponibilizado pela rede SIRGAS. A Figura 7 ilustra os vetores de discrepância ao comparar

o MV_{krigagem} com os modelos ITRF2014, GSRM 2014 e VEMOS2017. Destaca-se que todos os modelos de velocidades supracitados estão referenciados ao ITRF2014.

Figura 7 – Vetores de discrepâncias resultantes entre os modelos - em milímetros.: (a) ITRF2014 (MMP) X MV_{Krigagem} ; (b) GSRM (MMP) X MV_{Krigagem} ; (c) VEMOS2017 X MV_{Krigagem} . (d) VEMOS2009 X MV_{Krigagem} .



Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir da Figura 7 é possível perceber a semelhança entre o MV_{Krigagem} e o ITRF2014 (MMP). Já os modelos GSRM2014 (MMP), VEMOS2009 e VEMOS2017 apresentaram discrepâncias maiores e uma variação mais acentuada nos vetores discrepâncias. É possível também observar um comportamento diferenciado do modelo VEMOS2017, quanto ao comportamento dos vetores resultantes dos modelos ITRF2014 (MMP) e GSRM2014 (MMP). Isto pode ser devido à técnica de obtenção do modelo VEMOS2017, já que o VEMOS é obtido por interpolação, enquanto que o ITRF2014 (MMP) e o GSRM2014

(MMP) são obtidos pelo vetor de rotação (polo de Euler). A Tabela 3 apresenta os valores máximos, mínimos e as médias das discrepâncias dos modelos analisados.

Tabela 3 – Estatística básica dos vetores resultantes entre $MV_{Krigagem}$ e os modelos GSRM 2014(MMP), ITRF2014 (MMP), VEMOS2017 e VEMOS2009.

	MV_{Krig} X GSRM 2014 (MMP) (mm/ano)	MV_{Krig} X ITRF 2014 (MMP) (mm/ano)	MV_{Krig} X VEMOS 2017 (mm/ano)	MV_{Krig} X VEMOS 2009 (mm/ano)
MÉDIA	1,64	0,51	1,17	1,43
MÁXIMO	3,46	1,12	3,09	2,86
MÍNIMO	0,65	0,05	0,02	0,09

Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

Dessa maneira, é possível perceber que, de fato, os modelos VEMOS2017, VEMOS2009 e GSRM2014 (MMP) possuem variações e discrepâncias superiores, se comparados com o modelo ITRF2014 (MMP). Porém, ao realizar esta comparação, não é possível concluir quanto à eficiência em relação à realização da atualização de coordenadas.

Logo, com o intuito de verificar a eficiência do modelo de velocidade desenvolvido, foi realizada a atualização das coordenadas de 62 estações da RBMC, bem como foram escolhidas todas as estações em funcionamento no dia 26/11/2021 e foram removidas as estações que participaram da estimativa do modelo de velocidade (das 141 estações em funcionamento, somente 79 estações participaram da criação do modelo de velocidade). Os dados RINEX das estações foram obtidos no site da RBMC, processados no IBGE-PPP e os resultados foram obtidos no sistema de coordenadas IGB14 (ITRF2014) na época 2021,90. Em seguida, foi realizada a transformação de referencial (ITRF2014 → ITRF2000) e a atualização das coordenadas para ITRF2000 (SIRGAS2000), na época 2000,4. Foram utilizados os parâmetros do IGN (2022) na transformação de referencial, e na atualização das coordenadas foram utilizadas as velocidades dos modelos ITRF2014 (MMP), GSRM 2014(MMP), VEMOS2017 e $MV_{Krigagem}$. Também foram realizados os cálculos das discrepâncias em relação ao VEMOS2009 uma vez que o IBGE-PPP o utiliza para a realização da atualização das coordenadas. As discrepâncias planimétricas médias obtidas entre as coordenadas no SIRGAS2000, época 2000,4 (após transformação de referencial e atualização de coordenadas) e as coordenadas obtidas no descritivo das estações (SIRGAS2000, época 2000,4) estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Discrepância planimétrica entre as coordenadas atualizadas e as coordenadas dos descritivos de RBMC em metros.

	Sem Atualização	GSRM2014 (MMP)	ITRF2014 (MMP)	VEMOS2017	MV _{KRIGAGEM}	VEMOS2009
MÁXIMO	0,310	0,073	0,065	0,055	0,054	0,060
MÍNIMO	0,259	0,006	0,002	0,005	0,003	0,004
MÉDIA	0,282	0,044	0,013	0,030	0,016	0,020
DESVIO PADRÃO	0,009	0,016	0,010	0,011	0,010	0,009

Fonte: elaborada pelos autores deste trabalho (2022).

A partir da Tabela 4 é possível perceber que o modelo de velocidade elaborado neste trabalho ($MV_{Krigagem}$) forneceu resultados significativos na atualização das coordenadas. Os resultados mostram que, em média, a discrepância na atualização foi de 1,6 cm. Já nos modelos GSRM 2014 (MMP), ITRF2014 (MMP) e VEMOS2017, os valores foram 4,4 cm, 1,3 cm e 3,0 cm, respectivamente. Desse modo, pode-se dizer que, o modelo de velocidade $MV_{Krigagem}$ se mostrou mais eficiente que os modelos GSRM 2014(MMP) e VEMOS2017 e 2009 na atualização de coordenadas. Nesse cenário, o modelo de velocidade elaborado apresentara resultados similares aos modelos de velocidades ITRF2014 (MMP) e VEMOS2009.

Outro fator importante que pode ser notado é a relação entre os mapas de vetores de discrepância (Figura 7) e a Tabela 4, devido à semelhança entre o modelo de velocidade ITRF2014 (MMP) e $MV_{Krigagem}$, que foi evidenciado de acordo com os resultados da atualização das coordenadas. Esse processo também mostrou a eficiência de ambos os modelos em relação aos demais testados.

2.5. Conclusão

Esta pesquisa apresenta técnicas de obtenção de modelo de velocidade a partir de interpolador geoestatístico (krigagem ordinária) para a placa Sul-Americana (porção que o Brasil ocupa na placa), onde as velocidades das estações de monitoramento contínuo foram obtidas (94 estações) através de análises de séries temporais de coordenadas GNSS (período de 7 anos de investigação).

É possível perceber que o modelo de velocidade criado ($MV_{Krigagem}$) obteve resultados significativos na realização da atualização de coordenadas no Brasil, tendo em vista que a média das discrepâncias planimétricas entre as coordenadas atualizadas e as coordenadas do

descritivo foi de 1,6 cm. Já os valores médios de discrepâncias entre os demais modelos foram 4,4 cm, 1,3 cm, 3,0 cm e 2,0 cm com relação aos modelos GSRM2014 (MMP), ITRF2014 (MMP), VEMOS2017 e VEMOS2009, respectivamente. Isto evidencia a grande semelhança entre o modelo elaborado e o ITRF2014 (MMP) e também ao VEMOS2009.

Igualmente, pode-se afirmar que a interpolação por krigagem ordinária apresenta-se como uma importante ferramenta para a determinação de modelos de velocidade regionais, mesmo em regiões com baixa densificação de estações de monitoramento contínuo por ser um interpolador que modela efeitos locais e regionais, salienta-se que a placa tectônica estudada se trata de uma placa estável. Os resultados poderiam ser mais efetivos se houvesse uma densificação de estações da RBMC nas regiões norte e centro-oeste do Brasil, considerando a baixa densificação de estações da RBMC nestas regiões na época da pesquisa.

Também é importante evidenciar a robustez do modelo ITRF2014 (MMP) na realização de atualização de coordenadas no Brasil, por ser um modelo global e modelar com clareza o movimento tectônico da porção que o Brasil ocupa.

Referências

- ALTAMIMI, Z.; XAVIER, C.; LAURENT, M. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 121, n.8, p.6109-6131, 2016.
- ANSARI, K.; BAE, T. Contemporary deformation and strain analysis in South Korea based on long-term (2000–2018) GNSS measurements. **International Journal of Earth Sciences**, . 109, n. 1, p. 391-405, 2020.
- ALTAMIMI, Z.; MÉTIVIER, L.; REBISCHUNG, P.; ROUBY, H.; COLLILIEUX, X. ITRF2014 plate motion model. **Geophysical Journal International**, v. 209, n. 3, p. 1906-1912, 2017.
- ATANASOVA, M.; GEORGIEV, I.; CHAPANOV, Y. Global tectonic plate motions from SLR data processing. **ГОДИШНИК НА УНИВЕРСИТЕТА ПО АРХИТЕКТУРА, СТРОИТЕЛСТВО И ГЕОДЕЗИЯ**, p. 109-114, 2018.
- BOGUSZ, J.; KŁOS, A. N. N. A.; GRZEMPOWSKI, P.; KONTNY, B. Modelling the velocity field in a regular grid in the area of Poland on the basis of the velocities of European permanent stations. **Pure and Applied Geophysics**, v. 171, n. 6, p. 809-833, 2014.
- BÜRGMANN, R.; THATCHER, W.; BICKFORD, M. E. Space geodesy: A revolution in

crustal deformation measurements of tectonic processes. **Geological Society of America Special Papers**, v. 500, p. 397-430, 2013.

CÂMARA, G.; CARVALHO, M. S. Análise de Eventos Pontuais. In: **Análise espacial de dados geográficos**. EMBRAPA, Distrito Federal: Planaltina, 2004. p. 54-78

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S. Análise Espacial e Geoprocessamento. In: **Análise espacial de dados geográficos**. EMBRAPA, Distrito Federal: Planaltina, 2004. p. 20-53

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. Análise espacial de superfícies. In: **Análise espacial de dados geográficos**. EMBRAPA, Distrito Federal: Planaltina, 2004. p. 79-122

CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana**. 188f. 2015. Tese Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFV. Viçosa-MG, 2015.

COSTA, S. M. A. Estimativa do Campo de Velocidades a partir das Estações da RBMC. In: **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, Departamento de Geodésia. Rio de Janeiro, 2001 <<https://artigos.ibge.gov.br/artigos-home/geodesia/2004-2000/3100-estimativa-do-campo-de-velocidades-a-partir-das-estacoes-da-rbmc>> Acesso em: 24 out. 2019.

DREWES, H. A geodetic approach for the recovery of global kinematic plate parameters. **Bulletin géodésique**, v. 56, n. 1, p. 70-79, 1982.

DREWES, H; SÁNCHEZ, L. The varying surface kinematics in Latin America: VEMOS2009, 2015, and 2017. In: **Symposium SIRGAS2017**. 2017.

DREWES, H.; SÁNCHEZ, L. Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017. **Technische Universitaet Muenchen, Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut (DGFI-TUM), IGS RNAAC (SIRGAS)**, 2020.

DREWES, H; HEIDBACH, O. The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. In: **Geodesy for Planet Earth**. Springer, Berlin: Heidelberg, 2012. p. 657-664.

FERNANDES, V. V. **Contribuições sobre o envelope simulado na análise de diagnóstico em modelos de regressão**. 66f. 2019. Dissertação (Mestre em Estatística) da USP. São Carlos, 2019.

FUNDERBURK, W; OGUNTUASE, J. Surface Velocities and Viscoelastic Motion Reflected Through Time-Series Analysis of CORS. **AGUFM**, v. 2019, p. G53B-0627, 2019.

GOUDARZI, M. A.; BAVILLE, S. Application of PPP with ambiguity resolution in earth surface deformation studies: a case study in eastern Canada. **Survey Review**, v. 50, n. 363, p. 531-544, 2017.

GOUDARZI, M. A.; COCARD, M.; SANTERRE, R. EPC: Matlab software to estimate Euler pole parameters. **GPS Solutions**, v. 18, n. 1, p. 153-162, 2013.

IGN, 2022. **Transformation parameters from ITRF2014 to past ITRFs**. Disponível em: <http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2014_ITRFs.txt> Acesso em: 08 jan. 2022.

JAGODA, M.; RUTKOWSKA, M.; SUCHOCKI, C.; KATZER, J. Determination of the tectonic plates motion parameters based on SLR, DORIS and VLBI stations positions. **Journal of Applied Geodesy**, v. 1, 2019.

KAFTAN, V. I.; GVISHIANI, A. D.; MOROZOV, V. N.; TATARINOV, V. N. Methods and results of determination of movements and deformations of the Earth's crust according to GNSS data at the Nizhne-Kansk geodynamic test network in the area of radioactive waste disposal. *In: Space Research Institute*. Russian Academy of Sciences, Nizhne-Kansk, 2019

LANDIM, P. M. B. Sobre geoestatística e mapas. **Terra e Didática**, v. 2, n. 1, p. 19-33, 2006.

LARSON, K.M.; FREYMUELLER, J.T.; PHILIPSEN, S. Global Plate Velocities from Global Positioning System. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. B5, p. 9961-9981, 1997.

LI, C. K.; CHING, K. E.; CHEN, K. H. The ongoing modernization of the Taiwan semi-dynamic datum based on the surface horizontal deformation model using GNSS data from 2000 to 2016. **Journal of Geodesy**, v. 93, n. 9, p. 1543-1558, 2019.

LUNA, M. P.; STALLER, A.; TOULKERIDIS, T.; PARRA, H. Methodological approach for the estimation of a new velocity model for continental Ecuador. **Open Geosciences**, v. 9, n. 1, p. 719-734, 2017.

MANEVICH, A.; KAFTAN, V.; SHEVCHUK, R.; URMANOV, D. Modelling the Horizontal Velocity Field of the Nizhne-Kansk Massif According to GNSS Observations. *In: ENVIRONMENT. TECHNOLOGIES. RESOURCES. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2021. p. 162-169.

MCCARTHY, D. D. IERS Conventions. **IERS TECHNICAL NOTE 21**. U.S. Naval Observatory, 1996.

MIRONOV, A. P.; SUCHILIN, A. A.; ROGOZHIN, E. A. Observations of Modern Crustal Deformations in Moscow Using Global Navigation Satellite Systems. **Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics**, v. 55, n. 10, p. 1517-1525, 2019.

NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. D. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p. 150-165, jan - mar, 2017.

OLIVEIRA, M. C. N. **Métodos de estimação de parâmetros em modelos geoestatísticos com diferentes estruturas de covariâncias: uma aplicação ao teor de cálcio no solo**. 140f. 2003. Tese (doutorado em Agronomia) da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003.

PEREZ, J. A. S.; MONICO, J. F. G.; CHAVES, J. C. Velocity Field Estimation Using GPS Precise Point Positioning. **The South American Plate Case**, v. 2, n. 2, p. 90-99, 2003.

PEREZ, J. A. S. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizadas na Plana Sul-Americana: Estimadas a partir do processamento de dados GPS**. 166f. 2002. Dissertação da Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2002.

RAMOS, M. P. **Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas no PPP**. 99f. 2015. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) da UFV. Viçosa, 2015.

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, 2021.

REN, Y.; LIAN, L.; WANG, J. Analysis of Seismic Deformation from Global Three-Decade GNSS Displacements: Implications for a Three-Dimensional Earth GNSS Velocity Field. **Remote Sensing**, v. 13, n. 17, p. 3369, 2021.

RUI, X.; STAMPS, D. S. A geodetic strain rate and tectonic velocity model for China. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 20, n. 3, p. 1280-1297, 2019.

SALAMANCA, G. E. D. **Modelagem da deformação da crosta continental do Norte dos Andes através de inversão de dados sísmicos e geodésicos**. 221f. 2016. Tese de Doutorado da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, v. 102, p. 1-23, 2016. DOI. 10.1016/j.jog.2016.06.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Geodetic monitoring of the variable surface deformation in Latin America. In: **International Association of Geodesy Symposia**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2020. p. 01-12.

SÁNCHEZ, L.; DREWES, H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, v. 102, p. 1-23, 2016. DOI. 10.1016/j.jog.2016.06.

SÁNCHEZ, L., VÖLKSEN, C., SOKOLOV, A., ARENZ, H., SEITZ, F. Present-day surface deformation of the Alpine region inferred from geodetic techniques. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 3, p. 1503-1526, 2018.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, Alvaro. SARI: interactive GNSS position time series analysis software. **GPS Solutions**, v. 23, n. 2, p. 52, 2019.

SARSITO, D. A.; PRADIPTA, D.; ANDREAS, H. Euler Poles Determination of Southern Sunda Microblocks Base on GNSS GPS Observations. In: **2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)**. IEEE, 2018. p. 1-5.

SILVA, A. L.; COSTA, S. M. A. Análises e resultados do centro de processamento SIRGAS - IBGE. **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, UFPE, Recife-PE, 2008.

SILVA, A. S. A. **Ferramentas para modelagem e interpolação de dados ambientais em escala regional**. 121f. 2015. Tese (Biometria e Estatística) da UFRPE. Recife, 2015.

SIRGAS, 2022. **VEMOS: Modelo de velocidade para o SIRGAS**. Disponível em: <<https://www.sirgas.org/pt/velocity-model/>> Acesso em: 14 set. 2022.

SOUZA, W. O. **Modelagem do movimento da placa tectônica sul-americana por meio de dados VLBI e GNSS**. 177f. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) da UFPE. Recife, 2013.

STURARO, J. R. **Apostila de geoestatística básica**. Departamento de Geologia Aplicada. Rio Claro: UNESP, 2015.

TSANOVSKI, Y; DANCHEV, T. Horizontal intraplate velocity field model for the territory of Bulgaria derived from GNSS solution. **International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM**, v. 19, n. 2.2, p. 165-174, 2019.

UNAVCO, 2022a. **GPS Velocities Reference Frames**. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/visualization/GPS-Velocity-Viewer/GPS-Velocity-Viewer-frames.html>> Acesso em: 04 jan. 2022.

UNAVCO, 2022b. **Plate Motion Calculator**. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities/plate-motion-calculator/plate-motion-calculator.html>> Acesso em: 04 jan. 2022.

VIEIRA, S. R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/313098532>. Acesso em: 18 set. 2019.

VILELA, L. C. **Comparação entre as redes neurais artificiais e o método de interpolação krigagem aplicados à pesquisa agrônômica**. 124f. 2004. Tese da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP. Botucatu, 2004.

VIOLA, M. R.; MELLO, C. R. D.; PINTO, D. B.; MELLO, J. M. D.; ÁVILA, L. F. Métodos de interpolação espacial para o mapeamento da precipitação pluvial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 9, p. 970-978, 2010.

YAMAMOTO, J. K; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

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**. 105f. 2014. Tese da Universidade Politécnica de Madri. Madri, 2014.

CAPÍTULO 3. PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS NO PROCESSO DE COMPATIBILIZAÇÃO DE REFERENCIAIS E ÉPOCA DE COORDENADAS GNSS

Uncertainties Propagation in the Compatibility Process of References and Epoch of GNSS Coordinates

Resumo: Neste trabalho, busca-se mostrar o efeito da propagação de incertezas no processo de compatibilização de época e de referenciais das coordenadas obtidas no GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Ou seja, procura-se apresentar como as precisões dos parâmetros de transformação (PT) e das velocidades das estações GNSS podem afetar as precisões das coordenadas após a propagação de incertezas na compatibilização de referencial e época, e também, apontar sua influência na qualidade posicional das coordenadas. Para tanto, foram utilizadas 75 estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), cuja época de coleta de dados foi 01/07/2020 (época 2020,5), referenciadas ao IGB14. Inicialmente, foram obtidas as precisões dos PT entre o ITRF2014 e o ITRF2000, onde o ITRF2014 é alinhado ao IGB14 e o ITRF2000 ao SIRGAS2000. Nesta etapa, percebeu-se que as precisões dos PT são depreciadas, principalmente, devido à quantidade de referenciais envolvidos entre as duas realizações (ITRF2014, ITRF2008, ITRF2005 e ITRF2000 – quatro referenciais). Em seguida, foram realizadas as etapas de processamento de dados (compatibilização de referencial e de época das coordenadas, assim como a propagação de incertezas nos processos de compatibilização) em diversas simulações. Com isto, foi possível observar que o processo de compatibilização tornou as precisões das coordenadas notadamente piores, porém, mais realistas. Fazendo com que os valores de precisões das coordenadas, que eram, em média, de 1,8 mm e 0,8 mm nas componentes este (e) e norte (n) no Sistema Geodésico Local (SGL), respectivamente, passassem para 18,5 mm e 20,2 mm nas componentes (e) e (n), respectivamente, após a propagação de incertezas na transformação de referencial e a atualização das coordenadas.

Palavras-chave: Propagação de incertezas. Transformação de referencial. Atualização de coordenadas. GNSS.

Abstract: This article intends to show the effect of the propagation of uncertainties in the process of compatibility of epoch and referential of the coordinates obtained in the GNSS (Global Navigation Satellite System). It seeks to present how the precision of the Transformation Parameters (PT) and the velocity of GNSS stations can affect the precision of the coordinates after the propagation of uncertainties in the compatibility of referential and epoch. This article also points out the influence on the positional quality of the coordinates. For this purpose, 75 stations from the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems) distributed in the Brazilian territory were used. Initially, the PT precisions were obtained between ITRF2014 and ITRF2000, where ITRF2014 is aligned to IGB14 and ITRF2000 to SIRGAS2000. At this stage, it was noticed that the precisions of the PTs are depreciated, mainly due to the number of references involved between the two realizations (ITRF2014, ITRF2008, ITRF2005, and ITRF2000 – four references). Then, the data processing steps were performed - the compatibility of referential and epoch of coordinates, as well as the propagation of uncertainties in the matching processes - in several simulations. Done that, it was possible to observe that the compatibility process made the precision of the coordinates notably worse, but more realistic, making the precision values of the coordinates, which were, on average, 1.8 mm and 0.8 mm in the east (e) and north (n) components in the Local Geodetic System (SGL) respectively to become 18.5 mm and 20.2 mm in the components (e) and (n) respectively after the propagation of uncertainties in the reference frame transformation and coordinates update.

Keywords: Uncertainty Propagation. Reference Transformation. Coordinate Update. GNSS.

3.1. Introdução

As posições dos marcos geodésicos fixados na superfície terrestre sofrem variações temporais devido a efeitos geofísicos (deformações tectônicas, efeitos da carga oceânica, dentre outros) (PETIT *et al.*, 2010). Por isso, é necessário considerar a época associada com a realização de tais sistemas de referências.

Um exemplo de referencial moderno é o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), que possui sua definição idêntica ao ITRS (*International Terrestrial Reference System*), sendo sua realização uma densificação regional do ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) na América Latina (SIRGAS, 2022a). Segundo o SIRGAS (2022b), são disponíveis três realizações do sistema (SIRGAS95-época 1995,4; SIRGAS2000, época 2000,4; e SIRGAS-CON). O SIRGAS-CON é a atual realização do sistema, em que as estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) distribuídas na América Latina são utilizadas para estimar as posições semanais (alinhadas ao ITRF), bem como as soluções multianuais (posição e a velocidade das estações SIRGAS). A última solução multianual é a SIR17P01 (alinhado ao ITRF2014 na época 2015,0). No Brasil, o SIRGAS2000, que tem sua realização na época 2000,4, se tornou o sistema geodésico de referência oficial a partir de 25/02/2005 (IBGE, 2005), e é alinhado ao ITRF2000 (SIRGAS, 2022a).

O ITRS foi realizado pela primeira vez em 1988 (ITRF88) e, a partir de então, foram efetuadas várias outras realizações. A solução mais atual do ITRF é o ITRF2014 e, após a adoção do SIRGAS2000 (época2000,4) como o referencial oficial do Brasil, foram materializadas mais quatro versões do ITRF (ITRF2005, ITRF2008, ITRF2014 e ITRF2020). A nova realização do ITRS (ITRF2020) foi disponibilizada online a partir de 15/04/2022 (IGS, 2022a). O IGS (*International GNSS Service*) passou a adotar, a partir de 17/05/2020, o IGB14 como referencial geodésico das coordenadas dos satélites GNSS (órbitas precisas) (IGS, 2020). Desta forma, após essa data, as coordenadas obtidas no PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) estarão referenciadas ao IGB14 (época da coleta dos dados). Assim, ao obter coordenadas no PPP (IGB14_{época dos dados}) e utilizá-las no Brasil, é necessário realizar a compatibilização de referencial e de época para o SIRGAS2000_{época 2000,4}.

Para que seja feita a compatibilização de referencial (transformação de referencial) devem ser utilizados os Parâmetros de Transformação (PT), os quais são disponibilizados pelo IBGE (2021b). Entretanto, não são disponibilizadas as variações temporais dos PT, tampouco as suas precisões. Assim, para que seja possível determinar a influência das precisões dos PT nas precisões das coordenadas após o processo de compatibilização de referencial, com o uso de técnicas de propagação de incertezas, é importante a obtenção das precisões dos PT do ITRF2014 para o SIRGAS2000(ITRF2000), sendo possível realizar a transformação de referencial de forma direta (usando apenas estes PT). O IGN (2021a)

disponibiliza as precisões de PT entre realizações consecutivas, ou seja, precisões dos PT do ITRF2014 para o ITRF2008, assim como do ITRF2008 para o ITRF2005, do ITRF2005 para o ITRF2000 e etc. Desse modo, é possível efetuar a transformação de referencial e a propagação de incertezas sequencialmente entre cada realização, ou seja, de forma indireta (usando vários PT), do ITRF2014 até o ITRF2000 (SIRGAS2000).

Enfatiza-se que, apesar da existência dos PT que compatibilizam o referencial das coordenadas GNSS (IGb14 – ITRF2014) para o referencial oficial brasileiro (SIRGAS2000 alinhado ao ITRF2000) de forma direta, não são disponibilizadas as suas precisões. Segundo Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015), na transformação de referencial entre materializações não consecutivas do ITRF (exemplo: ITRF2014 para ITRF2000) não são disponibilizadas as precisões dos PT, o que dificulta, deste modo, a propagação de incertezas na transformação entre estes sistemas de referência.

Já na compatibilização de época (atualização das coordenadas) são utilizadas as velocidades das estações GNSS. De acordo com o manual de usuário do PPP, a compatibilização de época das coordenadas é feita com uso das velocidades obtidas pelo VEMOS2009 (*Velocity Model for SIRGAS*) (IBGE, 2021b). Porém, não é possível obter as precisões das velocidades com VEMOS2009, já que o aplicativo VMS2009 não fornece as precisões das velocidades. Para que seja possível verificar a influência das precisões das velocidades na propagação de incertezas no processo de compatibilização de época das coordenadas, é necessário obter as precisões das velocidades das estações. Ou seja, a obtenção das precisões de todos os elementos envolvidos no processo de compatibilização de referencial (PT, variações temporais dos PT e coordenadas) e época (velocidade das estações GNSS) é primordial no processo de propagação de incertezas, pois, só assim, será possível determinar a influência das incertezas propagadas nas precisões das coordenadas compatibilizadas em referencial e época.

Tendo em vista a importância do tema supracitado, vários pesquisadores realizaram trabalhos a este respeito: Chiu e Shih (2014) avaliaram as incertezas das coordenadas da rede geodésica de Taiwan no processo de compatibilização de referencial e época. Na época da publicação do trabalho, o referencial geodésico de Taiwan estava referenciado ao ITRF94, o que levou, em parte, os autores a concluir que as incertezas propagadas pelos PT são mais significativas do que as das coordenadas e velocidades. Por sua vez, Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015) realizaram as transformações de referencial, de forma sequencial (ITRF2008

até ITRF2000), e compatibilização de época das coordenadas de estações GNSS no território brasileiro com estimativa de incertezas. Já Soler, Han e Weston (2016) realizaram a compatibilização de referencial e época entre o referencial geodésico NAD83 (North American Datum), época 2010 e o ITRF2008, época 2005, utilizando uma abordagem matemática rigorosa no processo de compatibilização e na propagação de incertezas. Por seu turno, Puente e Folgueira (2019) fizeram análises de propagação de incertezas na transformação de referencial para coordenadas em diferentes posições geodésicas, os autores concluíram que as incertezas dos PT só são perceptíveis nas coordenadas propagadas, se as coordenadas a serem transformadas têm incertezas menores que 10 mm. Por fim, Smith (2020) desenvolveu uma pesquisa com o interesse de verificar e avaliar a influências das precisões dos PT, das coordenadas e das velocidades de estações no processo de propagação de incertezas na compatibilização de referencial e época. Sobre este estudo, deve-se salientar que o autor considerou os valores dos parâmetros de translação e escala, e suas respectivas incertezas, que foram nulos no processo de compatibilização de referencial e na propagação de incertezas.

Diante deste contexto e tendo em vista a indisponibilidade das precisões dos PT do ITRF2014 para o ITRF2000, com os quais é possível realizar a compatibilização de referencial de forma direta, o objetivo deste trabalho foi determinar as precisões dos PT do ITRF2014 para o ITRF2000, como isto, verificar o efeito das precisões de todos os dados utilizados na compatibilização de referencial e época (coordenadas, PT e velocidades das estações GNSS) nas precisões das coordenadas compatibilizadas em referencial e época, após a propagação de incertezas, para utilização no Brasil (SIRGAS2000_{época2000,4}). Com o uso de velocidades de estações GNSS, e de suas respectivas precisões, obtidas a partir de séries temporais de coordenadas GNSS. Ou seja, foi possível determinar e analisar as precisões das coordenadas na época e referencial do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro).

3.2. Compatibilização de referenciais e época

Para realizar a compatibilização de referencial geodésico, pode-se usar a transformação de *Helmert* generalizada, que considera as velocidades das estações, os PT e as suas variações no tempo (*rates*). Há, também, a possibilidade de atualizar os PT para a época de interesse de modo que, em seguida, seja possível compatibilizar as coordenadas com a

transformação de Helmert de 7 parâmetros, enfatiza-se que os 7 parâmetros deverão estar na mesma época das coordenadas de origem (época da coleta dos dados). Esta é a metodologia recomendada pelo IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems*) (IGN, 2021a). Já para realizar a compatibilização de épocas, são utilizadas as velocidades das estações GNSS.

3.2.1. Compatibilização de referencial

A cada nova realização do ITRS são disponibilizados PT, os quais podem ser usados para comparar dados ou resultados expressos em duas realizações ITRS diferentes, ou seja, servem para compatibilizar referenciais. Constantemente, o IGS efetua novas realizações e a emprega na obtenção de seus produtos - em geral, a cada nova materialização do ITRF (IGS, 2021b). A Tabela 1 apresenta as últimas sete realizações de referenciais pelo IGS.

Tabela 1: Data de início e fim dos últimos sete (7) referenciais utilizados pelo IGS

	IGS00 (ITRF2000)	IGb00 (ITRF2000)	IGS05 (ITRF2005)	IGS08 (ITRF2008)	IGb08 (ITRF2008)	IGS14 (ITRF2014)	IGb14 (ITRF2014)
Início	02/12/2001 Semana GPS 1143	11/01/2004 Semana GPS 1253	05/11/2006 Semana GPS 1400	17/04/2011 Semana GPS 1632	07/10/2012 Semana GPS 1709	29/01/2017 Semana GPS 1934	17/05/2020 Semana GPS 2106
Fim	10/01/2004 Semana GPS 1252	04/11/2006 Semana GPS 1399	16/04/2011 Semana GPS 1631	06/10/2012 Semana GPS 1708	28/01/2017 Semana GPS 1933	16/05/2020 Semana GPS 2105	Atual

Fonte: IGS (2021b).

Salienta-se que as realizações dos IGS's são alinhadas às materializações dos ITRF's (IGS, 2022b). É importante destacar, também, que o IGN(2022c) não disponibiliza as precisões dos PT para referenciais não consecutivos. A Tabela 2 apresenta os PT, *rates* e suas respectivas precisões: do ITRF2020 para o ITRF2014/IGS14 – (PT_0), referencial não utilizado pelo IGS até o momento; do ITRF2014/IGb14 para o ITRF2008/IGS08 – (PT_1); do ITRF2008/IGS08 para ITRF2005/IGS05 – (PT_2); e do ITRF2005/IGS05 para ITRF2000/IGS00 – (PT_3).

Tabela 2 - Parâmetros de transformação de referencial disponibilizados pelo ITRF.

Parâmetros ⇒	T _x -(mm)	T _y -(mm)	T _z -(mm)	D-(ppb)	R _x -(mas)	R _y -(mas)	R _z -(mas)
Varição Temporal⇒	\dot{T}_x -(mm/a)	\dot{T}_y -(mm/a)	\dot{T}_z -(mm/a)	\dot{D} -(ppb/a)	\dot{R}_x -(mas/a)	\dot{R}_y -(mas/a)	\dot{R}_z -(mas/a)
ITRF2020⇒ITRF2014	-1,4 ± 0,2	-0,9 ± 0,2	1,4 ± 0,2	-042 ± 0,03	0,00 ± 0,007	0,00 ± 0,006	0,00 ± 0,007
PT_0 (época 2015,0)	0,0 ± 0,2	-0,1 ± 0,2	0,2 ± 0,2	0,00 ± 0,03	0,00 ± 0,007	0,00 ± 0,006	0,00 ± 0,007
ITRF2014⇒ITRF2008	1,6 ± 0,2	1,9 ± 0,1	2,4 ± 0,1	-0,02 ± 0,02	0,00 ± 0,006	0,00 ± 0,006	0,00 ± 0,006
PT_1 (época 2010,0)	0,0 ± 0,2	0,0 ± 0,1	-0,1 ± 0,1	0,03 ± 0,02	0,00 ± 0,006	0,00 ± 0,006	0,00 ± 0,006
ITRF2008⇒ITRF2005	-0,5 ± 0,2	-0,9 ± 0,2	-4,7 ± 0,2	0,94 ± 0,03	0,00 ± 0,008	0,00 ± 0,008	0,00 ± 0,008
PT_2 (época 2005,0)	0,3 ± 0,2	0,0 ± 0,2	0,0 ± 0,2	0,00 ± 0,03	0,00 ± 0,008	0,00 ± 0,008	0,00 ± 0,008
ITRF2005⇒ITRF2000	0,1 ± 0,3	-0,8 ± 0,3	-5,8 ± 0,3	0,40 ± 0,05	0,00 ± 0,012	0,00 ± 0,012	0,00 ± 0,012
PT_3 (época 2000,0)	-0,2 ± 0,3	0,1 ± 0,3	-1,8 ± 0,3	0,08 ± 0,05	0,00 ± 0,012	0,00 ± 0,012	0,00 ± 0,012

Fonte: IGN (2021a).

Na Tabela 2: - T_x, T_y e T_z representam as translações entre as origens dos referenciais; - \dot{T}_x , \dot{T}_y e \dot{T}_z são as variações temporais das translações; - D é o fator diferencial de escala entre os referenciais; - \dot{D} a variação temporal do fator diferencial de escala; - R_x, R_y e R_z são as rotações entre os referenciais; e - \dot{R}_x , \dot{R}_y e \dot{R}_z , as variações temporais das rotações entre os referenciais.

A atualização dos PT ($\overrightarrow{PT}_{t_0}$) da época de origem t₀ para uma época de destino t (\overrightarrow{PT}_t) utiliza a Eq. (1) (IGN, 2022b):

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{PT}_t = \overrightarrow{PT}_{t_0} + \overrightarrow{PT}(t - t_0) = & \begin{matrix} T_X(t) = T_X(t_0) + \dot{T}_X(t - t_0) \\ T_Y(t) = T_Y(t_0) + \dot{T}_Y(t - t_0) \\ T_Z(t) = T_Z(t_0) + \dot{T}_Z(t - t_0) \\ D(t) = D(t_0) + \dot{D}(t - t_0) \\ R_X(t) = R_X(t_0) + \dot{R}_X(t - t_0) \\ R_Y(t) = R_Y(t_0) + \dot{R}_Y(t - t_0) \\ R_Z(t) = R_Z(t_0) + \dot{R}_Z(t - t_0) \end{matrix} = \begin{bmatrix} T_X(t) \\ T_Y(t) \\ T_Z(t) \\ D(t) \\ R_X(t) \\ R_Y(t) \\ R_Z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_X(t_0) \\ T_Y(t_0) \\ T_Z(t_0) \\ D(t_0) \\ R_X(t_0) \\ R_Y(t_0) \\ R_Z(t_0) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix} (t - t_0) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Em que: - \overrightarrow{PT} variação temporal dos PT; - t é a época de destino (época da coleta dos dados); - t₀ é época de origem (época dos PT). Os demais parâmetros já foram descritos.

Segundo Altamimi (2018), a determinação dos PT de referencial, entre realizações não consecutivas, é dada pelo somatório dos PT, bem como os *rates* dos PT. Ou seja, a determinação dos PT do ITRF2014 para o ITRF2000 é realizada a partir da soma dos PT e de suas respectivas variações temporais: ITRF2014 para ITRF2008; ITRF2008 para ITRF2005; e ITRF2005 para ITRF2000. Desse modo, destaca-se que são consideradas as épocas destes PT no somatório, ou seja, as variações anuais dos PT devem ser utilizadas. Também é possível determinar os *rates* dos PT, que são obtidos a partir da soma deles (ALTAMIMI, 2018).

Uma vez realizada a atualização dos PT de referencial, efetua-se a mudança de referencial das coordenadas utilizando a transformação de *Helmert*, com a Eq. (2) (IGN, 2022b):

$$\begin{aligned} X_{Bt} &= X_{At} + Tx_t + D_t * X_{At} - Rz_t * Y_{At} + Ry_t * Z_{At} \\ Y_{Bt} &= Y_{At} + Ty_t + Rz_t * X_{At} + D_t * Y_{At} - Rx_t * Z_{At} \\ Z_{Bt} &= Z_{At} + Tz_t - Ry_t * X_{At} + Rx_t * Y_{At} + D_t * Z_{At} \end{aligned} \quad (2)$$

Em que: - X, Y e Z são coordenadas cartesianas geocêntricas; - “A” e “B” são os referenciais das coordenadas.

A Eq. (2) realiza a mudança do referencial das coordenadas de “A” para o referencial “B”, utilizando os PT atualizados pela Eq. (1). Quando os PT possuem suas respectivas precisões, é possível realizar a propagação de incertezas.

4.2.1.1 Propagação de incertezas na compatibilização de referencial

Para realizar a propagação de incertezas na compatibilização de referencial, é necessário, inicialmente, propagar as incertezas no processo de atualização dos PT de referencial das coordenadas que é dada pela Eq. (1). A propagação de incertezas é realizada a partir das Eqs. (3), (4) e (5).

$$MVC_{\vec{PT}(t)} = J_{PT} * MVC_{\vec{PT}(t_0), \vec{PT}(t_0)} * J_{PT}^T \quad (3)$$

Sendo:

$$J_{PT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (t-t_0) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$MVC_{\vec{PT}(t_0), \vec{PT}(t_0)} = \begin{bmatrix} MVC_{\vec{PT}(t_0)} & 0 \\ 0 & MVC_{\vec{PT}(t_0)} \end{bmatrix}_{14 \times 14} \quad (5)$$

Em que: - $MVC_{\vec{PT}(t)}$ matriz de variância e covariância dos PT, na época de destino (t); - J_{PT} matriz jacobiana – derivada parcial da Eq. (1) em relação aos PT ($\vec{PT}(t)$) e suas variações anuais ($\vec{PT}(t_0)$); - $MVC_{\vec{PT}(t_0), \vec{PT}(t_0)}$ matriz de variância e covariância dos PT ($\vec{PT}(t_0)$) e dos *rates* ($\vec{PT}(t_0)$) na época de origem (t₀); - $MVC_{\vec{PT}(t_0)}$ matriz de variância e covariância dos PT na época de origem (t₀); - $MVC_{\vec{PT}(t_0)}$ matriz de variância e covariância dos *rates* dos PT na época de origem (t₀).

É importante realçar que o IGN(2021a), normalmente, disponibiliza apenas os desvios padrão dos PT e dos *rates*, ou seja, não são disponibilizadas as covariâncias (ou correlação) entre os elementos supracitados. Neste caso, a $MVC_{\vec{PT}(t_0), \vec{PT}(t_0)}$ será uma matriz de variâncias. Em seguida, realiza-se a propagação de incertezas na mudança de referencial das coordenadas, que é dada pela Eq. (2). A propagação de incertezas é realizada a partir das Eqs. (6), (7) e (8). Isto só é possível após a determinação da $MVC_{PT(t)}$, obtida a partir da Eq. (3).

$$MVC_{\vec{X}_B(t)} = J_{MR} * MVC_{\vec{X}_A(t), \vec{PT}(t)} * J_{MR}^T \quad (6)$$

Sendo:

$$J_{MR} = \begin{bmatrix} D+1 & -Rz & Ry & 1 & 0 & 0 & X & 0 & Z & -Y \\ Rz & D+1 & -Rx & 0 & 1 & 0 & Y & -Z & 0 & X \\ -Ry & Rx & D+1 & 0 & 0 & 1 & Z & Y & -X & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 10} \quad (7)$$

$$MVC_{\vec{X}_A(t), \vec{PT}(t)} = \begin{bmatrix} MVC_{\vec{X}_A(t)} & 0 \\ 0 & MVC_{\vec{PT}(t)} \end{bmatrix}_{10 \times 10} \quad (8)$$

Em que: - $MVC_{\vec{X}_B(t)}$ matriz de covariância das coordenadas após a mudança de referencial, do referencial “A” para “B”; - J_{MR} matriz jacobiana – derivada parcial da Eq. (2) em relação aos seus parâmetros (coordenadas no referencial “A”; PT de referencial ($\vec{PT}(t)$), na mesma época das coordenadas (t)); - $MVC_{\vec{X}_A(t), \vec{PT}(t)}$ matriz de variância e covariância das coordenadas na época (t) e dos PT ($\vec{PT}(t)$), parâmetros na mesma época das coordenadas (t); - $MVC_{\vec{X}_A(t)}$ matriz de covariância das coordenadas no referencial “A”.

Após a compatibilização de referencial, realiza-se a compatibilização de época das coordenadas para época de interesse, no qual se utiliza modelos de velocidade.

3.2.2. Compatibilização de época das coordenadas e mudança de referencial das velocidades

De posse das velocidades da estação, é possível fazer a compatibilização de época das coordenadas para época de interesse, normalmente na época de realização do sistema de referência desejado. Isto é realizado a partir da Eq. (9) (MONICO, 2008):

$$\begin{aligned} X_{B(t)} &= X_{B(t_0)} + V_{X_B} * (t - t_0) \\ Y_{B(t)} &= Y_{B(t_0)} + V_{Y_B} * (t - t_0) \\ Z_{B(t)} &= Z_{B(t_0)} + V_{Z_B} * (t - t_0) \end{aligned} \quad (9)$$

Em que: - V_x , V_y , V_z são as velocidades das estações, componentes em coordenadas cartesianas geocêntricas; - (t) é a época de destino; - t_0 a época de origem (época da obtenção dos dados); - B é o referencial das coordenadas e das velocidades.

Caso as velocidades não estejam no mesmo referencial das coordenadas, é necessário realizar a mudança do referencial das velocidades com o uso da Eq. (10) (MONICO, 2008):

$$\begin{aligned} V_{X_B} &= V_{X_A} + \dot{T}_{X_t} + [X_A * \dot{D} + Y_A * (-\dot{R}_Z) + Z_A * \dot{R}_Y] \\ V_{Y_B} &= V_{Y_A} + \dot{T}_{Y_t} + [X_A * \dot{R}_Z + Y_A * \dot{D} + Z_A * (-\dot{R}_X)] \\ V_{Z_B} &= V_{Z_A} + \dot{T}_{Z_t} + [X_A * (-\dot{R}_Y) + Y_A * \dot{R}_X + Z_A * \dot{D}] \end{aligned} \quad (10)$$

As velocidades das estações podem ser obtidas por meio de séries temporais de coordenadas GNSS ou através de modelos de velocidades existentes.

3.2.2.1. Propagação de incertezas na compatibilização de época

Para realizar a propagação de incertezas na compatibilização de épocas (Eq. (9)) é necessário, inicialmente, propagar a incertezas na mudança de referencial das velocidades (Eq. (10)) com o uso das Eqs. (11), (12) e (13):

$$MVC_{\vec{v}_B(t)} = J_{MRV} * MVC_{\vec{x}_A(t), \vec{v}_A, \vec{PT}(t)} * J_{MRV}^T \quad (11)$$

Sendo:

$$J_{MRV} = \begin{bmatrix} \dot{D} & -\dot{R}_Z & \dot{R}_Z & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & X & 0 & Z & -Y \\ \dot{R}_Z & \dot{D} & -\dot{R}_X & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & Y & -Z & 0 & X \\ -\dot{R}_Y & \dot{R}_X & \dot{D} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & Z & Y & -X & 0 \end{bmatrix}_{3 \times 13} \quad (12)$$

$$MVC_{\vec{x}_A(t), \vec{v}_A, \vec{PT}(t)} = \begin{bmatrix} MVC_{\vec{x}_A(t)} & 0 & 0 \\ 0 & MVC_{\vec{v}_A} & 0 \\ 0 & 0 & MVC_{\vec{PT}(t)} \end{bmatrix}_{13 \times 13} \quad (13)$$

Em que: - $MVC_{\vec{v}_B(t)}$ matriz de covariância das velocidades após a mudança de referencial, do referencial “A” para “B”; - J_{MRV} matriz jacobiana – derivada parcial da Eq. (10) em relação aos seus parâmetros (coordenadas no referencial “A”; velocidades no referencial “A”; variações temporais dos PT (*rates*)); - $MVC_{\vec{x}_A(t), \vec{v}_A, \vec{PT}(t)}$ matriz de covariância das coordenadas na época (t), das velocidades e dos *rates* dos PT ($\vec{PT}(t)$), que deve estar na mesma época das coordenadas (t).

Por fim, após realizar a propagação de incertezas na mudança de referencial das coordenadas (Eq. (6)) e das velocidades (Eq. (11)), é possível realizar a propagação de incertezas na compatibilização de época das coordenadas (Eq. (9)), conforme mostra as Eqs. (14), (15) e (16).

$$MVC_{\vec{x}_B(t_0)} = J_{AC} * MVC_{\vec{x}_B(t), \vec{v}_B} * J_{AC}^T \quad (14)$$

Sendo:

$$J_{AC} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & (t - t_0) & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & (t - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & (t - t_0) \end{bmatrix}_{3 \times 6} \quad (15)$$

$$MVC_{\vec{x}_B(t), \vec{v}_B} = \begin{bmatrix} MVC_{\vec{x}_B(t)} & 0 \\ 0 & MVC_{\vec{v}_B} \end{bmatrix}_{6 \times 6} \quad (16)$$

Em que: - $MVC_{\vec{x}_B(t_i)}$ matriz de variância e covariância das coordenadas após a compatibilização de época, alterando da época (t_0) para (t); - J_{AC} matriz jacobiana – derivada parcial da Eq. (9) em relação aos seus parâmetros (coordenadas no referencial “B”; velocidades no referencial “B”, as coordenadas e velocidades devem estar no mesmo referencial); - $MVC_{\vec{x}_B(t), \vec{v}_B}$ matriz de variância e covariância das coordenadas no referencial “B” na época (t) e das velocidades no referencial “B”.

Destaca-se que as velocidades utilizadas nesta pesquisa não possuem suas covariâncias, e, deste modo, a matriz $MVC_{\vec{v}_B}$ será uma matriz de variâncias. Em diversas aplicações geodésicas é comum a utilização das coordenadas no SGL (Sistema Geodésico Local). Destaca-se que os resultados são mais facilmente interpretados quando são transformados para SGL, em termos de componente planimétrica e vertical.

3.3. Sistema Geodésico Local

Segundo Chaves e Monico (2017), para se ter uma melhor visualização das discrepâncias (planimétrica) calculadas a partir de coordenadas cartesianas geocêntricas, elas são convertidas para o SGL. A conversão dos vetores (discrepâncias) de coordenadas cartesianas geocêntricas em componentes do vetor posição no SGL é dada pelas Eqs. (17) e (18) (LEICK, 2004):

$$\vec{e}_{e,n,u} = R \cdot \vec{X}_{x,y,z} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta e \\ \Delta n \\ \Delta u \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda & \text{cos}\lambda & 0 \\ -\text{sen}\varphi \text{cos}\lambda & -\text{sen}\varphi \text{sen}\lambda & \text{cos}\varphi \\ \text{cos}\varphi \text{cos}\lambda & \text{cos}\varphi \text{cos}\lambda & \text{sen}\varphi \end{bmatrix}_{3 \times 3} * \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (18)$$

Em que: - Δe , Δn , Δu são componentes do vetor posição no SGL; - (R) é a matriz de rotação; - ΔX , ΔY , ΔZ são componentes do vetor posição (discrepâncias) no sistema de coordenadas cartesianas; - φ , λ correspondem à latitude e à longitude do ponto de origem, respectivamente.

Ao realizar a conversão das coordenadas, torna-se necessário estimar as precisões das coordenadas convertidas. O processo de determinação destas precisões é expresso pelas Eqs. (19), (20) e (21):

$$MVC_{e,n,u} = J * MVC_{x,y,z} * J^T \quad (19)$$

Sendo:

$$J = R = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda & \text{cos}\lambda & 0 \\ -\text{sen}\varphi \text{ cos}\lambda & -\text{sen}\varphi \text{ sen}\lambda & \text{cos}\varphi \\ \text{cos}\varphi \text{ cos}\lambda & \text{cos}\varphi \text{ sen}\lambda & \text{sen}\varphi \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (20)$$

$$MVC_{x,y,z} = \begin{bmatrix} \sigma_X^2 & \sigma_{XY} & \sigma_{XZ} \\ \sigma_{XY} & \sigma_Y^2 & \sigma_{YZ} \\ \sigma_{XZ} & \sigma_{YZ} & \sigma_Z^2 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (21)$$

Em que: - $MVC_{e,n,u}$ é a matriz de covariância das discrepâncias no SGL; - J matriz jacobiana, é a derivada parcial da Eq. (17) em relação às coordenadas cartesianas geocêntricas; e - $MVC_{x,y,z}$ a matriz de covariância das coordenadas cartesianas geocêntricas.

Segundo Perez (2002), é conveniente ilustrar o campo de velocidades de estações em termos de suas componentes geodésicas locais (V_e , V_n e V_u). Nesse sentido, salienta-se que a mudança do referencial das velocidades do sistema de coordenadas cartesianas para o SGL é análoga à transformação do referencial das coordenadas (Eq. (17)), representado pela Eq. (22):

$$\begin{bmatrix} V_e \\ V_n \\ V_u \end{bmatrix}_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\lambda & \text{cos}\lambda & 0 \\ -\text{sen}\varphi \text{ cos}\lambda & -\text{sen}\varphi \text{ sen}\lambda & \text{cos}\varphi \\ \text{cos}\varphi \text{ cos}\lambda & \text{cos}\varphi \text{ sen}\lambda & \text{sen}\varphi \end{bmatrix}_{3 \times 3} * \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_{3 \times 1} \quad (22)$$

Em que: - V_e , V_n e V_u são as velocidades no SGL; e - V_x , V_y e V_z são as velocidades no sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas.

Ressalta-se que as propagações de incertezas das velocidades são similares às propagações de incertezas das coordenadas (Eq. (19)). Conforme mostra as Eqs. (23) e (24).

$$MVC_{V_e, V_n, V_u} = J * MVC_{V_x, V_y, V_z} * J^T \quad (23)$$

Sendo:

$$MVC_{V_x, V_y, V_z} = \begin{bmatrix} \sigma_{V_x}^2 & \sigma_{V_x V_y} & \sigma_{V_x V_z} \\ \sigma_{V_x V_y} & \sigma_{V_y}^2 & \sigma_{V_y V_z} \\ \sigma_{V_x V_z} & \sigma_{V_y V_z} & \sigma_{V_z}^2 \end{bmatrix}_{3 \times 3} \quad (24)$$

Em que: - MVC_{V_e, V_n, V_u} é a matriz de covariância das velocidades do no SGL; - J matriz jacobiana, igual a R; - MVC_{V_x, V_y, V_z} matriz variância e covariâncias das velocidades em coordenadas cartesianas geocêntricas.

3.4. Materiais e Métodos

3.4.1. Materiais

Para a realização desta pesquisa foram utilizados três conjuntos de PT (PT_1, PT_2 e PT_3), conforme apresentados na Tabela 2 (seção 3.2.1), os quais são disponibilizados em IGN (2022a) e cujas velocidades de 75 estações GNSS foram obtidas a partir de análises de séries temporais de coordenadas GNSS (referenciadas ao ITRF2014) nas quais foi utilizado o *software* SARI (*Señales y Análisis de Ruido Interactivo* - (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019)). Na obtenção destas velocidades, foram utilizados dados diários de observáveis GNSS (coletados nas estações da RBMC), no formato RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*), no período de 01/01/2012 a 29/12/2018. As velocidades e precisões foram obtidas de Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021) (Capítulo 1). Por fim, foram usados dados RINEX de 75 estações do dia 01/07/2020, época 2020,5, os quais foram processados no serviço *on-line* IBGE-PPP. Para análise dos resultados obtidos foi usado o software Matlab (versão 2012b).

3.4.2. Métodos

Conforme já mencionado, o IGN (2022a) disponibiliza apenas as precisões dos PT entre realizações consecutivas. Assim, a propagação de incertezas na transformação de referencial entre as realizações ITRF2014, ITRF2008, ITRF2005 e ITRF2000 é realizada sequencialmente quando não são disponibilizadas as precisões dos PT entre o ITRF2014 e o ITRF2000. Ou seja, após cada transformação de referencial das coordenadas, entre referenciais consecutivos, é realizada a propagação de incertezas. Isto também é necessário na realização da propagação de incertezas na transformação do referencial das velocidades das estações. Para facilitar a obtenção das incertezas das coordenadas e das velocidades após a

realização da compatibilização de referencial, foram determinadas as precisões dos PT e dos *rates* entre o ITRF2014 e o referencial ITRF2000 (SIRGAS2000) para as épocas 2010 e 2020,5 (época da coleta de dados). Para isto, foram obtidas as equações necessárias para determinação dos PT e dos *rates* entre os referenciais supracitados. Já para a obtenção dos PT é realizada a soma dos resultados obtidos pela Eq. (1), entre os referenciais desejados, conforme apresentado pela Eq. (26) (ALTAMIMI, 2018).

$$\begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ D \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{bmatrix}_{(t)}^{(ITRF2014 \rightarrow ITRF2000)} = \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ D \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{bmatrix}_{2010}^{(ITRF2014 \rightarrow ITRF2008)} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix} * (t - 2010) + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ D \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{bmatrix}_{2005}^{(ITRF2008 \rightarrow ITRF2005)} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix} * (t - 2005) + \begin{bmatrix} T_X \\ T_Y \\ T_Z \\ D \\ R_X \\ R_Y \\ R_Z \end{bmatrix}_{2000}^{(ITRF2005 \rightarrow ITRF2000)} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix} * (t - 2000) \quad (26)$$

Na Eq. (26), o termo (t) corresponde à época de coleta dos dados (época 2020,5). Em seguida, foram determinados os *rates* dos PT, que são dados pela Eq. (27) (ALTAMIMI, 2018):

$$\begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix}_{(t)}^{(ITRF2014 \rightarrow ITRF2000)} = \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix}_{(2010)}^{(ITRF2014 \rightarrow ITRF2008)} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix}_{(2005)}^{(ITRF2008 \rightarrow ITRF2005)} + \begin{bmatrix} \dot{T}_X \\ \dot{T}_Y \\ \dot{T}_Z \\ \dot{D} \\ \dot{R}_X \\ \dot{R}_Y \\ \dot{R}_Z \end{bmatrix}_{(2000)}^{(ITRF2005 \rightarrow ITRF2000)} \quad (27)$$

Logo, a partir das Eq. (26), onde foram determinados os PT para transformação de referencial do ITRF2014 para o ITRF2000, foi possível realizar a propagação de incertezas, por meio da qual foram determinadas as precisões dos PT a partir de propagação de incertezas, similar à Eq. (3), conforme apresentado pelas Eqs. (28), (29) e (30).

$$MVC_{PT_ITRF2014_2000}(t) = J_{PT_1-PT_2-PT_3} * MVC_{PT_1-PT_2-PT_3, PT_1-PT_2-PT_3} * J_{PT_1-PT_2-PT_3}^T \quad (28)$$

Sendo:

$$J_{PT_1-PT_2-PT_3} = [J_{PT_1} \quad J_{PT_2} \quad J_{PT_3}]_{7 \times 42} \quad (29)$$

$$MVC_{PT_1-PT_2-PT_3, PT_1-PT_2-PT_3} = \begin{bmatrix} MVC_{PT_1, PT_1} & 0 & 0 \\ 0 & MVC_{PT_2, PT_2} & 0 \\ 0 & 0 & MVC_{PT_3, PT_3} \end{bmatrix}_{42 \times 42} \quad (30)$$

O mesmo foi realizado para os *rates* dos PT, em que foi realizada a propagação de incertezas da Eq. (27) e foram determinadas as precisões dos *rates*, conforme apresentado pelas Eqs. (31), (32) e (33).

$$MVC_{PT_ITRF2014_2000(t)} = J_{PT_1-PT_2-PT_3} * MVC_{PT_1-PT_2-PT_3} * J_{PT_1-PT_2-PT_3}^T \quad (31)$$

Sendo:

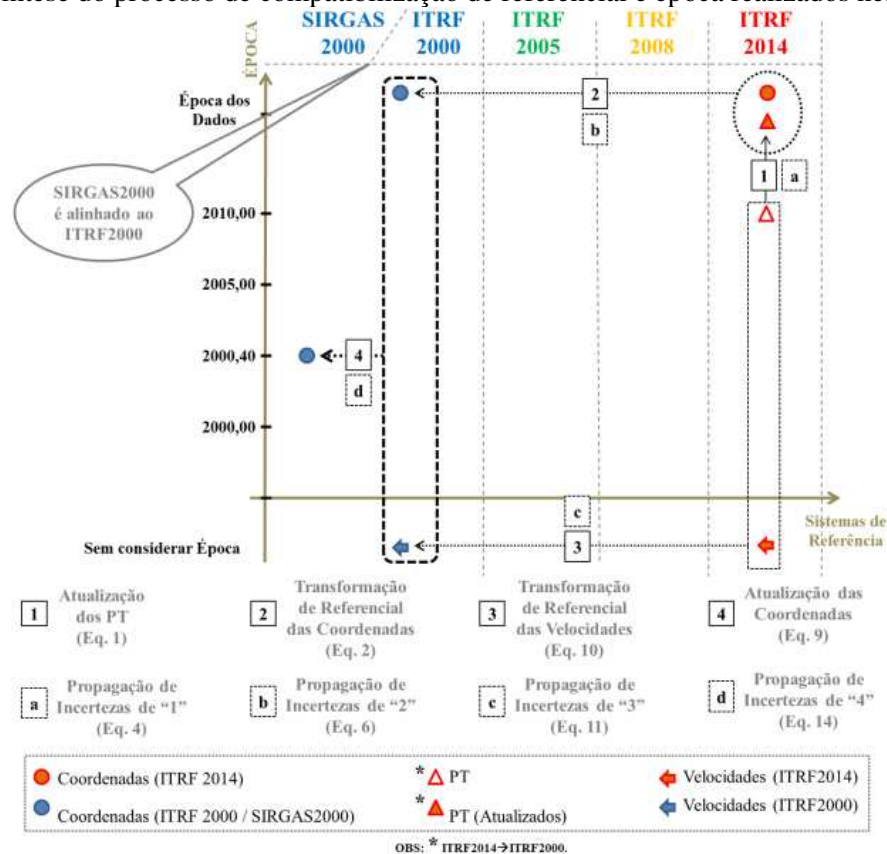
$$J_{PT_1-PT_2-PT_3} = \begin{bmatrix} I_{7 \times 7} & I_{7 \times 7} & I_{7 \times 7} \end{bmatrix}_{7 \times 21} \quad (32)$$

$$MVC_{PT_1-PT_2-PT_3} = \begin{bmatrix} MVC_{PT_1} & 0 & 0 \\ 0 & MVC_{PT_2} & 0 \\ 0 & 0 & MVC_{PT_3} \end{bmatrix}_{21 \times 21} \quad (33)$$

Em que: - $J_{PT_1-PT_2-PT_3}$ - a matriz jacobiana, é a derivada parcial da Eq. (27) em relação aos elementos dos *rates*; - $MVC_{PT_1-PT_2-PT_3}$ é a matriz de covariâncias dos *rates* (dos três conjuntos de PT utilizados neste trabalho).

Ao fim desses passos obtiveram-se os PT e os *rates* do ITRF2014 para ITRF2000 na época 2010 e 2020,5, e também suas respectivas precisões, por meio das quais foi possível obter também as precisões das coordenadas e das velocidades no ITRF2000 de forma direta, após a propagação de incertezas no processo de transformação de referencial. Esse processo é ilustrado pela Figura 1.

Figura. 1 Síntese do processo de compatibilização de referencial e época realizados neste trabalho.



Fonte: Os autores (2022).

Inicialmente, a partir dos PT na época das coordenadas ($ITRF2014 \rightarrow ITRF2000_{\text{época}}$ 2010) e de suas incertezas propagadas, obtidas a partir das Eqs. (26), (27), (28) e (31), foi possível realizar a compatibilização dos referenciais das coordenadas e das velocidades e a propagação de incertezas de forma direta, conforme ilustrado pela Figura 1. Após a obtenção das coordenadas, dos PT e das velocidades da estação, iniciou-se o processo de compatibilização de referencial e época. Primeiramente, foi necessário realizar a atualização dos PT ($ITRF2014$ p/ $ITRF2000_{\text{época}2010}$ para $ITRF2014$ p/ $ITRF2000_{\text{época_dos_dados}}$) e, em seguida, realizou-se a transformação de referencial das coordenadas ($\vec{X}_{ITRF2014\text{época_dos_dados}}$ para $\vec{X}_{ITRF2000\text{época_dos_dados}}$) utilizando-se a Eq. (2), ao passo em que, para alcançar a propagação de incertezas das coordenadas, a Eq. (6).

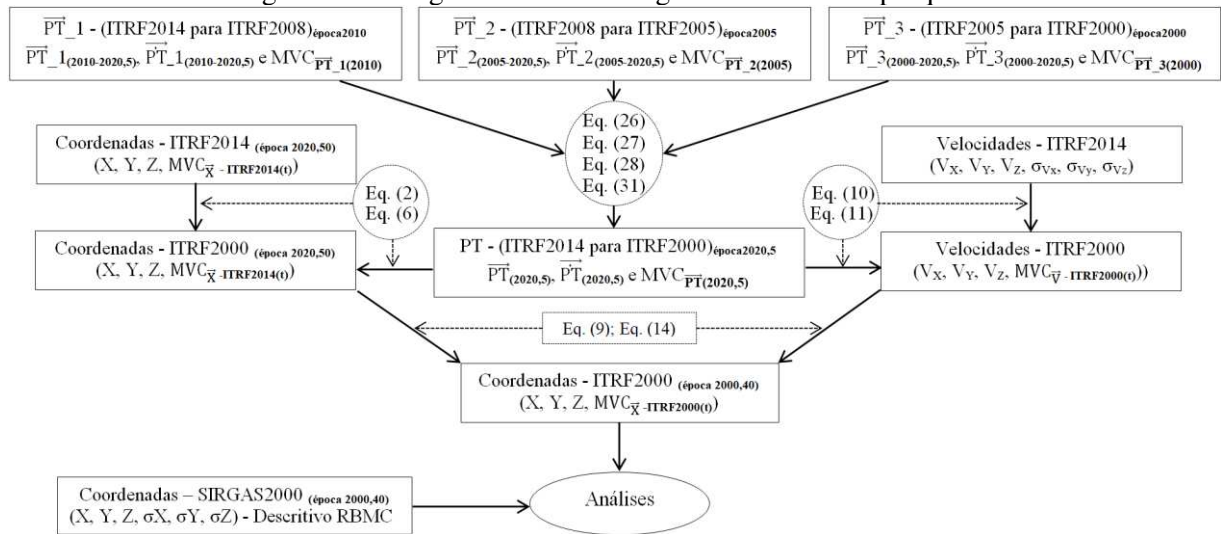
Após esse procedimento, foi realizada a transformação de referencial das velocidades da estação para o mesmo referencial da coordenada a ser compatibilizada em época ($\vec{V}_{ITRF2014}$ p/ $\vec{V}_{ITRF2000}$ - não é considerada a mudança de época nesta etapa) com a utilização da Eq. (10) e a propagação de incertezas das velocidades com base na Eq. (11). Conforme supracitado, a obtenção das velocidades das estações do GNSS utilizadas nesta pesquisa deu-se com o

auxílio do *software* SARI, o qual pode ser utilizado em um computador local ou remotamente, a partir de um servidor público da Web. O SARI possui um conjunto de ferramentas de análise interativas de séries temporais de coordenadas obtidas com GNSS e foi criado com foco na visualização em série e processamento de sinais usando MMQ (método dos mínimos quadrados), filtro de Kalman, e análise de ruído estocástico do MLE (*Maximum-Likelihood Estimation*) (SANTAMARÍA- GÓMEZ, 2019). Segundo Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021), o SARI apresenta-se como um *software* com grande potencial na efetivação de análises de séries temporais de coordenadas obtidas com uso do GNSS por apresentar fidelidade em suas aplicações. Deste modo, é possível afirmar que as velocidades e suas precisões foram obtidas com alto rigor, uma vez que foram considerados a tendência, a sazonalidade e os ruídos na determinação. Mais detalhes sobre este procedimento podem ser obtidos em Ramos, Dal Poz e Carvalho (2021) (Capítulo 1).

Ao fim da compatibilização dos referenciais das coordenadas e das velocidades, ou seja, da determinação das coordenadas em $\text{ITRF2000}_{\text{época2020,5}}$ e das velocidades em ITRF2000 , foi possível realizar a compatibilização de época. Salienta-se que as coordenadas e as velocidades estão acompanhadas de suas respectivas precisões. Nesse sentido, uma vez que as coordenadas estão no mesmo referencial das velocidades da estação, procedeu-se à compatibilização de época das coordenadas ($\vec{X}_{\text{ITRF2000}_{\text{época_dos_dados}}}$ para $\vec{X}_{\text{ITRF2000}_{\text{época2000,4}}}$) e a propagação de incertezas por meio das Eqs. (9) e (14), respectivamente. Ao fim deste passo, foi possível obter as coordenadas na mesma época e referencial das coordenadas da RBMC ($\text{SIRGAS2000}_{\text{época2000,4}}$ alinhado ao ITRF2000) e suas respectivas precisões.

As etapas supracitadas foram concretizadas após o pós-processamentos dos dados GNSS de 75 estações pertencentes à RBMC, a partir das quais foram obtidas as coordenadas cartesianas geocêntricas e respectivas precisões, referenciadas ao $\text{ITRF2014}_{\text{época2020,5}}$. Assim, os principais passos metodológicos utilizados nesta pesquisa são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma da metodologia realizada nesta pesquisa.



Fonte: Os autores (2022).

Com objetivo de verificar a influência das precisões dos elementos utilizados nas transformações de referenciais (PT e *rates*) e compatibilização de época das coordenadas (velocidades), a compatibilização de referencial e época foram realizadas de quatro maneiras distintas:

- Simulação A: considerando nulas as precisões dos PT, dos *rates* e das velocidades das estações GNSS;
- Simulação B: assumindo as precisões dos PT e dos *rates* iguais aos valores estimados na propagação de incerteza e nulas as precisões das velocidades;
- Simulação C: supondo nulas as precisões dos PT e dos *rates* e que as precisões das velocidades são iguais aos valores estimados pela propagação de incertezas;
- Simulação D: utilizando os valores de precisões dos PT e *rates* iguais aos valores estimados na propagação de incertezas e considerando as precisões das velocidades iguais aos valores estimados pela propagação de incertezas. A Tabela 3 apresenta uma síntese das simulações realizadas neste trabalho.

Tabela 3 - Síntese das simulações realizadas.

SIMULAÇÃO	Precisões dos PT e <i>rates</i> ($\sigma_{PT,rates}$) (ITRF2014→ITRF2000 _{época2020,5}) consideradas:	Precisões das velocidades (σ_{vel}) das estações da RBMC consideradas:
"A"	Nulas	Nulas
"B"	Valores estimados pela propagação de incertezas (Eqs. (28) e (31))	Nulas
"C"	Nulas	Valores estimados pela propagação de incertezas (Eq. (11))
"D"	Valores estimados pela propagação de incertezas (Eqs. (28) e (31))	Valores estimados pela propagação de incertezas (Eq. (11))

Fonte: Os autores (2022).

Salienta-se que, ao realizar as simulações supracitadas, é possível verificar o efeito de cada compatibilização de forma isolada. Ou seja, ao realizar a simulação “A”, não são consideradas nenhuma das precisões dos parâmetros envolvidos no processo de compatibilização (coordenadas com precisões idênticas às coordenadas na época de coleta dos dados e no referencial dos produtos do IGS). Ao realizar a simulação “B” é verificado o efeito das precisões e da época dos PT na compatibilização de referencial. Já ao realizar a simulação “C”, é verificado o efeito das precisões das velocidades das estações GNSS na compatibilização de época das coordenadas. E, por fim, ao realizar a simulação “D”, é verificado o efeito das precisões de todos os parâmetros utilizados na compatibilização de referencial e época. Nesse contexto, é importante destacar que as precisões médias das velocidades obtidas no SARI (referenciadas ao ITRF2014) são de 0,35 mm/ano, 0,54 mm/ano e 0,88 mm/ano nas componentes “e”, “n” e “u” do SGL, respectivamente. Estas precisões no sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas possuem valores de 0,62 mm/ano, 0,68 mm/ano e 0,59 mm/ano nas componentes “X”, “Y” e “Z”, respectivamente.

3.5. Resultados e Discussão

Inicialmente, serão apresentados, a partir da Tabela 4, os PT e os *rates* (e suas respectivas precisões) que realizam a compatibilização do ITRF2014 com o referencial oficial brasileiro (ITRF2000/SIRGAS2000) nas épocas 2010 e 2020,5, obtidas a partir das Eqs. (26), (27), (28) e (31).

Tabela. 4 - Parâmetros de transformação de referencial entre ITRF2014 e ITRF2000, nas épocas 2010 e 2020,5.

Parâmetros \Rightarrow	T_x -(mm)	T_y -(mm)	T_z -(mm)	D-(ppb)	R_x -(mas)	R_y -(mas)	R_z -(mas)
Varição Temporal \Rightarrow	\dot{T}_x -(mm/a)	\dot{T}_y -(mm/a)	\dot{T}_z -(mm/a)	\dot{D} -(ppb/a)	\dot{R}_x -(mas/a)	\dot{R}_y -(mas/a)	\dot{R}_z -(mas/a)
ITRF14 \Rightarrow ITRF00 (época 2010,0)	$0,7 \pm 3,2$	$1,2 \pm 3,2$	$-26,1 \pm 3,2$	$2,12 \pm 0,53$	$0,00 \pm 0,13$	$0,00 \pm 0,13$	$0,00 \pm 0,13$
	$0,1 \pm 0,4$	$0,1 \pm 0,4$	$-1,9 \pm 0,4$	$0,11 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,02$
ITRF14 \Rightarrow ITRF00 (época 2020,5)	$1,8 \pm 7,2$	$2,3 \pm 7,0$	$-46,1 \pm 7,0$	$3,28 \pm 1,15$	$0,00 \pm 0,28$	$0,00 \pm 0,28$	$0,00 \pm 0,28$
	$0,1 \pm 0,4$	$0,1 \pm 0,4$	$-1,9 \pm 0,4$	$0,11 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,02$

Nota: "ppb" – partes por bilhão ($1/1.000.000.000=1 \times 10^{-9}$); "mas" – miliarco de segundos ($1/1000 * 1/3600 * \pi/180^\circ$ rad).

Fonte: Os autores (2022) e IGN (2022c).

Conforme podem ser observadas, a partir da Tabela 3, as precisões dos PT (ITRF14 \Rightarrow ITRF00) sofrem uma piora na ordem de, aproximadamente, duas vezes quando são compatibilizadas em época (de 2010,0 para época 2020,5). O mesmo não ocorre com os *rates* dos PT (ITRF14 \Rightarrow ITRF00), uma vez que as medidas permanecem constantes após a compatibilização da época. Isso mostra o quanto o tempo (10,5 anos) afeta a precisão dos PT no processo de atualização dos PT para a época de interesse, bem como a necessidade de atualização contínua dos referenciais do ITRF.

Também foram determinadas as precisões dos PT e *rates*, assim como suas respectivas precisões do ITRF2014 para o ITRF2005 e ITRF2008, na época 2020,5. A Tabela 4 apresenta os PT para as respectivas realizações na época 2020,5.

Tabela 5 - Parâmetros de transformação de referencial do ITRF2014 para ITRF2008 e ITRF2005, na época 2020,5.

Parâmetros \Rightarrow	T_x -(mm)	T_y -(mm)	T_z -(mm)	D-(ppb)	R_x -(mas)	R_y -(mas)	R_z -(mas)
Varição Temporal \Rightarrow	\dot{T}_x -(mm/a)	\dot{T}_y -(mm/a)	\dot{T}_z -(mm/a)	\dot{D} -(ppb/a)	\dot{R}_x -(mas/a)	\dot{R}_y -(mas/a)	\dot{R}_z -(mas/a)
ITRF14 \Rightarrow ITRF08 (época 2020,5)	$1,6 \pm 2,1$	$1,9 \pm 1,1$	$1,4 \pm 1,1$	$0,30 \pm 0,21$	$0,00 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,06$	$0,00 \pm 0,06$
	$0,0 \pm 0,2$	$0,0 \pm 0,1$	$-0,1 \pm 0,1$	$0,03 \pm 0,02$	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$
ITRF14 \Rightarrow ITRF05 (época 2020,5)	$5,8 \pm 3,8$	$1,0 \pm 3,3$	$-3,4 \pm 3,3$	$1,24 \pm 0,51$	$0,00 \pm 0,14$	$0,00 \pm 0,14$	$0,00 \pm 0,14$
	$0,3 \pm 0,3$	$0,0 \pm 0,2$	$-0,1 \pm 0,2$	$0,03 \pm 0,04$	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$	$0,00 \pm 0,01$

Nota: "ppb" – partes por bilhão ($1/1.000.000.000=1 \times 10^{-9}$); "mas" – miliarco de segundos ($1/1000 * 1/3600 * \pi/180^\circ$ rad).

Fonte: Os autores (2022) e IGN (2022c).

Pode ser observado, a partir das Tabelas (4) e (5), que a quantidade de referenciais envolvidos na obtenção dos PT afeta, de forma notável, as precisões dos PT no seu processo de atualização para a época de interesse. Ao ter como base a translação na componente X (T_x) nos PT do ITRF2014 \Rightarrow ITRF2008_{2020,5} (referenciais consecutivos – dois referenciais

envolvidos), o valor da precisão da translação, que era $\pm 2,1$ mm, passou para $\pm 3,8$ mm nos PT do ITRF2014 \rightarrow ITRF2005_{2020,5} (três referenciais envolvidos). Quando são envolvidos quatro referenciais (PT do ITRF2014 \rightarrow ITRF2000_{2020,5}), o valor de precisão de “Tx” passa a ser de $\pm 7,2$ mm, é importante destacar que a análise supracitada é similar para os sete (7) PT. Com a materialização do ITRF2020, o IGS, possivelmente, passará a adotar o ITRF2020/IGS20 como referencial das coordenadas dos satélites (efemérides precisas). Com isto, as precisões dos PT ficarão, provavelmente, ainda mais comprometidas, o que mostra que a quantidade de referenciais envolvidos entre o referencial do SGB e o referencial dos produtos do IGS (efemérides precisas) poderá afetar ainda mais as precisões das coordenadas propagadas.

A partir dos PT, *rates* e de suas respectivas precisões, obtidas a partir da Tabela 4 (PT_{-ITRF2014 \rightarrow ITRF2000} - época 2020,5), e também das velocidades de 75 estações GNSS e de suas respectivas precisões, foram realizadas a compatibilização de referencial e época das coordenadas das 75 estações da RBMC analisadas nesta pesquisa, além da propagação de incertezas. As precisões das coordenadas, após as compatibilizações em referencial e época e que estavam referenciadas ao sistema de coordenadas cartesianas geocêntricas (σ_x , σ_y e σ_z), foram transformadas para o SGL (σ_e e σ_n). Tendo em vista que vários modelos de velocidades consideram apenas a movimentação planimétrica das placas tectônicas, foram analisadas somente as precisões planimétricas. Conforme supracitado, a compatibilização de referencial e época das coordenadas foram realizadas de quatro (4) maneiras distintas, sendo que a Tabela 6 apresenta a estatística das precisões das coordenadas após a realização da compatibilização de referenciais e época das coordenadas.

Tabela 6 - Estatística das precisões das coordenadas após a compatibilização de referencial e época para as quatro (4) maneiras pesquisadas, expressas em (mm) - precisões apresentadas no SGL (σ_e e σ_n).

SIMULAÇÕES	ESTATÍSTICAS							
	Média		Máximo		Mínimo		Desvio Padrão	
	σ_e	σ_n	σ_e	σ_n	σ_e	σ_n	σ_e	σ_n
Simulação “A” - $\sigma_{PT,rates}$ = Nulas e - σ_{vel} = Nulas	1,8	0,8	3,3	1,3	1,5	0,7	0,4	0,1
Simulação “B” - $\sigma_{PT,rates}$ = Estimado e - σ_{vel} = Nulas	11,4	11,2	11,8	11,3	11,4	11,2	0,1	0,0
Simulação “C” - $\sigma_{PT,rates}$ = Nulas e - σ_{vel} = Estimado	7,4	11,0	13,4	27,1	4,2	4,8	2,2	4,0
Simulação “D” - $\sigma_{PT,rates}$ = Estimado e - σ_{vel} = Estimado	18,5	20,2	21,6	31,8	17,3	17,3	1,0	2,5

Fonte: Os autores (2022).

Os resultados obtidos a partir da Tabela 6 mostram que as precisões planimétricas médias das coordenadas apresentam depreciações significativas quando são consideradas as precisões dos PT e das velocidades das estações GNSS no processo de compatibilização de referencial e época (Simulação “D”). As precisões médias das coordenadas estimadas pelo GNSS na época dos dados (idênticas aos resultados obtidos pela Simulação “A”), que eram 1,8 mm e 0,8 mm nas componentes este (e) e norte (n), respectivamente, passaram para 18,5 mm e 20,2 mm (Simulação “D”), uma vez que foi verificado que as médias das precisões no SGL tiveram uma piora na precisão de 16,7 mm e 19,7 mm nas componentes (e) e (n), respectivamente. Ao mesmo tempo, é possível notar que, ao considerar somente as precisões dos PT e *rates* (Simulação “B”) no processo de compatibilização, as influências nas precisões das coordenadas compatibilizadas são similares quando se considera somente as precisões das velocidades das estações GNSS (Simulação “C”), já que as precisões médias das coordenadas têm uma piora média de 9,6 mm e 10,4 mm nas componentes (e) e (n), respectivamente, e após a execução da Simulação “B” e 5,6 mm e 10,2 mm nas componentes (e) e (n), respectivamente, quando é executada a Simulação “C”, se comparada com as precisões médias das coordenadas estimadas pelo GNSS na época dos dados.

De modo geral, ao desconsiderar todas as precisões dos elementos utilizados na propagação de incertezas, ao realizar a compatibilização de referencial e época, os resultados se tornam mais otimistas, ou seja, sua qualidade é superestimada. Em contrapartida, ao considerar as precisões de todos os elementos na propagação de incertezas, os resultados são menos precisos, porém, mais realistas.

3.6. Considerações Finais e Conclusões

Pode-se perceber, inicialmente, que a atualização da época dos PT afeta efetivamente nas suas precisões, uma vez que, ao atualizar os PT da época 2010 para 2020,5 e realizar a propagação de incertezas, é verificado que as precisões dos PT pioraram, aproximadamente, duas vezes. Também se pode observar como as precisões dos PT e das velocidades das estações GNSS influenciam significativamente na precisão das coordenadas após o processo de compatibilização de referencial e de época, já que as precisões médias das coordenadas apresentam uma depreciação na ordem de 16,7 mm e 19,7 mm nas componentes (e) e (n), respectivamente, em comparação com as precisões médias das coordenadas estimadas pelo GNSS na época dos dados. Isto poderá piorar ainda mais a partir do momento em que o IGS

passar a adotar a nova atualização do ITRS, que corresponde ao ITRF2020/IGS20, como referencial geodésico das coordenadas dos satélites GNSS (efemérides precisas).

Desta forma, pode-se inferir que as precisões das coordenadas, após o pós-processamento no IBGE-PPP (IGb14_{época2020,5}), têm seus valores deteriorados de forma significativa após a compatibilização de referencial e época (ITRF2000_{2000,4} alinhada ao SIRGAS2000). Destaca-se que isso acontece devido ao fato de se levar em consideração as incertezas de todos os parâmetros, as quais são envolvidas no processo de compatibilização de referencial e época. Esses fatores tornam os resultados encontrados mais realistas, uma vez que os elementos utilizados na compatibilização de referencial e época (PT, *rates* e velocidades) possuem incertezas associadas e devem ser considerados na propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial e época das coordenadas. Salienta-se que o IGN não disponibiliza as covariâncias dos PT e dos *rates*, logo, não foram consideradas as covariâncias das precisões dos PT e dos *rates* na propagação de incertezas, o que, possivelmente, tornaria as precisões das coordenadas com depreciações ainda maiores, após a propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial e época.

Dessa forma, esta pesquisa também mostra que a compatibilização de época afeta em proporções similares a precisão das coordenadas após a propagação de incertezas quando comparada com a propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial. Enquanto o primeiro é afetado devido, principalmente, à época de realização do SGB (2000,4) que foi materializado há mais de 20 anos, o segundo é depreciado devido, principalmente, à quantidade de referenciais envolvidos na transformação de referencial (ITRF2014, ITRF2008, ITRF2005 e ITRF2000) e à época dos PT (PT_1 – 2010, PT_2 – 2005 e PT_3 – 2000). Para minimizar os efeitos apresentados, é recomendada a adoção de um referencial mais atual para o SGB.

Por fim, é importante destacar a relevância ao realizar a propagação de incertezas no processo de compatibilização de referencial e época na estimativa da precisão das coordenadas compatibilizadas em referencial e época, de modo a não se ter a qualidade superestimada. É também notável que a realização da propagação de incertezas na realização da compatibilização de referencial e época não é utilizada na prática. Nos principais serviços de processamento do PPP isto não é realizado, por exemplo, o serviço on-line IBGE-PPP que não realiza a propagação de incertezas.

Referências

ALTAMIMI, Z. **Relationship and Transformation between the International and the European Terrestrial Reference Systems**. EUREF Technical Note 1. France: Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN), 2018.

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**, v. 21, n. 3, p. 590-609, 2015. DOI. 10.1590/S1982-21702015000300033

CHAVES, W. O.; MONICO, J. F. G. ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA ENTRE O ITRF2014 E O SIR15P01. *In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositiva 6 a 9 de novembro de 2017*. Anais [...], Rio de Janeiro - RJ, 2017, p. 149-153.

CHIU, Y. H.; SHIH, P. T.Y. National datum uncertainty due to reference frame transformation: case study for the geodetic datum of Taiwan. **Journal of Surveying Engineering**, v. 140, n. 3, p. 05014002, 2014. DOI. 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000135

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Altera a caracterização do Sistema Geodésico Brasileiro**. 2005. Disponível em: <http://geoftp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_25fev2005.pdf>. Acesso em: 03 mai. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Manual do Usuário - versão Maio de 2020 (IBGE-PPP)**. 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2022.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **ITRF solutions**. 2022. Disponível em: <<https://itrf.ign.fr/en/solutions>>. Acesso em: 03 mai. 2022a.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **Transformation parameters from ITRF2020 to past ITRFs**. 2022. Disponível em <https://itrf.ign.fr/docs/solutions/itrf2020/Transfo-ITRF2020_TRFs.txt>. Acesso em: 03 mai. 2022b.

INSTITUT GÉOGRAPHIQUE NATIONAL (IGN). **Transformation Parameters between**

ITRF Solutions. 2022. Disponível em: <<https://itrf.ign.fr/en/solutions/transformations>>. Acesso em: 03 mai. 2022c.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **ITRF2020 is available on line**. 2022. Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2022/008187.html>>. Acesso em: 18 abr. 2022a.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **Chronology of IGS Reference Frame Usage**. 2022. Disponível em: <<http://acc.igs.org/igs-frames.html>>. Acesso em: 03 mai. 2022b.

INTERNATIONAL GNSS SERVICE (IGS). **Switch to IGB14 reference frame**. 2020. Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>>. Acesso em: 03 mai. 2022.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. 3rd ed. Hoboken: John Wiley and Sons, 2004. DOI. 10.1002/9781119018612

MONICO, J. F. M. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008.

PEREZ, J. A. S. **Campo de velocidade para as estações da RBMC e do IGS localizados na placa Sul-Americana: estimativa a partir do processamento de dados GPS**. 166f. 2002. Dissertação - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2002.

PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**. IERS Technical Note; No. 36. Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.

PUENTE, V.; FOLGUEIRA, M. ITRS/GCRS transformation: Uncertainty propagation analysis and short-term modelling of IAU 2006/2000A developments. **Advances in Space Research**, v. 63, n. 5, p. 1792-1802, 2019. DOI. 10.1016/j.asr.2018.10.050

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, 2021. DOI. 10.14393/rbcv73n2-55466

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

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **Soluções multianuais do SIRGAS**. Disponível em: <<https://www.sirgas.org/pt/multi-year-solutions/>>. Acesso em: 03 mai. 2022a.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). **Realizações do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas**. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-realizations/>>. Acesso em: 03 mai. 2022b.

SMITH, D. **On the Propagation of Formed Error Estimates of Euler Pole Parameters into Modernized NSRS Coordinates**. Silver Spring – MD: NOAA Technical Memorandum NOS NGS 85, 2020.

SOLER, T.; HAN, J. Y.; WESTON, N. D. Variance–covariance matrix of transformed GPS positions: Case study for the NAD 83 geodetic datum. **Journal of Surveying Engineering**, v. 142, n. 1, p. 04015004, 2016. DOI. 10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000143

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos nesta pesquisa evidenciam que a compatibilização de épocas e de referencial é uma tarefa de grande importância nas aplicações geodésicas, devendo este processo ser, portanto, tratado com muita cautela. A acurácia dos parâmetros de transformação e também das velocidades das estações são fundamentais nos resultados finais desta compatibilização, além da grande influência nas precisões das coordenadas após a mudança de referência e atualização para época de interesse.

No Capítulo 1 desta tese foi apresentada uma metodologia para a determinação de velocidades de estações GNSS a partir de análises de séries temporais de coordenadas da RBMC com uso do *software* SARI, cujo principal objetivo foi a verificação da influência da sazonalidade e do ruído na determinação de velocidades das estações da RBMC. Frisa-se que as coordenadas foram pós-processadas no serviço *online* IBGE-PPP e que foram analisadas séries temporais de 94 estações com, no mínimo, 4 anos de dados.

Na aplicação desta metodologia foi percebido que o *software* SARI apresentou-se como uma ferramenta com grande potencial na realização de análises de séries temporais de coordenadas obtidas com uso do GNSS, além de verificar sua ótima interação com o usuário nas análises gráficas destas séries. Isso ocorre porque o *software* tem uma interface gráfica de fácil interação, sendo possível, e de maneira eficiente, a identificação e retirada de *outliers* das séries.

A partir da metodologia apresentada foi verificado que a placa Sul-Americana (na porção analisada nesta pesquisa, qual seja, o Brasil) é estável, visto que as componentes de velocidade, quando são analisadas separadamente, apresentam valores semelhantes. Também foi possível inferir que os ruídos que afetaram as séries temporais de coordenadas obtidas com GNSS foram ruídos brancos e ruídos de cintilação (ruídos da lei de potência). Nesse sentido, destaca-se que a determinação desses ruídos foi feita por meio da estimativa MLE (*Maximum-Likelihood Estimation*).

Outro ponto importante percebido foi o efeito da sazonalidade nas velocidades das estações GNSS, que não influenciou na componente planimétrica das velocidades, ou seja, caso a sazonalidade seja negligenciada na determinação de velocidades de estações do GNSS, isto não trará perdas significativas nos resultados. Porém, pode-se observar que o mesmo não se aplica à componente u do SGL.

A partir da metodologia aplicada no Capítulo 1, foi notado que, ao realizar as análises de ruídos em séries temporais de coordenadas obtidas no GNSS, as velocidades das estações têm suas precisões depreciadas de forma significativa. Contudo, qualquer sinal sazonal, ou de periodicidade residual não modelado e removido adequadamente, moverá a parte estocástica para um ruído muito mais correlacionado, fazendo com que as incertezas sejam superestimadas. Isto mostra que a robustez na determinação de velocidade de estações do GNSS é de extrema importância para as aplicações geodésicas.

No Capítulo 2 foi proposta a determinação de um modelo de velocidade regional (placa Sul-Americana – porção que o Brasil ocupa). Esta metodologia propõe a utilização um interpolador geoestatístico (Krigagem ordinária) na interpolação de velocidades de estações do GNSS, obtidas a partir de séries temporais de coordenadas obtidas no GNSS pós-processadas no serviço *online* IBGE-PPP. Pode-se afirmar que o modelo de velocidade desenvolvido apresentou resultados muito bons na atualização de coordenadas no Brasil.

Evidencia-se, neste ínterim, que a interpolação por krigagem ordinária apresenta-se como uma ferramenta com potencial na determinação de modelos de velocidade, mesmo em regiões com baixa densificação de estações de monitoramento contínuo. Isso se dá em face da baixa densificação, principalmente nas regiões norte e centro-oeste, que não possibilitou a determinação de um espaçamento de grade igual a $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, sendo possível a determinação de uma grade de $1^\circ \times 1^\circ$. Salienta-se que a placa tectônica Sul-Americana (na porção que o Brasil ocupa) é estável, o que contribuiu de forma positiva nos resultados do modelo de velocidade criado. Assim, é importante destacar que o modelo de velocidade desenvolvido obteve resultados mais efetivos na atualização de coordenadas realizadas na pesquisa que o modelo de velocidade VEMOS2017 e resultados similares ao modelo de movimento de placa ITRF2014 (MMP) e ao modelo VEMOS2009.

No Capítulo 3 foi apresentada uma metodologia para realizar as análises das incertezas no processo de atualização de coordenadas e compatibilização de referenciais GNSS no Brasil, visto que, normalmente, não é aplicada a propagação de incertezas das coordenadas na compatibilização de época e de referenciais. Logo, o objetivo foi à determinação das precisões dos parâmetros de transformação entre o ITRF2014 e o ITRF2000, além de mostrar o quão é depreciada a precisão das coordenadas ao se realizar propagação de incertezas na compatibilização de época e de referencial. Outrossim, buscou-se apresentar, de forma detalhada, todas as etapas necessárias para realização de propagação de incertezas na compatibilização de época e de referencial.

A partir da metodologia aplicada foi possível verificar que, ao se fazer a propagação de incertezas das coordenadas na realização da compatibilização de época e de referencial, as precisões das coordenadas são depreciadas de forma significativas, uma vez que as coordenadas, antes de serem transformadas e reduzidas, tinham precisões milimétricas e, após a compatibilização de época e de referencial, passaram a ter precisões centimétricas.

Outro ponto importante visto na aplicação desta metodologia foi que tanto na mudança de referencial, quanto na atualização das coordenadas, as precisões das coordenadas são depreciadas de forma significativas. Enquanto a mudança de referencial torna as precisões que eram milimétricas em centimétricas, a atualização das coordenadas piora, em média, duas vezes as precisões das coordenadas, que corresponde a uma adição nas incertezas das coordenadas no valor de dois centímetros (2 cm). Logo, a aplicação desta metodologia deixa claro aos usuários de produtos GNSS que a propagação de incertezas na compatibilização de época e de referencial é uma tarefa de muita importância em diversas aplicações geodésicas. Salienta-se que em alguns serviços de pós-processamento absoluto (PPP), como CSRS-PPP e IBGE-PPP, não são realizadas as propagações de incertezas no processo de transformação de referencial e atualização de coordenadas, uma tarefa inconsistente de acordo com os resultados obtidos pela metodologia supracitada.

Diante das explicações supracitadas, conclui-se que os objetivos propostos pela pesquisa foram atingidos, haja vista que foram gerados resultados que contribuem com a comunidade geodésica em aplicações de compatibilização de época e de referenciais do GNSS, dentre os quais pode-se citar: a elaboração de uma metodologia na geração de velocidades de estações GNSS; a concepção de um modelo de velocidade para o Brasil; o desenvolvimento de uma metodologia para quantificação da depreciação das precisões das coordenadas na compatibilização de época e de referencial GNSS; e por fim, a apresentação, de forma detalhada, de todo o processo de propagação de incertezas na compatibilização de época e de referencial GNSS.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a sazonalidade nas séries temporais de coordenadas obtidas com uso do GNSS na componente u do SGL, uma vez estas que apresentam comportamentos periódicos mais acentuados. Principalmente nas estações com maiores amplitudes, visto a possibilidade da influência de cargas hídricas (exemplo, rios) neste comportamento. Também se recomenda, para trabalhos futuros, a inclusão de novas estações da RBMC na determinação de um modelo de velocidade para o Brasil em vista da baixa densificação de estações de monitoramento contínuo nas regiões norte e centro-oeste,

no período de investigação desta pesquisa. Recomenda-se ainda a aplicação da krigagem ordinária na investigação de placas tectônicas instáveis e também a aplicação de colocação por mínimos quadrados na determinação de um modelo de velocidade para o Brasil. E também uma pesquisa mais detalhada na realização de atualização de coordenadas para todo o Brasil.

Também é recomendada, em trabalhos futuros, a determinação de um modelo de velocidade para o Brasil que seja capaz de disponibilizar as precisões das velocidades das estações, já que com a krigagem ordinária não é possível à obtenção das incertezas das velocidades obtidas.