

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

LÉCIO ALVES NASCIMENTO

**ANÁLISE TEMPORAL DO EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NAS
DEFORMAÇÕES EM ESTAÇÕES GNSS LOCALIZADAS NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2021

LÉCIO ALVES NASCIMENTO

**ANÁLISE TEMPORAL DO EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NAS
DEFORMAÇÕES EM ESTAÇÕES GNSS LOCALIZADAS NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

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: Paulo César Emiliano

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2021

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

T

N244a
2021 Nascimento, Lécio Alves, 1982-
Análise temporal do efeito da carga hidrológica nas
deformações em estações GNSS localizadas na Amazônia
brasileira / Lécio Alves Nascimento. – Viçosa, MG, 2021.
147 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: William Rodrigo Dal Poz.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Geodésia. 2. Sistema de posicionamento global. 3. Séries
temporais. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 526.1

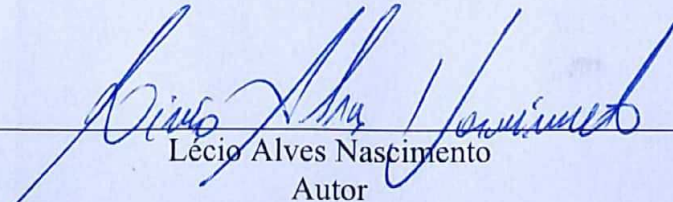
LÉCIO ALVES NASCIMENTO

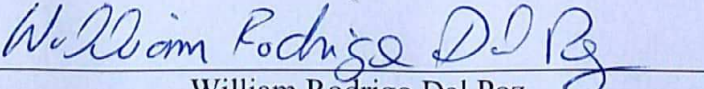
**ANÁLISE TEMPORAL DO EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NAS
DEFORMAÇÕES EM ESTAÇÕES GNSS LOCALIZADAS NA AMAZÔNIA
BRASILEIRA**

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: 01 de março de 2021.

Assentimento:


Lécio Alves Nascimento
Autor


William Rodrigo Dal Poz
Orientador

AGRADECIMENTOS

Seria egoísta de minha parte chegar até aqui e levar todo o crédito por esta tese, apesar de toda dedicação, empenho e sacrifícios. Nesse contexto, ressalto que esta é fruto de um esforço de um grupo diversificado de pessoas que compartilharam, compartilham e compartilharão experiências e momentos pessoais e profissionais. Algumas destas pessoas não terei mais a oportunidade de ver e abraçar, pois deixaram suas imensuráveis contribuições e seguiram para além da vida. Todas estas pessoas contribuíram, de alguma forma, nas diferentes etapas da minha vida e, conseqüentemente, no desenvolvimento desta pesquisa, seja introduzindo novos conceitos e ensinamentos, analisando dados, lendo e fazendo sugestões, discutindo, aconselhando, incentivando, apoiando ou, muitas vezes, simplesmente me escutando. Expresso a tais pessoas os meus mais sinceros agradecimentos e minha profunda gratidão.

Em especial, agradeço:

A Deus, o autor da vida, por ter me concedido sabedoria, paz, consolo e por estar sempre ao meu lado em cada momento da evolução temporal da minha vida.

Aos meus pais, amigos de todas as horas, Rozilda e Florisval, pela família, amizade, coragem, apoio, compreensão, dedicação, carinho e por acreditar sempre em mim; à minha irmã Greice por todo incentivo, amizade, carinho, confiança e esforço. Sem vocês, não chegaria até aqui.

À minha esposa Nilcéia e ao meu filho Nicolás pelos momentos de alegria e consolo, incentivo, compreensão, carinho, amizade, motivação e por me fazerem determinado a cada etapa desse trabalho. Obrigado por estarem ao meu lado em cada passo dado em direção a essa conquista.

Aos queridos tios Rosinaldo, Rosivaldo, Magnovaldo, André Marino e Levi e tias Marilda, Áurea, Sinália e Azenete pelo incentivo, carinho, motivação e amizade.

Aos primos George, Levi Jr., Johan, Tiago, Alisson e Fernando pelos momentos de descontração, ensinamentos, motivação e amizade.

A todos os familiares pelo apoio e carinho incondicional, sem vocês não teria chegado até aqui.

Ao professor doutor William Rodrigo Dal Poz pela orientação, apoio, amizade e contribuições.

Ao professor doutor Paulo César Emiliano pela coorientação e pelas valiosas contribuições direcionadas ao desenvolvimento deste trabalho.

À professora Maria Rita dos Santos (In Memoriam) por todos os valiosos ensinamentos que contribuíram para que eu chegasse até aqui. Tenho certeza que ficará muito feliz aí no céu por esta conquista.

A todos os demais professores que contribuíram com seus ensinamentos e amizade para o meu crescimento em todas as etapas da vida.

Ao amigo Krisley Xavier pela parceria, longas conversas, discussões, contribuições e ajuda no decorrer do desenvolvimento desta pesquisa.

À amiga e cunhada doutora Patrícia pelo incentivo, ajuda, conversas e contribuição.

Ao amigo Arthur Machado pela amizade, incentivo, ajuda e contribuição.

Aos grandes amigos Fabrício, Fabiano, Alessandra e Francisco pelo companheirismo, preocupação, pelas longas conversas e ensinamentos. Vocês foram cruciais neste processo.

Aos amigos Farley, Renata, Luiz Filipe, Ticiane (Titice), Valdenice, Glaucus, Maiza, Ricardo (Pato), Roberto Costa, Emerson, Guilherme (Taruíra), Roberto Miranda e Zeca pela disposição em tornar o período de desenvolvimento desta pesquisa mais leve, agradável e alegre.

A todos os colegas do IFNMG – Campus Araçuaí pelo companheirismo, motivação, apoio e incentivo, em especial aos colegas e também amigos João Jacintho, Lais Barbosa, Grácia Lorena, Raniery Freire e Amanda Jardim.

Ao IBGE pela disponibilidade dos dados do projeto da RBMC e do serviço IBGE-PPP.

A todos que, de forma geral, estabelecem uma relação de amizade comigo, reitero que:

“[...] não sabem o quanto são meus amigos. Não percebem o amor que lhes devoto e a absoluta necessidade que tenho deles. E eu poderia suportar, embora não sem dor, que tivessem morrido todos os meus amores, mas enlouqueceria se morressem todos os meus amigos! Até mesmo aqueles que não percebem o quanto são meus amigos e o quanto minha vida depende de suas existências... A alguns deles não procuro, basta-me saber que eles existem. Esta mera condição me encoraja a seguir em frente pela vida. Mas, porque não os procuro com assiduidade, não posso lhes dizer o quanto gosto deles. Eles não iriam acreditar! Mas é delicioso que eu saiba e sinta que os adoro, embora não declare e não os procure. E às vezes, quando os procuro, noto que eles não têm noção de como me são necessários, de como são indispensáveis ao meu equilíbrio vital, porque eles fazem parte do mundo que eu, tremulamente construí e se tornaram alicerces do meu encanto pela vida. Quando viajo e fico diante de lugares maravilhosos, cai-me alguma lágrima por não estarem junto de mim, compartilhando daquele prazer... Se alguma coisa me consome e me envelhece e que a roda furiosa da vida não me permite ter sempre ao meu lado, morando comigo, andando comigo, falando comigo, vivendo comigo, todos os meus amigos, e, principalmente os que não desconfiam ou talvez nunca vão saber que são meus amigos! A gente não faz amigos, reconhece-os.”

Vinicius de Moraes

Por fim, vou seguindo em frente com eterna gratidão e em direção aos novos desafios, pois:

*Meu caminho pelo mundo
Eu mesmo traço
A Bahia já me deu
Régua e compasso
Quem sabe de mim sou eu
Aquele abraço!*

Gilberto Gil

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

“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”

(Mario Sergio Cortella)

RESUMO

NASCIMENTO, Lécio Alves, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Análise temporal do efeito da carga hidrológica nas deformações em estações GNSS localizadas na Amazônia brasileira.** Orientador: William Rodrigo Dal Poz. Coorientador: Paulo César Emiliano.

Investigações acerca do efeito da carga hidrológica, em regiões específicas, como a Amazônica, têm se concentrado nas respostas elásticas da crosta (deformações) associadas às componentes posicionais. Portanto, é pertinente investigar o efeito supramencionado nas componentes posicionais fundamentando-se no relacionamento estatístico entre as séries posicionais e de dados linimétricos. Nesse contexto, utilizou-se dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) em conjunto com o serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística PPP) para a geração das séries posicionais. Contudo, as realizações adotadas pelo IBGE-PPP (IGSyy/IGbyy – *International GNSS Service* ou SIRGAS2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000) devem ser cuidadosamente atribuídos às séries posicionais, pois podem interferir nos resultados. Desse modo, para a definição adequada do referencial das séries posicionais vinculadas à investigação do efeito da carga hidrológica se fez necessário avaliar o alinhamento e a similaridade entre as soluções IGS14-ECD e SIRGAS2000-ECD (Época de Coleta dos Dados). Nesse sentido, constatou-se que as soluções IGS14-ECD e SIRGAS2000-ECD compatibilizadas com os novos parâmetros utilizados pelo IBGE-PPP foram compatíveis e alinhadas ao nível menor ou igual a 0,002 m. Assim sendo, optou-se por utilizar nas séries as soluções IGS14-ECD. Na sequência, investigou-se o deslocamento e velocidades de nove estações da RBMC (AMBC, AMCO, AMHA, AMMU, AMTE, AMUA, ITAM, NAUS e PAIT) fundamentando-se nas amplitudes das séries posicionais e no coeficiente de regressão resultante do ajuste de modelos de regressão linear simples. As velocidades V_n , V_e e V_u estimadas com as séries posicionais foram comparadas às derivadas do VEMOS2009 (modelo de velocidade para o SIRGAS 2009) e disponibilizadas pela SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo). Quando comparadas as velocidades supramencionadas, notou-se que V_n , V_e e V_u apresentaram discrepâncias variando entre -0,0001 e 0,0014 m/ano; -0,0021 e 0,0017 m/ano; e -0,0027 e 0,0084 m/ano, respectivamente. Considerando as amplitudes anuais, verificou-se que os maiores valores ocorreram para as componentes Δu (~0,073 m) e Δn (~0,020 m) das estações NAUS e AMUA;

e Δe (0,016 m) da estação AMBC, evidenciando a maior expressividade do efeito da carga hidrológica nas proximidades do leito do Rio Negro. Por fim, analisou-se estatisticamente a tendência (velocidades) e periodicidades associadas a quatro estações da RBMC (NAUS, AMUA, AMBC e AMCO). Nesta etapa aplicou-se a modelagem de Box e Jenkins associada ao procedimento desenvolvido por Chen e Liu para efetuar a correção de saltos ocasionados por trocas de antenas e/ou receptores nas séries posicionais. Posteriormente, aplicou-se o método LOWESS e a demodulação complexa associada ao filtro passa-baixa para a extração da tendência e dos sinais periódicos, respectivamente. Salienta-se que esses procedimentos estatísticos são muito utilizados na econometria de séries temporais. Contudo, destaca-se que sua aplicação em séries temporais posicionais se mostrou eficiente para as finalidades propostas. Tendência significativa foi observada para Δn e Δe das quatro estações consideradas, justificável pelo sentido noroeste de deslocamento da placa Sul-americana. Ademais, similaridades foram verificadas nas periodicidades para Δn e Δu da NAUS e cota linimétrica (365,2 dias); e para Δn , Δe e Δu das estações AMBC e AMCO (379,6 e 381 dias, respectivamente). Contudo, notou-se diferenças para Δe da NAUS (1217,2 dias) e AMUA (444 dias). Por fim, fundamentando-se nas defasagens entre as séries posicionais e linimétricas, acredita-se que as deformações periódicas atreladas ao efeito da carga hidrológica são regidas pelas cheias e vazantes, vinculadas ao remanso e às zonas úmidas recorrentes em Manaus, e se propagam para estações circunvizinhas.

Palavras-chave: Geodésia. GNSS. IBGE-PPP. Séries temporais. Carga hidrológica.

ABSTRACT

NASCIMENTO, Lécio Alves, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2021. **Temporal analysis of the effect of the hydrological load on the deformations in GNSS stations located in the Brazilian Amazon.** Advisor: William Rodrigo Dal Poz. Co-adviser: Paulo César Emiliano.

Investigations about the effect of the hydrological load, in specific regions, such as the Amazon, have concentrated on the elastic responses of the crust (deformations) associated with the positional components. Therefore, it is pertinent to investigate the aforementioned effect on positional components based on the statistical relationship between the positional and linimetric data series. In this context, GNSS (Global Navigation Satellite System) data from RBMC stations (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems) was used in conjunction with the online service IBGE-PPP (Brazilian Institute of Geography and Statistics PPP) to generate the data. positional series. However, the achievements adopted by the IBGE-PPP (IGSyy/IGbyy - International GNSS Service or SIRGAS2000 - Geocentric Reference System for the Americas 2000) must be carefully attributed to the positional series, as they may interfere with the results. Thus, for the proper definition of the referential of the positional series linked to the investigation of the effect of the hydrological load, it was necessary to assess the alignment and similarity between the solutions IGS14-ECD and SIRGAS2000-ECD (Time of Data Collection). In this sense, it was found that the solutions IGS14-ECD and SIRGAS2000-ECD compatible with the new parameters used by IBGE-PPP were compatible and aligned to the level less than or equal to 0.002 m. Therefore, it was decided to use the IGS14-ECD solutions in the series. Then, the displacement and velocity of nine stations of the RBMC (AMBC, AMCO, AMHA, AMMU, AMTE, AMUA, ITAM, NAUS, and PAIT) were investigated based on the amplitudes of the positional series and the regression coefficient resulting from the adjustment of simple linear regression models. The V_n , V_e , and V_u velocities estimated with the positional series were compared to those derived from VEMOS2009 (velocity model for SIRGAS 2009) and made available by SIRGAS-CON (SIRGAS Network for Continuous Monitoring). When comparing the velocities mentioned above, it was noted that V_n , V_e , and V_u presented discrepancies varying between -0,0001 and 0,0014 m / year; -0.0021 and 0.0017 m/year; and -0.0027 and 0.0084 m/year, respectively. Considering the annual amplitudes, it was found that the highest values occurred for the Δu (~0.073 m) and Δn (~0.020 m) components of the NAUS and AMUA stations; and Δe (0.016 m) from the AMBC station,

showing the greater expressiveness of the effect of the hydrological load in the vicinity of the bed of the Negro River. Finally, the trend (velocities) and periodicities associated with four stations of the RBMC (NAUS, AMUA, AMBC, and AMCO) were statistically analyzed. In this step, Box and Jenkins modeling was applied, associated with the procedure developed by Chen and Liu to correct the jumps caused by exchanging antennas and/or receivers in the positional series. Subsequently, the LOWESS method and the complex demodulation associated with the low-pass filter were applied to extract the trend and periodic signals, respectively. It should be noted that these statistical procedures are widely used in the econometrics of time series. However, it is noteworthy that its application in positional time series proved to be efficient for the proposed purposes. A significant trend was observed for Δn and Δe of the four stations considered, justified by the northwestern direction of displacement of the South American plate. In addition, similarities were verified in the periodicities for Δn and Δu of NAUS and linimetric quota (365.2 days); and for Δn , Δe , and Δu from AMBC and AMCO stations (379.6 and 381 days, respectively). However, differences were noted for Δe of NAUS (1217.2 days) and AMUA (444 days). Finally, based on the lags between the positional and linimetric series, it is believed that the periodic deformations linked to the effect of the hydrological load are governed by the floods and ebbs, linked to the backwater and the recurrent wetlands in Manaus, and propagate to surrounding stations.

Keywords: Geodesy. GNSS. IBGE-PPP. Time Series. Hidrologic load.

LISTA DE FIGURAS

2. AVALIAÇÃO DOS NOVOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE ITRF E SIRGAS2000 NO IBGE-PPP COM ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS.

- Figura 1– Estações da RBMC utilizadas.49
- Figura 2 – Fluxograma metodológico para compatibilização entre as redes IGS_{yy}-ECD/IG_byy-ECD e SIRGAS2000-ECD nas séries temporais.....51
- Figura 3 – Fluxograma metodológico para compatibilização das redes IGS_{yy}-ECD/IG_byy-ECD para IGS14-ECD e desta para SIRGAS2000-ECD nas séries temporais.....53
- Figura 4 – Séries de componentes do SGL referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P1 (azul) e P2 (colorida). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).....56
- Figura 5 – Séries de discrepâncias planimétricas e altimétricas referentes às séries referenciadas ao SIRGAS2000-ER compatibilizado com P1 (azul) e P2 (colorida). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).....58
- Figura 6 – Séries de componentes do SGL referentes às séries referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P2 (colorida) e IGS14-ECD (azul). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).....59
- Figura 7 – Séries de componentes do SGL referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado do IGS14-ECD com P2 (colorida) e SIRGAS2000-ECD compatibilizado do IGS14-ECD com P1 (azul). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).60
- Figura 8 – Séries de componentes do SGL referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P2 (colorida) e SIRGAS2000-ECD compatibilizado do IGS14-ECD com P2 (azul). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).61

3. O EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NOS DESLOCAMENTOS E VELOCIDADES DE ESTAÇÕES GNSS DA BACIA AMAZÔNICA BRASILEIRA

- Figura 1 – Geoespacialização das estações da RBMC utilizadas.....72
- Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.74

Figura 3 – Séries de componentes norte (Δn) derivadas das soluções em SIRGAS2000 disponibilizadas pelo IBGE-PPP. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.....	77
Figura 4 – Série de cotas linimétricas da estação do porto de Manaus e séries de componentes vertical (Δu) em IGS14-ECD. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.....	79
Figura 5 – Série de cotas linimétricas da estação do porto de Manaus e séries de componentes norte (Δn) em IGS14-ECD. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.....	80
Figura 6 – Série de cotas linimétricas da estação do porto de Manaus e séries de componentes leste (Δe) em IGS14-ECD. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.....	81
Figura 7 – Estatísticas referentes às amplitudes associadas às séries temporais das estações utilizadas.....	83
Figura 8 – Distâncias relativas à estação NAUS e amplitudes médias associadas às séries temporais das estações utilizadas.	83
Figura 9 – Velocidades referentes às séries temporais, VEMOS2009 e SIRGAS-CON das estações utilizadas.....	85
Figura 10 – Discrepâncias entre as velocidades estimadas com as séries temporais e derivadas do VEMOS2009.	86
Figura 11 – Discrepâncias entre as velocidades estimadas com as séries temporais e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.....	87
Figura 12 – Discrepâncias entre as velocidades planimétricas estimadas com as séries temporais (TS), VEMOS2009 e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.	88
4. ABORDAGEM ESTATÍSTICA APLICADA À INVESTIGAÇÃO DE DEFORMAÇÕES ASSOCIADAS AO EFEITO DE CARGA HIDROLÓGICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	
Figura 1 – Identificação e distribuição espacial das estações utilizadas.	98
Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.	99

Figura 3 – Saltos detectados nas estações GNSS utilizadas para o cálculo do modelo VEMOS2015 (intervalo de tempo de março de 2010 a abril de 2015). Os círculos representam saltos causados por deslocamentos cossísmicos; quadrados representam saltos devido a mudanças de antena e/ou receptor.	101
Figura 4 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior), posicionais da estação NAUS com saltos e falhas (à direita) e com saltos corrigidos, períodos imputados e trajetória (à esquerda). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.	115
Figura 5 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior), sinais periódicos das séries diferenciadas (linha preta) e por LOWESS (linha azul) (à esquerda) e somente por LOWESS (linha azul) (à direita).	118
Figura 6 – Periodogramas referentes à série de cotas linimétricas do porto de Manaus e às componentes periódicas de Δn , Δe e Δu da estação NAUS.	119
Figura 7 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior), séries posicionais da estação AMUA com períodos imputados (pontos em preto) e trajetória (linha azul) à esquerda, com seus respectivos sinais periódicos (em azul) à direita.	122
Figura 8 – Periodogramas referentes à série de cotas linimétricas do porto de Manaus e às componentes periódicas de Δn , Δe e Δu da estação AMUA.	124
Figura 9 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior) e séries temporais posicionais da estação AMBC com períodos imputados, representados pelos pontos em preto e trajetória em azul (à esquerda) com seus respectivos sinais periódicos em azul (à direita)..	127
Figura 10 – Periodogramas referentes aos sinais periódicos de Δn , Δe e Δu da estação AMBC e da série de cotas linimétricas do porto de Manaus.	129
Figura 11 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior) e séries posicionais da estação AMCO com períodos imputados, representados pelos pontos em preto e trajetória em azul (à esquerda) com seus respectivos sinais periódicos em azul (à direita).	132
Figura 12 – Periodogramas referentes aos sinais periódicos de Δn , Δe e Δu da estação AMCO e das cotas linimétricas do porto de Manaus.	134

LISTA DE TABELAS

2. AVALIAÇÃO DOS NOVOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE ITRF E SIRGAS2000 NO IBGE-PPP COM ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Tabela 1 – Realizações IGS adotadas pelo IBGE-PPP.	46
Tabela 2 – Estações da RBMC utilizadas com os respectivos períodos considerados nas séries posicionais.	49
Tabela 3 – Parâmetros de transformação entre as redes IGS _{yy} /IG _b yy e SIRGAS2000, anteriores a 17/05/2020.	51
Tabela 4 – Parâmetros de transformação entre as redes IGS _{yy} /IG _b yy e SIRGAS2000, a partir de 17/05/2020.	52
Tabela 5 – Parâmetros de transformação entre as redes IGS _{yy} /IG _b yy.	54

3. O EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NOS DESLOCAMENTOS E VELOCIDADES DE ESTAÇÕES GNSS DA BACIA AMAZÔNICA BRASILEIRA

Tabela 1 – Estações da RBMC utilizadas com os respectivos quantitativos de dados.	72
Tabela 2 – Distâncias aproximadas entre estações.	73
Tabela 3 – Amplitudes referentes às séries temporais das estações.	82
Tabela 4 – Componentes de velocidades referenciadas ao ITRF2014 (IGS14) determinadas por séries temporais, derivadas do VEMOS2009 e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.	85
Tabela 5 – Discrepâncias entre as componentes de velocidades estimadas por séries temporais e derivadas do VEMOS2009.	86
Tabela 6 – Discrepâncias referentes às componentes de velocidades estimadas por séries temporais e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.	87

4. ABORDAGEM ESTATÍSTICA APLICADA À INVESTIGAÇÃO DE DEFORMAÇÕES ASSOCIADAS AO EFEITO DE CARGA HIDROLÓGICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Tabela 1 – Estações utilizadas e seus respectivos períodos considerados nas séries.	98
Tabela 2 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries posicionais da estação NAUS e de cota linimétrica.	116
Tabela 3 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação NAUS.	117
Tabela 4 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação NAUS e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.	119
Tabela 5 – Defasagens referentes à estação NAUS.	121
Tabela 6 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries posicionais da estação AMUA e de cota linimétrica.	123

Tabela 7 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMUA. ...	124
Tabela 8 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMUA e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.	124
Tabela 9 – Defasagens referentes à estação AMUA.	126
Tabela 10 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries de componentes posicionais da estação AMBC e de cota linimétrica.	128
Tabela 11 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMBC. .	128
Tabela 12 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMBC e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.	129
Tabela 13 – Defasagens referentes à estação AMBC.....	130
Tabela 14 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries de componentes posicionais da estação AMCO e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.....	133
Tabela 15 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMCO. .	133
Tabela 16 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMCO e de cotas linimétricas do porto de Manaus.	135
Tabela 17 – Defasagens referentes à estação AMCO.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APPS	<i>Automatic Precise Positioning Service</i>
ARIMA	<i>Autoregressive Integrated Moving Average</i>
BeiDou	<i>China's Global Navigation Satellite System</i>
CSRS-PPP	<i>Canadian Spatial Reference System - PPP</i>
ERP	<i>Earth Rotation Parameter</i>
Galileo	<i>Europe's Global Satellite Navigation System</i>
GIPSY	<i>GNSS Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software</i>
GLONASS	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite Systems</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBGE-PPP	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - PPP
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IGS	<i>International GNSS Service</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RINEX	<i>Receiver Independent Exchange Format</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
TEQC	<i>Translation, Editing and Quality Check</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	19
1.1	Considerações iniciais	19
1.2	Hipóteses	29
1.3	Objetivo.....	30
1.4	Justificativas.....	30
1.5	Estruturação do trabalho	33
	Referências	33
2	AVALIAÇÃO DOS NOVOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE ITRF E SIRGAS2000 NO IBGE-PPP COM ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS	42
2.1	Introdução	44
2.2	Séries temporais posicionais	45
2.3	Materiais e métodos	49
2.3.1	Experimento 1	50
2.3.2	Experimento 2	52
2.4	Resultados e discussões	54
2.4.1	Experimento 1	55
2.4.2	Experimento 2	58
2.5	Conclusões	61
	Referências	63
3	O EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NOS DESLOCAMENTOS E VELOCIDADES DE ESTAÇÕES GNSS DA BACIA AMAZÔNICA BRASILEIRA	68
3.1	Introdução	69
3.2	Geração das séries temporais posicionais	71
3.3	Regressão linear simples e determinação de velocidades	71
3.4	Materiais e métodos	72
3.5	Resultados e discussões	76
3.6	Considerações finais, conclusões e recomendações.....	88
	Referências	90
4	ABORDAGEM ESTATÍSTICA APLICADA À INVESTIGAÇÃO DE DEFORMAÇÕES ASSOCIADAS AO EFEITO DE CARGA HIDROLÓGICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA	95
4.1	Introdução	96

4.2	Materiais e métodos	98
4.3	Resultados e discussões	113
4.3.1	Estação NAUS	114
4.3.2	Estação AMUA	122
4.3.3	Estação AMBC	126
4.3.4	Estação AMCO	131
4.4	Conclusões	136
	Referências	138
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	144
5.1	Conclusões gerais.....	144
5.2	Recomendações para trabalhos futuros.....	147

1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 Considerações iniciais

Fenômenos relacionados à geodinâmica e deformação crustal ocorrem a uma taxa específica em relação ao tempo e decorrem da viscoelasticidade da Terra, visto que esta não pode ser considerada um corpo rígido (SAPUCCI; MONICO, 2001). Tais fenômenos provocam alterações espaço-temporais na posição (coordenadas) de pontos na superfície terrestre, com níveis de magnitude e significância variáveis (SÁNCHEZ; DREWES, 2016).

Inúmeras investigações científicas fundamentam-se nas alterações posicionais para averiguar alguns destes fenômenos, como se pode observar em Alinia, Tiampo e James (2017) e Kowalczyk e Rapinski (2018), que analisam o movimento de placas tectônicas; Geirsson et al. (2017), que avaliam a atividade vulcânica; Kim e Bae (2017) e Tiryakioglu et al. (2017), que investigam os terremotos; Rajner (2018) estuda o derretimento de geleiras; Benedito, Albarici e Trabanco (2018) e Albarici et al. (2019), que investigam os efeitos de carga oceânica e marés terrestres; Bevis et al. (2005), Urquhart (2009), Dach et al. (2010), Fritsche, Döll e Dietrich (2012), Nascimento (2016), Giacometti et al. (2017), Oliveira (2018), Knowles, Bennett e Harig (2020), que investigam os efeitos de cargas hidrológica e/ou de pressão atmosférica.

Nesse sentido, o desenvolvimento de investigações como as supramencionadas tem se fundamentado na aplicação das séries temporais posicionais, uma vez que estas refletem a evolução temporal dos efeitos, afins ou correlatos, de fenômenos como os anteriormente destacados. Portanto, as séries posicionais se firmam como uma ferramenta amplamente empregada nestes tipos de investigação.

Comumente, tem-se utilizado o método de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) para a geração das séries temporais posicionais. Tal método possibilita a realização do posicionamento de forma eficiente, sendo globalmente empregado em diversas aplicações e investigações científicas (GRINTER; ROBERTS, 2011; NISTOR; BUDA, 2015; CHOY; BISNATH; RIZOS, 2016). Sua execução está associada a obtenção da posição de um ponto com a utilização de observações não diferenciadas do código e da fase de batimento da onda portadora, coletadas por receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) de dupla frequência (L1L2), atreladas às efemérides precisas (órbitas dos satélites propriamente ditas e erros dos seus respectivos relógios) (WITCHAYANGKON, 2000; LEICK, 2004; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008; CHOY, 2009; IBGE, 2017; IBGE, 2020). Salienta-se que as efemérides precisas têm sido produzidas e disponibilizadas pelo IGS (*International GNSS Service*) e centros associados, sem nenhum custo (IGS, 2020).

Contudo, o PPP também pode ser realizado com dados de receptores GNSS de simples frequência (L1), porém, seus resultados apresentarão menor acurácia (CHEN; GAO, 2005; CHOY, 2009; AFIFI; EL-RABBANY, 2014; AZAMBUJA, 2015). Tal redução na acurácia se justifica pela minimização (e não eliminação dos efeitos de primeira ordem) dos efeitos de primeira ordem da ionosfera proporcionada com a aplicação de modelos como o de Klobuchar e o modelo Global da Ionosfera disponibilizado pelo IGS (CHOY, 2009; AZAMBUJA, 2015). No entanto, pesquisas associadas à modelagem e correção do efeito ionosférico de primeira ordem tem avançado no sentido da redução na perda de acurácia dos resultados obtidos no PPP realizado com dados de simples frequência, justificável pelas diversas estratégias de processamento utilizadas para explorar o efeito ionosférico, além da integração de dados GNSS multifrequência e multiconstelações no PPP (SETTI JUNIOR; ALVES; SILVA, 2019; SU; JIN; HOQUE, 2019). De fato, atualmente o GNSS é composto pelas constelações GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*GLObal'naya NAVigatsionnaya Sputnikkovaya Sistema*), Galileo (*Europe's Global Satellite Navigation System*) e BeiDou (*China's Global Navigation Satellite System*), em nível global. Destes, o GPS, o GLONASS e o BeiDou encontram-se totalmente operacionais, enquanto a constelação Galileo está em fase de testes de operacionalidade (BEIDOU, 2020; ESA, 2020; INSIDE GNSS, 2020).

Salienta-se que a maior acurácia obtida nos resultados do PPP efetuado com dados GNSS de dupla frequência está associada à consideração no processamento da combinação linear das observáveis GNSS denominada “livre de ionosfera” (*ionospheric free signal* ou simplesmente *ion-free*), o que possibilita a eliminação do efeito de primeira ordem da ionosfera (LEICK, 2004; HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008). Contudo, os impactos dos efeitos ionosféricos de ordens superiores no PPP devem ser investigados.

Nascimento (2016) destaca que o PPP pode ser efetuado de duas formas: a primeira é utilizando softwares científicos como, por exemplo, o Bernese GNSS Software (DACH et al., 2015), que exige do usuário um conhecimento aprofundado acerca dos parâmetros e da modelagem utilizada, além do alto custo e restrições de acesso. Softwares científicos gratuitos também apresentam tal complexidade operacional e restrições de acesso, caso do GIPSY-OASIS (*GNSS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software*) (GIPSY, 2021) desenvolvido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), através do JPL (*Jet Propulsion Laboratory*). Entretanto, tais softwares também proporcionam ao usuário conhecimento aprofundado sobre os parâmetros de processamento, possibilitando o estudo de efeitos específicos que afetam o posicionamento. A segunda consiste na utilização de serviços de PPP disponibilizados de forma online e gratuita por instituições e centros de pesquisa de

diversos países. As formulações, parâmetros e metodologia empregada no PPP podem ser consultadas em Zumberge et al. (1997), Kouba e Héroux (2000), Héroux e Kouba (2001), Seeber (2003), Leick (2004), Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Wasle (2008), Monaco (2008), Choy (2009), Afifi e El-Rabbany (2014), Azambuja (2015) e Kouba (2015).

Considerando os principais serviços de PPP disponibilizados online, será enfatizado o IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - PPP) (IBGE-PPP, 2020) devido à sua utilização nesta pesquisa, a partir do programa computacional RINEX-EDITION descrito em Nascimento et al. (2017). O IBGE-PPP consiste em uma adaptação do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System - PPP*) (atualmente versão 1.05/11216 atualizada) para uso no Brasil e processa dados GPS e GLONASS, de maneira isolada e/ou simultânea. Ressalta-se que o IBGE-PPP fornece resultados acurados tanto na realização do IGS-ECD (IGS na época de coleta) (atualmente Igb14, compatível e alinhado com o ITRF2014 - *International Terrestrial Reference Frame* 2014) quanto no SIRGAS2000-ECD (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000, época de coleta dos dados). Neste último, disponibiliza-se as coordenadas também na data de realização do sistema (época de referência – SIRGAS2000-ER), época 2000,4, cuja redução das coordenadas é efetuada aplicando-se as velocidades extraídas do VEMOS2009 (Modelo de Velocidade para o SIRGAS 2009) (COSTA et al., 2012; DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2017; IBGE, 2020).

Importa ressaltar que o ITRF consiste na realização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*) adotado internacionalmente como sistema de referência terrestre e é considerado como o referencial geodésico mais acurado. Atualmente tem-se o ITRF2014 como a realização mais recente do ITRS. Contudo, encontra-se em desenvolvimento o ITRF2020, cujas soluções finais tem previsão de divulgação entre os meses de setembro e outubro de 2021 (ITRF, 2020).

O ITRF2014 foi estabelecido fundamentando-se em uma modelagem que considera os movimentos não lineares das estações, incluindo movimentos sazonais (anuais e semestrais) e deformação pós-sísmica causadas por grandes terremotos, em particular os ocorridos no Chile em 2010 e no Japão em 2011. Séries históricas de posições das estações utilizadas e de EOPs (parâmetros de orientação da Terra) baseadas nas soluções de quatro técnicas geodésicas espaciais – VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*), SLR (*Satellite Laser Ranging*), DORIS (*Doppler Orbitography Radiopositioning Integrated by Satellite*) e GNSS – disponibilizadas pelos centros técnicos associados ao IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) também foram utilizadas (ALTAMIMI et al., 2016).

Fundamentando-se no ITRF, o IGS determina sua própria realização do ITRS que é atrelada ao ano relativo ao ITRF no qual se baseia, sendo equivalentes ao nível global, no sentido de que compartilham a mesma origem, escala e orientação. Suas realizações são denominadas IGS_{yy}, em que o yy refere-se aos dois últimos dígitos do ano relativo ao ITRF. De forma análoga, atualizações das realizações IGS_{yy} podem ser encontradas para um mesmo ITRF sob a nomenclatura de IG_byy. Pequenas diferenças podem ocorrer entre as coordenadas ITRF e IGS devido a fatores específicos da estação, como o uso de modelos de antena aprimorados na realização/atualização do IGS. Contudo, a transformação entre ITRF e a realização/atualização IGS correspondente é zero (BLICK et al., 2014; REBISCHUNG; SCHMID, 2016). Salienta-se que o IGS14 se fundamenta em um subconjunto de informações oriundas de 252 estações estáveis e com bom desempenho e que integram a rede global do IGS (*IGS Network*), englobando áreas pouco cobertas (REBISCHUNG, 2016).

Referenciais geodésicos regionais como o EUREF (*European Terrestrial Reference Frame*), o NAD83 (*North American Datum 1983*), o AFREF (*African Reference Frame*) e o SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) tem sua definição idêntica ao ITRS e sua realização é uma densificação regional do ITRF que cobrem áreas continentais (SEEBER, 2003). A principal diferença entre alguns referenciais regionais e o ITRF/IGS está associada à relação das velocidades locais à placa tectônica dominante englobada pelo referencial, e não à uma condição NNR (*No-Net-Rotation*). Essa abordagem minimiza as velocidades das estações e, nesse sentido, os referenciais regionais não restringidos pelo movimento de uma única placa tectônica estão estreitamente alinhados com o ITRF/IGS (BLICK et al., 2014).

Adicionalmente, os referenciais geodésicos nacionais modernos são tipicamente uma realização estática do ITRF ou de um referencial regional. Na maioria dos países, as coordenadas de um referencial nacional formam a base para todo levantamento, posicionamento e mapeamento dentro das fronteiras nacionais e, como os softwares de levantamento/GIS (*Geographic Information System*) e os dados espaciais geralmente não são projetados para lidar com a constante mudança das coordenadas, a época para os referenciais nacionais é fixa e as coordenadas são consideradas invariáveis com o tempo (BLICK et al., 2014). No Brasil adotou-se oficialmente para o SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) o SIRGAS2000, que consiste na realização do SIRGAS para o ano 2000, cujas coordenadas estão fixadas à época 2000,4 (IBGE, 2015). Ademais, o SIRGAS utiliza como elipsoide de referência o GRS80 (*Geodetic Reference System* de 1980), recomendado pela IAG (*International Association of Geodesy*) (HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008).

Nesse sentido, fundamentando-se no anteriormente mencionado infere-se que as soluções referenciadas ao ITRF2014 são mais consistentes e estáveis e, portanto, são amplamente empregadas nas séries posicionais aplicadas às investigações científicas associadas às deformações (contínuas e periódicas) derivadas dos efeitos de fenômenos específicos, como o de carga hidrológica. No entanto, mesmo o SIRGAS2000 sendo um referencial nacional moderno, as séries posicionais referenciadas ao SIRGAS2000-ECD disponibilizadas pelo IBGE-PPP devem ter sua consistência avaliada em relação às soluções IGS-ECD. De fato, o IBGE-PPP passou a utilizar, a partir de 17 de maio de 2020, um novo conjunto de parâmetros de transformação para a compatibilização das realizações IGS-ECD para o SIRGAS2000-ECD. Tal avaliação se justifica, pois, antes de iniciar as investigações acerca do efeito de fenômenos específicos, como o abordado nesta pesquisa, é pertinente que se atribua cuidadosamente o referencial às séries posicionais utilizadas, pois este pode interferir nos resultados. Além disso, proporcionará aos usuários o entendimento acerca do alinhamento e similaridade entre as soluções SIRGAS2000-ECD e IGS-ECD do IBGE-PPP e seu potencial de aplicação em atividades práticas e em investigações com abordagem de séries posicionais.

Sánchez e Drewes (2016) evidenciam que as séries posicionais podem conter saltos (descontinuidades) ocasionados por trocas de equipamento (fatores artificiais) que variam de alguns milímetros a até 8 cm. De fato, Bevis, Bedford e Caccamise (2020) evidenciam que em áreas não sismogênicas, como o Brasil, a maioria dos saltos são relacionados a fatores artificiais. Portanto, quando o propósito é estudar as causas do movimento ou da deformação da crosta é importante que se remova estes saltos das séries. Para estes casos, uma nova posição é estimada e incorporada às séries originais.

Gazeaux et al. (2013) afirmam que o efeito cumulativo dos saltos pode alterar significativamente as estimativas de posição e velocidade. Ademais, destacam que a detecção dos saltos é importante, pois estes influenciam na compreensão de deformações da superfície da Terra. Nesse sentido, apresentam uma gama de métodos (manuais, semiautomáticos e automáticos) voltados à detecção de saltos em séries posicionais. Bruni et al. (2014) apresentam um algoritmo para a detecção de saltos em séries posicionais fundamentado no STARS (*Sequential t test Analysis of Regime Shifts*). Já Najder (2020) destaca o FODITS (*Finding Outliers and Discontinuities In Time Series*), um subprograma contido na versão 5.2 do BSW (*Bernese GNSS Software*) que permite efetuar a análise automática de séries posicionais, incluindo a detecção automática de saltos, mudanças de velocidade, eventos periódicos e *outliers*, bem como a identificação das épocas de ocorrência de todos os eventos.

No entanto, utilizou-se nesta pesquisa uma estratégia para a identificação e correção dos saltos causados por fatores artificiais nas séries posicionais fundamentando-se na metodologia de Box e Jenkins em conjunto com o procedimento iterativo proposto por Chen e Liu (1993). A metodologia apresentada por Box e Jenkins consiste no ajuste de modelos autorregressivos (*AR*), integrados (*I*) de médias móveis (*MA*, do inglês *Moving Average*) – *ARIMA*. Para tal, utiliza-se um ciclo iterativo de quatro etapas – especificação, identificação, estimação e verificação – para a construção do modelo, onde sua estrutura baseia-se nos próprios dados da série (MORETTIN; TOLOI, 2006; BOX; JENKINS; REINSEL, 2008).

Chen e Liu (1993) destacam que os saltos (*outliers* sequenciais) presentes na série podem produzir viés nas estimativas dos parâmetros associados ao modelo *ARIMA* ajustado, mesmo que este seja ajustado adequadamente. Nesse sentido, desenvolveram um procedimento eficaz para detecção e incorporação de saltos aos modelos ajustados, evitando o efeito de mascaramento (*masking*) através da estimação conjunta dos parâmetros do modelo e dos efeitos dos saltos.

O procedimento iterativo de Chen e Liu (1993) é composto por três estágios em que o primeiro corresponde à estimativa inicial dos parâmetros e detecção de saltos; no segundo, ocorre a estimativa conjunta dos efeitos dos saltos e parâmetros do modelo e, no terceiro, ocorre a detecção de saltos utilizando as estimativas finais dos parâmetros do modelo *ARIMA*. Ao final da execução da estratégia supramencionada, obtém-se novas posições estimadas e corrigidas dos saltos, que são incorporadas nas séries originais.

Ressalta-se que a modelagem de Box e Jenkins é amplamente empregada nas mais diversas áreas com o objetivo, na maioria dos casos, de se efetuar a predição de estimativas futuras das variáveis consideradas nas séries temporais, como se pode verificar em Mohammadi e Su (2010), que utilizam tal modelagem para modelar e prever a média condicional e a volatilidade dos preços semanais do petróleo bruto em onze mercados internacionais; Alghamdi et al. (2019) aplicam a modelagem para avaliar alguns fatores que afetam significativamente a taxa de congestionamento de tráfego; Rotela Junior, Salomon e Pamplona (2014) aplicou tal modelagem pra previsão de séries temporais do Ibovespa (Índice do Mercado de Ações Brasileiro) e Benvenuto et al. (2020), que faz uso daquela modelagem para prever a disseminação da COVID-19, causada pelo Sars-CoV-2. Algumas investigações têm sido desenvolvidas combinando-se a modelagem *ARIMA* a outros modelos, tais como em Li et al. (2020), que combinam modelos *ARIMA* e funções ortogonais empíricas para predição de valores do VTEC (*Vertical Total Electron Content*) para a região de Guangxi, na China. No âmbito das séries posicionais, Anshah, Ahmad e Amin (2008) aplicam a modelagem *ARIMA*

para identificação e previsão de danos causados por movimentos estruturais; Xin et al. (2018) combinam modelos *ARIMA* com o filtro de Kalman e modelos *GARCH* (*Generalized Autoregressive Conditional Heteroskedasticity*) para a previsão de deformações estruturais em pontes; e Hohensinn, Häberling e Geiger (2020), que utilizam a modelagem *ARIMA* e análises espectrais para implementação de uma modelagem voltada à detecção de pequenas vibrações, com amplitudes abaixo do nível submilimétrico, baseando-se em dados coletados em um experimento de mesa de agitação GNSS.

Nesse contexto, destaca-se que a estratégia baseada na combinação da modelagem *ARIMA* associada ao procedimento de Chen e Liu utilizada na corrente pesquisa para a identificação e correção dos saltos ocasionados por trocas de antenas e/ou receptores nas séries posicionais não foi utilizada/evidenciada.

Diversos efeitos referentes às fontes de erros sistemáticos podem degradar a acurácia das posições estimadas no IBGE-PPP e, portanto, são modelados conforme recomendações estipuladas nas convenções do IERS (PETIT; LUZUM, 2010), tais como: os troposféricos, de primeira ordem da ionosfera, de marés (polares e terrestres) através dos ERP (*Earth Rotation Parameter*), de carga oceânica, os relacionados com centro de fase das antenas dos satélites e do receptor e do multicaminho. No entanto, os termos ionosféricos de ordem superior não são considerados na modelagem, podendo assim serem transformados em movimentos artificiais diurnos, sazonais e interanuais, que podem ser mal interpretados como efeitos de maré e deformação crustal (KEDAR et al., 2003). Entretanto, devem ter seu comportamento e magnitude avaliados para a região considerada nesta pesquisa. Detalhes sobre os parâmetros de processamento utilizados no IBGE-PPP podem ser consultados em IBGE (2017) e IBGE (2020).

Adicionalmente, o efeito da carga hidrológica (*water storage* e *hydrological load*), que está associado a eventos geodinâmicos e de deformação crustal, não é considerado no PPP por não apresentar modelagem consistente em escala global (PETIT; LUZUM, 2010; RAJNER; LIWOSZ, 2012). Tal efeito tem caráter local ou regional, evidenciando-se em regiões específicas, como a Amazônica, e é dependente da transferência sazonal de massa d'água entre os continentes e os oceanos, correspondente ao ciclo hidrológico, que ocasiona deformações viscoelásticas temporais (transitórias) na superfície da Terra (TREGONING et al., 2009; FRITSCHÉ; DÖLL; DIETRICH, 2012). Registra-se ainda, por oportuno que efeitos associados à geodinâmica e deformação crustal interagem com a rotação da Terra de diferentes maneiras, como se pode observar em Ambrosino et al. (2019), que evidenciam a correlação entre a taxa de rotação da Terra e a ocorrência de terremotos.

Devido à desconsideração do efeito da carga hidrológica no PPP, este efeito afeta diretamente as posições estimadas, tendo sua espaço-temporalidade evidenciada nas séries temporais posicionais. No entanto, Rosa (2008) e Knowles, Bennett e Harig (2020) destacam que apesar da parte majoritária dos efeitos estarem associados ao efeito de carga hidrológica, ainda permanecem (ou podem comparecer), na série temporal posicional, outros efeitos que requerem um estudo mais detalhado, como por exemplo o efeito de segunda ordem da ionosfera. Adicionalmente, salienta-se que as séries temporais posicionais utilizadas nesta pesquisa foram geradas utilizando o programa computacional denominado RINEX EDITION (NASCIMENTO et al., 2017), que integra dados GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) (COSTA et al. 2018; RBMC, 2020) com o serviço online IBGE-PPP, em modo estático. Ademais, utilizaram-se dados GNSS (GPS e GLONASS) de estações situadas na bacia amazônica brasileira, com janelas de rastreamento de vinte e quatro horas (24h). Destaca-se que o efeito de carga de maré oceânica pode ser negligenciado durante o período de 24 horas. Em contrapartida, o efeito de maré terrestre geralmente não é nulo, em função da existência de muitos componentes periódicos (XU, 2000). Contudo, como mencionado anteriormente, estes efeitos são modelados no IBGE-PPP.

Diversas investigações tem se destinado a averiguar o efeito da carga hidrológica, em diferentes regiões da Terra, fundamentando-se na utilização de séries temporais posicionais e de dados adicionais, como as cotas linimétricas. Em alguns casos, aplica-se as séries de componentes verticais para a validação das deformações crustais originadas pela carga hidrológica e inferidas do GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*) ou dos modelos de armazenamento continental de água, como se pode observar em Davis et al. (2004), Tregoning et al. (2009), Moreira (2010), Chamoli, Lowry e Jeppson (2014), Fu et al. (2015), Zou et al. (2015), Rossi, Zuliani e Fabris (2016), Chanard et al. (2018), Knowles, Bennett e Harig (2020). Assim sendo, destaca-se que se utilizou na pesquisa corrente dados linimétricos referentes ao Porto de Manaus.

Van Dam et al. (2001) utilizaram os deslocamentos verticais mensais estimados na modelagem para a carga de armazenamento terrestre de água (neve, água do solo e águas subterrâneas) em conjunto com os deslocamentos verticais superficiais de 147 estações GPS distribuídas globalmente e concluíram que a carga continental de água pode causar deslocamentos verticais de 15 mm ou mais em grandes regiões do globo, com deslocamentos de até 30 mm em algumas regiões específicas. As séries temporais utilizadas compreenderam o período entre 1994 e 1998, onde empregou-se a estação RBMC de Brasília (BRAZ) para a região do Brasil.

Romagnoli et al. (2003) avaliam a influência dos efeitos da consolidação do solo¹ e expansão térmica nas variações de altura (e gravidade) utilizando séries temporais de componentes verticais com soluções diárias para o período de julho de 1996 a setembro de 2001, para uma região da Itália. Nessa pesquisa, verificaram que as séries de componentes verticais apresentam uma oscilação sazonal da ordem de 18 mm, considerando na análise as variações na massa atmosférica, oceânica e hidrológica. No entanto, ressaltam que fatores como a consolidação do solo e a expansão térmica do marco geodésico devem ser levados em consideração no caso de posicionamento vertical de alta precisão, pois uma redução de 1 m ou 2 m do lençol freático induz um assentamento do solo de 4 mm e 7 mm, respectivamente. Uma variação de 0,7 mm foi obtida referente à expansão térmica do pilar da estação, considerando uma variação de 7°C a 8°C na temperatura.

Bevis et al. (2005) analisam as flutuações sazonais na massa d'água do sistema do rio Amazonas e sua influência na resposta elástica da Terra. Nesse sentido, verificaram que a estação GPS em Manaus – MANA (atual estação GNSS NAUS) – manifesta um ciclo anual de deslocamento vertical com uma amplitude de 50 a 75 mm, pico a pico, sendo de duas a três vezes maior que a amplitude prevista para essa região. Salientam que o deslocamento vertical do solo é fortemente anticorrelacionado com as variações temporais de cotas linimétricas, porém sem defasagem detectável entre as duas séries temporais. À época observaram, pela primeira vez, uma resposta puramente elástica às mudanças no peso de um sistema fluvial. As séries temporais utilizadas abarcaram o período entre 1994 e 2002.

Costa, Matos e Blitzkow, (2012) utilizam dados linimétricos e séries temporais de componentes verticais para a validação da avaliação do acúmulo de água no subsolo da bacia amazônica pelo GRACE. Nesta pesquisa foram utilizadas 24 estações da RBMC, onde as séries temporais posicionais referentes às estações NAUS (Manaus - AM) e BRAZ (Brasília-DF) apresentaram a mesma amplitude anual já destacada por Bevis et al. (2005) e Van Dam et al. (2001) nas séries temporais de componentes verticais. As séries temporais utilizadas abrangeram o período entre 2007 e 2010.

Fu et al. (2013) avaliam os movimentos horizontais de estações GNSS em resposta ao carregamento sazonal de água da chuva na bacia amazônica utilizando séries temporais posicionais determinadas por GPS e inferidas pelo GRACE. Concluíram que as estações localizadas a oeste e leste da zona de carga apresentam boa correlação na direção leste e fraca

¹ A consolidação do solo é um processo físico dependente do tempo, que envolve uma redução do índice de vazios sob condições de carregamento ou aumento das pressões efetivas. Estes produzem a expulsão da água dos poros, o que leva ao assentamento do solo.

na direção norte entre as duas técnicas utilizadas. Isso ocorre porque seus movimentos sazonais horizontais são principalmente na direção leste-oeste. Para as estações no lado sul da carga, as correlações na componente norte são muito melhores do que os da componente leste. Destaca-se que a estação POVE (Porto Velho - RO) foi a única estação utilizada localizada na Amazônia brasileira. O período utilizado nas séries temporais variou entre 2008 e 2013.

Moreira et al. (2016) avaliam as respostas elásticas, observadas e modeladas, da crosta para os efeitos da carga hidrológica na bacia amazônica. Nesse caso, foram comparadas séries temporais de componente vertical mensal de 18 estações da RBMC, localizadas na bacia amazônica, com as deformações derivadas de observações do GRACE e de um modelo hidrológico global. Verificou-se que as séries temporais de componentes verticais apresentaram os maiores desvios já registrados ocasionados pela carga hidrológica em duas estações localizadas no centro da bacia. O período abarcado nas séries temporais utilizadas compreendeu o intervalo entre 2006 e 2014 para estação NAUS.

Nascimento (2016) avaliou a influência da carga hidrológica na altitude geométrica utilizando dados linimétricos e altitudes geométricas das estações NAUS e SAGA (São Gabriel da Cachoeira – AM) da RBMC. Nesse caso, a amplitude pico a pico encontrada atingiu aproximadamente 11 cm para a estação NAUS, com anticorrelações de -92,5% e -61,6% entre as variáveis utilizadas para as duas estações. Giacometti et al. (2017) apresentam um estudo similar, porém para a estação MGIN (Inconfidentes - MG) da RBMC, onde também constataram uma alta anticorrelação entre a altitude geométrica e as cotas linimétricas. Os períodos utilizados nas séries temporais das pesquisas supracitadas foram de 2010 a 2015 e dezembro de 2014 a janeiro de 2016.

Chanard et al. (2018) integram séries temporais derivadas do GRACE e de estações GNSS para propor um modelo global preciso para deslocamentos superficiais horizontais e verticais induzidos pela redistribuição de massa. Foram utilizadas no estudo 689 estações GNSS globalmente distribuídas. Nesse sentido, destacam que a elaboração de um modelo global associado à redistribuição de massa é de grande importância, uma vez que não há nenhum modelo convencional recomendado para corrigir deformações, o que pode contribuir para melhorar as estimativas das velocidades de placas tectônicas e a detecção de sinais de deformação transitória. Ademais, tal modelo pode proporcionar uma melhor compreensão das variações de massa hidrológica em grande escala, auxiliando assim uma modelagem futura precisa da deformação causada pela carga hidrológica em estações GNSS.

Knowles, Bennett e Harig (2020) comparam os deslocamentos verticais medidos por 23 estações GNSS, localizadas na bacia amazônica, com os deslocamentos estimados dos campos

geopotenciais derivados do GRACE. Dessa forma, frisam que uma fração de erro aparente das séries GNSS deriva de sinais de carregamento de massa que não são completamente caracterizados por tendências ou movimentos periódicos sazonais. Adicionalmente, salientam que entre março de 2011 e novembro de 2016 encontrou-se uma deformação contínua média de $1,20 \pm 0,26$ mm/ano e um movimento periódico anual médio de $10,22 \pm 0,57$ mm, considerando um modelo combinado para a bacia amazônica. Assim, evidenciam que um modelo de trajetória padrão para o movimento do local é coerente nos conjuntos de dados e parecem coincidir com vários eventos de enchentes e secas entre 2011 e 2016, o que sugere que a série temporal de coordenadas de GNSS registra deslocamentos impulsionados por oscilações climáticas em grande escala. Porém, neste estudo não foram utilizadas as séries de cotas linimétricas.

Em vista do exposto, pode-se observar que a maioria dos estudos anteriormente citados investigam o efeito da carga hidrológica sob a perspectiva das deformações verticais ocorridas em vários locais do planeta, fundamentando-se, total ou parcialmente, na análise de séries temporais de componentes verticais referentes a estações GNSS. No entanto, devido à característica viscoelástica da Terra, o efeito da carga hidrológica se evidencia como deformações temporais (transitórias) da superfície da Terra e afetam, em maior ou menor grau, todas as componentes posicionais das estações GNSS. Portanto, avaliar as deformações contínuas (velocidades) e periódicas (sazonalidade e ciclo) associadas ao efeito da carga hidrológica nas componentes posicionais é importante, visto que afetam diretamente o posicionamento GNSS de alta precisão e, indiretamente, os produtos derivados deste.

Nesse contexto, pode-se observar que há uma carência de estudos relacionados às deformações contínuas e periódicas associadas ao efeito da carga hidrológica nas componentes posicionais planimétricas para a região central da bacia amazônica situada no Brasil, o que justifica o desenvolvimento de pesquisas desta natureza. Adicionalmente, a análise e modelagem das séries temporais de componentes posicionais das estações GNSS aplicadas neste trabalho podem constituir uma nova proposta para auxiliar o entendimento acerca do comportamento, dos impactos e da propagação de tal efeito de forma geoespacializada.

1.2 Hipóteses

Assim sendo, definem-se como hipóteses deste trabalho:

- i. É importante avaliar e evidenciar a viabilidade e o potencial das soluções SIRGAS2000 fornecidas pelo IBGE-PPP para estudos de deformações fundamentados em análises de séries temporais, uma vez que o SIRGAS2000 é o sistema oficial brasileiro.

- ii. É relevante evidenciar a significância das discrepâncias entre as velocidades derivadas das séries temporais, com e sem tratamento prévio de dados, e as extraídas do modelo de velocidade VEMOS2009, uma vez que o efeito da carga hidrológica afeta, em maior ou menor grau, todas as séries de componentes posicionais de estações GNSS da Amazônia brasileira.
- iii. A aplicação de um procedimento estatístico baseando-se na modelagem proposta por Box e Jenkins em conjunto com a metodologia iterativa desenvolvida por Chen e Liu (1993) é satisfatória para identificação e correção de saltos ocasionados por trocas de antenas e/ou receptores nas séries temporais posicionais.
- iv. Aplicar uma modelagem estatística fundamentada em análise harmônica (análise espectral ou de Fourier) e testes de hipóteses é suficientemente robusta para extrair e avaliar as deformações periódicas definidas pela trajetória das séries posicionais.
- v. É possível avaliar a propagação do comportamento das deformações associadas ao efeito da carga hidrológica em estações GNSS situadas na região de Manaus fundamentando-se nas análises de séries temporais posicionais e de cotas linimétricas e nas defasagens entre elas.

1.3 Objetivo

Avaliar espacialmente a influência do efeito da carga hidrológica nas deformações contínuas e periódicas associadas às estações GNSS localizadas na Amazônia brasileira com aplicação de modelagem e análises de séries temporais.

1.4 Justificativas

A RBMC exerce um papel cada vez mais importante nos trabalhos associados ao posicionamento GNSS, aplicados às diversas áreas e finalidades. Independentemente do método de posicionamento utilizado (absoluto ou relativo), a acurácia das coordenadas finais pode ser influenciada, em maior ou menor grau, por efeitos ocasionados por diversas fontes de erros sistemáticos, em especial as não modeladas, como o de carga hidrológica. Atividades que demandam alta acurácia são mais suscetíveis à influência deste efeito e, portanto, torna-a mais significativa. Portanto, averiguar o comportamento e a influência espaço-temporal do efeito da carga hidrológica nas estações GNSS situadas na Amazônia brasileira é significativa, uma vez que a expressividade da ocorrência deste efeito nessa região se justifica por sua grande concentração hidrológica.

De fato, a bacia amazônica possui a mais extensa rede hidrográfica do globo terrestre, conhecida por sua grande disponibilidade hídrica, o que se dá por uma densa rede de drenagem que entrecorta uma vasta região geográfica com rios, lagos e igarapés de grande variabilidade, tanto na extensão quanto na largura dos rios, bem como no volume de água por eles transportado (MMA, 2006; ANA, 2012).

Devido à inexistência de modelagem, o conhecimento acerca do comportamento e implicações das deformações associadas a este efeito no PPP se tornam importantes, uma vez que pode auxiliar a comunidade de usuários, tanto nos processos decisórios quanto no desenvolvimento de estudos e modelagens voltados à mitigação/eliminação destes efeitos em âmbito regional ou local, o que torna a significância da investigação justificável.

Além disso, cabe evidenciar que os conhecimentos vinculados às deformações relacionadas à carga hidrológica não se restringem apenas aos usuários do PPP, sendo úteis também aos que empregam o método de posicionamento relativo e utilizam as estações da RBMC selecionadas como base (estação de referência). Nesse caso, as evidências apresentadas nesta pesquisa possibilitarão o desenvolvimento de investigações no âmbito das implicações do efeito da carga hidrológica e sua propagação de uma estação base para a estação móvel (*rover*) no posicionamento relativo de alta precisão, bem como no posicionamento relativo em rede.

Como mencionado anteriormente, o efeito da carga hidrológica afeta as séries temporais posicionais estimadas com o PPP e, conseqüentemente, influencia as deformações contínuas e periódicas das estações GNSS. Dessa forma, é importante que se avalie as deformações contínuas sob o prisma das estimativas das velocidades efetuadas a partir das séries temporais posicionais, uma vez que estas podem constituir resultados mais realistas. Nesse sentido, justifica-se que a recomendação dada por SIRGAS (2020), em que especifica que as velocidades sejam estimadas a partir de levantamentos GNSS contínuos ou repetitivos (séries temporais) que cubram um período mínimo de dois anos. Todavia, não evidencia em tal recomendação os critérios e nem a metodologia a ser utilizada para a estimação das velocidades a partir das séries posicionais. Assim sendo, também é relevante avaliar a significância das deformações contínuas estimadas considerando tanto as séries posicionais diretamente (sem tratamento prévio dos dados), quanto suas trajetórias (séries após o tratamento dos dados). Salienta-se que as séries posicionais utilizadas foram referenciadas ao ITRF2014/IGS14.

Contudo, se faz necessário e coerente que se avalie criteriosamente a consistência das séries posicionais associadas às soluções SIRGAS2000 disponibilizadas pelo IBGE-PPP, uma vez que o SIRGAS2000 é legalmente o sistema de referência oficial brasileiro, adotado em diversas atividades de informações geoespaciais (IBGE, 2015; INDE, 2020).

Considerando que no Brasil frequentemente se utiliza a versão 2009 do VEMOS (Modelo de Velocidade para o SIRGAS), denominada VEMOS2009 (DREWES; HEIDBACH, 2012), para a obtenção de velocidades associadas a pontos pertencentes à área de cobertura do SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), é pertinente que também se avalie a significância das discrepâncias determinadas entre as velocidades estimadas com as séries temporais e extraídas do VEMOS2009. Conforme destacam Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016), o método de obtenção das velocidades pode ocasionar impacto centimétrico no PPP, uma vez que estas são aplicadas no procedimento de atualização/redução de coordenadas. Dessa forma, pequenos movimentos na crosta podem ocasionar diferenças significativas em um mesmo levantamento, dependendo da época de realização, degradando assim a qualidade posicionamento.

Adicionalmente, o comportamento das deformações contínuas e periódicas das estações GNSS são dependentes, dentre outros fatores, de sua localização. Estações situadas em pontos de concentração de massa d'água, associados às zonas úmidas e de remanso (SILVA, 2010; ALVES, 2018), por exemplo, estão mais suscetíveis à maior influência do efeito da carga hidrológica. Nesse contexto, as variações das deformações podem ocorrer de forma distinta de um ponto situado em Manaus, pertencente à zona úmida e de remanso ocasionada pela confluência do Rio Negro com o Solimões, para pontos em seu entorno. Diante disso, avaliar o efeito da carga hidrológica em Manaus e sua propagação para pontos circunvizinhos contribuirá tanto para o entendimento desse efeito, quanto para o desenvolvimento de estudos específicos associados às aplicações geodésicas, geofísicas e hidrológicas.

Por fim, é importante frisar que a avaliação e a análise das deformações contínuas e periódicas associadas às séries temporais posicionais e de cota linimétrica possibilitam investigar a influência da deformação sofrida pela crosta em resposta ao fenômeno de carga hidrológica em diferentes pontos situados na Amazônia brasileira.

Ademais, a execução dos procedimentos estatístico-matemáticos utilizados é implementada a partir de scripts desenvolvidos utilizando o programa R. Este programa é gratuito, de código aberto e consiste em uma ferramenta robusta para tais aplicações, disponibilizado gratuitamente por R Core Team (2020), propiciando um excelente ambiente para análises e modelagem de dados com recursos de alta qualidade. Outrossim, todos os serviços e dados utilizados nesta pesquisa são disponibilizados de forma gratuita pelas instituições que os produzem e mantem em suas páginas eletrônicas, não acarretando custos ao desenvolvimento das investigações aqui propostas.

1.5 Estruturação do trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos, incluindo o Capítulo 1 – Introdução geral, já apresentado.

O Capítulo 2 aborda uma análise da consistência (alinhamento e a similaridade) entre as soluções ITRF2014 e SIRGAS2000, época de coleta dos dados, de forma a possibilitar a definição cuidadosa e adequada do referencial das séries posicionais vinculadas à investigação do efeito da carga hidrológica.

O Capítulo 3 apresenta uma análise sobre o efeito da carga hidrológica e sua influência no deslocamento e na determinação de velocidades de estações GNSS situadas na bacia amazônica brasileira, fundamentando-se na determinação das amplitudes e estimativas de deformações contínuas.

O Capítulo 4 retrata a avaliação das deformações contínuas e periódicas associadas ao efeito da carga hidrológica nas estações GNSS localizadas na Amazônia brasileira sob a perspectiva da abordagem estatística da análise espectral e modelagem de série temporal.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais obtidas a partir dos três estudos propostos nessa pesquisa, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

Referências

AFIFI, A.; EL-RABBANY, A. Single frequency precise point positioning using GPS and galileo observables. In: XXV FIG CONGRESS 2014, Kuala Lumpur. **Anais eletrônicos...** Kuala Lumpur: FIG, 2014. p. 2-10. Disponível em: https://www.fig.net/resources/proceedings/fig_proceedings/fig2014/papers/ts03b/TS03B_afifi_el-rabbany_7286.pdf. Acesso em: 27 de out. 2019.

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

ALGHAMDI, T.; ELGAZZAR, K.; BAYOUMI, M.; SHARAF, T.; SHAH, S. Forecasting Traffic Congestion Using ARIMA Modeling. 2019. **15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)**. DOI: 10.1109/iwcmc.2019.8766698.

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

ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, v. 121, n. 8, p. 6109-6131, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.

ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica**. 76 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

AMBROSINO, F.; THINOVA, L.; BRIESTENSKÝ, M.; SABBARESE, C. Anomalies identification of Earth's rotation rate time series (2012–2017) for possible correlation with strong earthquakes occurrence. **Geodesy and Geodynamics**, v. 10, n. 6, p. 455-459, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2019.06.002>.

ANA (2012). Agência Nacional de Águas. Plano estratégico de recursos hídricos dos afluentes da margem direita do Rio Amazonas. Relatório Síntese. Brasília, DF: ANA, 2012. 437 P. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2013/planoEstrategicoDeRecursos.pdf>. Acesso em: 05 de nov. 2019.

ANSHAH, S. A.; AHMAD, A.; AMIN, Z. M. ARIMA model time-series forecasting for structural monitoring using RTK-GPS. In: **7th International Symposium & Exhibition on Geoinformation** (ISG 2008), 13-15 October 2008, Putra World Trade Centre (PWTC), Kuala Lumpur, Malaysia.

AZAMBUJA, J. L. F. **Potencialidades de serviços on-line de posicionamento por ponto preciso em aplicações geodésicas: uma análise envolvendo longo período de dados das estações da RBMC**. 2015. 102 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Porto Alegre, RS, 2015.

BEIDOU (2020). Centro de informação e análise para tempo de coordenação e suporte de navegação: Composição e condição do sistema BEIDOU. Disponível em: < <https://www.glonass-iac.ru/BEIDOU/index.php> >. Acesso em: 15 de jan. de 2020.

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

BENVENUTO, D.; GIOVANETTI, M.; VASSALLO, L.; ANGELETTI, S.; CICOZZI, M. Application of the ARIMA model on the COVID-2019 epidemic dataset. **Data in Brief**, v. 29, 105340, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105340>.

BEVIS, M.; ALSDORF, D.; KENDRICK, E.; FORTES, L. P.; FORSBERG, B.; SMALLEY JUNIOR, R.; BECKER, J. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophys. Res. Lett.** Berlin, DD, v. 32, n. 16, p. 4. aug. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023491>.

BEVIS, M.; BEDFORD, J.; CACCAMISE, II D. J. The Art and Science of Trajectory Modelling. In: Montillet JP., Bos M. (eds) **Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences**. Springer Geophysics. Springer, Cham. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21718-1_1.

BLICK, G.; CROOK, C.; DONNELLY, N.; FRASER, R.; LILJE, M.; MARTIN, D.; RIZOS, C.; ROMAN, D. R.; SARIB, R.; SOLER, T.; STANAWAY, R.; WESTON, N. D. **Reference Frames in Practice Manual**. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen - DENMARK, 2014.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008, 768 p.

BRUNI, S.; ZERBINI, S.; RAICICH, F.; ERRICO, M.; SANTI, E. Detecting discontinuities in GNSS coordinate time series with STARS: case study, the Bologna and Medicina GPS sites. *J Geod*, n. 88, p. 1203–1214, 2014. DOI: 10.1007/s00190-014-0754-4.

CHAMOLI, A.; LOWRY, A. R.; JEPPSON, T. N. Implications of transiente deformation in the northern Basin and range, western United States. **J. Geophys. Res. Solid. Earth**, Hoboken, NJ, v. 119, n. 5 p. 4393–4413. 5 may. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013JB010605>.

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

CHEN, C.; LIU, L. M. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series. **Journal of the American Statistical Association**. São Paulo, SP, v. 88, n. 421, 1993. p. 284–297. Disponível em: <https://www.istat.it/it/files/2014/06/Joint-Estimation-of-Model-Parameters-and-Outlier-Effects-in-Time-Series.pdf>. Acesso em: 04 de nov. 2019.

CHEN, K.; GAO, Y. Real-time precise point positioning using single frequency data. In: PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2005), Long Beach, **Anais eletrônicos...** Manassas: ION Publications, 2005, p. 1514-1523. Disponível em: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=6350>. Acesso em: out. 2020.

CHOY, S. L. **Accuracy of single frequency Precise Point Positioning (PPP)**. 2009. 267 p. Thesis (Doctor of Philosophy) - School of Mathematical and Geospatial Sciences. College of Science, Engineering and Health. Melbourne, AUS, 2009.

CHOY, S. L.; BISNATH, S.; RIZOS, C. Uncovering common misconceptions in GNSS precise point positioning and its future prospect. **GPS Solutions**. Heidelberg, BE, p. 1-10, 21 may. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>.

COSTA, S. M. A.; DA SILVA, A. L.; JÚNIOR, N. J. M.; DE ALMEIDA LIMA, M. A. O sucesso de três anos do serviço IBGE-PPP. **UD y la Geomática**, Bogotá, COL, v. 6, n. 1, p. 79–88, diciembre 2012. Disponível em: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/UDGeo/article/view/4413>. Acesso em: 28 de out. 2019.

COSTA, S. M. A.; MANTOVANI, G.; SCOFANO, F.; LIMA, M. A. A.; SILVA, A. L.; MOURA JÚNIOR, N. J. Ampliação e modernização da RBMC. **VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO**, Recife, PE, p. 440-450. 2018. Disponível em: <https://www.ufpe.br/documents/39451/1384233/Anais+do+VII+SIMGEO/2ff23c73-935d-4418-8728-feb24630f34>. Acesso em: 01 de nov. 2019.

COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. *Bol. Ciênc. Geod.* Curitiba, PR, v. 18, n. 2, p. 262-281, abr-jun, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702012000200006>.

DACH, R.; BÖHM, J.; LUTZ, S.; STEIGENBERGER, P.; BEUTLER, G. Evaluation of the

impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis. **Journal of Geodesy**. Heidelberg, BL, v. 85, ed. 2, feb, p. 75-91, 2010. DOI: 10.1007/s00190-010-0417-z.

DACH, R.; LUTZ, S.; WALSER, P.; FRIDEZ, P. Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, **Astronomical Institute**, University of Bern, Bern Open Publishing, 2015. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.

DAVIS, J. L.; ELO´SEGUI, P.; MITROVICA, J. X.; TAMISIEA; M. E. Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L24605, 2004. DOI: 10.1029/2004GL021435.

DREWES, H.; HEIDBACH, O. The 2009 horizontal velocity field for South America and the Caribbean. **Geodesy for Planet Earth**, Heidelberg, BL, v. 136, p. 657-664, jul. 2012. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-20338-1_81.

ESA (2020). European Space Agency. Galileo. Disponível em: <http://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo/What_is_Galileo>. Acesso em: 15 de jan. de 2020.

FRITSCHÉ, M.; DÖLL, P.; DIETRICH, R. Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth's crust from continental watermass and atmospheric pressure variations using GPS. *Journal of Geodynamics*. Elsevier, NY, v. 59, n. 60, p. 133-142, 2012. DOI: <http://10.1016/j.jog.2011.04.001>.

FU, Y.; ARGUS, D. F.; FREYMUELLER, J. T.; HEFLIN, M. B. Horizontal motion in elastic response to seasonal loading of rain water in the Amazon Basin and monsoon water in Southeast Asia observed by GPS and inferred from GRACE. **Geophysical Research Letters**, v. 40, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013GL058093>.

FU, Y.; ARGUS, D. F.; LANDERER, F. W.; WIESE, D. N.; WATKINS, M. M. Terrestrial water storage variations in the western United States estimated from GPS loading deformation. **Gewex News**. Pasadena, CA, v. 25, n. 2, p. 5-7, may. 2015. Disponível em: http://www.gewex.org/gewex-content/files_mf/1432239905May2015.pdf. Acesso em: 02 de nov. 2020.

GAZEAUX, J.; WILLIAMS, S.; KING, M.; BOS, M.; DACH, R.; DEO, M.; MOORE, A. W.; OSTINI, L.; PETRIE, E.; ROGGERO, M.; TEFERLE, F. N.; OLIVARES, G.; WEBB, F. H. Detecting offsets in GPS time series: first results from the Detection of Offsets in GPS Experiment, **J. Geophys. Res. Solid Earth**, n. 118, 2013. DOI:10.1002/jgrb.50152.

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

GIACOMETTI, J. P. S.; ALBARICI, F. L.; TRABANCO, J. L. A.; GUIMARÃES, G. N. Influência da carga hídrica na altitude geométrica da estação RBMC de Inconfidentes/MG. *Revista Brasileira de Geomática*. Curitiba, PR, v. 5, n. 1, 2017. p. 43-61. DOI: 10.3895/rbgeo.v5n1.5425.

GIPSY (2021). GIPSY: GNSS - Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software. Disponível em:<<https://gipsy-oasis.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 06 de fev.

2021.

GRINTER, T.; ROBERTS, C. Precise Point Positioning: Where are we now? In: INTERNATIONAL GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS SOCIETY IGSS SYMPOSIUM. 2011. **Anais Eletrônicos...** Eugene: IG Inside GNSS. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.441.5296&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 02 de nov. 2019.

HÉROUX, P.; KOUBA, J. GPS precise point positioning using IGS orbit products. **Physics and chemistry of the earth part A solid earth and geodesy**. Amsterdã, Países Baixos, v. 26, n. 6-8, p. 573-578, dec. 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1464-1895\(01\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S1464-1895(01)00103-X).

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GPS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more**. Austria: Springer Wien New York, 2008.

HOHENSINN, R.; HÄBERLING, S.; GEIGER, A. Dynamic displacements from high-rate GNSS: Error modeling and vibration detection. **Measurement**, v. 157, 107655, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.107655>.

IBGE (2015). Nota Técnica. Término do Período de Transição para Adoção no Brasil do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua Realização DE 2000,4 (SIRGAS2000). Disponível em: http://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/rpr_01_2015_sirgas2000.pdf. Acesso em: 04 de nov. 2020.

IBGE (2017). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Manual do Usuário. Diretoria de Geociências. Aplicativo Online IBGE-PPP. Coordenação de Geodésia, p. 33, abril 2017. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: 03 de nov. 2019.

IBGE (2020). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS: manual do usuário. Versão Maio de 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: jul. 2020.

IBGE-PPP (2020). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 03 de nov. 2020.

IGS (2020). International GNSS Service. Products. Disponível em: <http://www.igs.org/products>. Acesso em: 03 de nov. 2020.

INDE (2020). Estabelecido em 25 de fevereiro de 2015 o término do período de transição para o SIRGAS2000. 2020. Disponível em: <https://inde.gov.br/Noticias/Detalhe/22>. Acesso em: 28 de out. 2020.

INSIDE GNSS (2020). Now Operational, BeiDou Could Conceal Cybersecurity Threat. Disponível em: <https://insidegnss.com/now-operational-beidou-could-conceal-cybersecurity-threat/>. Acesso em: 28 de jan. 2021.

ITRF (2020) International Terrestrial Reference Frame. Call for participation. Disponível em: http://itrf.ign.fr/doc_ITRF/CFP-ITRF2020.pdf. Acesso em: mai. 2020.

KEDAR, S.; HAJJ, G. A.; WILSON, B. D.; HEFLIN, M. B. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 16, 1829, 2003. DOI:10.1029/2003GL017639.

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

KNOWLES, L. A.; BENNETT, R. A.; HARIG C. Vertical displacements of the Amazon basin from 2 GRACE and GPS. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 125, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JB018105>.

KOUBA, J. A guide to using international GPS service (IGS) products. Canadá, sep. 2015. Disponível em: <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873-A-Guide-to-Using-the-IGS-Products>. Acesso em: 02 de nov. 2019.

KOUBA, J.; HÉROUX, P. GPS precise point positioning using IGS orbit products. Canadá, sep. 2000. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.200.6994&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em: 02 de mai. 2019.

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

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

LI, C.; PENG, H.; HUANG, L. K.; LIU, L. L.; XIE, S. F. Research on Short-term Ionospheric Prediction Combining with EOF and ARIMA Model Over Guangxi Area. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.**, XLII-3/W10, p. 1147–1153, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W10-1147-2020>.

MMA (2006). Ministério do Meio Ambiente. Caderno da Região Hidrográfica Amazônica: Secretaria de Recursos Hídricos. Brasília, p. 124, 2006. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br>. Acesso em: 05 de nov. 2020.

MOHAMMADI, H.; SU, L. International evidence on crude oil price dynamics: Applications of ARIMA-GARCH models. **Energy Economics**, v. 32, n. 5, p. 1001-1008, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2010.04.009>.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. ISBN 978-85-7139-788-0.

MOREIRA, D. M. **Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica**. 2010. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. UFRJ/COPPE, 2010.

MOREIRA, D. M.; CALMANT, S.; PEROSANZ, F.; XAVIER, L.; ROTUNNO FILHO, O. C.; SEYLER, F.; MONTEIRO, A. C. Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin, **Geophys. Res. Lett.**, v. 43, 2016. DOI: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/2016GL070265>.

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

NAJDER, J. Automatic detection of discontinuities in the station position time series of the reprocessed global GNSS network using Bernese GNSS Software. **Acta Geodyn. Geomater.**, v. 17, n. 4, p. 439–451, 2020. DOI: 10.13168/AGG.2020.0032.

NASCIMENTO, L. A. **Influência da carga hidrológica na altitude geométrica a partir de análise de séries temporais estimadas no método PPP**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Viçosa, 2016. 73 p.

NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, 2017. p. 150-165. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702017000100010>.

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

OLIVEIRA, J. R. S. **Uso de informações geodésicas para estudos tectônicos no Pantanal. 59 p. Dissertação** (Mestrado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PETIT, G; LUZUM, B (eds.). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). IERS Technical. Note No. 36. IERS Conventions. Frankfurt am Main, 2010. Disponível em: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Acesso em: 29 de out. 2019.

R Core Team (2020). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 07 de nov. 2020.

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

RAJNER, M.; LIWOSZ, T. Studies of crustal deformation due to hydrological loading on GPS height estimates. **Geodesy and Cartography**, Varsóvia, PI, v. 60, n. 2, p. 135-144, jun. 2012. DOI: 10.2478/v10277-012-0012-y.

RAMOS, M. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas estimadas pelo PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, 2016. p. 389-404. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000300022>.

RBMC (2020). Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>. Acesso em 15 de set. 2020.

REBISCHUNG, P. (2016). [IGSMail-7399] **Upcoming switch to IGS14/igs14.atx**.

Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2016/001233.html>>. Acesso em mar. de 2021.

REBISCHUNG, P.; SCHMID, R. Preparations for the IGS realization of ITRF2014. 2016. Disponível em: <<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7171.pdf>>. Acesso em: mar. 2021.

ROMAGNOLI, C; ZERBINI, S; LAGO, L; RICHTER, B; SIMON, D; DOMENICHINI, F; ELMI, C; GHIROTTI, M. Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. **Journal of Geodynamics**, v. 35. p. 521-539. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7).

ROSA, G. P. S. **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

ROSSI, G.; ZULIANI, D.; FABRIS, P. Long-term GNSS measurements from the northern Adria microplate reveal fault-induced fluid mobilization. **Tectonophysics**, Amsterdam, NED, v. 690, parte A, p. 142-159, 28 out. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.04.031>.

ROTELA JUNIOR, P., SALOMON, F.L.R. PAMPLONA, E. O. (2014) ARIMA: An Applied Time Series Forecasting Model for the Bovespa Stock Index. **Applied Mathematics**, n. 5, p. 3383-3391, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.4236/am.2014.521315>.

SÁNCHEZ, L.; DREWES H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, v. 102, 2016. p. 1-23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.06.005>.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 18, n. 2, 2000. p. 161-172. DOI: <http://www.scielo.br/pdf/rbg/v18n2/8826.pdf>.

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

SETTI JUNIOR, P. T.; ALVES, D. B. M.; SILVA, C. M. KLOBUCHAR AND NEQUICK G IONOSPHERIC MODELS COMPARISON FOR MULTI-GNSS SINGLE-FREQUENCY CODE POINT POSITIONING IN THE BRAZILIAN REGION. **Bol. Ciênc. Geod.**, Curitiba, v. 25, n. 3, e2019016, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702019000300016>.

SILVA. J. S. **Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia amazônica**. 279 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SIRGAS (2020). SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS. VEMOS: Modelo de velocidade para o SIRGAS. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/>>. Acesso em: 19 de mai. 2020.

SU, K.; JIN, S.; HOQUE, M. M. Evaluation of Ionospheric Delay Effects on Multi-GNSS Positioning Performance. *Remote Sens.*, v. 11, n. 171, 2019. DOI:10.3390/rs11020171.

TIRYAKIOGLU, I.; YIGIT, C. O.; YAVASOGLU, H.; SAKA, M. H.; ALKAN, R. M. The Determination of Interseismic, Coseismic and Postseismic Deformations Caused by the Gökçeada-Samothraki Earthquake (2014, Mw 6.9) Based on GNSS Data, **Journal of African Earth Sciences**, 2017. DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2017.05.012

TREGONING, P.; WATSON, C.; RAMILLIEN, G.; MCQUEEN, H.; ZHANG, J. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS. **Geophysical Research Letters**, Berlin, DD, v. 36, n. 15, p. 6, aug. 2009. DOI: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009GL038718/full>.

URQUHART, L. Atmospheric Pressure Loading and its Effects on Precise Point Positioning. In: PROCEEDINGS OF THE 22ND INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING OF THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (ION GNSS 2009), Savannah. **Anais Eletrônicos...** Manassas: ION Publications, 2009, p. 658-667. Disponível em: <https://www.ion.org/publications/abstract.cfm?articleID=8470>. Acesso em: nov. 2020.

VAN DAM, T.; WAHR, J.; MILLY, P. C. D.; SHMAKIN, A. B.; BLEWITT, G.; LAVALLÉE, D.; LARSON, K. M. Crustal displacements due to continental water loading. **Geophysical Research Letters**, Berlin, DD, v. 28, n. 4, p. 651-654, feb. 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GL012120>.

WITCHAYANGKOON, B. **Elements of GPS precise point positioning**. 286 p. Thesis (Doctor of philosophy) - University of Maine, Orono, ME, 2000.

XIN, J.; ZHOU, J.; YANG, S.X.; LI, X.; WANG, Y. Bridge Structure Deformation Prediction Based on GNSS Data Using Kalman-ARIMA-GARCH Model. **Sensors**, v. 18, n. 1, p. 298, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18010298>.

XU, GUOCHANG. **GPS: theory, algorithms and applications**. 2 ed, Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.

ZOU, R.; WANG, Q.; FREYMUELLER, J. T.; POUTANEN, M.; CAO, X.; ZHANG, C.; YANG, S.; HE, P. Seasonal hydrological loading in southern tibet detected by joint analysis of GPS and GRACE. **Sensors, Sitzerland**, BL, v. 15, n. 12, p. 30525–30538, dec. 2015. DOI: 10.3390/s151229815.

ZUMBERGE, J. F.; HEFTIN, M. B.; JEFFERSON, D.C.; WATKINS, M. M.; WEBB, F. H. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, Hoboken, NJ, v. 102, n. B3, p. 5005-5017, mar. 1997. DOI: <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.

2 AVALIAÇÃO DOS NOVOS PARÂMETROS DE TRANSFORMAÇÃO ENTRE ITRF E SIRGAS2000 NO IBGE-PPP COM ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Resumo: O IBGE-PPP, serviço de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) online, estima coordenadas originalmente referenciadas às realizações IGSyy /IGbyy e então as compatibiliza para o SIRGAS2000 com a aplicação da transformação de Helmert e seus respectivos parâmetros de transformação. Em 17 de maio de 2020 o IBGE-PPP passou a utilizar um novo conjunto de parâmetros (P2), descontinuando o conjunto antigo (P1). Nesse contexto, este trabalho se propõe a avaliar os impactos dos novos parâmetros na compatibilização entre redes e atualização temporal de coordenadas utilizados pelo IBGE-PPP, fundamentando-se em análise de séries temporais de dados das estações NAUS e AMCO. Inicialmente efetuou-se a compatibilização entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD conforme metodologia aplicada pelo IBGE-PPP utilizando P1 e P2. Em seguida, as séries foram atualizadas temporalmente para SIRGAS2000-ER e, em conjunto com as coordenadas obtidas nos descritivos das estações utilizadas, também em SIRGAS2000-ER, determinou-se as discrepâncias planimétrica e altimétrica. Por fim, compatibilizaram-se as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD das séries temporais para o IGS14-ECD e deste para o SIRGAS2000-ECD utilizando P1 e P2. Analisando as séries temporais SIRGAS2000-ECD compatibilizadas com P1 (SCP1) e P2 (SCP2) para as duas estações, observou-se que as séries de componente norte (Δn) SCP1 apresentaram mudanças de nível (diferenças) de aproximadamente $\pm 0,017$ m e $-0,013$ m em relação a SCP2, nos períodos referentes às materializações do IGS05 e IGS14. As séries das componentes leste (Δe) e vertical (Δu) SCP1 também apresentaram diferenças quando comparadas à SCP2, porém com magnitudes entre 0,001 m e 0,006m e 0,004 m e 0,012 m, respectivamente. Considerando os conjuntos de parâmetros de transformação entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD, pôde-se observar que as séries SCP2 apresentaram resultados mais consistentes quando comparadas às séries SCP1, diminuindo os impactos causados pelas trocas de referenciais ocorridas ao longo do tempo. Ademais, as séries SCP2 foram compatíveis com as séries referenciadas ao IGS14-ECD ao nível menor ou igual a 0,002 m. Portanto, observa-se que tanto as séries posicionais referenciadas ao IGS14-ECD quanto às séries SCP2 podem ser aplicadas nas investigações associadas a deformações (contínuas e periódicas) oriundas dos efeitos de fenômenos específicos, como o de carga hidrológica.

Palavras-chave: IBGE-PPP. Geodésia. Helmert. Séries temporais. Parâmetros de transformação.

Abstract: IBGE-PPP, the Precise Point Positioning (PPP) online service, estimates coordinates originally referenced to the IGSy/IGby achievements and then makes them compatible for SIRGAS2000 with the application of the Helmert transformation and its respective transformation parameters. On May 17, 2020, IBGE-PPP started using a new set of parameters (P2), discontinuing the old set (P1). In this context, this work proposes to evaluate the impacts of the new parameters on compatibility between networks and temporal update of coordinates used by IBGE-PPP, based on the analysis of time series of data from NAUS and AMCO stations. Initially, the compatibility between the IGSy-ECD/IGby-ECD and SIRGAS2000-ECD networks was carried out according to the methodology applied by IBGE-PPP using P1 and P2. Then, the series was updated temporarily for SIRGAS2000-ER and, together with the coordinates obtained in the descriptions of the stations used, also in SIRGAS2000-ER, the planimetric and altimetric discrepancies were determined. Finally, the IGSy-ECD/IGby-ECD networks of the time series were made compatible for the IGS14-ECD and this one for the SIRGAS2000-ECD using P1 and P2. Analyzing the time series SIRGAS2000-ECD compatible with P1 (SCP1) and P2 (SCP2) for the two stations, it was observed that the series of north component (Δn) SCP1 showed changes in level (differences) of approximately ± 0.017 m and -0.013 m in relation to SCP2, in the periods referring to the materialization of IGS05 and IGS14. The series of the eastern (Δe) and vertical (Δu) SCP1 components also showed differences when compared to SCP2, but with magnitudes between 0.001 m and 0.006 m and 0.004 m and 0.012 m, respectively. Considering the sets of transformation parameters between the IGSy-ECD/IGby-ECD and SIRGAS2000-ECD networks, it was observed that the SCP2 series presented more consistent results when compared to the SCP1 series, reducing the impacts caused by the exchange of references that occurred over time. In addition, the SCP2 series were compatible with the series referenced to the IGS14-ECD at a level less than or equal to 0.002 m. Therefore, it is observed that both the positional series referenced to the IGS14-ECD and the SCP2 series can be applied in investigations associated with deformations (continuous and periodic) arising from the effects of specific phenomena, such as the hydrological load.

Keywords: IBGE-PPP. Geodesy. Helmert. Time series. Transformation parameters.

2.1 Introdução

A tecnologia GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) tem sido amplamente empregada para finalidades distintas, tais como: monitoramento estrutural, determinação de deslocamentos e deformações de placas tectônicas, apoio para mapeamento, georreferenciamento de imóveis rurais, etc. Dentre as alternativas de métodos de posicionamento GNSS disponíveis pode-se evidenciar o Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). Seu destaque em relação aos demais métodos se dá, dentre outros fatores, pela disponibilidade e gratuidade de serviços de PPP online, praticidade, alta acurácia (centimétrica), independência de estações de referência, apenas como entrada de dados arquivo RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*) das observações etc. (GHODDOUSI-FARD; DARE, 2006; MOREIRA, 2010; GRINTER; ROBERTS, 2011).

Diante dos principais serviços de PPP online disponibilizados encontra-se o IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - PPP). Este serviço consiste em uma adaptação do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System - PPP*) para uso no Brasil e fornece aos usuários resultados acurados tanto na realização do ITRS (*International Terrestrial Reference System*) efetuada pelo IGS (*International GNSS Service*) quanto no SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas 2000), referencial geodésico oficial brasileiro (RAMOS; DAL POZ; CARVALHO, 2016; IBGE, 2020). Salienta-se que as realizações do ITRS efetuadas pelo IGS são denominadas IGS_{yy} e sua atualização IG_{byy} – yy refere-se aos dois últimos dígitos do ano relativo ao ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) a que se baseiam – e são equivalentes às realizações do ITRF ao nível global, no sentido de que compartilham a mesma origem, escala e orientação (BLICK et al., 2014; REBISCHUNG; SCHMID, 2016).

Originalmente as coordenadas estimadas no IBGE-PPP são referenciadas à realização IGS_{yy}/IG_{byy} vigente nas órbitas dos satélites na época de coleta dos dados. Dessa forma, para referenciar tais coordenadas ao SIRGAS2000, é necessário efetuar a compatibilização das redes aplicando-se a transformação de Helmert, com seus respectivos parâmetros de transformação (SAPUCCI; MONICO, 2001; CARVALHO, 2015). Destaca-se que o conjunto de parâmetros utilizados pelo IBGE-PPP são determinados pelo próprio IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), estimados através de coordenadas de estações GNSS permanentes localizadas no continente Sul-Americano e presentes nas realizações SIRGAS (IBGE, 2020). Caso a compatibilização ocorra entre as realizações IGS_{yy}/IG_{byy}, aplica-se à transformação de Helmert os conjuntos de parâmetros disponibilizados em Petit e Luzum (2010), Altamimi,

Collilieux e Métivier (2012), Altamimi et. al. (2016), ITRF (2021). Diversos estudos associados à compatibilização entre redes e a atualização temporal de coordenadas utilizam com frequência a transformação de Helmert com os conjuntos de parâmetros citados dentre estes: Carvalho, Dal Poz e Larocca (2015), Carvalho (2015); Braga e Dal Poz (2017), Braga e Dal Poz (2019), etc. Além dos parâmetros anteriores, Carvalho et. Al. (2015) e Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) utilizam os parâmetros próprios do IBGE nos procedimentos supracitados.

IBGE-PPP (2020) destaca que a partir de 17 de maio de 2020 passou a utilizar um novo conjunto de parâmetros de transformação entre as realizações IGSyy/IGbyy e o SIRGAS2000, o que acarretou alterações nas coordenadas, quando comparadas às determinadas com o conjunto de parâmetros utilizados anteriormente a esta data. Portanto, se mostra importante avaliar as variações ocorridas nas posições de pontos específicos, estimadas com ambos os conjuntos de parâmetros utilizados no IBGE-PPP, uma vez que estas podem degradar a acurácia dos levantamentos geodésicos de alta precisão e/ou a produtos geodésicos destes derivados, como as séries posicionais utilizadas em investigações de deformações (contínuas e periódicas) associadas, por exemplo, ao efeito da carga hidrológica. Ademais, averiguar o alinhamento e similaridade entre as soluções referenciadas às realizações IGS e ao SIRGAS2000 contribuirá para uma definição adequada do referencial aplicável às séries posicionais vinculadas à investigação do efeito da carga hidrológica, uma vez que podem interferir nos resultados.

Nesse contexto, propõe-se neste trabalho avaliar os impactos dos novos parâmetros entre as realizações IGSyy/IGbyy e SIRGAS2000 utilizados pelo IBGE-PPP na compatibilização de redes e atualização temporal de coordenadas, fundamentando-se em análise de séries temporais, de forma a fundamentar a especificação da realização mais adequada a ser utilizada nas séries posicionais destinadas à investigação do efeito da carga hidrológica.

2.2 Séries temporais posicionais

Um conjunto de valores de posições (coordenadas) associadas a uma materialização de referência e ordenadas no tempo define uma série temporal posicional. Nesse sentido, variadas metodologias podem ser utilizadas para construí-las ou obtê-las. Dentre tais metodologias, destacaremos a implementada por Nascimento et al. (2017) no programa computacional denominado RINEX EDITION. Tal programa viabiliza a construção de séries temporais de informações posicionais (coordenadas cartesianas X , Y , Z ; elipsoidais φ , λ , h e as precisões de ambas) a partir de dados GNSS das estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) (RBMC, 2020; COSTA et al., 2018) em conjunto com o serviço

online IBGE-PPP (IBGE-PPP, 2020). Caso necessário, é possível editar os arquivos RINEX de forma automatizada utilizando o TEQC (*Translation, Editing and Quality Check*) (ESTEY; MEERTENS, 1999; UNAVCO, 2020).

Como mencionado no Capítulo 1 desta pesquisa, o IBGE-PPP é uma adaptação do CSRS-PPP (NRCAN, 2020) (versão 1.05/11216 atualizada) para uso no Brasil e fornece resultados acurados tanto na realização do ITRS efetuada pelo IGS referente à época de coleta dos dados – **IGSyy-ECD/IGbyy-ECD** – (atualmente IGb14, compatível e alinhado com o ITRF2014) quanto no SIRGAS2000. Neste último, as coordenadas são disponibilizadas tanto na época de coleta dos dados – **SIRGAS2000-ECD** – quanto na época de sua realização – **SIRGAS2000-ER – 2000,4** (IBGE, 2017; IBGE, 2020). Ressalta-se que o SIRGAS2000 é o referencial geodésico nacional moderno brasileiro adotado para as atividades que demandam informações geoespaciais (IBGE, 2015; INDE, 2020).

Originalmente, as coordenadas estimadas no IBGE-PPP estão referenciadas à realização IGSyy-ECD/IGbyy-ECD vigente nas órbitas dos satélites para a época do rastreamento, como se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1 – Realizações IGS adotadas pelo IBGE-PPP.

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

Fonte: IBGE (2017) e IBGE (2020).

O IGSyy e suas atualizações IGbyy fundamentam-se na realização do ITRF e são atreladas ao ano relativo ao ITRF no qual se baseia, sendo equivalentes ao nível global. Dessa forma, tem-se que o IGS05 e o ITRF2005 são compatíveis e alinhados (IGSACC, 2020), assim como o IGS08 e sua atualização IGb08 são compatíveis e alinhados ao ITRF2008 (WESTON; SOLER, 2012; IGSACC, 2020) e, de forma análoga, o IGS14 e sua atualização IGb14 são compatíveis e alinhados ao ITRF2014 (REBISCHUNG, 2020a; REBISCHUNG, 2020b). Adicionalmente, evidencia-se que o ITRF2014 é a realização mais atual e consistente do ITRS (ALTAMIMI et al., 2016). Contudo, encontra-se em desenvolvimento atualmente o ITRF2020 (ITRF, 2020).

A compatibilização entre as redes IGSyy /IGbyy é efetuada aplicando-se a transformação de Helmert com os parâmetros de transformação disponibilizados por Petit e Luzum (2010), Altamimi, Collilieux e Métivier (2012) e Altamimi et. al. (2016) e suas respectivas variações temporais. Inicialmente atualizam-se os parâmetros de transformação de sua época de

determinação (t_k) para a época (t_o) referente as coordenadas na rede de referência de origem (o) conforme Eq. (1) (SAPUCCI; MONICO, 2001; PETIT; LUZUM, 2010; CARVALHO, 2015):

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

em que \vec{P}_{t_o} é o vetor dos parâmetros de transformação na época das coordenadas na rede de referência de origem; \vec{P}_{t_k} é o vetor dos parâmetros de transformação na época de sua determinação; \vec{P}_{t_k} é o vetor das taxas de variação dos parâmetros na época de sua determinação; \dot{T}_X , \dot{T}_Y , \dot{T}_Z , \dot{D} , \dot{R}_X , \dot{R}_Y e \dot{R}_Z correspondem as taxas de variação anual dos parâmetros anteriormente descritos.

Posteriormente, os parâmetros atualizados são aplicados ao modelo matemático descrito na Eq. (2) para a compatibilização entre as redes de origem e destino. Importa ressaltar que tanto os parâmetros quanto as coordenadas consideradas nas redes devem estar em uma mesma época t_o (PETIT; LUZUM, 2010):

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

Adicionalmente, destaca-se que as coordenadas referenciadas às redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD são compatibilizadas para SIRGAS2000-ECD aplicando-se a transformação de Helmert, com os respectivos parâmetros de transformação (três translações, um fator de escala e três rotações). Como IBGE (2017) e IBGE (2020) não disponibilizam as variações temporais destes parâmetros, não é possível atualiza-los para a época de coleta dos dados e, portanto, aplicam-se diretamente no modelo apresentado na Eq. (2).

Para algumas situações em que as redes de origem e destino envolvam épocas distintas, as coordenadas compatibilizadas para a rede de destino com época (t_o) não são suficientes, justificável pela incompatibilidade entre a época t_o e a época de interesse (t). Nesse caso, as coordenadas podem ter sua atualização temporal da época t_o para uma época t de interesse, utilizando-se a Eq. (3) (CARVALHO, 2015; SIRGAS, 2020):

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t)} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{d(t_o)} + \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}_d (t - t_o), \quad (3)$$

em que $[X, Y, Z]_{d(t)}^T$ são as coordenadas da estação na época e rede de interesse; $[X, Y, Z]_{d(t_o)}^T$ são as coordenadas cartesianas da estação na época de origem e rede de interesse; $[V_X, V_Y, V_Z]_d^T$ são os vetores velocidade do ponto considerado na mesma rede das coordenadas na época t_o .

As componentes de velocidade utilizadas no procedimento supracitado podem ser determinadas com algum modelo de velocidades ou deformações. No Brasil, por estar localizado na região de cobertura do SIRGAS, frequentemente utiliza-se o VEMOS2009 (Modelo de Velocidade para o SIRGAS, versão 2009) (DREWES; HEIDBACH, 2012). Salienta-se que este modelo é utilizado pelo IBGE-PPP para atualização temporal das coordenadas SIRGAS2000-ECD para SIRGAS2000-ER (IBGE, 2020). Xavier, Dal Poz e Nascimento (2021) destacam mesmo o VEMOS2009 sendo um modelo baseado em observações mais antigas, não mostrou perda de desempenho em datas mais recentes quando comparado ao VEMOS2017 (versão mais recente do VEMOS).

Considerando que a interpretação de resultados associados às componentes cartesianas geocêntricas X , Y e Z é complexa, Leick (2004) destaca que tais resultados podem ser mais facilmente interpretados quando associados ao SGL (Sistema Geodésico Local). Além disso, Monico (2008) destaca que o SGL possibilita avaliar as variações locais específicas, ocorridas em X , Y e Z , em termos das componentes horizontais e vertical.

O relacionamento entre as componentes cartesianas geocêntricas X , Y e Z com as componentes norte, leste e vertical $(\Delta n, \Delta e, \Delta u)$ do SGL (Sistema Geodésico Local) é estabelecido por uma transformação específica, em que a origem e a orientação espacial do SGL são dependentes das componentes elipsoidais φ_o (latitude) e λ_o (longitude) do ponto de origem (LEICK, 2004; HOFMANN-WELLENHOF; LICHTENEGGER; WASLE, 2008). No caso das séries temporais o ponto de origem coincide com as componentes elipsoidais médias, ou seja, $(\varphi_o, \lambda_o) = (\bar{\varphi}, \bar{\lambda})$ (SILVA; MONICO, 2012; MACIUK; SZOMBARA, 2018). Nesse contexto, as séries temporais de componentes geodésicas locais $(\Delta n, \Delta e, \Delta u)$ são determinadas com a aplicação da Eq. (4) (LEICK, 2004):

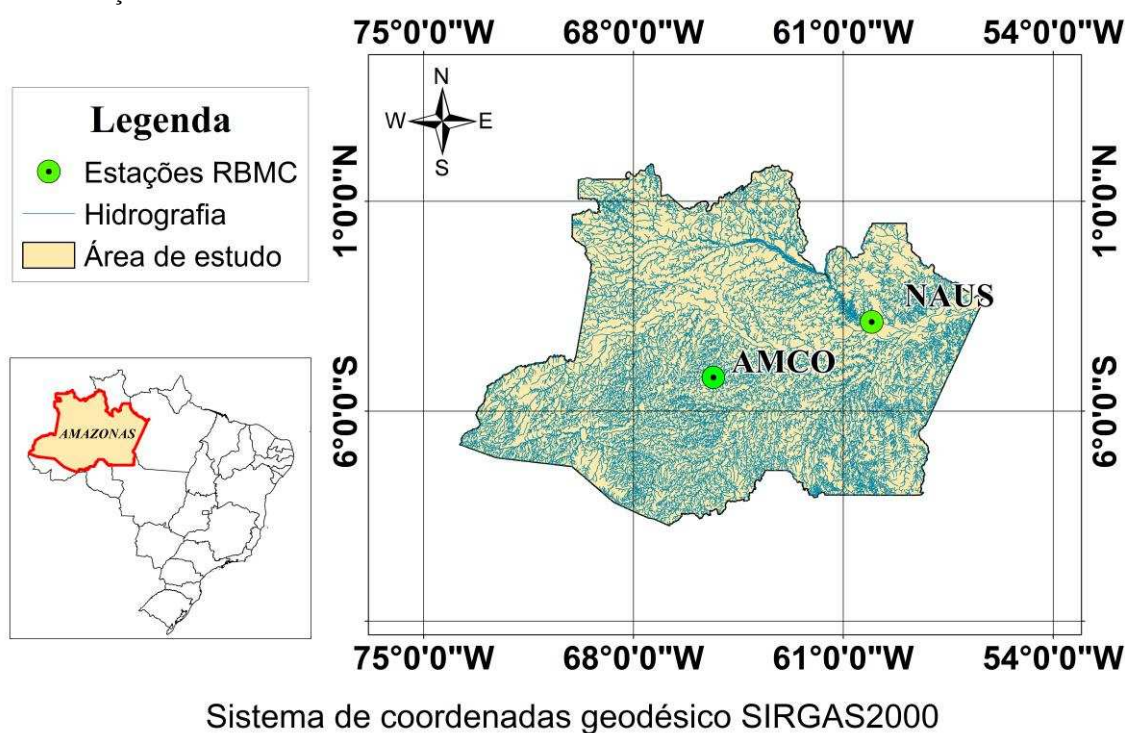
$$\begin{bmatrix} \Delta n_j \\ \Delta e_j \\ \Delta u_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\text{sen}\bar{\varphi}\text{cos}\bar{\lambda} & -\text{sen}\bar{\varphi}\text{sen}\bar{\lambda} & \text{cos}\bar{\varphi} \\ -\text{sen}\bar{\lambda} & \text{cos}\bar{\varphi} & 0 \\ \text{cos}\bar{\varphi}\text{cos}\bar{\lambda} & \text{cos}\bar{\varphi}\text{sen}\bar{\lambda} & \text{sen}\bar{\varphi} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_j - \bar{X} \\ Y_j - \bar{Y} \\ Z_j - \bar{Z} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

em que: $(\Delta n_j, \Delta e_j, \Delta u_j)$ são as componentes geodésicas locais da j -ésima época de interesse; (X_j, Y_j, Z_j) são as componentes cartesianas da j -ésima época de interesse; $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$ são as componentes cartesianas médias das séries temporais consideradas; e, $(\bar{\varphi}, \bar{\lambda})$ são as componentes elipsoidais médias referentes às componentes cartesianas médias das séries temporais consideradas.

2.3 Materiais e métodos

Para a realização dos experimentos foram utilizados dados de duas estações da RBMC, localizadas em Coari – AM (AMCO) e Manaus – AM (NAUS), como mostrado na Figura 1.

Figura 1– Estações da RBMC utilizadas.



Fonte: O autor (2021).

Os períodos considerados para as séries temporais posicionais são apresentados na Tabela 2, com suas respectivas estações.

Tabela 2 – Estações da RBMC utilizadas com os respectivos períodos considerados nas séries posicionais.

Estações RBMC	Município	Data inicial	Data final
AMCO	Coari (AM)	12/09/2012 (DOY n° 256)	31/12/2019 (DOY n° 365)
NAUS	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY n° 001)	

*DOY (*Dia do ano*)

Fonte: O autor (2021).

Após a definição dos períodos considerados, realizou-se a geração das séries temporais posicionais utilizando o RINEX EDITION. Nesse caso, adquiriram-se arquivos de observações

GNSS (GPS e GLONASS) em formato RINEX, com janelas de rastreamento de 24 horas, que foram posteriormente enviados para processamento no IBGE-PPP, em modo estático. Ressalta-se que o IBGE-PPP passou a adotar a integração GPS e GLONASS no processamento a partir de 14 de agosto de 2011 e, portanto, observações referentes a datas anteriores consideram somente a constelação GPS no processamento (IBGE, 2020). Apesar disso, Yigit et al. (2014), Ventorim e Dal Poz (2016) e Alcaay e Yigit (2017) afirmam que a diferença entre os resultados do processamento de dados GNSS e somente GPS não é significativa (milimétrica) para a seção de rastreamento utilizada.

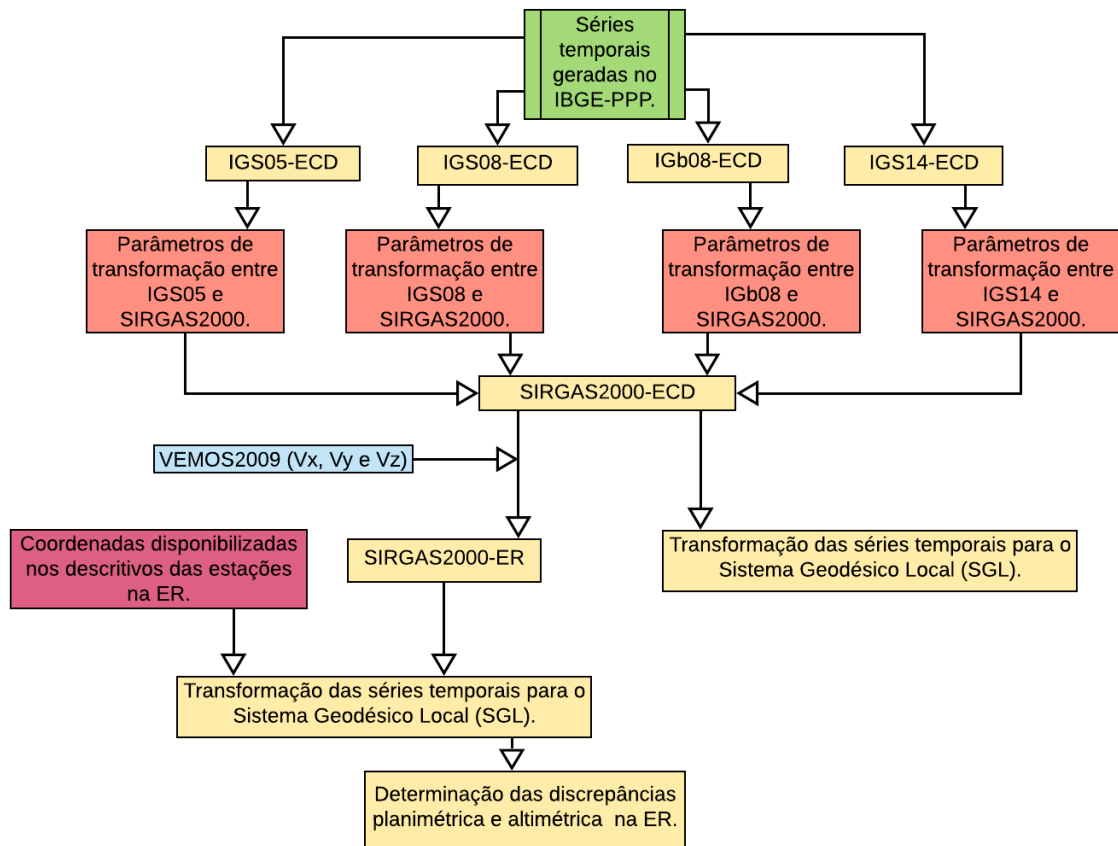
Ademais, o IBGE-PPP apresenta acurácia análoga ao BSW (*Bernese GNSS Software*) (versão 5.2), se consideradas condições similares no processamento (método PPP em modo estático e arquivos GNSS com janela de rastreamento de 24h) (BRAGA; DAL POZ, 2019; OLIVEIRA; DAL POZ; ALMEIDA, 2019). Informações sobre o BSW podem ser consultadas em Fridez (2020).

De posse das séries temporais posicionais, observou-se que estas compreenderam pelo menos três realizações IGSyy-ECD/IGbyy-ECD. Portanto, efetuou-se a compatibilização entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD utilizando quatro estratégias, subdivididos em dois experimentos, descritos na sequência.

2.3.1 Experimento 1

Nesse experimento, a compatibilização entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD foi efetuada seguindo a metodologia aplicada pelo IBGE-PPP (exceto a transformação para o SGL) apresentada na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma metodológico para compatibilização entre as redes IGS_{yy}-ECD/IG_byy-ECD e SIRGAS2000-ECD nas séries temporais.



Fonte: O autor (2021).

Nesta etapa, utilizou-se a transformação de Helmert (Eq. (1)) juntamente com os dois conjuntos de parâmetros de transformação entre as redes IGS_{yy}-ECD/IG_byy-ECD e SIRGAS2000-ECD disponibilizados pelo IBGE. O primeiro conjunto (P1) refere-se aos parâmetros utilizados pelo IBGE-PPP anteriormente a 17 de maio de 2020, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de transformação entre as redes IGS_{yy} /IG_byy e SIRGAS2000, anteriores a 17/05/2020.

Parâmetros	T_x (mm)	T_y (mm)	T_z (mm)	D (ppb)	R_x (mas)	R_y (mas)	R_z (mas)
IGS05 para SIRGAS2000	5,1	6,5	9,9	0,00	-0,150	0,020	0,021
IGS08 para SIRGAS2000	2,5	4,3	4,6	-1,10	0,140	-0,010	0,080
IGb08 para SIRGAS2000	2,0	4,1	3,9	-1,00	0,170	-0,030	0,070
IGS14 para SIRGAS2000	2,6	1,8	-6,1	-0,05	0,308	0,106	-0,096

*mas: milisegundo de arco

Fonte: IBGE (2017).

O segundo conjunto de parâmetros (P2), mostrados na Tabela 4, começaram a ser utilizados pelo IBGE-PPP a partir de 17 de maio de 2020. IBGE-PPP (2020) ressalta que P2 foi instituído no sentido de diminuir os impactos causados pelas trocas de redes ocorridas ao longo do tempo.

Tabela 4 – Parâmetros de transformação entre as redes IGS_{yy}/IG_byy e SIRGAS2000, a partir de 17/05/2020.

Parâmetros	T_X (mm)	T_Y (mm)	T_Z (mm)	D (ppb)	R_X (mas)	R_Y (mas)	R_Z (mas)
IGS05 para SIRGAS2000	-0,8	-3,9	-6,1	-0,18	0,000	0,000	0,000
IGS08 para SIRGAS2000	-3,4	-4,8	-8,6	1,62	0,000	0,000	0,000
IGb08 para SIRGAS2000	-3,4	-5,4	-8,8	1,57	0,000	0,000	0,000
IGS14 para SIRGAS2000	-2,6	-3,2	-4,2	1,22	0,000	0,000	0,000

*mas: milisegundo de arco

Fonte: IBGE (2020).

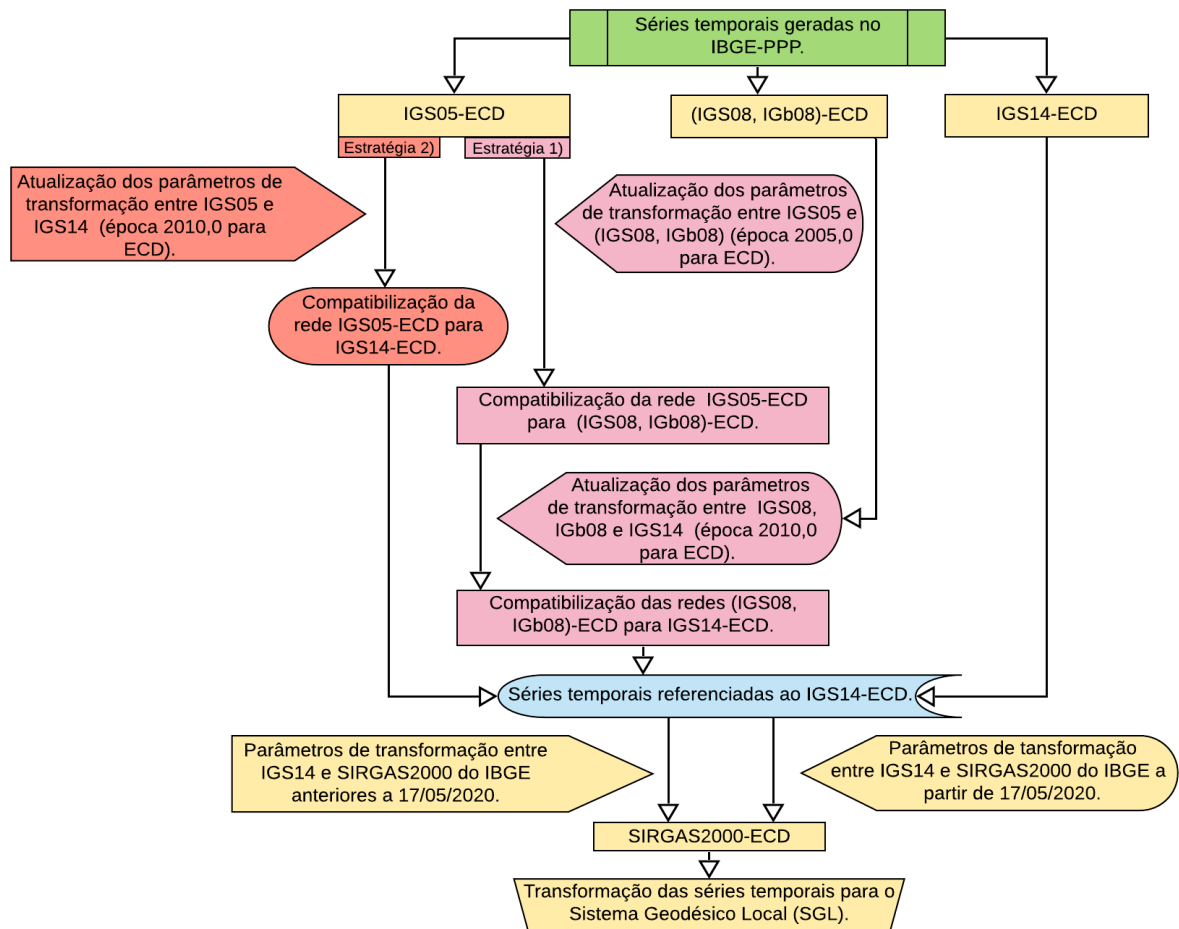
Vale ressaltar que IBGE (2017) e IBGE (2020) não disponibilizam as variações temporais dos parâmetros e, portanto, não há possibilidade de atualiza-los para a época das coordenadas. De forma análoga, institui-se a impossibilidade de compatibilização dos referenciais das velocidades.

Posteriormente, as séries em SIRGAS2000-ECD obtidas com o IBGE-PPP foram transformadas para o SGL aplicando-se a Eq. (4). Adicionalmente, atualizou-se temporalmente tais séries para SIRGAS2000-ER aplicando-se a Eq. (3), utilizando as componentes de velocidades extraídas do VEMOS2009 (DREWES; HEIDBACH, 2012). Na sequência, transformou-se tanto as componentes posicionais das séries SIRGAS2000-ER, quanto as componentes obtidas nos descritivos das estações utilizadas, também em SIRGAS2000-ER, para o SGL conforme Eq. (4). Nesse caso, considerou-se como origem do SGL as coordenadas médias das séries atualizadas temporalmente e dos descritivos, respectivamente. Por fim, determinou-se as discrepâncias planimétrica e altimétrica a partir das componentes do SGL utilizando como referência nos cálculos as componentes oriundas dos referidos descritivos das estações.

2.3.2 Experimento 2

O segundo experimento consistiu na compatibilização das redes IGS_{yy}-ECD/IG_byy-ECD das séries temporais para o IGS14-ECD. Deste, as séries foram compatibilizadas para o SIRGAS2000-ECD utilizando P1 e P2. A sequência metodológica aplicada é descrita na Figura 3.

Figura 3 – Fluxograma metodológico para compatibilização das redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD para IGS14-ECD e desta para SIRGAS2000-ECD nas séries temporais.



Fonte: O autor (2021).

Neste procedimento os conjuntos de parâmetros de transformação, apresentados na Tabela 5, foram inicialmente atualizados para as épocas das coordenadas (época de coleta dos dados) utilizando a Eq. 2 e, em seguida, aplicados na transformação de Helmert (Eq. 1) para a compatibilização entre redes das séries para o IGS14-ECD. Como já destacado anteriormente, as redes IGSyy bem como sua atualização IGbyy são equivalentes às realizações do ITRF ao nível global (BLICK et al., 2014; REBISCHUNG; SCHMID, 2016) o que justifica a aplicação dos parâmetros de transformação utilizados nesta etapa.

Tabela 5 – Parâmetros de transformação entre as redes IGS_{yy}/IG_byy.

Parâmetros	T_X (mm)	T_Y (mm)	T_Z (mm)	D (ppb)	R_X (mas)	R_Y (mas)	R_Z (mas)
ITRF2014 para ITRF2008, época 2010,0	1,6	1,9	2,4	-0,02	0,000	0,000	0,000
ITRF2008 para ITRF2005, época 2005,0	-0,5	-0,9	-4,7	0,94	0,000	0,000	0,000
ITRF2014 para ITRF2005, época 2010,0	2,6	1,0	-2,3	0,92	0,000	0,000	0,000
Variações temporais (rates)	\dot{T}_X (mm /ano)	\dot{T}_Y (mm /ano)	\dot{T}_Z (mm /ano)	\dot{D} (ppb /ano)	\dot{R}_X (mas /ano)	\dot{R}_Y (mas /ano)	\dot{R}_Z (mas /ano)
ITRF2014 para ITRF2008, época 2010,0	0,0	0,0	-0,1	0,03	0,000	0,000	0,000
ITRF2008 para ITRF2005, época 2005,0	0,3	0,0	0,0	0,00	0,000	0,000	0,000
ITRF2014 para ITRF2005, época 2010,0	0,3	0,0	-0,1	0,03	0,000	0,000	0,000

*mas: milissegundo de arco

Fonte: Petit e Luzum (2010); Altamimi, Collilieux e Métivier (2012) e Altamimi et. al. (2016).

Considerando a compatibilização entre as redes IGS05-ECD e IGS14-ECD, utilizou-se duas estratégias distintas: 1) de IGS05-ECD para IGS08-ECD e deste para IGS14-ECD (forma intermediária); 2) de IGS05-ECD para IGS14-ECD (forma direta). O IGS08-ECD e IGS08-ECD foram diretamente compatibilizados para o IGS14-ECD. A forma intermediária de compatibilização entre as redes IGS05-ECD e IGS14-ECD detém maior rigor teórico, conforme evidenciado por Carvalho (2015), Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016), Braga e Dal Poz (2017).

Na sequência, as séries temporais posicionais referenciadas ao IGS14-ECD foram compatibilizadas para o SIRGAS2000-ECD aplicando-se a Eq. (1) com os parâmetros de transformação entre IGS14-ECD e SIRGAS2000-ECD apresentados nas Tabelas 3 e 4. Posteriormente, as séries referenciadas ao IGS14-ECD e ao SIRGAS2000-ECD foram transformadas para o SGL aplicando-se a Eq. (4).

Salienta-se que todos os procedimentos inerentes ao desenvolvimento metodológico, bem como os gráficos gerados, foram implementados em scripts no software R (R CORE TEAM, 2020).

2.4 Resultados e discussões

Com a finalidade de melhorar a visualização e tornar as análises mais claras e consistentes, destacaram-se nas figuras os intervalos de tempo (períodos) referentes às realizações IGS_{yy}/IG_byy, bem como as épocas de trocas de antenas, receptores e conjunto de antena e receptor. Os sinais + ou - associados aos valores das mudanças de nível indicam o sentido (acima ou abaixo) destas em relação às séries SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P2. Entenda-se por mudanças de nível as variações ocorridas entre as séries SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P2 e SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P1, considerando um mesmo período de tempo.

2.4.1 Experimento 1

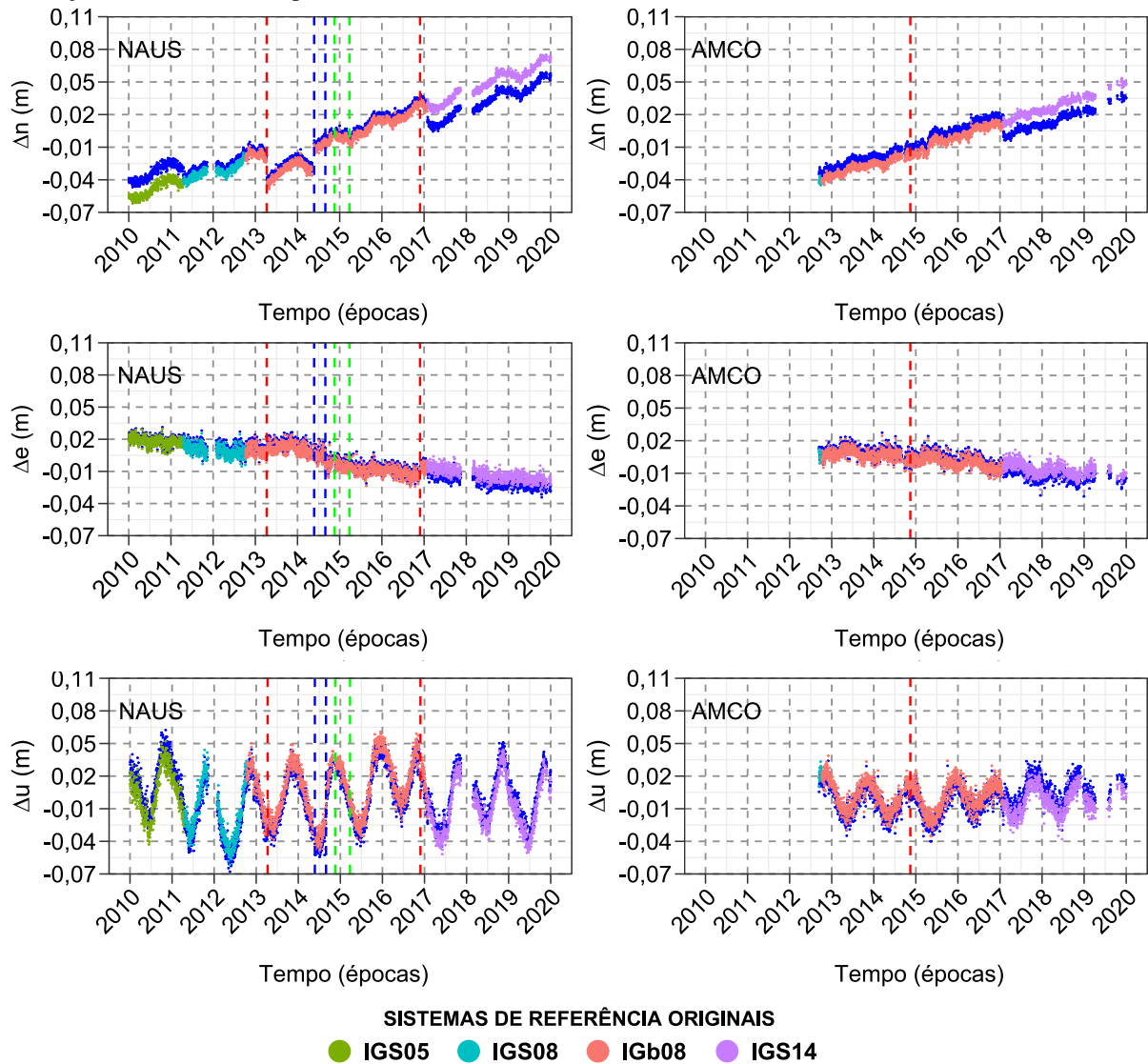
Analisando as séries temporais referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P1(**SCP1**), pode-se observar que estas apresentam diferenças quando comparadas às séries SIRGAS2000-ECD compatibilizadas com P2 (**SCP2**), como mostrado na Figura 4. Diferenças significativas foram apresentadas nas séries de componentes norte (Δn) e estão relacionadas à períodos específicos. De fato, a série Δn SCP1 da estação NAUS apresenta duas mudanças de nível de aproximadamente $\pm 0,017$ m em relação à série SCP2. Tais mudanças de nível associam-se aos períodos referentes ao IGS05 e IGS14. Analogamente, a série Δn SCP1 da estação AMCO possui uma mudança de nível de aproximadamente $-0,013$ m quando comparada a SCP2, referente ao IGS14. Mudança de nível entre as séries Δn SCP1 e SCP2 das estações NAUS e AMCO podem ser verificadas para os períodos referentes ao IGS08 e IGS08, com magnitudes menores, variando entre $+0,003$ m e $+0,006$ m.

As séries de componentes leste (Δe) SCP1 também apresentaram diferenças quando comparadas à SCP2, porém com magnitudes menores nas mudanças de nível, variando entre $+0,001$ m e $-0,006$ m e $+0,002$ m e $-0,005$ m para as estações NAUS e AMCO, respectivamente. As maiores variações ocorreram no período relativo ao IGS14.

Comparando as séries de componentes vertical (Δu) SCP1 e SCP2, constatou-se mudanças de nível com variações entre $+0,007$ m e $+0,012$ m e $-0,004$ m e $+0,009$ m para as estações NAUS e AMCO, respectivamente. Os maiores valores das variações ocorreram no período do IGS05 e IGS14 para as estações NAUS e AMCO, nesta ordem.

Adicionalmente, ressalta-se que saltos ocasionados por fatores artificiais (trocas de antenas, receptores ou conjunto de antena e receptor) foram verificados nas séries da estação NAUS.

Figura 4 – Séries de componentes do SGL referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P1 (azul) e P2 (colorida). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).



Fonte: O autor (2021).

Dessa forma, pode-se observar que mesmo com as diferenças entre P1 e P2 as soluções obtidas apresentaram uma pequena alteração nas mudanças de nível (milimétricas) para os períodos referentes ao IGS08 e IGB08, quando comparadas às mudanças de nível associadas ao IGS05 e IGS14 (centimétricas), para algumas das componentes. Tal fato pode ser justificado, dentre outros fatores, pelo acréscimo gradativo no número de estações de referência utilizadas na evolução dos IGSyy/IGbyy, quanto pela consideração de movimentos não lineares das estações, que incluiu sinais sazonais (anuais e semestrais) de posições de estações e deformações ocorridas após eventos sísmicos causados por grandes terremotos, caso do IGS14.

De fato, IBGE-PPP (2020) destaca que a utilização dos parâmetros P2 pode gerar diferenças, cuja magnitude pode variar de poucos milímetros a até 0,020 m na componente

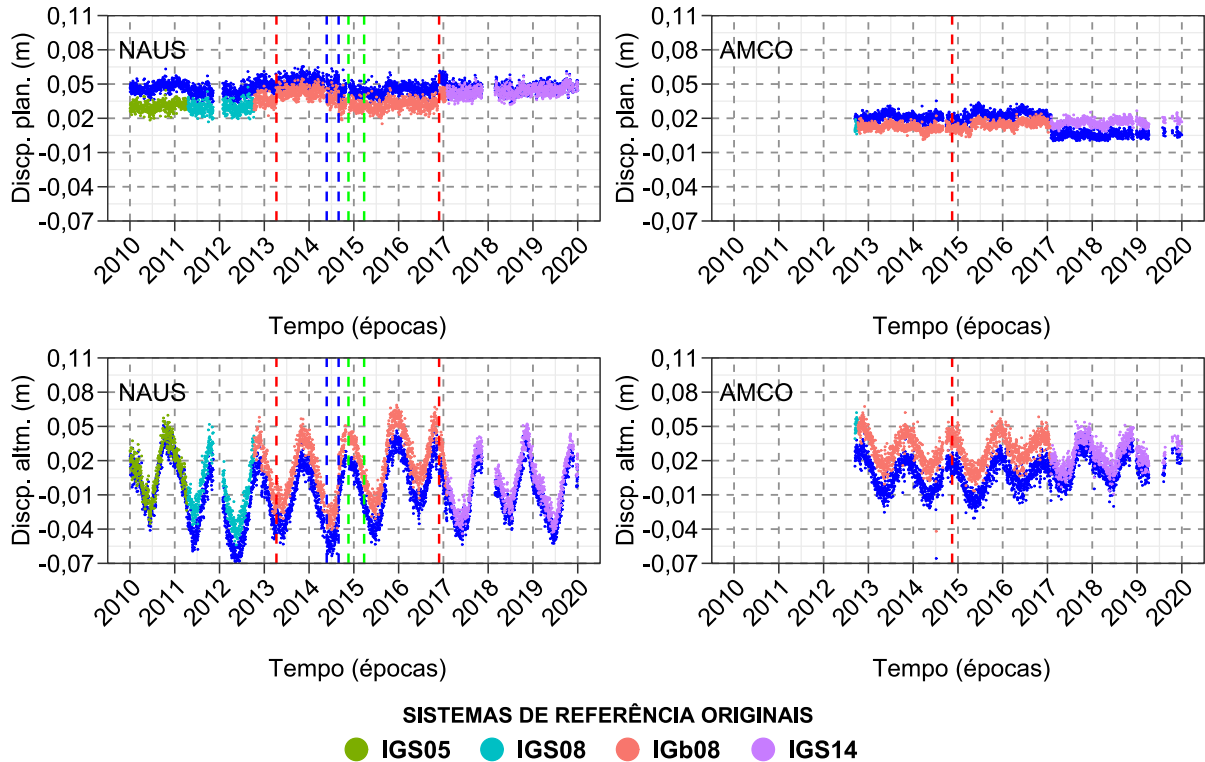
planimétrica e de alguns milímetros a até 0,030 m, quando comparadas com as coordenadas determinadas com os parâmetros antigos – P1. Desse modo, os resultados encontrados se enquadram no intervalo estipulado, para ambas as estações, tanto na componente planimétrica quanto na altimétrica. Nesse âmbito, as variações verificadas nas componentes posicionais podem comprometer o processo de atualização/integração de produtos geodésicos/cartográficos associados às coordenadas SIRGAS2000-ECD determinadas com P1 (levantamento antigo) e P2 (levantamento recente). Ademais, as séries de coordenadas SIRGAS2000-ECD determinadas com P1 se mostraram inadequadas para compor séries posicionais aplicáveis às investigações que se fundamente em análises de séries temporais posicionais, caso seja de interesse a utilização destas soluções SIRGAS2000-ECD.

Ademais, verificou-se que algumas das componentes foram mais afetadas do que outras, o que pode ser justificado pela influência da dinâmica das deformações da crosta terrestre ocorridas em resposta ao efeito da carga hidrológica recorrente na bacia Amazônica, principalmente em locais próximos aos grandes corpos d'água, regiões de zonas úmidas (SILVA, 2010) e de remanso (ALVES, 2018), como Manaus, onde está localizada a estação NAUS. Nesse caso, o comportamento das deformações nas componentes posicionais das estações é dependente da sua localização, como demonstrado no decorrer dos capítulos seguintes.

Considerando as séries das discrepâncias referentes às SCP1 e SCP2, dispostas na Figura 5, observa-se que as séries de discrepâncias planimétricas SCP1 e SCP2 referentes à estação NAUS apresentaram mudanças de nível de aproximadamente +0,017 m, +0,014 m, +0,012 m e +0,002 m referente ao período do IGS05, IGS08, IGB08 e IGS14, respectivamente. As séries de discrepâncias planimétricas SCP1 e SCP2 para AMCO apresentaram comportamento distinto da NAUS, denotando mudanças de nível de aproximadamente +0,009 m no período associado ao IGS05, IGS08 e IGB08 e -0,012 m para o IGS14, respectivamente.

Quanto às séries das discrepâncias altimétricas SCP1 e SCP2, apresentadas na Figura 5, observa-se que a estação NAUS apresentou mudanças de nível de aproximadamente -0,005 m, -0,022 m, -0,022 m e -0,009 m para o período do IGS05, IGS08, IGB08 e IGS14, respectivamente. Mudanças de nível de aproximadamente -0,023 m e -0,010 m foram observadas nas séries das discrepâncias altimétricas SCP1 e SCP2 da estação AMCO, para o período do IGS08, IGB08 e IGS14.

Figura 5 – Séries de discrepâncias planimétricas e altimétricas referentes às séries referenciadas ao SIRGAS2000-ER compatibilizado com P1 (azul) e P2 (colorida). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).



Fonte: O autor (2021).

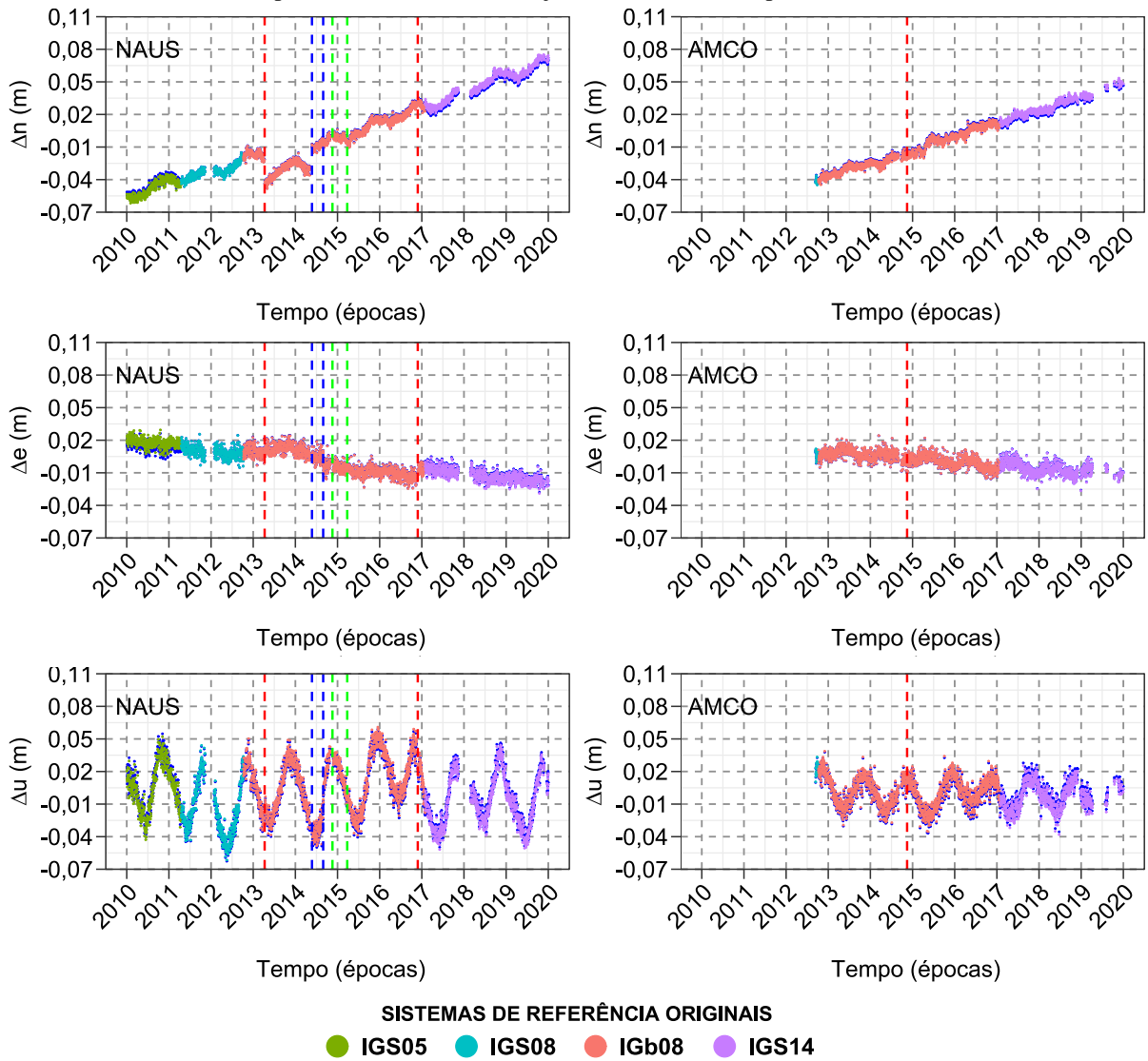
Considerando as séries de discrepâncias planimétricas individualmente, observa-se que a série SCP1 da estação NAUS possui maior estabilidade, o que também se observa para a série SCP2 da estação AMCO. Dessa forma, estudos que se fundamentem em tais discrepâncias podem ter seus resultados sub ou superestimado a depender da época, ou conjunto de épocas, consideradas.

2.4.2 Experimento 2

As séries SCP2 obtiveram resultados similares às séries compatibilizadas para o IGS14 para as estações NAUS e AMCO, como apresentados na Figura 6. Diferenças milimétricas ($\sim 0,002$ m) foram obtidas no período referente ao IGS05 e IGS14 para a estação NAUS. Nos períodos referentes ao IGS08 e IGb08, as diferenças obtiveram ordem menores ou iguais à submilimétrica ($\leq 10^{-4}$ m), para ambas as estações.

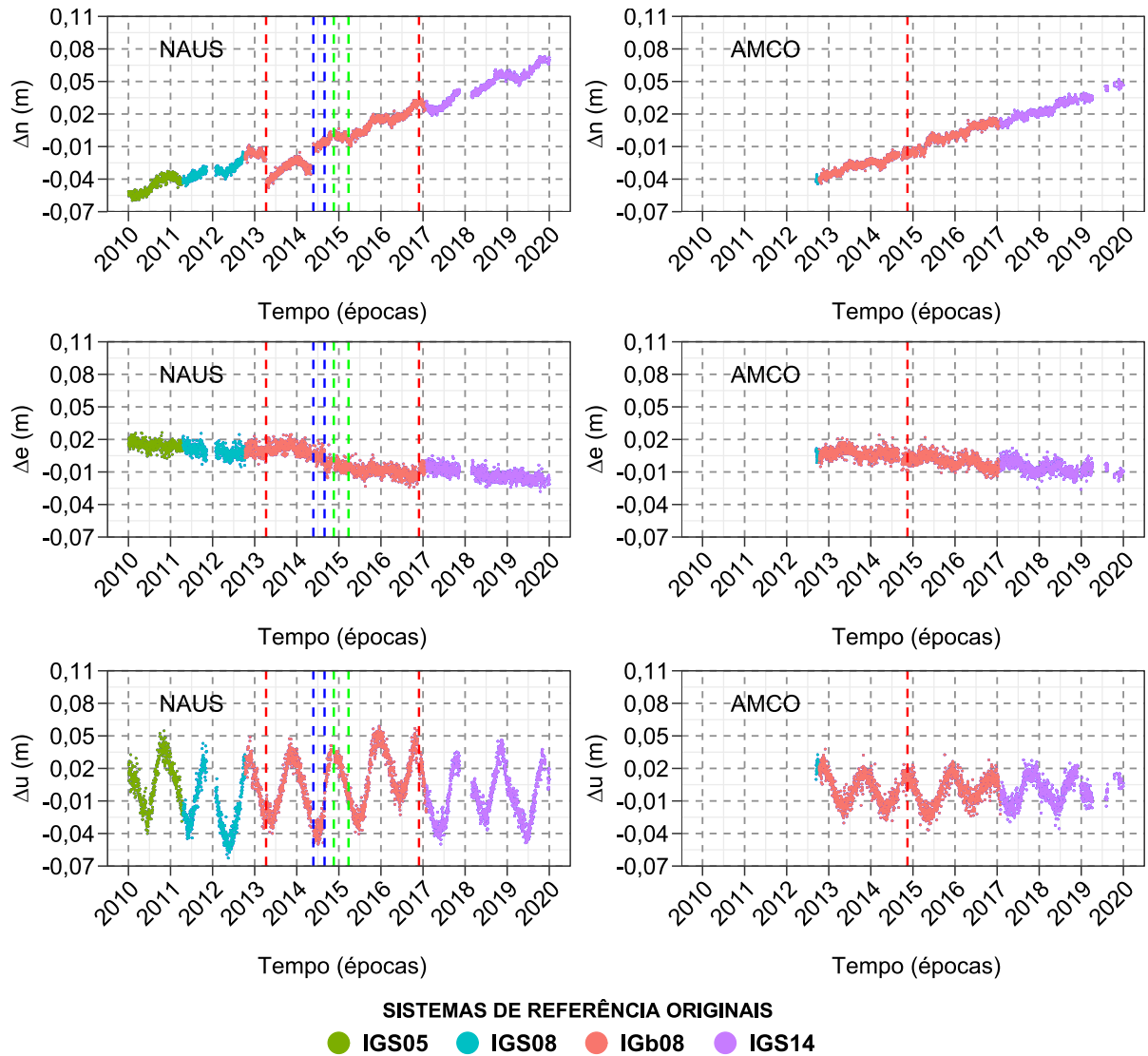
Após a compatibilização da rede IGS14-ECD para SIRGAS2000-ECD com P1 (**ITSP1**) e P2 (**ITSP2**), observou-se que as séries posicionais não apresentaram diferenças significativas (da ordem de 10^{-11} m), como se pode observar na Figura 7.

Figura 6 – Séries de componentes do SGL referentes às séries referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P2 (colorida) e IGS14-ECD (azul). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).



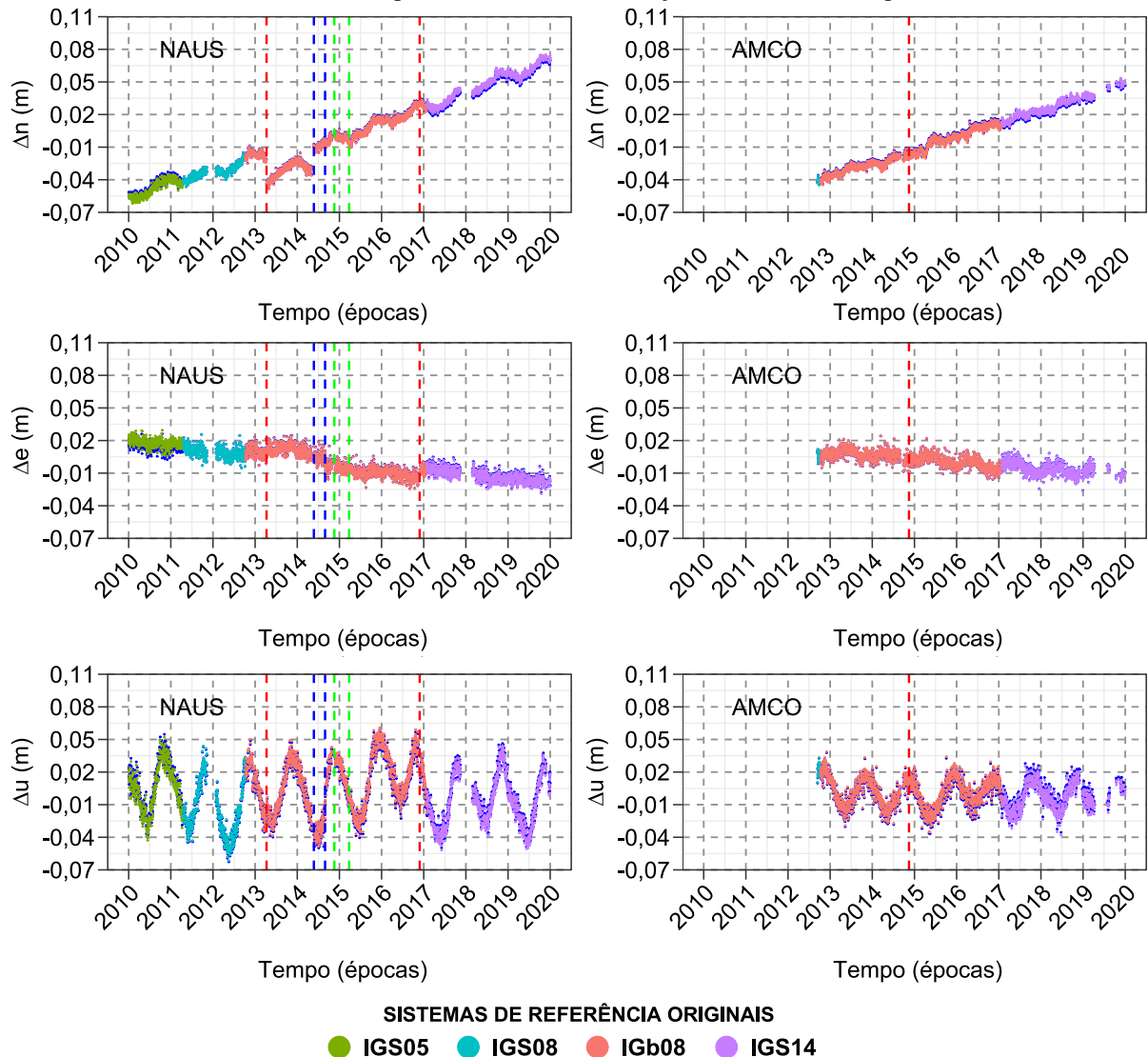
Fonte: O autor (2021).

Figura 7 – Séries de componentes do SGL referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado do IGS14-ECD com P2 (colorida) e SIRGAS2000-ECD compatibilizado do IGS14-ECD com P1 (azul). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).



Fonte: O autor (2021).

Figura 8 – Séries de componentes do SGL referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizado com P2 (colorida) e SIRGAS2000-ECD compatibilizado do IGS14-ECD com P2 (azul). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha).



Fonte: O autor (2021).

Nesse sentido, quando comparadas às séries SCP2 com as séries ITSP2, dispostas na Figura 8, pode-se constatar que estas apresentaram resultados similares aos observados na comparação entre as séries SCP2 e IGS14-ECD, apresentadas na Figura 6. Resultados idênticos foram encontrados na comparação das séries SCP2 com as séries ITSP1.

2.5 Conclusões

Considerando os conjuntos de parâmetros de transformação entre IGS_{yy} /IG_{byy} e SIRGAS2000, pode-se observar que as séries SCP2 apresentaram resultados mais consistentes quando comparadas às séries SCP1. De fato, tal comportamento ressalta que P2 foi instituído no sentido de diminuir os impactos causados pelas trocas de referenciais ocorridas ao longo do

tempo, o que foi claramente demonstrado neste trabalho.

Dentre as séries SCP1, as das componentes Δn foram mais afetadas obtendo maior magnitude nas mudanças de nível, tanto absolutas quanto relativas às séries SCP2 nos períodos referentes ao IGS05 e IGS14. As séries SCP1 das componentes Δe e Δu também apresentaram mudanças de nível quando comparadas às séries SCP2, porém com menor magnitude. Adicionalmente, salienta-se que mudanças de nível ocasionadas por fatores artificiais (trocas de antenas, receptores ou conjunto de antena e receptor) foram verificadas nas séries da estação NAUS.

Quanto às séries das discrepâncias referentes às SCP1 e SCP2, verificou-se que estas também apresentaram divergências. Observou-se que as séries de discrepâncias planimétricas SCP1 e SCP2 da estação NAUS exibiram diferenças decrescentes, associadas à evolução temporal dos IGSyy /IGbyy.

Já na estação AMCO, um comportamento distinto foi verificado, com a maior mudança de nível associada ao ITRF2014 (IGS14). As séries das discrepâncias altimétricas SCP1 e SCP2 também apresentaram mudanças de nível, com menores magnitudes. No entanto, cabe destacar que as discrepâncias altimétricas refletem o comportamento das séries na época dos dados, uma vez que o modelo de velocidades utilizado proporciona somente a atualização temporal das coordenadas planimétricas (IBGE, 2015).

Na etapa de compatibilização das redes IGSyy /IGbyy para IGS14, observou-se que as duas estratégias utilizadas para a compatibilização do IGS05 apresentaram resultados similares. Nesse caso, a aplicação da segunda estratégia pode ser mais viável por ser direta, otimizando a implementação. Além disso, devido ao menor número de etapas, pode haver uma redução nas incertezas inseridas, o que deve ser verificado via propagação de variâncias. Comparando as séries SCP2 com as séries IGS14, verificou-se que há alinhamento e similaridade entre as soluções IGS14-ECD e SIRGAS2000-ECD, disponibilizadas atualmente pelo IBGE-PPP, ao nível menor ou igual a 0,002 m para as estações utilizadas. Nesse sentido, devido à consistência apresentada pelas séries SCP2, estas podem ser aplicadas em estudos associados às séries temporais posicionais referentes ao território brasileiro. No entanto, a compatibilização entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD está associada à impossibilidade de atualização temporal dos parâmetros de transformação disponibilizados pelo IBGE, o que pode introduzir distorções. Nesse sentido, é pertinente que se avalie a significância das séries IGS14-ECD e SIRGAS2000-ECD fundamentando-se na análise da propagação dos erros.

Considerando a compatibilização das redes IGS14-ECD para SIRGAS2000-ECD com P1 (ITSP1) ou P2 (ITSP2), verificou-se que a diferença entre ambas não foi significativa, da

ordem de 10^{-11} m. Ademais, os resultados obtidos na comparação entre as séries ITSP1/ITSP2 com a SCP2 foram similares aos encontrados na comparação entre as séries em IGS14-ECD e SCP2.

Portanto, a compatibilização das redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD para IGS14-ECD e deste para o SIRGAS2000-ECD com P1 ou P2 constitui uma opção para a obtenção de séries em SIRGAS2000-ECD, compatíveis com as séries em IGS14-ECD, ao nível menor ou igual ao milimétrico. Dessa forma, devido a maior estabilidade das soluções associadas ao IGS14-ECD, é pertinente que estas sejam utilizadas nas séries posicionais aplicadas em investigações acerca das deformações ocasionadas por fenômenos como o de carga hidrológica.

Referências

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

ALTAMIMI, Z.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L. Analysis and results of ITRF2008. (IERS Technical Note; 37) Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2012. 54 p.

ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, v. 121, n. 8, p. 6109-6131, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.

ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica**. 76 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

BLICK, G.; CROOK, C.; DONNELLY, N.; FRASER, R.; LILJE, M.; MARTIN, D.; RIZOS, C.; ROMAN, D. R.; SARIB, R.; SOLER, T.; STANAWAY, R.; WESTON, N. D. **Reference Frames in Practice Manual**. International Federation of Surveyors (FIG), Copenhagen - DENMARK, 2014.

BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Mudança de referencial e atualização de coordenadas entre o IGS14 (ITRF2014) e o SIRGAS2000 (ITRF2000). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 4., Presidente Prudente, 2017. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2017. p .543-550.

BRAGA, F. L. S.; DAL POZ, W. R. Potencialidades do PPP no Software Bernese com Compatibilizações de Sistemas Geodésicos de Referência e de Tempo. **Rev. Bras. Cartogr.**, v. 71, n. 3, p. 726-755, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv71n3-47483>.

CARVALHO, A. S. **Implicações do emprego de diferentes modelos de velocidades e parâmetros da transformação de Helmert no posicionamento geodésico na placa sul-americana**. 188 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em

Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; GRIPP JUNIOR, J.; LAROCCHA, A. P. C.; KRUEGER, C. P. Systematization of the steps to Positional Determination in SIRGAS2000 based on ITRF(IGb08) Coordinates obtained by Online PPP Services. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 67, n. 1, p. 43-58, 2015.

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; LAROCCHA, A. P. C. Compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 3, p. 590-609, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000300033>.

COSTA, S. M. A.; MANTOVANI, G.; SCOFANO, F.; LIMA, M. A. A.; SILVA, A. L.; MOURA JÚNIOR, N. J. Ampliação e modernização da RBMC. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**. p. 440-450.

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

ESTEY, L. H.; MEERTENS. C. M. TEQC: The Multi-Purpose Toolkit for GPS/GLONASS Data. **GPS Solutions**. v. 3, n. 1, p. 42-49, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/PL00012778>.

FREITAS, K. X. S. DE; DAL POZ, W. R.; NASCIMENTO, L. A. Avaliação do Impacto da Compatibilização de Referencial das Velocidades na Redução de Coordenadas no PPP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, n. 1, p. 198-213, 19 fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n1-55416>.

FRIDEZ, P. Bernese GNSS Software. 2020. Disponível em: <<http://www.bernese.unibe.ch>>. Acesso em: mai. 2020.

GHODDOUSI-FARD, R.; DARE, P. Online GPS processing services: an initial study. **GPS Solut.** v. 10, p. 12–20, 2006. DOI: [10.1007/s10291-005-0147-5](https://doi.org/10.1007/s10291-005-0147-5).

GRINTER, T.; ROBERTS, C. Precise Point Positioning: Where are we now? In: INTERNATIONAL GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS SOCIETY IGNSS SYMPOSIUM – IGNSS2011, 2011, Sydney. **Proceedings of IGNSS2011**. p. 15.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. **GPS Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, GALILEO & more**. Austria: Springer Wien New York, 2008.

INFRAESTRUTURA NACIONAL DE DADOS ESPACIAIS (INDE). Estabelecido em 25 de fevereiro de 2015 o término do período de transição para o SIRGAS2000. 2020. Disponível em: <<https://www.inde.gov.br/Noticias/Detalhe/22>>. Acesso em: mai. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS: manual do usuário. Versão Maio de 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: jul. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual do Usuário - Aplicativo Online IBGE-PPP Versão: abril 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: jul. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Nota Técnica. Término do período de transição para adoção no Brasil do Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS), em sua realização de 2000,4 (SIRGAS2000), 2015. Disponível em:

<http://geofp.ibge.gov.br/metodos_e_outros_documentos_de_referencia/normas/nota_tecnica_termino_periodo_transicao_sirgas2000.pdf>. Acesso em: mai. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA PPP (IBGE-PPP). Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=saiba-mais-geociencias>>. Acesso em: mai. 2020.

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

INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME (ITRF). **Transformation parameters**. Disponível em: <https://itrf.ign.fr/trans_para.php>. Acesso em: mai. 2021.

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

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

MACIUK, K.; SZOMBARA, S. Annual crustal deformation based on GNSS observations between 1996 and 2016. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 11, n. 21, p. 1-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4022-4>.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2ª.ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.

MOREIRA, D. M. **Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p.150-165, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702017000100010>.

NATURAL RESOURCES CANADA (NRCAN). CSRS-PPP: Canadian Spatial Reference System – Precise Point Positioning. 2020. Disponível em: <<https://www.google.com/search?q=CSRS-PPP&aq=chrome..69i57j0l7.1576j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8>>. Acesso em: mai. 2020.

OLIVEIRA, G. D.; DAL POZ, W. R.; ALMEIDA, M. S. Implementação de um sistema on-line para processamento de dados GNSS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 71, n. 2, p. 501-512, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv71n2-48184>.

PETIT, G.; LUZUM, B. IERS Conventions (2010). IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. ISBN 3-89888-989-6.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2020. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: mar. 2020.

RAMOS, M. P.; DAL POZ, W. R.; CARVALHO, A. S. Análise das possibilidades de transformação de referencial e atualização de coordenadas estimadas pelo PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p.389-404. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000300022>.

REBISCHUNG, P. [IGSMail-6663]. Igb08: an update on IGS08. Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2012/000497.html>>. Acesso em: mai. 2020a.

REBISCHUNG, P. [IGSMail-7921] Switch to Igb14 reference frame. Disponível em: <<https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>>. Acesso em: mai. 2020b.

REBISCHUNG, P.; SCHMID, R. **Preparations for the IGS realization of ITRF2014**. 2016. Disponível em: <<http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2016/EGU2016-7171.pdf>>. Acesso em: mar. 2021.

REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS (RBMC). Dados diários e situação operacional. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diarios-e-situacao-operacional>>. Acesso em: mai. 2020.

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G. Transformação de Helmert generalizada no posicionamento de alta precisão: fundamentação teórica e exemplificações. **Brazilian Journal of Geophysics**, Presidente Prudente-SP, v. 18, n. 2, p. 161-172. ago. 2001. ISSN 1809-4511.

SILVA, H. A.; MONICO, J. F. G. Análise de séries temporais de coordenadas GNSS. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2012, Recife. **Anais do IV SIMGEO**. p. 001-009.

SILVA, J. S. **Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia amazônica**. 279 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas, Uso de velocidades no processamento de dados GNSS. 2020. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/using-velocities-gnss/>>. Acesso em: fev. 2020.

UNAVCO (University NAVSTAR Consortium). TEQC - The Toolkit for GNSS Data. 2020. Disponível em: <<https://www.unavco.org/software/data-processing/teqc/teqc.html>>. Acesso em: abr. 2020.

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

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

1-13.

YIGIT, C. O.; GIKAS, V.; ALCAY, S.; CEYLAN, A. Performance evaluation of short to long term GPS, GLONASS and GPS/GLONASS postprocessed PPP. **Survey Review**, v. 46, n. 336, p. 155-166, 2014. DOI: 10.1179/1752270613Y.0000000068.

3 O EFEITO DA CARGA HIDROLÓGICA NOS DESLOCAMENTOS E VELOCIDADES DE ESTAÇÕES GNSS DA BACIA AMAZÔNICA BRASILEIRA

Resumo: O fenômeno de carga hidrológica tem expressividade em regiões específicas, como a Amazônica, e constitui-se como uma característica local. Seu efeito se manifesta como deformações viscoelásticas temporais na superfície terrestre e não são considerados na modelagem do PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Nesse sentido, o presente trabalho objetiva investigar a influência da carga hidrológica no deslocamento e nas velocidades de oito estações da RBMC (AMBC, AMCO, AMHA, AMTE, AMUA, ITAM, NAUS e PAIT) situadas na bacia amazônica, utilizando séries temporais posicionais geradas no IBGE-PPP e de cotas linimétricas. Estimou-se as velocidades a partir do ajuste de modelos de regressão linear simples e os deslocamentos periódicos (oscilações) a partir das amplitudes calculadas. As séries de componentes verticais (Δu) apresentaram maiores amplitudes, quando comparadas às séries de componentes norte (Δn) e leste (Δe). A estação NAUS apresentou maior amplitude média para série Δu (0,073 m) e amplitude máxima em 2012 (0,084 m), justificável pela maior cheia histórica. As séries Δn apresentaram resultados similares à série Δu , porém com amplitudes menores. A estação NAUS obteve amplitude máxima (0,023 m) em 2012 e 2015 para série Δn , justificável pelas cheias máximas, e amplitude média de 0,020 m. Em relação às séries Δe , maior amplitude média (0,016 m) foi obtida por AMBC. Comprovado o efeito da carga hidrológica nas componentes posicionais, comparou-se as velocidades derivadas das séries, do VEMOS2009 e fornecidas pela rede SIRGAS-CON, em que V_n , V_e e V_u apresentaram discrepâncias variando entre -0,0001 e 0,0014 m; -0,0021 e 0,0017; e -0,0027 e 0,0084 respectivamente, o que evidencia que as velocidades estimadas das séries apresentam uma boa estimativa. Contudo, tais velocidades devem ter sua significância atestada.

Palavras-chave: Geodésia. Carga hidrológica. Velocidade. GNSS. PPP.

Abstract: The hydrological load phenomenon is expressive in specific regions, such as the Amazon, and constitutes itself as a local characteristic. Its effect is manifested as temporal viscoelastic deformations on the Earth's surface and is not considered in the PPP (Precise Point Positioning) modeling. In this sense, the present work aims to investigate the influence of the hydrological load on the displacement and speeds of eight stations of the RBMC (AMBC, AMCO, AMHA, AMTE, AMUA, ITAM, NAUS, and PAIT) located in the Amazon Basin, using positional time series generated at IBGE-PPP and linimetric quotas. The velocities were

estimated from the adjustment of simple linear regression models and their periodic displacements (oscillations) from the calculated amplitudes. The series of vertical components (Δu) presented greater amplitudes when compared to the series of the north (Δn) and east (Δe) components. The NAUS station presented the highest average amplitude for the Δu series (0.073 m) and the maximum amplitude in 2012 (0.084 m), justified by the largest historical flood. The Δn series presented results similar to the Δu series, but with smaller amplitudes. The NAUS station achieved maximum amplitude (0.023 m) in 2012 and 2015 for the Δn series, justified by the maximum floods, and an average amplitude of 0.020 m. In relation to the Δe series, a greater mean amplitude (0.016 m) was obtained by AMBC. After proving the effectiveness of the hydrological load on the positional components, the velocities derived from the series, from VEMOS2009 and provided by the SIRGAS-CON network, were compared, in which V_n , V_e , and V_u presented discrepancies varying between -0,0001 and 0,0014 m; -0.0021 and 0.0017; and -0.0027 and 0.0084 respectively, which shows that the estimated speeds of the series have a good estimate. However, these speeds must have their significance attested.

Keywords: Geodesy. Hydrological load. Velocity. GNSS. PPP.

3.1 Introdução

Fenômenos geodinâmicos e de deformação crustal provocam deslocamentos ao longo do tempo, causando alterações nas posições espaciais (coordenadas) de pontos da superfície terrestre (SAPUCCI; MONICO, 2001; SÁNCHEZ; DREWES, 2016).

Diversos destes fenômenos são investigados fundamentando-se nas alterações posicionais ao longo do tempo, tais como o movimento de placas tectônicas (ALINIA; TIAMPO; JAMES, 2017; KOWALCZYK; RAPINSKI, 2018), a atividade vulcânica (GEIRSSON et al. 2017), o derretimento de geleiras (RAJNER, 2018) e a carga hidrológica (BEVIS et al., 2005; FRITSCH; DOLL; DIETRICH, 2012; NASCIMENTO, 2016).

Comumente, empregam-se em tais investigações séries temporais posicionais geradas a partir de dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) advindos das redes ativas de monitoramento contínuo, pós-processados em serviços de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso) online, o que se justifica em virtude: da gratuidade, da quantidade e qualidade dos dados, da acurácia alcançada nos serviços (centimétrica) etc. (GRINTER; ROBERTS, 2011; CHOY; BISNATH; RIZOS, 2016). Adicionalmente, evidencia-se que as posições estimadas no PPP independem de estações de referência, condição essencial aos estudos que demandem variações locais das posições (MOREIRA, 2010).

Nesse sentido, salienta-se que efeitos de diversos fenômenos são modelados no PPP,

conforme recomendações de Petit e Luzum (2010). No entanto, o efeito da carga hidrológica (*water storage e hidrological load*) é desconsiderado no PPP por não apresentar modelagem consistente em escala global (PETIT; LUZUM, 2010; RAJNER; LIWOSZ, 2012). Tal efeito é representativo em regiões específicas que apresentam transferência significativa de massa d'água, como a Amazônica, derivando de um processo hidrogeodinâmico associado ao ciclo hidrológico, que ocasiona deformações viscoelásticas temporais (transitórias) na superfície da Terra (TREGONING et al., 2009; FRITSCH; DOLL; DIETRICH, 2012).

Estudos afins ou correlatos, associados à influência do efeito da carga hidrológica na componente altimétrica são comumente encontrados, como em Van Dam et al. (2001), Romagnoli et al. (2003), Davis et al. (2004), Bevis et al. (2005), Rosa (2008), Costa, Matos e Blitzkow (2012), Moreira et al. (2016), Nascimento (2016), Giacometti et al. (2017), Oliveira (2018) e Knowles, Bennett e Harig (2020). No entanto, há necessidade de mais estudos que investiguem a influência deste efeito nas componentes planimétricas, como o apresentado por Fu et al. (2013), uma vez que pode degradar produtos derivados, como as velocidades (deformação contínua da superfície) das estações GNSS (AZAMBUJA; MATSUOKA, 2016).

SIRGAS (2020) recomenda que as velocidades devam advir de levantamentos GNSS contínuos ou repetitivos (séries temporais) que cubram um período mínimo de dois anos e, caso isso não seja possível, sejam extraídas de um modelo de velocidades ou deformações. No entanto, não apresenta diretriz ou recomendação quanto aos critérios e/ou metodologias voltadas à utilização de séries temporais. Nesse sentido, Bogusz e Klos (2016) e Olds et al. (2019) destacam que a estimação das velocidades a partir das séries temporais de posição é comumente efetuada com o ajuste do modelo de regressão linear simples.

Ressalta-se que no Brasil utiliza-se frequentemente o VEMOS2009 (modelo de velocidade para o SIRGAS 2009) (DREWES; HEIDBACH, 2012) para a estimação das velocidades. As velocidades são amplamente empregadas nos procedimentos de atualização temporal de coordenadas, como o utilizado pelo serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-PPP) (IBGE, 2020). Ademais, de forma a complementar as análises, as velocidades fornecidas pela rede SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo) também foram utilizadas.

Em vista do exposto, propõe-se investigar a influência do efeito da carga hidrológica nas séries temporais de componentes posicionais e sua implicação na estimação das velocidades de estações da RBMC situadas na bacia amazônica, fundamentando-se nas amplitudes e no modelo de regressão linear ajustado. Adicionalmente, será efetuada uma avaliação sobre o impacto da aplicação das séries posicionais constituídas pelas soluções SIRGAS2000-ECD (Sistema de

Referência Geocêntrico para as Américas 2000, época de coleta dos dados) determinadas anteriormente a 17 de maio de 2020, no processo de estimação das velocidades.

3.2 Geração das séries temporais posicionais

A geração das séries posicionais efetuada no corrente Capítulo seguiu o procedimento descrito na Seção 2.2 – Séries temporais posicionais – do Capítulo 2 desta pesquisa.

3.3 Regressão linear simples e determinação de velocidades

Kazmier (2007) e Bussab e Morettin (2012) evidenciam que os valores dos coeficientes de regressão linear b_0 e b_1 são estimados baseando-se nos dados amostrais de N observações, cuja equação de regressão linear amostral é definida conforme Eq. (1):

$$\hat{Y}_i = Y_i - \hat{\varepsilon}_i = b_0 + b_1 X_i \quad (1)$$

em que: \hat{Y}_i indica o valor estimado (ou ajustado) para a i -ésima observação da variável dependente; Y_i é a variável dependente (ou de resposta) na i -ésima observação; $\hat{\varepsilon}_i$ é o erro aleatório (resíduo) em Y_i para a i -ésima observação; b_0 é o intercepto de \hat{Y}_i para a população; b_1 é a inclinação da população, chamado de coeficiente de regressão; X_i é a variável independente (ou explanatória) para a i -ésima observação; e $i = 1, 2, 3, \dots, N$.

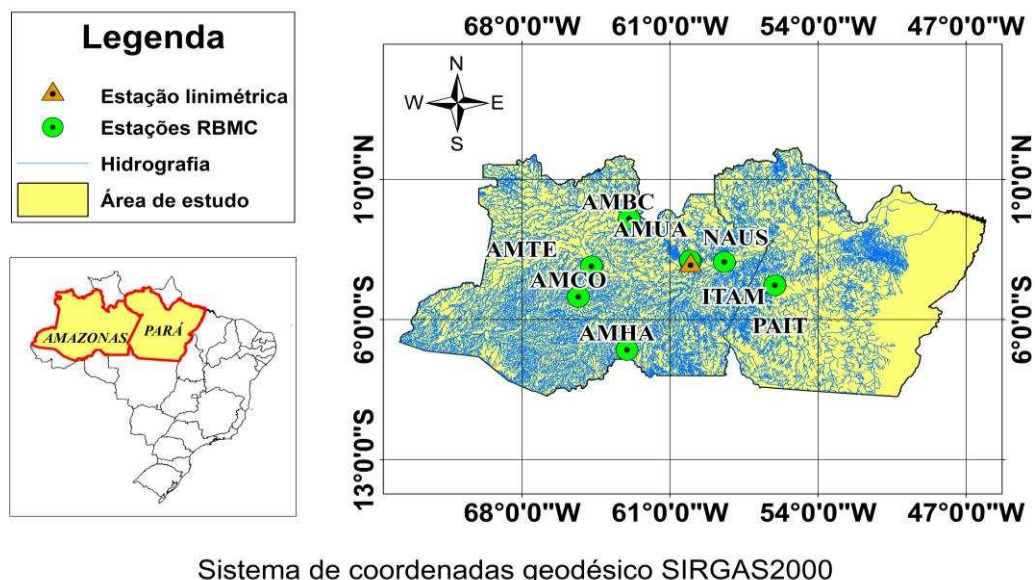
Um dos métodos utilizados para determinar os valores de b_0 e b_1 é o MMQ (Método dos Mínimos Quadrados). Pelo critério do MMQ o melhor ajuste da linha de regressão (e conseqüentemente, a melhor equação) é aquele para o qual a soma dos desvios quadráticos entre os valores mais provável e estimado ($\sum_{i=1}^n (\varepsilon_i)^2 = \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2$) da variável dependente é minimizado para a amostra de dados considerada. Maiores detalhes sobre o MMQ podem ser consultados em Ghilani e Wolf (2006).

Bogusz e Klos (2016), Fazilova, Ehgamberdiev e Kuzin (2018) e Olds et al. (2019) ressaltam que as componentes de velocidade $\vec{V} = (V_n, V_e, V_u)$ correspondem ao coeficiente b_1 da equação de regressão linear amostral, ajustada para cada série temporal posicional do SGL. O relacionamento destas componentes com as componentes do vetor velocidade nas coordenadas geodésicas elipsoidais $\vec{V} = (V_\varphi, V_\lambda, V_h)$ e cartesianas geocêntricas $\vec{V} = (V_x, V_y, V_z)$ pode ser verificado em Carvalho (2015).

3.4 Materiais e métodos

Para a realização do experimento descrito e discutido na sequência foram selecionadas oito estações da RBMC situadas na bacia amazônica, cuja geoespacialização é apresentada na Figura 1. Ademais, de forma a auxiliar e fundamentar as discussões, foram utilizados dados linimétricos (cotas linimétricas) referentes à estação linimétrica do Porto de Manaus – PORTO MANAUS –, disponibilizados pelo porto de Manaus em sua página eletrônica². Os períodos considerados bem como o quantitativo de dados correspondentes às séries temporais posicionais geradas e de cotas linimétricas, cuja data final é 31/12/2019 (dia do ano n° 365), são apresentados na Tabela 2 para as respectivas estações. Destaca-se que as estações AMBC e ITAM foram descontinuadas em 21/09/2018 e 02/04/2019, respectivamente.

Figura 1 – Geoespacialização das estações da RBMC utilizadas.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 1 – Estações da RBMC utilizadas com os respectivos quantitativos de dados.

Estações	Município	Data inicial	Total de dados (Dias)	Dados faltantes (Dias)	Dados válidos (Dias)
Linimétrica	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY n° 001)	3652	0	3652
AMBC	Barcelos (AM)	27/05/2015 (DOY n° 147)	1679	620	1059
AMCO	Coari (AM)	12/09/2012 (DOY n° 256)	2684	351	2333
AMHA	Humaitá (AM)	01/01/2015 (DOY n° 001)	1825	695	1130
AMTE	Tefé (AM)	21/10/2013 (DOY n° 294)	2262	340	1922
AMUA	Manaus - UEA (AM)	20/02/2015 (DOY n° 051)	1775	309	1466
ITAM	Itacoatiara (AM)	30/10/2014 (DOY n° 303)	1888	837	1051
NAUS	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY n° 001)	3652	285	3367
PAIT	Itaituba (PA)	07/04/2010 (DOY n° 097)	3555	604	2951

*DOY (Day Of Year – Dia do ano)

Fonte: O autor (2021).

² <https://www.portodemanau.com.br/?pagina=niveis-maximo-minimo-do-rio-negro>

Registra-se ainda, por oportuno que a área de estudo considerada está sob forte influência da carga hidrológica, característica predominante na região. Contudo, o efeito da carga hidrológica pode ser mais evidente em locais de grande concentração de massa d'água, associados às zonas úmidas e de remanso, como em Manaus (SILVA, 2010; ALVES, 2018). Nesse sentido, Bevis et al. (2005) utilizam a estação MANA (atual NAUS) para avaliar a propagação do efeito da carga hidrológica em seu entorno, evidenciando que tal propagação é mais significativa em um raio de até 200 quilômetros daquela estação. Adicionalmente, Costa, Matos e Blitzkow (2012) acentuam que este efeito é perceptível à distância de até 1000 quilômetros de Manaus, porém com menor amplitude. Diante disso, utilizou-se nesse trabalho a NAUS como referência, cujas distâncias aproximadas entre esta e as demais estações são apresentadas na Tabela 3.

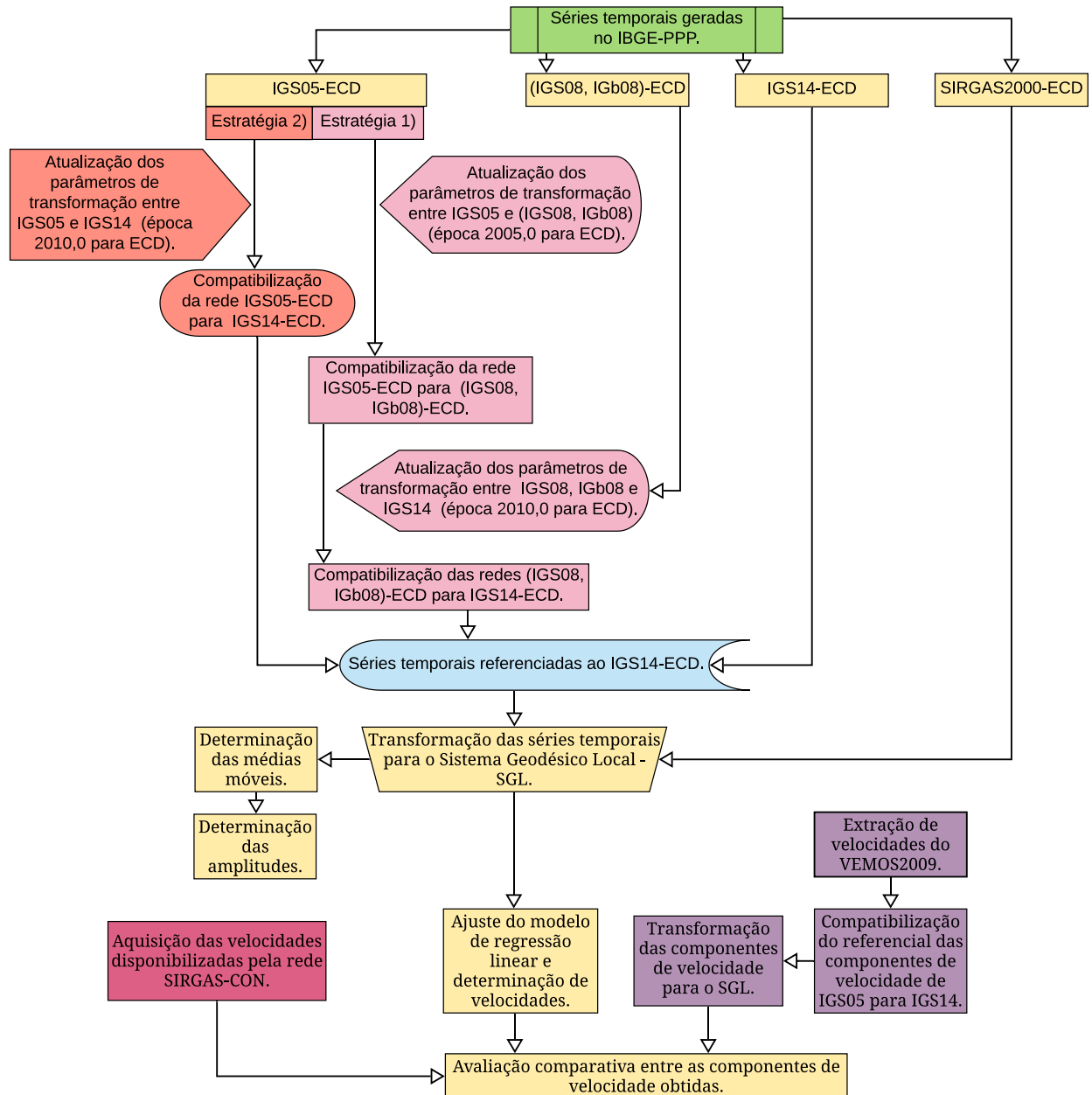
Tabela 2 – Distâncias aproximadas entre estações.

Estação de origem	Estação de destino	Distância aproximada (Km)
NAUS	Linimétrica	012,93
	AMTE	518,26
	AMCO	620,88
	AMHA	596,27
	AMUA	008,65
	ITAM	180,87
	AMBC	391,91
	PAIT	467,83

Fonte: O autor (2021).

As etapas metodológicas utilizadas neste Capítulo são apresentadas, de forma resumida, na Figura 2 e apresentadas na sequência.

Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.



Fonte: O autor (2021).

Salienta-se que as etapas referentes à compatibilização entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e IGS14-ECD das séries posicionais apresentadas na Figura 2 foram descritas na Seção 2.3.2 – Experimento 2 – do Capítulo 2 desta pesquisa. Adicionalmente, as coordenadas SIRGAS2000-ECD das séries posicionais foram disponibilizadas pelo IBGE-PPP no período do processamento dos dados (anteriormente a 17 de maio de 2020) e, nesse caso, a compatibilização entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD foi efetuada seguindo a metodologia aplicada pelo IBGE-PPP, descrita na Seção 2.3.1 – Experimento 1 –

do Capítulo 2 desta pesquisa. Ademais, a transformação das séries referenciadas ao IGS14-ECD e SIRGAS2000-ECD para o SGL (Sistema Geodésico Local) foi efetuada como descrito na Seção 2.2 – Séries temporais posicionais – do Capítulo 2 desta pesquisa.

Conforme destacam Nascimento et al. (2017) as séries posicionais contem ruídos aleatórios (flutuações) associados aos erros aleatórios oriundos do processamento dos dados GNSS e, portanto, podem degradar os resultados referentes às amplitudes das séries posicionais. De forma a minimizar o impacto destes ruídos nas amplitudes é conveniente que se aplique algum filtro às séries. Para tal fim, aplicou-se às séries posicionais um filtro de médias móveis (MA) simples centrada.

Um filtro MA é um tipo de convolução matemática que possibilita a construção de uma série de médias móveis a partir da média de valores sequenciais da série original (HYNDMAN, 2010). Este filtro consiste em um filtro FIR (*Finite-Impulse Response*) e pode ser considerado uma espécie de filtro LPF (*Low-Pass Filter*) simples. Dessa forma, ressalta-se que o filtro MA é ideal para reduzir o ruído aleatório das séries, pois mantém as respostas do sinal original (STEVEN, 1999). Destaca-se que as séries de médias móveis tornam a trajetória da série mais coerente à determinação das amplitudes.

Contudo, procedimentos mais robustos que combinam filtros LPF, como os do tipo *Butterworth*, com a FFT (*Fast Fourier Transform*) podem ser aplicados para a obtenção da trajetória das séries em estudo.

A avaliação do efeito da carga hidrológica nas componentes posicionais fundamentou-se na comparação entre variações temporais de cotas linimétricas (nível do rio) e as séries de componentes Δn , Δe , Δu , conforme utilizado por Bevis et al. (2005), Rosa (2008), Costa, Matos e Blitzkow (2012), Giacometti et al. (2017), Nascimento et al. (2017) e Oliveira (2018). Contudo, a série de cotas linimétricas representa apenas a variação superficial da água, não refletindo outros fatores como: movimentos tectônicos (SAADI et al., 2002), suspensão/transporte/deposição de sedimentos nos rios (FILIZOLA; GUYOT, 2011) e abalos sísmicos (ASSUMPÇÃO et al., 2014). Portanto, tal comparação não está relacionada simplesmente às magnitudes, mas ao comportamento do sinal hidrológico representado nas séries, possibilitando assim analisar seus deslocamentos de fase e amplitude (ANDERSEN et al., 2008). Nesse sentido, utilizaram-se os dados linimétricos disponibilizados pelo Porto de Manaus.

Por fim, ajustou-se modelos de regressão linear simples às séries Δn , Δe , Δu , segundo a Eq. (1), para a determinação dos coeficientes de regressão b_1 e, conseqüentemente, das componentes de velocidades (V_n, V_e, V_u) para cada uma das estações utilizadas. Cabe evidenciar

que, como SIRGAS (2020) não especifica critérios e/ou metodologias, não foi aplicado tratamento prévio aos dados referentes às séries temporais.

Ademais, as componentes de velocidades também foram extraídas do VEMOS2009. Como suas velocidades são referenciadas ao IGS05, efetuou-se a compatibilização destas para o IGS14 e, posteriormente, transformaram-nas para o SGL conforme Carvalho (2015). As componentes de velocidade referentes à rede SIRGAS-CON (Rede SIRGAS de Monitoramento Contínuo), referenciadas ao IGS14 e já no SGL foram obtidas na página eletrônica³ do SIRGAS.

Destaca-se que todos os procedimentos estatístico-matemáticos inerentes ao desenvolvimento metodológico anteriormente descrito, bem como os gráficos gerados, foram implementados em *scripts* no *software* R. Tal software caracteriza-se como uma ferramenta robusta para tais aplicações, disponibilizada gratuitamente por R Core Team (2021).

3.5 Resultados e discussões

Uma vez que SIRGAS (2020) recomenda que as séries temporais posicionais devam originar-se de levantamentos GNSS, contínuos ou repetitivos, que cubram um período mínimo de dois anos, verificou-se que os conjuntos de dados utilizados não apresentam períodos menores que 2 anos.

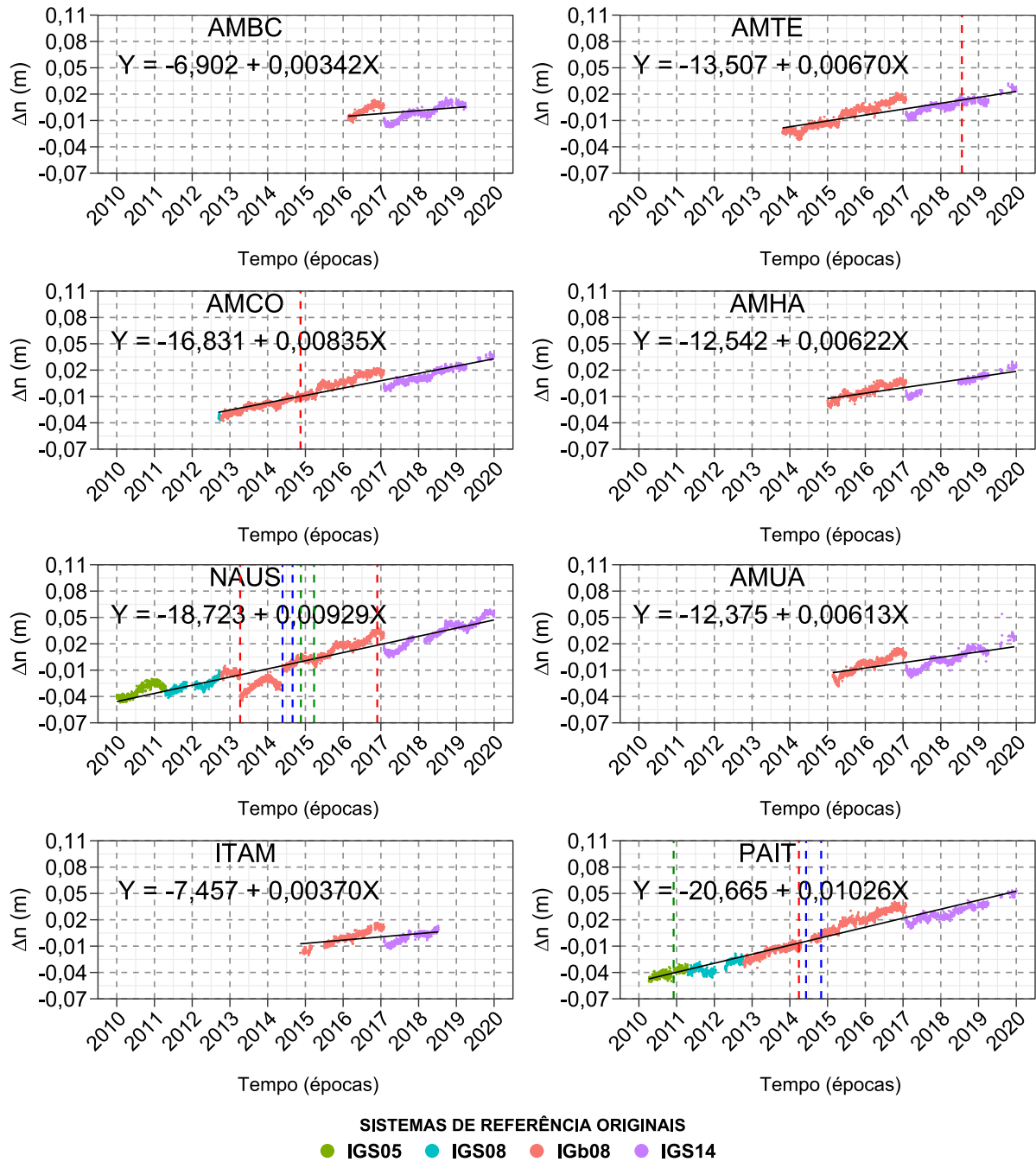
Quanto ao referencial a ser utilizado nas séries temporais, inicialmente optou-se por utilizar as séries de componentes geodésicas locais derivadas das posições geocêntricas em SIRGAS2000-ECD, disponibilizadas pelo IBGE-PPP à época do processamento dos dados (anteriormente a 17 de maio de 2020). No entanto, verificou-se que as séries de componentes norte (Δn) apresentaram uma descontinuidade, associada à época da mudança da rede IGB08 para IGS14, de aproximadamente 0,020 m ($\cong 2$ cm) referente ao período do IGS14, degradando as velocidades V_n referenciadas ao SIRGAS2000-ECD, principalmente para séries menores, como se pode observar na Figura 3. Dessa forma, verificou-se a inviabilidade da aplicação das séries SIRGAS2000-ECD supramencionadas para a estimação de velocidades. Ademais, as séries de componentes leste (Δe) e vertical (Δu) não apresentaram tal descontinuidade.

Tal fato pode ser ocasionado por fatores ligados à compatibilização entre as redes IGS_{yy}-ECD/IGB_{yy}-ECD e SIRGAS2000-ECD, tais como a aplicação de parâmetros de transformação “fixos”, indispondo das respectivas variações temporais (ver Tabela 4), o que impossibilita suas atualizações temporais; a compatibilização individual (direta) entre cada rede

³ <http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/stations/>

IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD, ou seja, de {IGS05-ECD, IGS08-ECD, IGb08-ECD, IGS14-ECD} para SIRGAS2000-ECD; e/ou a maior consistência do ITRF2014 e, conseqüentemente, do IGS14-ECD em relação as realizações anteriores (ALTAMIMI et al., 2016).

Figura 3 – Séries de componentes norte (Δn) derivadas das soluções em SIRGAS2000 disponibilizadas pelo IBGE-PPP. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.



Fonte: O autor (2021).

Contudo, IBGE-PPP (2020) destaca que a partir de 17 de maio de 2020 passou a adotar

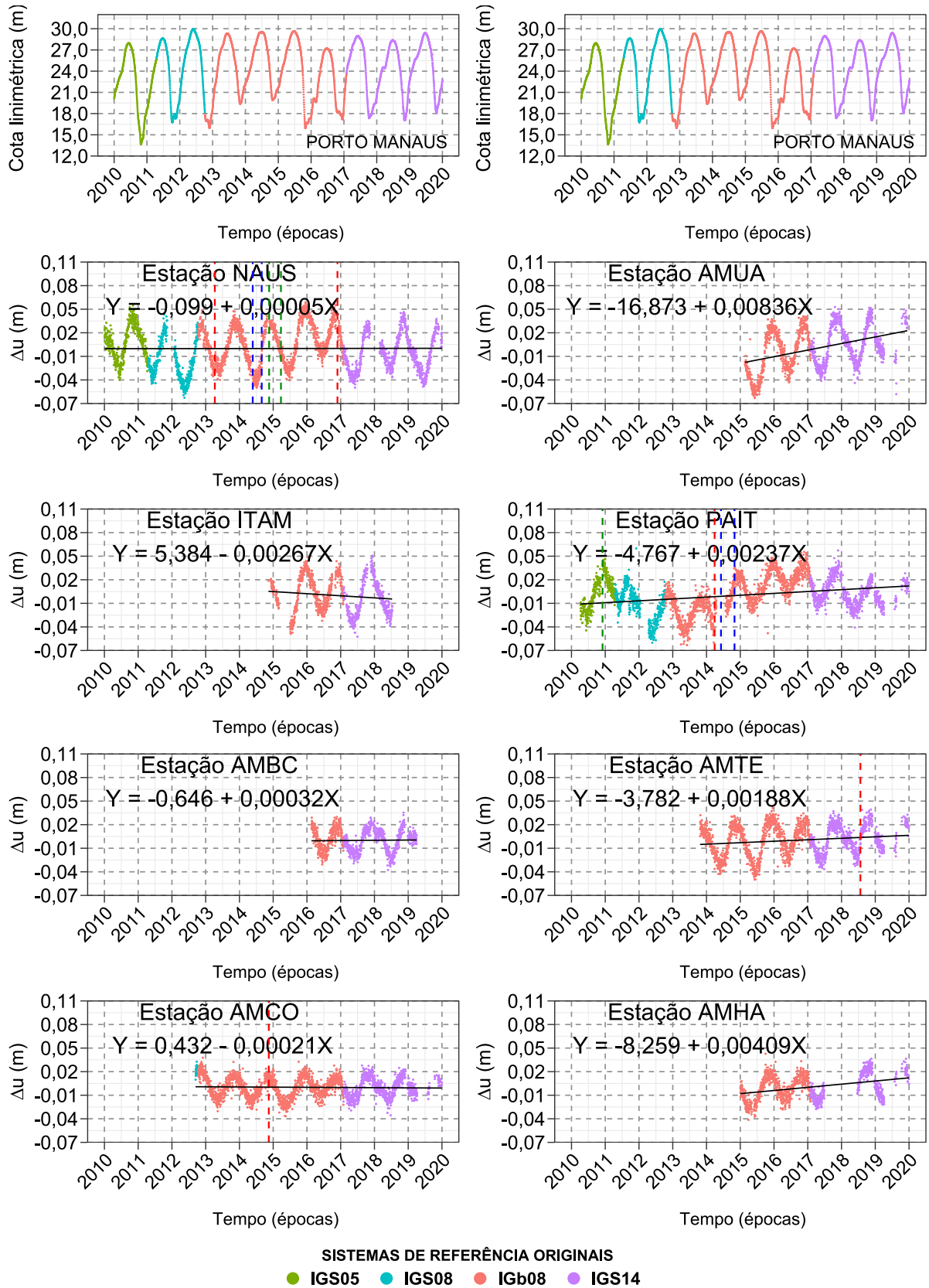
novos conjuntos de parâmetros de transformação entre as redes IGSyy-ECD/IGbbyy-ECD e SIRGAS2000-ECD. Esta alteração visa diminuir os impactos causados pelas trocas de redes ocorridas ao longo do tempo. Destaca também que as diferenças entre as coordenadas determinadas com os parâmetros novos e antigos podem variar de poucos milímetros a 2 cm e a 3cm para as componentes planimétricas e altimétricas, respectivamente. Nesse sentido, os impactos desta mudança foram avaliados e expressos no Capítulo 2 do corrente trabalho.

As séries das componentes compatibilizadas e referenciadas ao IGS14-ECD foram verificadas e constatou-se que estas não apresentaram a descontinuidade anteriormente destacada e, portanto, optou-se por utiliza-las neste Capítulo. De forma a auxiliar nas análises, manteve-se as séries de cotas linimétricas na parte superior das Figuras 4, 5 e 6. Considerando a Figura 4 pode-se observar que as séries de componentes Δu sofrem grande influência do efeito da carga hidrológica, apresentando comportamento oscilatório inverso ao da série de cotas linimétricas, com diferença de fase de aproximadamente 180° , reafirmando o já apresentado em Davis et al. (2004), Bevis et al. (2005) e Costa, Matos e Blitzkow (2012). Todavia, verifica-se nas Figuras 5 e 6 que as séries de componentes Δn e Δe também sofrem tal efeito, porém em menor grau, quando comparadas à componente vertical e linimétrica.

As séries de componentes Δu dispostas na Figura 4 evidenciaram que a estação AMCO, distante aproximadamente 620,88 quilômetros da estação NAUS, apresentou menor magnitude nas oscilações quando comparada às estações NAUS e AMUA. Além disso, a série de componente Δu destas estações (NAUS e AMUA) descrevem uma evolução temporal diferente entre si, mesmo estando próximas (aproximadamente 8,65 quilômetros), porém com magnitude similar. Adicionalmente, notou-se um expressivo efeito adicional à carga hidrológica na série Δu da estação PAIT, o que pode degradar sua amplitude. Nesse caso, Saadi et al. (2002) destaca a existência de uma falha geológica transcorrente⁴ na região de Itaituba – PA, o que pode ocasionar/contribuir para o efeito adicional, devendo assim ser investigado. Ademais, nota-se que as séries de componentes Δn e Δe dispostas nas Figuras 5 e 6 evidenciam o movimento linear sistemático de deslocamento da Placa Sul-Americana, cujas orientações resultantes apontam para direção noroeste, com azimute médio de aproximadamente 342° (DREWES; HEIDBACH, 2012; CARVALHO, 2015).

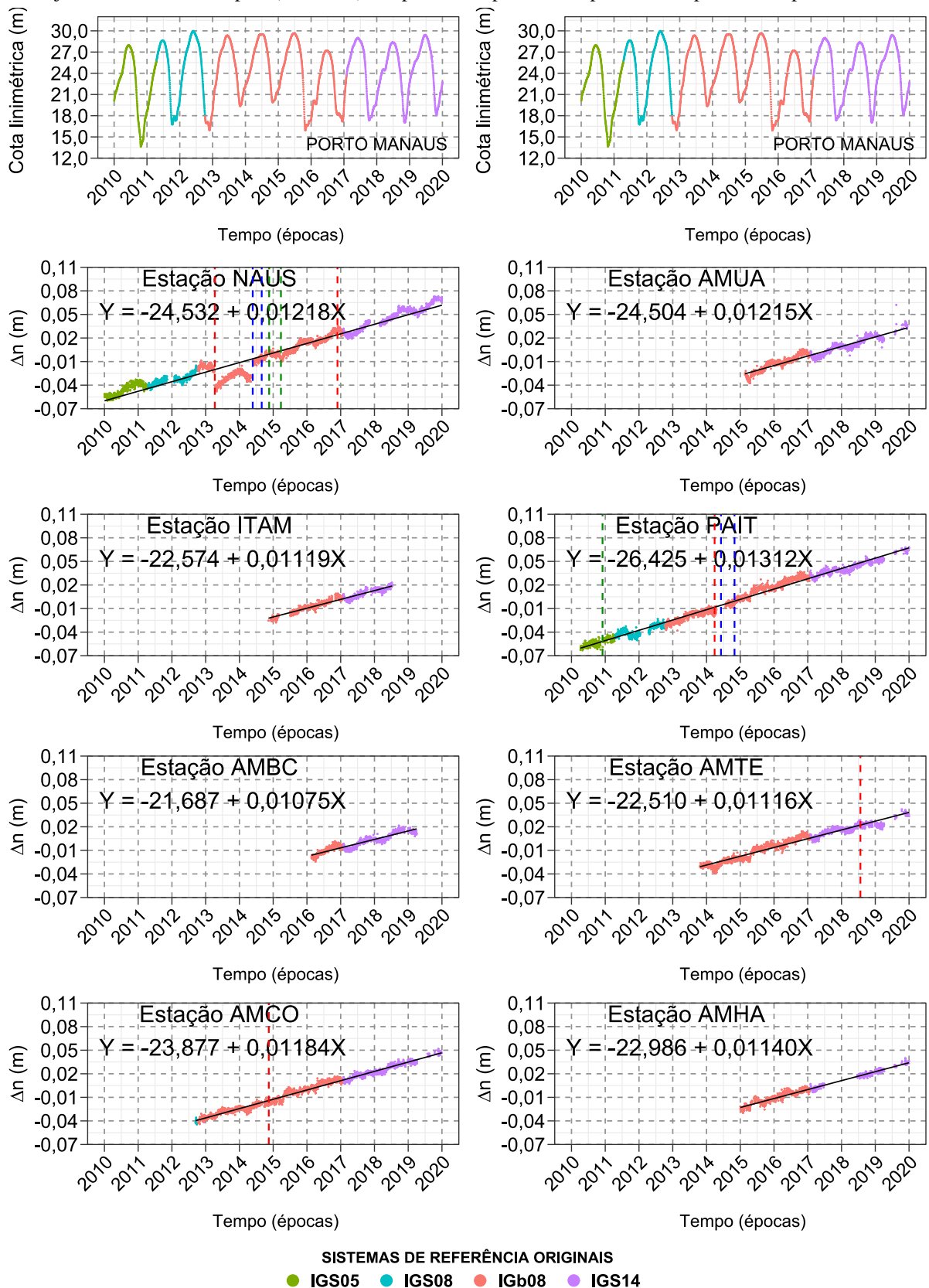
⁴ Falhas transcorrentes (sinônimos: de rejeito direcional, de rasgamento) são aquelas ao longo dos quais o deslocamento dos blocos (original ou por reativação) é predominantemente horizontal e paralelo à direção da falha. A descrição ou definição de uma determinada falha transcorrente está associada ao caráter da movimentação lateral – se original e persistente, ou reativação de uma falha originalmente normal ou reversa – e pode gerar implicações (ZALÁN, 1986).

Figura 4 – Série de cotas limimétricas da estação do porto de Manaus e séries de componentes vertical (Δu) em IGS14-ECD. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.



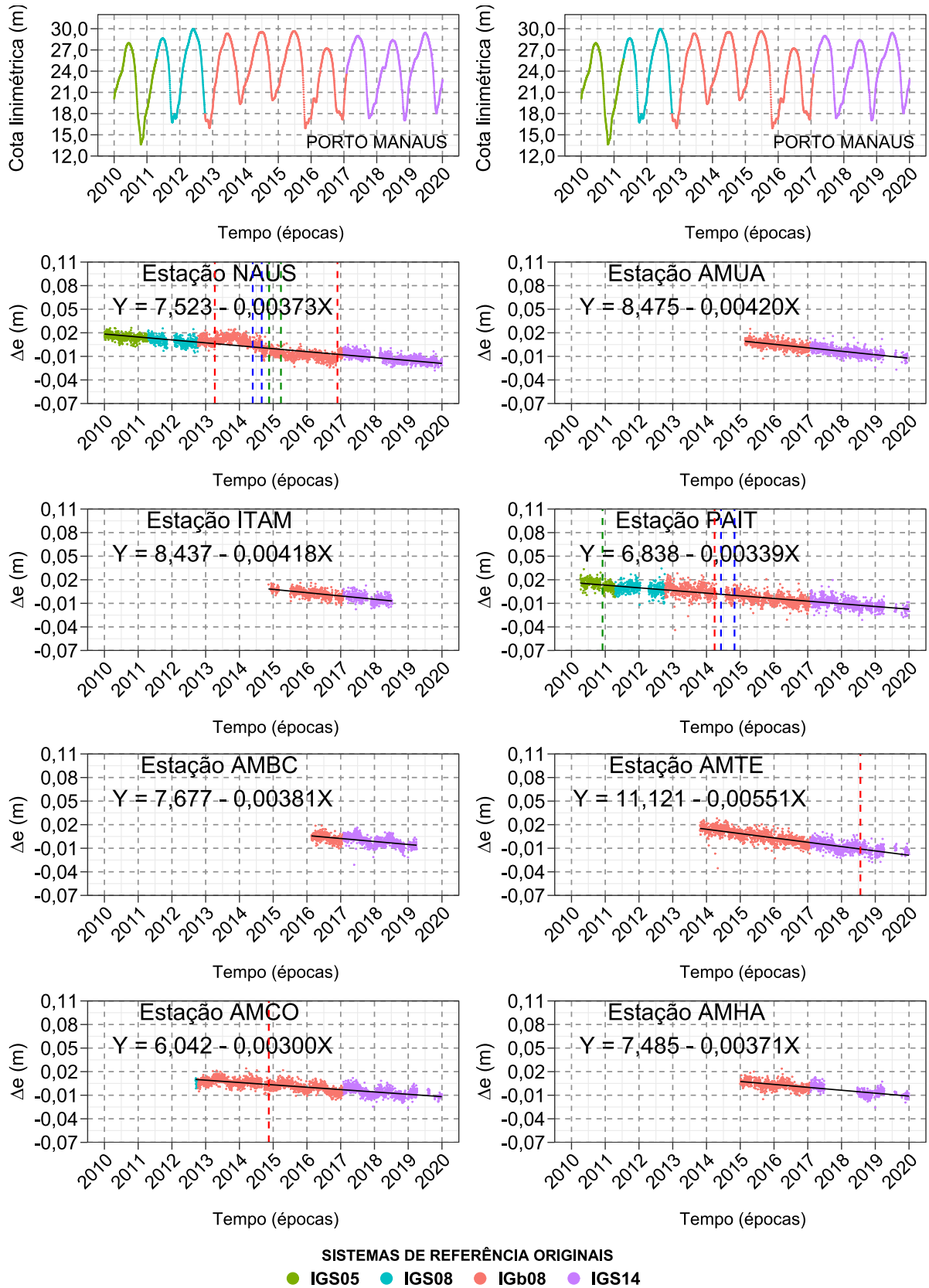
Fonte: O autor (2021).

Figura 5 – Série de cotas linimétricas da estação do porto de Manaus e séries de componentes norte (Δn) em IGS14-ECD. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca de conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.



Fonte: O autor (2021).

Figura 6 – Série de cotas limimétricas da estação do porto de Manaus e séries de componentes leste (Δe) em IGS14-ECD. As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.



Fonte: O autor (2021).

Considerando as amplitudes apresentadas na Tabela 3 e Figura 7 observa-se que a série Δu da estação NAUS apresentou maior amplitude média dentre as estações consideradas. No entanto, suas maiores amplitudes ocorreram em 2012 (0,084 m) e 2015 (0,079 m), justificável pelos eventos extremos máximos (cheias), evidenciados na série de cotas linimétricas, refletindo assim o efeito da carga hidrológica. Adicionalmente, a amplitude média obtida em AMUA foi similar à obtida na estação NAUS, fato justificável pela proximidade entre ambas as estações (8,65 quilômetros). As demais estações obtiveram amplitude média menor que a apresentada na NAUS para a componente considerada. De forma análoga, verificou-se que a maior amplitude média para série Δn ocorreu para a estação NAUS, porém com valor inferior ao obtido na série Δu . A maior amplitude da série Δn da estação NAUS também ocorreu em 2012 (0,020 m), o que mostra a influência do efeito da carga nesta componente. Em relação às séries Δe , maior amplitude média foi obtida por AMBC (0,016 m).

Tabela 3 – Amplitudes referentes às séries temporais das estações.

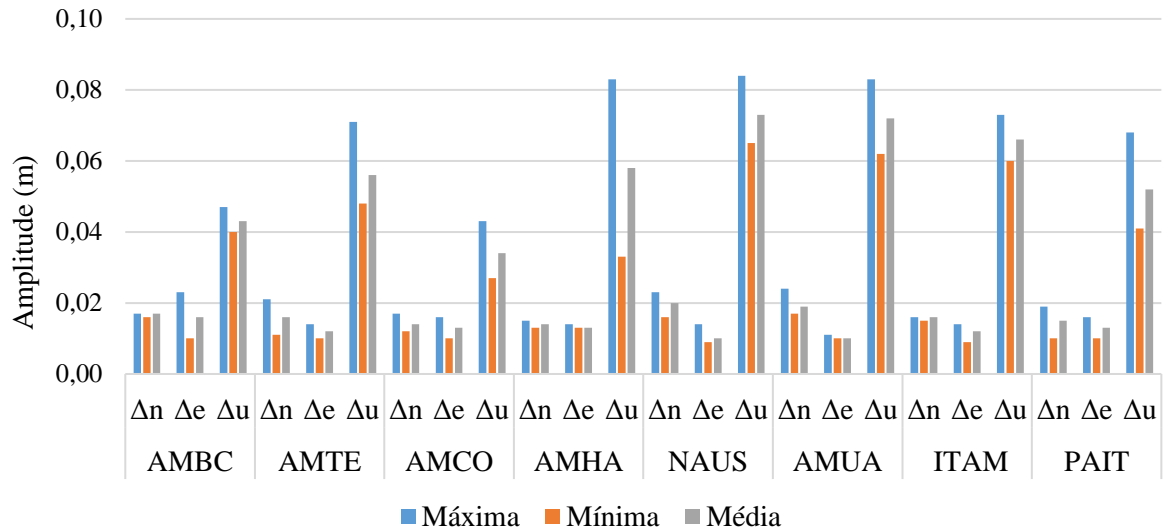
Estação	Comp.	Amplitudes (m)												
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Máx.	Mín.	Méd.
MANAUS	LINIM.	14,32	11,86	14,00	10,71	9,60	13,74	9,99	11,66	11,33	11,36	14,32	9,60	11,86
AMBC	Δn	*	*	*	*	*	*	0,017	0,017	0,016	**	0,017	0,016	0,017
	Δe	*	*	*	*	*	*	0,010	0,023	0,017	**	0,023	0,010	0,016
	Δu	*	*	*	*	*	*	0,040	0,043	0,047	**	0,047	0,040	0,043
AMTE	Δn	*	*	*	**	0,016	0,021	0,016	0,015	0,011	**	0,021	0,011	0,016
	Δe	*	*	*	**	0,012	0,010	0,011	0,014	0,014	**	0,014	0,010	0,012
	Δu	*	*	*	**	0,052	0,071	0,048	0,054	0,053	**	0,071	0,048	0,056
AMCO	Δn	*	*	**	0,014	0,013	0,017	0,014	0,012	0,014	**	0,017	0,012	0,014
	Δe	*	*	**	0,010	0,016	0,012	0,014	0,014	0,014	**	0,016	0,010	0,013
	Δu	*	*	**	0,034	0,031	0,043	0,027	0,035	0,036	**	0,043	0,027	0,034
AMHA	Δn	*	*	*	*	*	0,015	0,013	**	**	**	0,015	0,013	0,014
	Δe	*	*	*	*	*	0,013	0,014	**	**	**	0,014	0,013	0,013
	Δu	*	*	*	*	*	0,083	0,033	**	**	**	0,083	0,033	0,058
NAUS	Δn	0,021	0,016	0,023	**	**	0,023	0,020	0,019	0,021	0,021	0,023	0,016	0,020
	Δe	0,009	0,009	0,014	**	**	0,010	0,011	0,009	0,011	0,009	0,014	0,009	0,010
	Δu	0,074	0,065	0,084	**	**	0,079	0,070	0,075	0,065	0,073	0,084	0,065	0,073
AMUA	Δn	*	*	*	*	*	0,024	0,017	0,017	0,018	**	0,024	0,017	0,019
	Δe	*	*	*	*	*	0,010	0,010	0,011	0,010	**	0,011	0,010	0,010
	Δu	*	*	*	*	*	0,083	0,062	0,072	0,071	**	0,083	0,062	0,072
ITAM	Δn	*	*	*	*	**	**	0,016	0,015	**	*	0,016	0,015	0,016
	Δe	*	*	*	*	**	**	0,009	0,014	**	*	0,014	0,009	0,012
	Δu	*	*	*	*	**	**	0,060	0,073	**	*	0,073	0,060	0,066
PAIT	Δn	0,010	0,013	0,015	0,015	0,019	0,018	0,018	0,013	0,015	**	0,019	0,010	0,015
	Δe	0,013	0,010	0,011	0,014	0,013	0,016	0,012	0,015	0,013	**	0,016	0,010	0,013
	Δu	0,066	0,047	0,057	0,043	0,068	0,052	0,041	0,047	0,042	**	0,068	0,041	0,052

*Período sem dados.

**Contiveram descontinuidades que degradaram as amplitudes.

Fonte: O autor (2021).

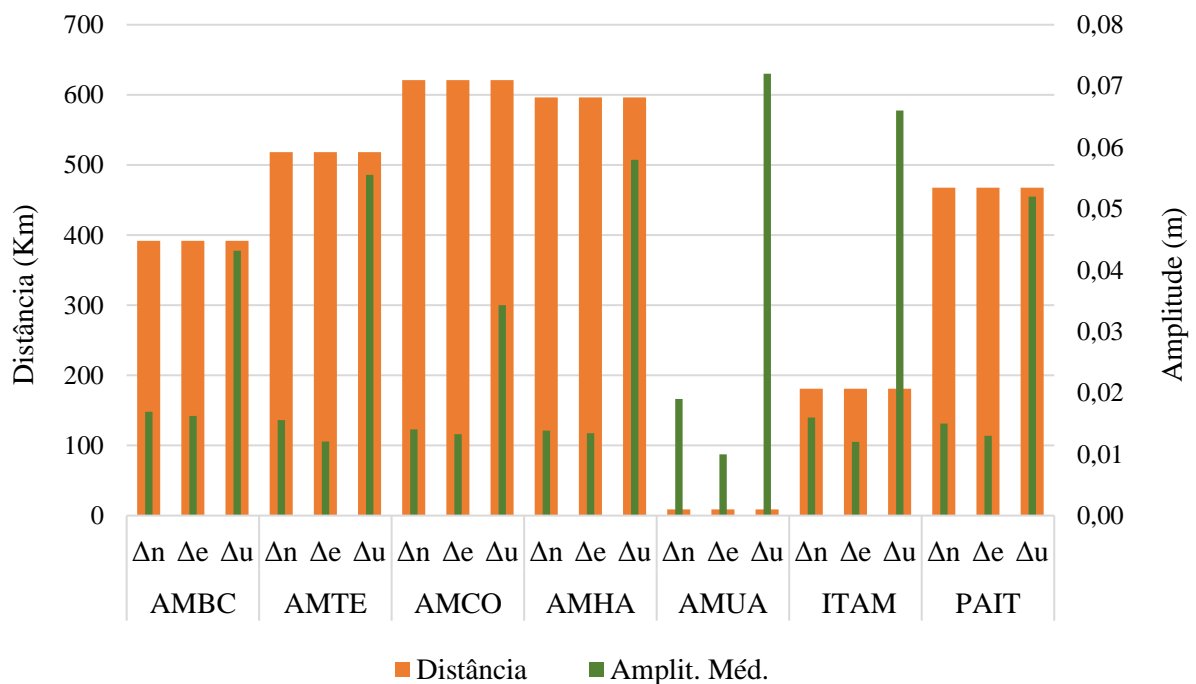
Figura 7 – Estatísticas referentes às amplitudes associadas às séries temporais das estações utilizadas.



Fonte: O autor (2021).

Adicionalmente, pode-se observar na Figura 8 que mesmo com maiores distâncias relativas à NAUS, as estações AMTE e AMHA não apresentaram menores amplitudes médias nas séries Δu , quando comparadas às estações AMBC e PAIT, com menores distâncias. Destaca-se que fatores geológicos e/ou geofísicos podem influenciar as amplitudes e, portanto, devem ser considerados e investigados de forma multidisciplinar.

Figura 8 – Distâncias relativas à estação NAUS e amplitudes médias associadas às séries temporais das estações utilizadas.



Fonte: O autor (2021).

Em termos do comportamento oscilatório das séries pode-se verificar que as séries Δn

e Δu das estações NAUS, AMUA e AMBC estão aproximadamente em fase. Além disso, as séries Δe das estações AMBC, AMTE e AMCO se apresentam (ou estão) fora de fase (aproximadamente 180°) em relação às séries Δn e Δu , e em fase (aproximadamente 0°) em relação à série de cotas linimétricas.

Se faz necessário frisar que a estação NAUS apresentou salto (ocasionado por trocas de antenas) entre os anos de 2013 e 2014 e, portanto, desconsiderou-se este período na determinação das amplitudes.

Em virtude da comprovação da sensibilidade das séries posicionais ao efeito da carga hidrológica, pode-se inferir que as velocidades determinadas a partir destas podem ter suas estimativas mais realistas, o que justifica a recomendação de SIRGAS (2020). Nesse sentido, considerando a frequente utilização do VEMOS2009 (DREWES; HEIDBACH, 2012) para extração das velocidades no Brasil, comparou-se seus resultados aos obtidos com as séries temporais. Ademais, as velocidades obtidas com as séries posicionais também foram comparadas às disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON para algumas das estações utilizadas.

Evidencia-se que o VEMOS2009 consiste em um modelo que representa as médias anuais dos movimentos horizontais da superfície (planimétrico), abrangendo apenas um determinado período, desconsiderando os efeitos cossísmicos (saltos) (SIRGAS, 2020). Nesse sentido, Drewes e Heidbach (2012) destacam que os efeitos cossísmicos se referem aos grandes terremotos ocorridos em regiões sismogênicas como os de Cariaco, na Venezuela em 1997 e Arequipa, no Peru em 2001. Como o Brasil se encontra na parte estável da placa Sul-Americana, tais efeitos não são significativos.

Outro fator é a baixa densidade de estações utilizadas na construção do VEMOS2009 para a região de estudo, podendo assim não incorporar/refletir o efeito da carga hidrológica. De fato, o erro de previsão das velocidades varia, dependendo da região, de menos de 1 mm/ano a até 9 mm/ano nas áreas com cobertura com observação esparsa, caso da parte central da placa Sul-Americana em que se situa o Brasil (DREWES; HEIDBACH, 2012). Adicionalmente, a indisponibilidade das componentes verticais está associada à dificuldade da modelagem das variações verticais superficiais, que dependem de modelos geofísicos regionais e locais muito detalhados para a estimação de movimentos locais da crosta (DREWES; HEIDBACH, 2012; IBGE, 2015).

Salienta-se que os períodos utilizados nas séries temporais abrangem eventos extremos (secas e cheias, observáveis na série linimétrica) e diferem tanto do período de cobertura do VEMOS2009 quanto do período utilizado para a determinação das componentes disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON. Ramos, Dal Poz e Carvalho (2016) ressaltam que o

método de determinação das velocidades pode gerar impacto centimétrico no PPP, devido à aplicação destas nos procedimentos de atualização temporal de coordenadas.

Nesse contexto, a Tabela 4 e Figura 9 apresentam as velocidades V_n , V_e e V_u oriundas das séries temporais; do VEMOS2009 e fornecidas pela rede SIRGAS-CON. Adicionalmente, destaca-se que a magnitude acentuada observada para as componentes V_n e V_e decorrem do comportamento linear sistemático do deslocamento da placa Sul-Americana, que apresenta a resultante na direção noroeste. De fato, tal resultante está associada ao crescimento e decréscimo linear sistemático evidenciado nas séries de componentes Δn e Δe , respectivamente.

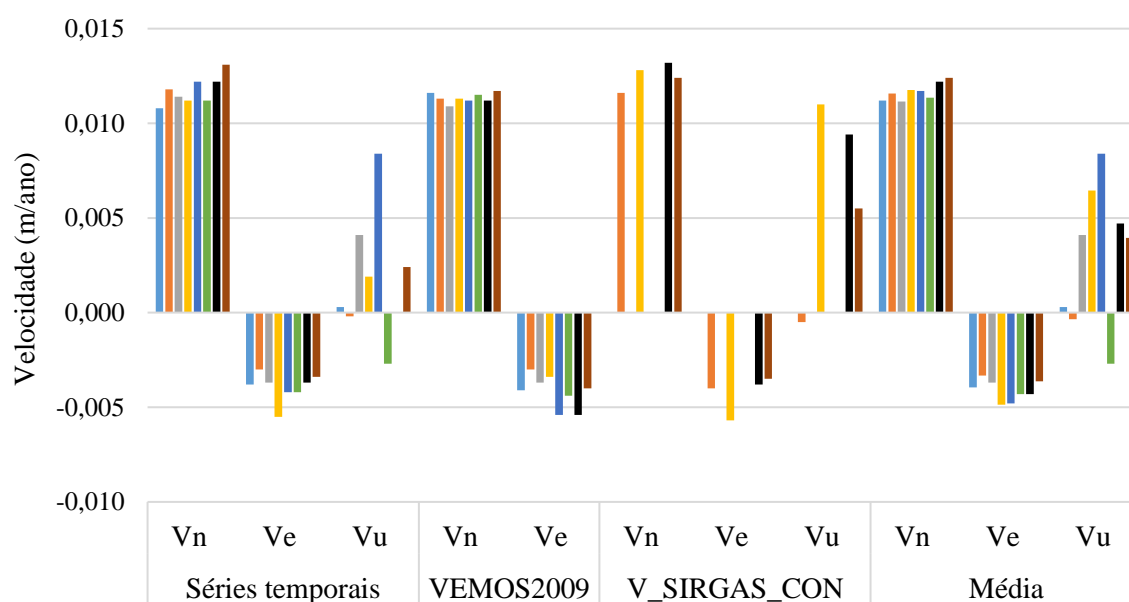
Tabela 4 – Componentes de velocidades referenciadas ao ITRF2014 (IGS14) determinadas por séries temporais, derivadas do VEMOS2009 e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.

Estação RBMC	Séries temporais			VEMOS2009		V_SIRGAS-CON		
	V_n (m /ano)	V_e (m /ano)	V_u (m /ano)	V_n (m /ano)	V_e (m /ano)	V_n (m /ano)	V_e (m /ano)	V_u (m /ano)
AMBC	0,0108	-0,0038	0,0003	0,0116	-0,0041	ND	ND	ND
AMCO	0,0118	-0,0030	-0,0002	0,0113	-0,0030	0,0116	-0,0040	-0,0005
AMHA	0,0114	-0,0037	0,0041	0,0109	-0,0037	ND	ND	ND
AMMU	0,0115	-0,0046	-0,0029	0,0116	-0,0042	ND	ND	ND
AMTE	0,0112	-0,0055	0,0019	0,0113	-0,0034	0,0128	-0,0057	0,0110
AMUA	0,0122	-0,0042	0,0084	0,0112	-0,0054	ND	ND	ND
ITAM	0,0112	-0,0042	-0,0027	0,0115	-0,0044	ND	ND	ND
NAUS	0,0122	-0,0037	0,0000	0,0112	-0,0054	0,0132	-0,0038	0,0094
PAIT	0,0131	-0,0034	0,0024	0,0117	-0,0040	0,0124	-0,0035	0,0055

*ND (Não disponível)

Fonte: O autor (2021).

Figura 9 – Velocidades referentes às séries temporais, VEMOS2009 e SIRGAS-CON das estações utilizadas.



■ AMBC ■ AMCO ■ AMHA ■ AMTE ■ AMUA ■ ITAM ■ NAUS ■ PAIT

Fonte: O autor (2021).

A partir das discrepâncias ΔV_n , ΔV_e e ΔV_u apresentadas na Tabela 5 e Figura 10 pode-se inferir que as variações entre as componentes determinadas com as séries temporais e as do VEMOS2009 foram de ordem submilimétrica para a maioria das estações, exceto para a componente V_e das estações AMTE e AMUA; componente V_n da estação PAIT e componentes V_n e V_e da estação NAUS que apresentaram ordem milimétrica. Ademais, as maiores discrepâncias na componente V_n ocorreram para as estações PAIT, NAUS e AMUA, sendo que para as duas últimas os valores foram similares. Considerando a componente V_e verificou-se que as maiores discrepâncias ocorreram para as estações AMTE, NAUS e AMUA. Nesse sentido, observa-se que as estações NAUS e AMUA apresentam maiores discrepâncias tanto para V_n quanto para V_e .

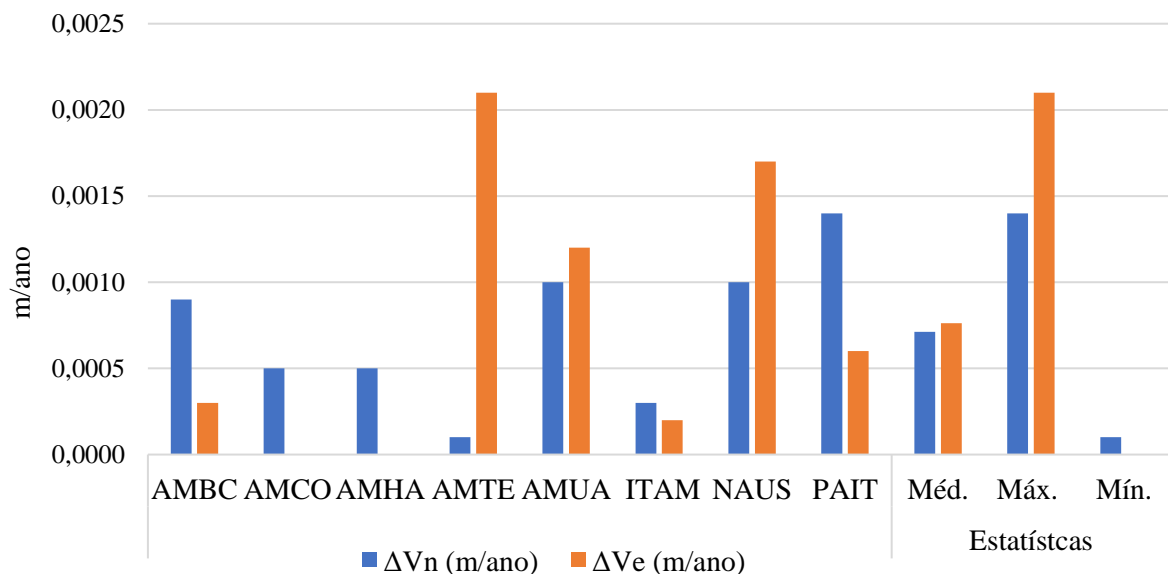
Tabela 5 – Discrepâncias entre as componentes de velocidades estimadas por séries temporais e derivadas do VEMOS2009.

Discrepâncias Séries temporais - VEMOS2009									
	AMBC	AMCO	AMHA	AMMU	AMTE	AMUA	ITAM	NAUS	PAIT
ΔV_n (m/ano)	0,0009	0,0005	0,0005	0,0001	0,0001	0,0009	0,0003	0,0010	0,0014
ΔV_e (m/ano)	0,0003	0,0000	0,0000	0,0004	0,0021	0,0012	0,0002	0,0017	0,0006

*ND (Não disponível)

Fonte: O autor (2021).

Figura 10 – Discrepâncias entre as velocidades estimadas com as séries temporais e derivadas do VEMOS2009.



Fonte: O autor (2021).

Fundamentando-se na Tabela 6 e Figura 11 constatou-se que valores significativos foram obtidos para as discrepâncias associadas às componentes verticais das estações NAUS e AMTE, com exceção da estação AMCO, o que evidencia a necessidade de se considerar a

modelagem dos efeitos de fatores adicionais que podem influenciar as séries posicionais, tais como os saltos e os efeitos de ordem superior da ionosfera, para que se obtenha uma estimativa precisa das componentes de velocidade associadas a tal componente.

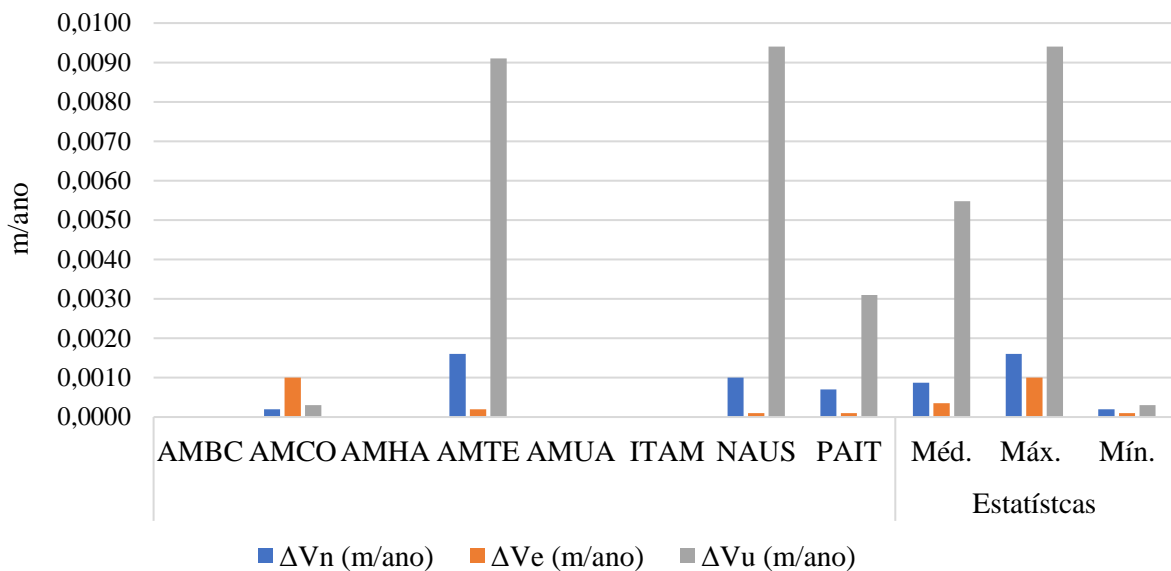
Tabela 6 – Discrepâncias referentes às componentes de velocidades estimadas por séries temporais e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.

Discrepâncias Séries temporais - V_SIRGAS-CON									
	AMBC	AMCO	AMHA	AMMU	AMTE	AMUA	ITAM	NAUS	PAIT
ΔV_n (m/ano)	ND	0,0002	ND	ND	0,0016	ND	ND	0,0010	0,0007
ΔV_e (m/ano)	ND	0,0010	ND	ND	0,0002	ND	ND	0,0001	0,0001
ΔV_u (m/ano)	ND	0,0003	ND	ND	0,0091	ND	ND	0,0094	0,0031

*ND (Não disponível)

Fonte: O autor (2021).

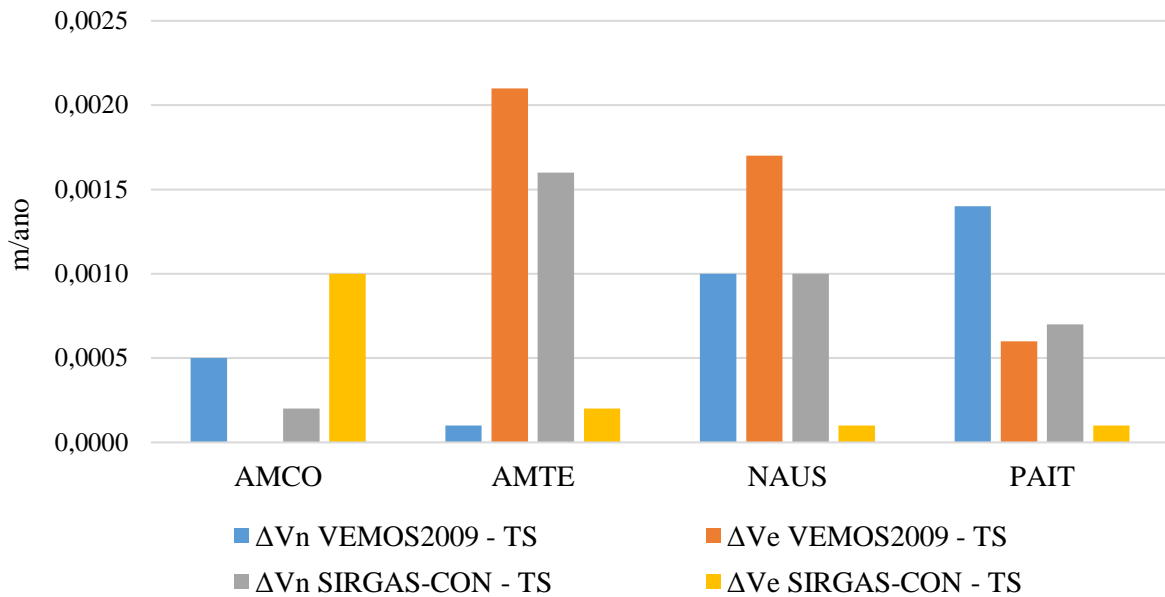
Figura 11 – Discrepâncias entre as velocidades estimadas com as séries temporais e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.



Fonte: O autor (2021).

Considerando as discrepâncias ΔV_n e ΔV_e entre as séries temporais e SIRGAS-CON dispostas na Figura 12 pode-se notar que ΔV_n apresenta valores maiores quando comparados aos de ΔV_e para AMTE, NAUS e AMUA. Comportamento similar é evidenciado para ΔV_n e ΔV_e das estações AMCO e PAIT, quando consideradas as discrepâncias entre as séries temporais e VEMOS2009. No entanto, ao considerar as discrepâncias ΔV_n e ΔV_e entre as séries temporais e SIRGAS-CON observa-se que os valores de ΔV_e são maiores quando comparados aos de ΔV_n para a estação AMCO. O mesmo ocorre para as estações AMTE e NAUS, considerando as discrepâncias ΔV_n e ΔV_e entre as séries temporais e VEMOS2009.

Figura 12 – Discrepâncias entre as velocidades planimétricas estimadas com as séries temporais (TS), VEMOS2009 e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON.



Fonte: O autor (2021).

Adicionalmente destaca-se que a modelagem utilizada pela rede SIRGAS-CON para a estimação das velocidades fundamenta-se na utilização do método de colocação por mínimos quadrados com funções de covariância empiricamente determinadas, cujos detalhes da modelagem podem ser consultados em Sánchez e Drewes (2016).

Adotando-se uma modelagem dos efeitos sazonais caracterizados pelas amplitudes observadas nas séries Δu e dos fatores adicionais como saltos e efeitos de ordem superior da ionosfera que afetam as séries posicionais na determinação de V_u , destacamos que sua inserção no processo de atualização temporal de coordenadas pode (ou poderá) proporcionar resultados mais acurados. Nesse sentido, avaliar a significância das velocidades estimadas das séries temporais no processo de atualização temporal de coordenadas é de grande valia.

3.6 Considerações finais, conclusões e recomendações

Diante do exposto pode-se constatar que as séries de componentes Δn , Δe e Δu são afetadas pelo efeito da carga hidrológica, porém, com magnitudes diferentes, influenciando assim as velocidades determinadas a partir destas, o que justifica a recomendação da utilização das séries temporais para a determinação das componentes de velocidade V_n , V_e e V_u .

As séries de componentes norte (Δn) derivadas das posições em SIRGAS2000-ECD disponibilizadas pelo IBGE-PPP apresentou descontinuidade ($\cong 2$ cm) para o período de referente ao IGS14, em todas as estações utilizadas, o que pode ser associados aos parâmetros de transformação “fixos” aplicados, bem como o procedimento de conversão individual (direta)

entre as redes IGSyy-ECD/IGbyy-ECD e o SIRGAS2000-ECD. No entanto, a partir de 17 de maio de 2020, o IBGE-PPP passou a adotar novos conjuntos de parâmetros de transformação entre os referenciais, o que pode reduzir/eliminar tal descontinuidade. Os efeitos dessa mudança foram avaliados e apresentados no Capítulo 2 deste trabalho. Adicionalmente, o posicionamento de alta precisão realizado no período de transição entre o IGB08 e o IGS14, processados no IBGE-PPP antes da data supramencionada e que utilizam soluções SIRGAS2000-ECD fornecidas pelo IBGE-PPP podem apresentar incoerências.

A expressividade do efeito de carga hidrológica é mais evidente nas séries de componentes verticais, o que pode ser observado nas amplitudes médias determinadas. No entanto, as séries de componentes planimétricas (Δn e Δe) obtiveram amplitudes médias menores quando comparadas às das componentes verticais. Observou-se que os maiores valores de amplitude média foram obtidos para a estação NAUS, alcançando 0,020 m e 0,073 m, respectivamente. Considerando as séries de componentes Δe verificou-se que o maior valor de amplitude média foi apresentado na estação AMBC, atingindo 0,016 m.

Salienta-se que as séries de componentes Δn das estações próximas ao Rio Negro (NAUS, AMUA e AMBC) apresentaram maior sensibilidade ao efeito da carga hidrológica, obtendo maior amplitude média. Além disso, observou-se que as séries Δn e Δu das estações NAUS, AMUA e AMBC estão aproximadamente em fase. Quando comparadas às séries de cotas linimétricas, ambas apresentaram diferença de fase de aproximadamente 180° . Ademais, as séries Δe das estações AMBC, AMTE e AMCO apresentam fora de fase (aproximadamente 180°) quando comparadas às séries Δn e Δu , e aproximadamente em fase (aproximadamente 0°) quando comparadas às séries de cotas linimétricas.

Relação direta entre as distâncias e amplitudes não foram estabelecidas para a maioria dos casos considerados, ou seja, estações com maiores distâncias relativas à NAUS não apresentaram menores amplitudes médias. Nesse contexto, variáveis geológicas, geofísicas, sedimentares etc. devem ser consideradas nas avaliações da propagação do efeito da carga hidrológica.

Quando avaliadas as velocidades V_n e V_e estimadas com as séries posicionais, observou-se que estas diferiram das mesmas componentes derivadas do VEMOS2009 e das disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON e devem ter sua significância avaliada. Nesse contexto, as velocidades estimadas com as séries posicionais podem ser mais realistas por abarcarem a influência dos fatores locais, com predominância da carga hidrológica para a área considerada. Contudo, deve-se considerar que a expressividade nas velocidades V_n e V_e decorre do efeito majoritário do deslocamento da placa Sul-Americana. Ademais, as séries

temporais possibilitaram a estimação da componente Vu .

Por fim, recomenda-se efetuar uma análise robusta das séries temporais com a finalidade de avaliar e/ou corrigir descontinuidades artificiais, avaliar/modelar fatores periódicos e tendenciosos, o que possibilita melhores estimativas para as velocidades e deformações crustais. Além disso, abordar a determinação das velocidades com suas respectivas propagações de variâncias, com análise de precisão e acurácia também é de grande valia. Ademais, utilizar softwares científicos que permita ao usuário maior domínio sobre os parâmetros de processamento para gerar soluções de PPP é importante, uma vez que proporcionam ao usuário conhecimento aprofundado sobre os parâmetros de processamento, possibilitando assim o estudo de efeitos específicos que afetam o posicionamento.

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: <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0987-5>.

ALTAMIMI, Z.; REBISCHUNG, P.; MÉTIVIER, L.; COLLILIEUX, X. ITRF2014: A new release of the international terrestrial reference frame modeling nonlinear station motions. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, v. 121, n. 8, p. 6109-6131, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JB013098>.

ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica**. 76 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

ANDERSEN, O., P. BERRY, J. FREEMAN, F. G. LEMOINE, S. LUTSCKHE, F. JAKOBSEN, AND M. BUTTS. Satellite altimetry and GRACE gravimetry for studies of annual water storage variations in Bangladesh. **Terr. Atmos. Ocean. Sci.**, v. 19, p. 47-52, 2008. DOI: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.47(SA).

ASSUMPÇÃO, M.; FERREIRA, J.M.; BEZERRA, H.; FRANÇA, G.S.; BARBOSA, J.R.; MENEZES, E.; RIBOTTA, L.C.; PIRCHINER, M.; NASCIMENTO, A.; DOURADO, J.C. Intraplate seismicity in Brazil. In: Talwani, P. **Intraplate Earthquakes**. S. N. A. de (Ed.). Cambridge, 2014. p. 50-71.

AZAMBUJA; J. L. F.; MATSUOKA, M. T Velocidades das coordenadas obtidas por Posicionamento por Ponto Preciso: um modelo considerando coordenadas horizontais e altura elipsoidal. **Revista Brasileira de Geomática**. v.4, n. 2, 2016. p.70-80. DOI: 10.3895/rbgeo.v4n2.5480.

BEVIS, M.; ALSDORF, D.; KENDRICK, E.; FORTES, L. P.; FORSBURG, B.; SMALLEY JUNIOR, R.; BECKER, J. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 16, p. 1-4, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023491>.

BOGUSZ, J.; KLOS, A. On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. **GPS Solutions**, v. 20, n. 4, p. 655–664, 2016. DOI: 10.1007/s10291-015-0478-9.

BUSSAB, W. O.; MORETTIN, P. A. **Estatística Básica**. 9ª ed. 2017 São Paulo: Saraiva, 2005.

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

CARVALHO, A. S.; DAL POZ, W. R.; LARocca, A. P. C. Compatibilização de referenciais de coordenadas e velocidades com estimativa de precisão. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n. 3, p. 590-609, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702015000300033>.

CHOY, S. L.; BISNATH, S.; RIZOS, C. Uncovering common misconceptions in GNSS precise point positioning and its future prospect. **GPS Solutions**, v. 21, n.1, p. 13-22, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>.

COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, p. 262-281, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702012000200006>.

DAVIS, J. L.; ELO´SEGUI, P.; MITROVICA, J. X.; TAMISIEA; M. E. Climate-driven deformation of the solid Earth from GRACE and GPS. **Geophysical Research Letters**, v. 31, L24605, 2004. DOI: 10.1029/2004GL021435.

DREWES, H.; O. HEIDBACH. The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: KENYON S.; PACINO M.; MARTI U. (eds). **Geodesy for Planet Earth**. International Association of Geodesy Symposia, Springer, Berlin, v. 136, p. 657-664, 2012. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1_81.

FAZILOVA, D.; EHGAMBERDIEV, SH.; KUZIN, S. Application of time series modeling to a national reference frame realization. **Geodesy and Geodynamics**, v. 9, p. 281-287, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.04.003>.

FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 41, n. 4, p. 566-576, dez. de 2011. DOI: 10.25249/0375-7536.2011414566576.

FRITSCHÉ, M.; DÖLL, P.; DIETRICH, R. Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth’s crust from continental watermass and atmospheric pressure variations using GPS. **Journal of Geodynamics**, v. 59, n. 60, p. 133- 142, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.04.001>.

FU, Y.; ARGUS, D. F.; FREYMUELLER, J. T.; HEFLIN, M. B. Horizontal motion in elastic response to seasonal loading of rain water in the Amazon Basin and monsoon water in Southeast Asia observed by GPS and inferred from GRACE. **Geophysical Research Letters**, v. 40, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/2013GL058093>.

GEIRSSON, H.; D’OREYE, N.; MASHAGIRO, N.; SYAUSWA, M.; CELLI, G.; KADUFU, B.; SMETS, B.; KERVYN, F. Volcano-tectonic deformation in the Kivu Region, Central

Africa: Results from six years of continuous GNSS observations of the Kivu Geodetic Network (KivuGNet). **Journal of African Earth Sciences**, v. 134, p. 809-823, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.12.013>.

GIACOMETTI, J. P. S.; ALBARICI, F. L.; TRABANCO, J. L. A.; GUIMARÃES, G. N. Influência da carga hídrica na altitude geométrica da estação RBMC de Inconfidentes/MG. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 1, p. 043-061, 2017. DOI: 10.3895/rbgeo.v5n1.5425.

GRINTER, T.; ROBERTS, C. Precise Point Positioning: Where are we now? In: INTERNATIONAL GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS SOCIETY IGNSS SYMPOSIUM – IGNSS2011, 2011, Sydney. **Proceedings of IGNSS2011**. p. 15.

HYNDMAN, R. J. **Moving Averages**. Contribution to the International Encyclopedia of Statistical Science, ed. Miodrag Lovric, Springer. p.866-869, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS: manual do usuário. Versão Maio de 2020. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>>. Acesso em: jul. 2020.

KAZMIER, L. J. **Estatística Aplicada à Administração e Economia**. 4ª ed, Porto Alegre: Bookman, 2007.

KNOWLES, L. A.; BENNETT, R. A.; HARIG C. Vertical displacements of the Amazon basin from 2 GRACE and GPS. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 125, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JB018105>.

KOWALCZYK, K.; RAPINSKI, J. Verification of a GNSS Time Series Discontinuity Detection Approach in Support of the Estimation of Vertical Crustal Movements. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 149, p. 1-15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7040149>.

MOREIRA, D. M. **Rede de referência altimétrica para avaliação da altimetria por satélites e estudos hidrológicos na região amazônica**. 157 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MOREIRA, D. M., S.; CALMANT, S.; PEROSANZ, F.; XAVIER, L.; ROTUNNO FILHO, O. C.; SEYLER, F.; MONTEIRO, A. C. Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin, Geophys. **Geophysical Research Letters**. v. 43, p. 262-281, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL070265>.

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

NASCIMENTO, L. A.; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o IBGE-PPP. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 1, p.150-165, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702017000100010>.

OLDS, S.; ERIKSSON, S.; MUNSON, D.; DAHLMAN L. Analyzing Plate Motion Using EarthScope GPS Data, 2019. Disponível em: <<https://serc.carleton.edu/eet/platemotio>>

n/index.html>. Acesso em: abr. 2020.

OLIVEIRA, J. R. S. **Uso de informações geodésicas para estudos tectônicos no Pantanal**. 59 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PETIT, G.; LUZUM, B. **IERS Conventions (2010)**. IERS Technical Note N° 36, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. ISBN 3-89888-989-6.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: mar. 2021.

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

RAJNER, M.; LIWOSZ, T. Studies of crustal deformation due to hydrological loading on GPS height estimates. **Geodesy and Cartography**, v. 60, n. 2, p. 135- 144, 2012. DOI: [10.2478/v10277-012-0012-y](https://doi.org/10.2478/v10277-012-0012-y).

ROMAGNOLI, C; ZERBINI, S; LAGO, L; RICHTER, B; SIMON, D; DOMENICHINI, F; ELMI, C; GHIROTTI, M. Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. **Journal of Geodynamics**, v. 35. p. 521-539, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(03\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7).

ROSA, G. P. S. **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

SAADI, A.; MACHETTE, M. N.; HALLER, K. M.; DART, R. L.; BRADLEY, L.; SOUZA, A. M. P. D. Map and Database of Quaternary Faults and Lineaments in Brazil. Denver: **U.S. Geological Survey**, June 2002. 1:6.000.000.

SÁNCHEZ, L.; DREWES H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, United Kingdom, v. 102, p. 1-23, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.06.005>.

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

SILVA, J. S. **Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia amazônica**. 279 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SISTEMA DE REFERÊNCIA GEOCÊNTRICO PARA AS AMÉRICAS (SIRGAS). VEMOS: Modelo de velocidade para o SIRGAS. 2020. Disponível em: <<http://www.sirgas.org/pt/sirgas-con-network/velocity-model/>>. Acesso em: mai. 2020.

STEVEN, W. S. **Moving Average Filters**, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal

Processing, 2 ed San Diego: California Technical Publishing, p. 277-284, 1999.

TREGONING, P.; WATSON, C.; RAMILLIEN, G.; MCQUEEN, H.; ZHANG, J. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 15, p. 1-6, 2009. DOI: 10.1029/2009GL038718.

VAN DAM, T.; WAHR, J.; MILLY, P. C. D.; SHMAKIN, A. B.; BLEWITT, G.; LAVALLÉE, D.; LARSON, K. M. Crustal displacements due to continental water loading. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 4, p. 651-654, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GL012120>.

WOLF, P.R.; GHILANI, C. D. **Adjustment Computations: Spatial data analysis**. 4 ed. New York. Editora: John Wiley & Sons. 2006.

ZALÁN, P. V. A tectônica transcorrente na exploração de petróleo: uma revisão. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 16, p. 245-257, 1986.

4 ABORDAGEM ESTATÍSTICA APLICADA À INVESTIGAÇÃO DE DEFORMAÇÕES ASSOCIADAS AO EFEITO DE CARGA HIDROLÓGICA NA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Resumo:

As investigações do efeito de carga hidrológica têm se concentrado nas deformações associadas às componentes verticais. No entanto, é sabido que tal efeito também acarreta deformações também nas componentes horizontais (planimétricas). Assim sendo, objetiva-se com este trabalho investigar as deformações ocorridas em quatro estações da RBMC (NAUS, AMUA, AMBC e AMCO) situadas na Amazônia brasileira com uma abordagem estatística fundamentada na modelagem de Box e Jenkins, análises espectrais e testes de hipóteses aplicados às séries temporais posicionais e de cotas linimétricas para avaliação de suas componentes de tendência (velocidades) e periodicidade (sazonalidade e ciclo). Observou-se que em todas as estações as componentes Δn e Δe apresentaram tendência (velocidade) significativa, o que não ocorreu para a componente Δu . Contudo, destaca-se que a significância das velocidades associadas a Δn e Δe está associada, majoritariamente, ao deslocamento da placa Sul-Americana. Velocidades de 0,01198 e -0,00347 m/ano; 0,0122 e -0,0042 m/ano; 0,01084 e -0,00476 m/ano e de 0,0119 e -0,0029 m/ano foram obtidas para Δn e Δe das estações NAUS, AMUA, AMBC e AMCO, respectivamente. As deformações periódicas de Δn e Δu da NAUS apresentaram *lag* sazonal similar ao das cotas linimétricas (365,2 dias), o que não ocorreu para Δe (1217,2 dias). Comportamento similar foi observado para estação AMUA, porém com periodicidades menores. A estação AMBC obteve comportamento periódico bem definido, sem fatores semianuais para Δn , Δe e Δu , com periodicidade idêntica entre si (379,6 dias). AMCO também apresenta periodicidade idêntica entre si (381 dias), com comportamento periódico sem fatores semianuais para Δe e Δu . Adicionalmente, observou-se que Δn e Δe das estações NAUS e AMUA; e AMCO, respectivamente, apresentaram uma “inversão” na distribuição das deformações. Ademais, os extremos de tais deformações ocorrem anteriormente aos picos das cheias e posteriormente aos vales das secas, para Δn e Δu das estações NAUS e AMUA. Verificou-se que as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram antes dos picos e vales das cotas linimétricas para AMBC. Comportamento oposto foi observado para a Δe . Considerando a estação AMCO, as deformações atingem os extremos antes dos picos das cotas linimétricas (pico das cheias) para a componente Δu .

Palavras-chave: Geodésia. Deformações. Séries temporais. PPP. Carga hidrológica.

Abstract: The investigations of the hydrological load effect have focused on the deformations associated with the vertical components. However, it is known that such an effect also causes deformations also in the horizontal (planimetric) components. Therefore, the objective of this work is to investigate the deformations that occurred in four stations of the RBMC (NAUS, AMUA, AMBC, and AMCO) located in the Brazilian Amazon with a statistical approach based in modeling Box and Jenkins, spectral analysis and hypothesis tests applied to the positional and time series linimetric quotas for the evaluation of its trend components (velocities) and periodicity (seasonality and cycle). It was observed that in all stations the components Δn and Δe showed a significant trend (velocities), which did not occur for the component Δu . However, it is noteworthy that the significance of the velocities associated with Δn and Δe is mainly associated with the displacement of the South American plate. Velocities of 0.01198 and -0.00347 m / year; 0.0122 and -0.0042 m / year; 0.01084 and -0.00476 m / year and 0.0119 and -0.0029 m / year were obtained for Δn and Δe from NAUS, AMUA, AMBC and AMCO stations, respectively. The periodic deformations of NAUS Δn and Δu showed seasonal lag similar to that of the linimetric quotas (365.2 days), which did not occur for Δe (1217.2 days). Similar behavior was observed for the AMUA station, but with shorter intervals. The AMBC station had a well-defined periodic behavior, without semi-annual factors for Δn , Δe , and Δu , with identical periodicity between them (379.6 days). AMCO also has an identical periodicity with each other (381 days), with periodic behavior without semiannual factors for Δe and Δu . Additionally, it was observed that Δn and Δe from NAUS and AMUA stations; and AMCO, respectively, presented an “inversion” in the deformation distribution. In addition, the extremes of such deformations occur before the flood peaks and afterward the drought valleys, for Δn and Δu of the NAUS and AMUA stations. It was found that the deformations in the components Δn and Δu occurred before the peaks and valleys of the linimetric dimensions for AMBC. Opposite behavior was observed for Δe . Considering the AMCO station, the deformations reach the extremes before the peaks of the linimetric dimensions (peak of the floods) for the Δu component.

Keywords: Geodesy. Deformations. Time series. PPP. Hydrological load.

4.1 Introdução

Deslocamentos posicionais de pontos da superfície terrestre podem ser associados aos efeitos de fenômenos geodinâmicos e de deformação, tais como: o movimento de placas tectônicas, a atividade vulcânica, a carga atmosférica, hidrológica etc. Uma das formas de se

investigar estes tipos de fenômenos consiste em analisar a evolução espaço-temporal dos seus efeitos nas séries temporais de posição (coordenadas) (FRITSCHÉ; DOLL; DIETRICH, 2012; SÁNCHEZ; DREWES, 2016; GEIRSSON et al., 2017; KOWALCZYK; RAPINSKI, 2018).

As séries posicionais aplicadas à tais tipos de investigações têm sido geradas utilizando dados GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e o método de PPP (Posicionamento por Ponto Preciso). Nesse sentido, uma das possibilidades para geração das séries consiste na utilização de dados GNSS da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS) (COSTA et al., 2018; RBMC, 2020) em conjunto com o serviço online IBGE-PPP (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-PPP) (IBGE-PPP, 2020; IBGE, 2020), ambos mantidos e disponibilizados gratuitamente pelo IBGE.

Ressalta-se que o IBGE-PPP considera em sua implementação a modelagem dos efeitos de diversos fenômenos seguindo as recomendações descritas em Petit e Luzum (2010). Porém, o efeito de carga hidrológica (*water storage e hidrological load*) é desconsiderado por não possuir modelagem consistente em escala global (PETIT; LUZUM, 2010; RAJNER; LIWOSZ, 2012). Adicionalmente, destaca-se que os efeitos de ordem superior da ionosfera também não são considerados (IBGE, 2020). Registra-se ainda, por oportuno que a carga hidrológica se restringe a regiões específicas que apresentam transferência significativa de massa d'água associada ao ciclo hidrológico, como a região da bacia amazônica brasileira, o que ocasiona deformações viscoelásticas temporais (transitórias) na superfície da Terra (TREGONING et al., 2009; FRITSCHÉ; DOLL; DIETRICH, 2012).

Investigações acerca do efeito da carga hidrológica tem se concentrado na avaliação das deformações relativas às componentes verticais, fundamentando-se na associação das variações temporais de cotas linimétricas (nível do rio) às séries posicionais de componentes verticais, como as apresentadas por Van Dam et al. (2001), Bevis et al. (2005), Costa, Matos e Blitzkow (2012), Nascimento (2016), Moreira et al. (2016), Giacometti et al. (2017), Oliveira (2018) e Knowles, Bennett e Harig (2020). No entanto, é sabido que o efeito da carga hidrológica também afeta as componentes horizontais (planimétricas) e, portanto, se faz necessário averiguar o impacto e a propagação deste efeito no posicionamento GNSS.

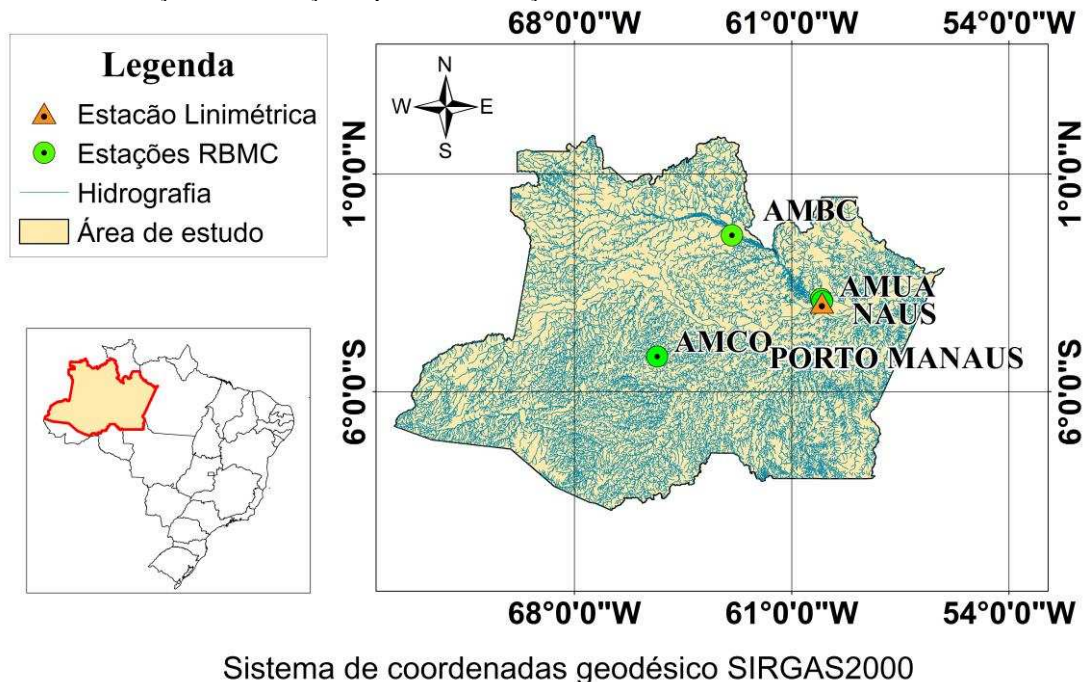
Assim sendo, objetiva-se com este trabalho efetuar uma abordagem estatística fundamentada na aplicação de análises espectrais e testes de hipóteses para a investigação das deformações ocorridas em estações da RBMC situadas na Amazônia brasileira, fundamentando-se nas análises estatísticas sobre as componentes de tendência (velocidades) e periodicidade (sazonalidade e ciclo) das séries temporais posicionais e de cotas linimétricas. Ademais, será avaliada uma estratégia baseada na combinação da modelagem de Box e Jenkins

associada ao procedimento iterativo de Chen e Liu para a identificação e correção dos saltos ocasionados por trocas de antenas e/ou receptores nas séries posicionais.

4.2 Materiais e métodos

Neste trabalho utilizou-se dados de observação GNSS (GPS e GLONASS) de quatro estações da RBMC e dados de uma estação linimétrica. A disposição e identificação das estações, assim como os períodos adotados nas séries temporais, podem ser verificados nas Figura 1 e Tabela 1, respectivamente. Ademais, a estação AMBC teve sua operação encerrada em 02/04/2019.

Figura 1 – Identificação e distribuição espacial das estações utilizadas.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 1 – Estações utilizadas e seus respectivos períodos considerados nas séries.

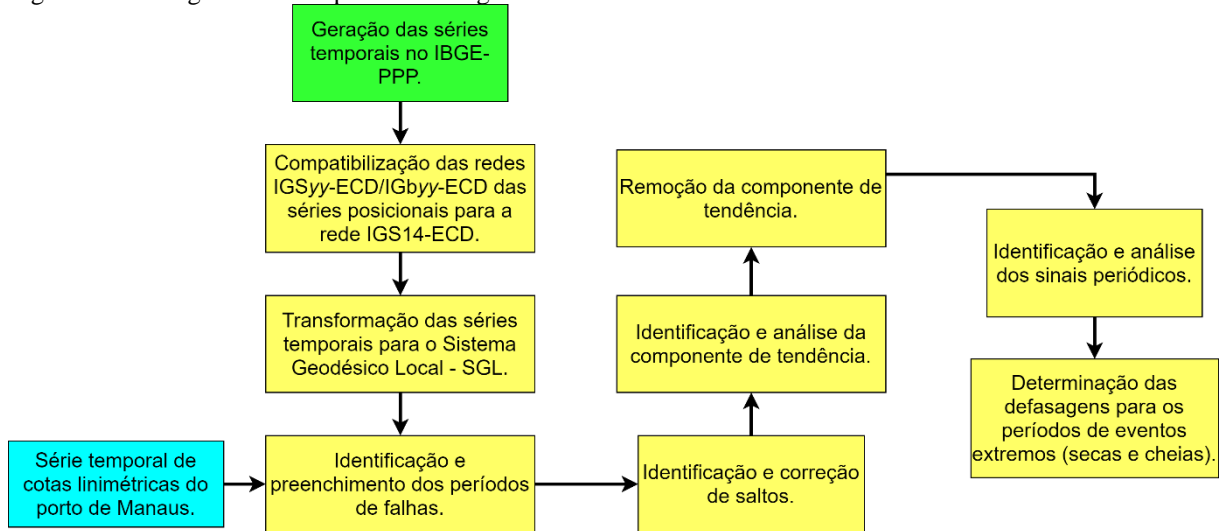
Estações	Município	Data inicial	Data final
NAUS	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY n° 001)	31/12/2019 (DOY n° 365)
AMUA	Manaus - UEA (AM)	20/02/2015 (DOY n° 051)	
AMBC	Barcelos (AM)	27/05/2015 (DOY n° 147)	
AMCO	Coari (AM)	12/09/2012 (DOY n° 256)	
PORTO MANAUS	Manaus (AM)	01/01/2010 (DOY n° 001)	

*DOY (Day of Year - Dias do ano)

Fonte: O autor (2021).

As etapas metodológicas aplicadas nesse Capítulo são apresentadas na Figura 2 e serão descritas e fundamentadas na sequência.

Figura 2 – Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas.



Fonte: O autor (2021).

As etapas relacionadas à compatibilização entre as redes IGS_{yy}-ECD/IG_{byy}-ECD e IGS14-ECD das séries posicionais apresentadas na Figura 2 foram descritas na Seção 2.3.2 – Experimento 2 – do Capítulo 2 desta pesquisa. Ademais, a transformação das séries referenciadas ao IGS14-ECD para o SGL (Sistema Geodésico Local) foi efetuada como descrito na Seção 2.2 – Séries temporais posicionais – do Capítulo 2 desta pesquisa. Por fim, destaca-se que a série de cotas linimétricas referente à estação linimétrica do Porto de Manaus, descrita na Seção 3.4 – Materiais e métodos – do Capítulo 3 desta pesquisa, também foram consideradas no Capítulo corrente.

Ao examinar as séries temporais posicionais, constatou-se que estas continham períodos de falhas (falta de dados) devido à indisponibilidade de dados GNSS pelo IBGE. Neste caso, efetuou-se o preenchimento (imputação) dos dados para os períodos de falhas. O procedimento aplicado para imputação considera que, se os dados anteriores àquele dado faltante apresentarem padrão sazonal, utiliza-se uma decomposição sazonal na interpolação, caso contrário, procede-se com a interpolação linear para o preenchimento dos dados (MORITZ et al., 2015). Justifica-se a imputação pela relação de dependência de alguns procedimentos executados na sequência às observações anteriores, caso da condição de autorregressividade, que se fundamenta no pressuposto de que o valor atual da série é uma combinação linear dos valores anteriores mais os resíduos (CRYER; CHAN, 2008).

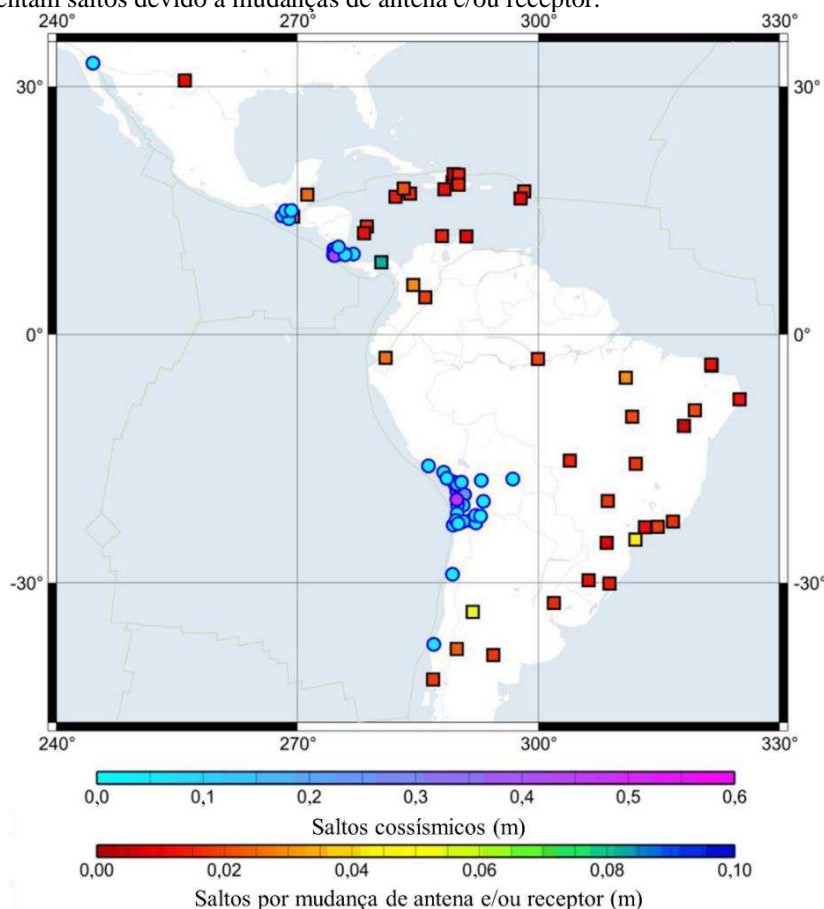
As séries temporais de componentes posicionais, segundo Bogusz et al. (2016), Herring, Floyd e King (2017) e Barzaghi, Betti e De Gaetani (2018), podem ser escritas em termos dos componentes que a constituem conforme Eq. (1), com $\vec{x}_p(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t)] = [\Delta n(t), \Delta e(t), \Delta u(t)]$, para $p = 1, 2, 3$ e $t = 1, 2, 3, \dots, N$:

$$x_{p_t} = \underbrace{x_{p_0} + v_{x_p} \cdot t}_{\text{comp. de tendência}} + \underbrace{\sum_{i=1}^P [R_i \cos(2\pi f_i t + \tau_i)]}_{\text{comp. periódica}} + \underbrace{O_{x_p}}_{\text{outlier}} + \underbrace{\sum_{j=1}^M H_j \cdot x_{p_j}^{off}}_{\text{Saltos}} + \underbrace{\varepsilon_{x_p}(t)}_{\text{resíduo}} \quad (1)$$

em que: x_{p_0} corresponde a posição inicial; v_{x_p} é a velocidade da estação; R_i , f_i e τ_i é a amplitude, frequência e diferença de fase, respectivamente; O_{x_p} são os *outliers*; $x_{p_j}^{off}$ correspondem as amplitudes dos deslocamentos dos saltos; H_j é uma função degrau; ε_{x_p} são os resíduos; P é a P -ésima componente periódica considerada (anual, semianual, sazonal); M é o M -ésimo salto e t é a época.

Saltos podem ocorrer nas séries temporais posicionais e suas causas podem ser naturais (como fortes terremotos) ou artificiais (como mudança de antena e/ou receptores ou modificação no marco geodésico). Sánchez e Drewes (2016) destacam que maioria deles é causada pela renovação/alteração do equipamento em algumas estações, como mostrado na Figura 3. De fato, Bevis, Bedford e Caccamise (2020) afirmam que em áreas não sismogênicas, como o Brasil, essencialmente todos os saltos observados são artificiais. Portanto, quando o propósito é estudar as causas físicas do movimento ou deformação da crosta é importante que se remova estes saltos das séries. Esses saltos variam de alguns milímetros a até 8 cm e são facilmente removíveis, pois afetam apenas a posição da estação e não altera a trajetória da estação, ao contrário dos saltos causados por deslocamentos cossísmicos (SÁNCHEZ e DREWES, 2016).

Figura 3 – Saltos detectados nas estações GNSS utilizadas para o cálculo do modelo VEMOS2015 (intervalo de tempo de março de 2010 a abril de 2015). Os círculos representam saltos causados por deslocamentos cossísmicos; quadrados representam saltos devido a mudanças de antena e/ou receptor.



Fonte: Sánchez e Drewes (2016).

Nos casos de ocorrência de saltos ocasionados por fatores artificiais (mudança de antena e/ou receptor), utilizou-se a seguinte estratégia para a correção: de início ajustou-se um modelo seguindo a metodologia proposta por Box e Jenkins para modelagem de séries temporais e, na sequência, aplicou-se as séries posicionais e seus respectivos modelos ajustados no procedimento iterativo proposto por Chen e Liu (1993) para identificação e correção dos saltos.

A metodologia apresentada por Box e Jenkins para modelagem de séries temporais consiste no ajuste de modelos autorregressivos (*AR*), integrados (*I*) de médias móveis (*MA*, do inglês *moving average*) – *ARIMA* (MORETTIN; TOLOI, 2006; BOX; JENKINS; REINSEL, 2008). Para tal, utiliza-se um ciclo iterativo para a construção do modelo, onde sua estrutura baseia-se nos próprios dados. O ciclo apresenta quatro etapas:

- Especificação: em que se considera uma classe geral de modelos que caracterize os dados;
- Identificação: com base na função de autocorrelação (*fac*) e autocorrelação parcial (*facp*) e alguns critérios;

- Estimação: os parâmetros do modelo identificado anteriormente são estimados por métodos de máxima verossimilhança condicional, não-condicional e exata (ver Morettin e Tolo (2006));
- Verificação: é realizada uma análise de resíduos do modelo para verificar se este é adequado à finalidade proposta.

Caso o modelo não seja adequado, repete-se o ciclo iterativo. Em geral, os modelos obedecem ao princípio da parcimônia, ou seja, contém um número pequeno de parâmetros.

Cryer e Chan (2008) afirmam que a classe dos modelos autorregressivos de ordem p , denotado por $AR(p)$, fundamenta-se no pressuposto de que o valor atual da série x_{p_t} é uma combinação linear dos p valores anteriores mais os resíduos ε_t . Nesse caso, Shumway e Stoffer (2010) destacam que um modelo autorregressivo é da forma:

$$x_{p_t} = \phi_1 x_{p_{t-1}} + \phi_2 x_{p_{t-2}} + \dots + \phi_p x_{p_{t-p}} + \varepsilon_t, \quad (2)$$

em que x_{p_t} é estacionária e $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_p$ são os parâmetros estruturais do modelo ($\phi_p \neq 0$) e ε_t é ruído branco, com média zero ($\mu = 0$) e variância constante σ_ε^2 . Caso a média seja diferente de zero ($\mu \neq 0$), a Eq. (2) se torna:

$$x_{p_t} = \alpha + \phi_1 x_{p_{t-1}} + \phi_2 x_{p_{t-2}} + \dots + \phi_p x_{p_{t-p}} + \varepsilon_t, \quad (3)$$

com $\alpha = \mu(1 - \phi_1 - \dots - \phi_p)$.

Considerando o operador de tempo passado definido na Eq. (4) conforme Shumway e Stoffer (2010), tem-se que:

$$Bx_{p_t} = x_{p_{t-1}}, \quad (4)$$

daí a Eq. (3) é reescrita como:

$$x_{p_t} = \alpha + \phi_1 Bx_{p_t} + \phi_2 B^2 x_{p_t} + \dots + \phi_p B^p x_{p_t} + \varepsilon_t, \quad (5)$$

portanto,

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)x_{p_t} = \alpha + \varepsilon_t. \quad (6)$$

Definindo $\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ como operador autorregressivo estacionário (ou polinômio autorregressivo) de ordem p , tem-se:

$$\phi(B)x_{p_t} = \alpha + \varepsilon_t. \quad (7)$$

Morettin e Toloi (2006) definem a classe dos modelos de médias móveis como um processo linear de ordem q , denotado por $MA(q)$, sendo uma combinação linear do ruído branco. Sua notação é dada por:

$$x_{p_t} = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}, \quad (8)$$

onde q são os *lags* (ou janelas) das médias móveis e $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ ($\theta_q \neq 0$) são os parâmetros.

Utilizando o operador de tempo passado tem-se que:

$$x_{p_t} = \mu + \theta(B)\varepsilon_t, \quad (9)$$

em que $\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ é o operador de médias móveis de ordem q .

Box, Jenkins e Reinsel (2008) e Morettin e Toloi (2006) afirmam que para muitas séries estacionárias encontradas na prática, um modelo parcimonioso e adequado se dá pela junção dos modelos autorregressivo de ordem p ($AR(p)$) e de médias móveis de ordem q ($MA(q)$), formando assim um modelo autorregressivo e de médias móveis de ordem p e q , denotado por $ARMA(p, q)$. Estes modelos são definidos por:

$$x_{p_t} = \alpha + \phi_1 x_{p_{t-1}} + \phi_2 x_{p_{t-2}} + \dots + \phi_p x_{p_{t-p}} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}. \quad (10)$$

Utilizando os operadores autorregressivo $\phi(B)$ e de médias móveis $\theta(B)$, descritos anteriormente, tem-se:

$$x_{p_t} - \phi_1 B x_{p_t} - \phi_2 B^2 x_{p_t} - \dots - \phi_p B^p x_{p_t} = \alpha + \varepsilon_t - \theta_1 B \varepsilon_t - \theta_2 B^2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q B^q \varepsilon_{t-q}, \quad (11)$$

ou

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)x_{p_t} = \alpha + (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q)\varepsilon_t. \quad (12)$$

Logo, a forma compacta para a Eq. (10) é dada por:

$$\phi(B)x_{p_t} = \alpha + \theta(B)\varepsilon_t, \quad (13)$$

em que $\alpha = \mu(1 - \phi_1 - \dots - \phi_p)$ é o intercepto do modelo.

Box, Jenkins e Reinsel (2008), Morettin e Toloi (2006) e Cryer e Chan (2008) destacam que os modelos descritos até aqui são apropriados para descrever séries temporais estacionárias. Na prática, muitas das séries temporais encontradas são não estacionárias. Nas séries que apresentam tendência, pode-se aplicar d diferenças simples para que a série se torne estacionária.

A diferenciação simples consiste no procedimento utilizado para eliminar a tendência. Nesse caso, a primeira diferença pode ser definida como:

$$\Delta x_{p_t} = x_{p_t} - x_{p_{t-1}}, \quad (14)$$

em que x_{p_t} é a observação no instante t e $x_{p_{t-1}}$ é a observação em um passo anterior, no instante $t - 1$. Em situações normais, será suficiente tomar uma ou duas diferenças para tornar a série livre da tendência.

Considerando o operador de tempo passado definido na Eq. (4), tem-se que a Eq. (14) pode ser reescrita como:

$$\Delta x_{p_t} = (1 - B)x_{p_t}. \quad (15)$$

De forma geral,

$$B^k \Delta x_{p_t} = \Delta x_{p_{t-k}}, \quad (16)$$

portanto, as diferenças de ordem d são definidas por:

$$\Delta^d x_{p_t} = (1 - B)^d x_{p_t}. \quad (17)$$

Salienta-se que a primeira diferença simples elimina a tendência linear, a segunda elimina a tendência quadrática e assim por diante.

Nesse caso, diz-se que uma série temporal x_{p_t} segue um modelo autoregressivo, integrado e de médias móveis se a d -ésima diferença $W_t = \Delta^d x_{p_t}$ é um processo estacionário do *ARMA*, tal que $\phi(B)W_t = \theta(B)\varepsilon_t$. Portanto, o modelo *ARIMA*(p, d, q), em que p e q são as ordens de $\phi(B)$ e $\theta(B)$ respectivamente, é apropriado para descrever séries temporais que apresentem tendência. Este modelo pode ser escrito como:

$$\phi(B)\Delta^d x_{p_t} = \theta(B)\varepsilon_t, \quad (18)$$

em que d é a ordem de integração do modelo e representa o número de diferenças que tornou a série estacionária (sem tendência).

Após especificada a classe geral de modelos, inicia-se a etapa de identificação do modelo *ARIMA* a ser ajustado às séries temporais. Esta escolha é feita, principalmente, fundamentando-se nas autocorrelações e autocorrelações parciais estimadas (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Box, Jenkins e Reinsel (2008) afirmam que a função de autocorrelação (*fac*) é definida por:

$$\rho_\tau = \frac{\text{Cov}(x_{p_t}, x_{p_{t+\tau}})}{\sqrt{\text{Var}(x_{p_t})}\sqrt{\text{Var}(x_{p_{t+\tau}})}} = \frac{\gamma_\tau}{\gamma_0}, \quad (19)$$

onde τ é inteiro.

A função de autocorrelação pode ser estimada por:

$$\hat{\rho}_K = \frac{\sum_{t=K+1}^N (x_{p_t} - \bar{x}_p)(x_{p_{t-K}} - \bar{x}_p)}{\sum_{t=1}^N (x_{p_t} - \bar{x}_p)^2}, \quad (20)$$

em que $\bar{x}_p = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_{p_t})$ e K é o número de defasagens utilizados, enquanto a função de autocorrelação parcial (*facp*) é definida por:

$$\phi_{kk} = \text{Corr}(x_{p_t}, x_{p_{t+k}} | x_{p_{t+1}}, \dots, x_{p_{t+k+1}}) \quad (21)$$

Box, Jenkins e Reinsel (2008), Morettin e Tolo (2006) e Cryer e Chan (2008) destacam que a estimação da autocorrelação parcial pode ser efetuada resolvendo as equações de Yule-Walker, porém, consiste em um método complexo.

Morettin e Tolo (2006) salientam que a *fac* e *facp* não são muito úteis para identificação dos modelos, justificável por suas formas complicadas. Nesse sentido, uma alternativa é utilizar critérios de informação que permitam escolher o modelo mais adequado. Dentre os critérios de informação mais difundidos e encontrados na literatura pode-se destacar: o critério de informação de Akaike (*AIC - Akaike Information Criteria*) (AKAIKE, 1974), o critério de informação de Akaike corrigido (*AIC_c - Corrected Akaike Information Criterion*) (SUGIURA, 1978) e o critério de informação Bayesiano (*BIC - Bayesian Information Criteria*) (SCHWARZ, 1978), cujas definições são dadas por:

$$AIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + 2k, \quad (22)$$

$$AIC_c = -2 \ln L(\hat{\theta}) + 2k + \frac{2(k+1)}{n-k-1}, \quad (23)$$

$$BIC = -2 \log L(\hat{\theta}) + k \log n, \quad (24)$$

em que $L(\hat{\theta})$ é a função de máxima verossimilhança do estimador $\hat{\theta}$, $k = p + q + 1$ é o número de parâmetros no modelo e n é o número de observações da série.

O modelo escolhido será aquele que apresentar menores valores para os critérios. Para o caso de modelos de séries temporais *AIC* e *AIC_c* apresentam desempenho inferior ao desempenho do *BIC*, sendo que a porcentagem de acertos do *AIC* e *AIC_c* foram muito similares e estabilizaram-se em torno de 85%, enquanto que o *BIC* teve uma porcentagem de acertos estabilizada em torno de 96% ou mais (EMILIANO, 2013). Portanto, a seleção de modelos nesta pesquisa foi efetuada considerando o *BIC*.

A verificação, última etapa do processo iterativo de Box e Jenkins, consiste em testar a qualidade do ajuste do modelo e, se o ajuste for ruim, sugerir as modificações apropriadas. Se o modelo for especificado corretamente e as estimativas dos parâmetros estiverem razoavelmente próximas dos valores reais, os resíduos deverão ter as propriedades do ruído branco, ou seja, devem se comportar aproximadamente como variáveis normais independentes

e identicamente distribuída. Caso contrário, um novo modelo pode ser especificado como sendo o adequado (CRYER e CHAN, 2008).

O teste frequentemente utilizado para verificação do modelo é o teste de Ljung e Box (Ljung e Box, 1978). Este teste deriva do teste proposto por Box e Pierce (1970), em que a estatística é dada por:

$$Q(K) = n \sum_{j=1}^K \hat{r}_j^2, \quad (25)$$

onde K é o número de defasagens utilizadas para estimar a função de autocorrelação, n é o número de observação da série e \hat{r}_j^2 o valor estimado para o j -ésimo coeficiente de autocorrelação. Em caso de adequação do modelo, o teste de Box e Pierce apresenta distribuição de qui-quadrado χ^2 com K graus de liberdade.

No entanto, Ljung e Box (1978) verificaram que a distribuição do *qui*-quadrado para a estatística Q é baseada em um teorema do limite e, portanto, a aproximação não é satisfatória. Nesse sentido, definiram uma estatística de teste cuja distribuição nula é muito mais próxima do *qui*-quadrado, instituindo assim o teste de Ljung e Box (ou Box e Pierce modificado), cuja estatística é dada por:

$$Q(K) = n(n+2) \sum_{j=1}^K \frac{\hat{r}_j^2}{n-j}, \quad (26)$$

Considerando que o modelo ajustado seja satisfatório, a distribuição *qui*-quadrado para o teste de Ljung e Box terá $K - \nu$ graus de liberdade, onde ν é a quantidade de parâmetros do modelo ajustado. As hipóteses e interpretações consideradas para ambos os testes são:

$$\begin{aligned} H_0: & \text{ Os resíduos são não autocorrelacionados;} \\ H_1: & \text{ Os resíduos são autocorrelacionados.} \end{aligned} \quad (27)$$

A não rejeição da hipótese nula H_0 está condicionada ao bom ajuste do modelo, caso contrário, tem-se o indício de que o modelo não está bem ajustado e, portanto, um novo modelo alternativo deve ser proposto, ajustado e verificado, até se obter o resultado desejado.

Os modelos ajustados podem ser aplicados a metodologias para a detecção de saltos (*outliers* sequenciais) (observações discrepantes ou atípicas) em séries temporais. Nesse sentido, Chen e Liu (1993) salientam que, mesmo que o modelo seja especificado adequadamente, os saltos ainda podem produzir viés nas estimativas de parâmetros dos modelos ajustados. Portanto, desenvolveram um procedimento mais eficaz que possibilita a detecção de saltos, evitando o efeito de mascaramento (*masking*) através da estimação conjunta dos parâmetros do modelo e dos efeitos destes.

O procedimento iterativo proposto por Chen e Liu (1993) é composto por três estágios, cujas etapas são detalhadas, de forma resumida, na sequência:

Estágio I: Estimativa inicial dos parâmetros e detecção de *outliers*.

Etapa 1 – Calcula-se as estimativas de máxima verossimilhança dos parâmetros do modelo com base na série original ou na série ajustada e obtém-se os resíduos. Na primeira iteração, a série original é usada para iniciar o procedimento e, após a primeira iteração, a série ajustada é utilizada.

Etapa 2 – Detecta-se os *outliers* avaliando o valor máximo das estatísticas padronizadas de seus efeitos baseando-se em um valor crítico C . Tal valor é dependente do número de observações N da série de forma que $C = 3,0$, se $N \leq 50$; $C = 4,0$, se $N \geq 450$ e, caso contrário, $C = 3 + 0,0025(N - 50)$.

Etapa 3 – Se não houver nenhum erro externo, segue-se para a etapa 4. Caso contrário, o efeito dos *outliers* é removido dos resíduos e das observações e, em seguida, retorna-se à etapa 2 para verificar se *outliers* adicionais podem ser encontrados.

Etapa 4 – Se nenhum *outlier* for encontrado na primeira iteração do *loop* interno, o procedimento é parado e a série observada está livre de *outliers*. Caso contrário, se forem encontrados *outliers* no *loop* interno sob as estimativas de parâmetros fornecidas, retorna-se a Etapa 1 para revisar as estimativas de parâmetros. Se o número total de *outliers* em todos os *loops* internos for maior que zero e nenhum *outlier* adicional for detectado no *loop* interno atual, segue-se para a Etapa 1 do estágio II.

Estágio II: Estimativa conjunta dos efeitos dos *outliers* e parâmetros do modelo.

Etapa 1 – Considerando que foram identificados m candidatos a *outliers*, nas épocas $t = t_1, t_2, \dots, t_m$, estima-se conjuntamente os efeitos destes *outliers* aplicando-se o modelo de regressão múltipla.

Etapa 2 – Calculam-se as estatísticas $\hat{\tau}$ dos efeitos dos *outliers* ω_j em que $\hat{\tau} = \hat{\omega}_j / \sigma(\hat{\omega}_j)$, para $j = 1, 2, \dots, m$. Se $|\hat{\tau}_j| = \hat{\tau}_v \leq C$, em que C é o valor crítico utilizado na Etapa

2 do estágio I, em seguida, o *outlier* é excluído do conjunto dos *outliers* identificados e retorna-se a etapa 1 do estágio II com os $(m - 1)$ *outliers* restantes. Caso contrário, segue-se para a etapa 3 do estágio II.

Etapa 3 – Obtém-se a série ajustada removendo-se os efeitos dos *outliers*, usando as estimativas mais recentes de ω_j determinada na Etapa 1 do estágio II.

Etapa 4 – Calcula-se as estimativas da máxima verossimilhança dos parâmetros do modelo, utilizando a série ajustada. Se a alteração do erro padrão residual é maior do que ξ , retorna-se à Etapa 1 do estágio II. Caso contrário, prossegue-se para a Etapa 1 do estágio III. O valor de ξ é escolhido pelo usuário para controlar a precisão das estimativas dos parâmetros.

Estágio III: Detecção de *outliers* utilizando as estimativas finais dos parâmetros do modelo.

Etapa 1 – Calcula-se os resíduos, classificando a série original baseando-se nas estimativas de parâmetros obtidas na Etapa 4 do estágio II.

Etapa 2 – Utilizando os resíduos obtidos em na Etapa 1 do estágio III, itera-se o procedimento através dos Estágios I e II, com as seguintes modificações: 1) as estimativas dos parâmetros utilizados no ciclo interior do estágio I são as obtidas na Etapa 4 do Estágio II e, 2) omite-se do Estágio II as etapas 3 e 4, sendo as estimativas finais dos efeitos dos *outliers* detectados, as obtidas na Etapa 1 do Estágio II da última iteração.

Ressalta-se que ao final do procedimento de Chen e Liu (1993), obtém-se os trechos corrigidos dos saltos, que são incorporados às séries originais.

Com as séries posicionais imputadas e corrigidas dos saltos causados por fatores artificiais, prosseguiu-se para as análises da tendência. No âmbito da estatística moderna o conceito de tendência está associado com padrões especiais de não estacionariedade do mecanismo real que gera uma série temporal. Nesse sentido, existem duas noções de tendência: a determinística e a estocástica. A primeira é definida como aquela que se pode determinar seguindo algum modelo matemático específico, ou seja, segue uma relação matemática exata, expressando um padrão fixo e previsível. Ou seja, um padrão “determinístico”, porque esta palavra se refere a algo que se pode determinar ou prever com certeza. Noutro ângulo, uma tendência é dita não-determinística ou estocástica quando pode ser descrita apenas em termos de uma distribuição de probabilidades, como um crescimento persistente no tempo que é aleatório, e não fixo como as constantes do modelo de tendência determinística linear, descrito na Seção 3.3 – Regressão linear simples e determinação de velocidades – desta pesquisa (BOX; JENKINS; REINSEL, 2008; MATTOS, 2018).

Salienta-se que o termo “tendência estocástica” é bastante usado na literatura, mas nunca

é definido de um modo explícito. Por isso, acontece de diferentes autores conceitua-lo de diferentes maneiras. No entanto, parece haver atualmente uma certa unanimidade entre a maioria dos autores de que tendência estocástica seja definida como supracitado (MATTOS, 2018).

Para verificação da existência das componentes de tendência nas séries, aplicou-se o teste de Dickey-Fuller aumentado ou abreviadamente, ADF teste. Tal teste consiste na análise da regressão descrita na Eq. (28):

$$\Delta x_{p_t} = \beta_1 + \beta_2 t + \pi x_{p_{t-1}} + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta x_{p_{t-i}} + \varepsilon_t \quad (28)$$

em que: Δx_{p_t} é a primeira diferença da série em análise; β_1 representa o intercepto; β_2 é o coeficiente de tendência determinística; π é o coeficiente de tendência estocástica; m é o menor valor inteiro que torna os resíduos da equação ruído branco e pode ser minimizado pelo critério de informação de Akaike – AIC – ou pelo critério de informação bayesiano – BIC – e ε_t é ruído branco.

Neste teste verifica-se inicialmente a hipótese H_0 : A série possui raiz unitária ($\rho = 1$) e, portanto, possui tendência estocástica. Isto equivale a testar H_0 : A série possui tendência estocástica ($\pi = 0$), pois a regressão é estimada com uma diferença (Δx_{p_t}) já aplicada à série. Se H_0 for rejeitada, conclui-se que a série não possui tendência estocástica. O segundo passo é verificar a presença de tendência determinística pela hipótese H_0 : $\beta_2 = 0$ (A série não possui tendência determinística). Se H_0 não for rejeitada, conclui-se que a série está livre de tendência (DICKEY; FULLER, 1979).

Gülal, Erdogan e Tiryakioglu (2013) afirmam que a análise da tendência é extremamente importante, pois define os movimentos lineares (deformações contínuas) das estações GNSS, utilizados para expressar a taxa de movimentação (ou velocidade) da placa tectônica. Dessa forma, Olds et al. (2011), Bogusz e Klos (2016) e Fazilova, Ehgamberdiev e Kuzin (2018) afirmam que a determinação das componentes de velocidade $\vec{V} = (V_n, V_e, V_u)$ é comumente efetuada ajustando-se modelos de regressão linear, em que o coeficiente angular da reta de regressão ajustada corresponde às respectivas velocidades. A modelagem de regressão linear foi descrita na Seção 3.3 – Regressão linear simples e determinação de velocidades – desta pesquisa.

Além das deformações contínuas, majoritariamente associadas ao deslocamento da placa Sul-Americana para as componentes planimétricas, deformações periódicas (cíclicas e/ou

sazonais) também afetam as estações GNSS. Estes tipos de deformações correspondem, geralmente, às respostas viscoelásticas da Terra aos fenômenos (ou eventos) transitórios que se repetem regularmente a cada período idêntico de tempo (a cada hora, dia, mês ou ano), como o de carga hidrológica, considerado nesse trabalho. Portanto, analisar a significância das componentes periódicas é importante, pois possibilitam entender a evolução temporal do comportamento destas deformações ocasionadas em estações GNSS localizadas na área de estudo. Contudo, caso exista tendência, é prudente removê-la anteriormente à análise periódica (SING; THORNE; HEGGE, 1985).

Dois procedimentos foram utilizados para a remoção da tendência das séries: no primeiro, aplicou-se as diferenças simples sucessivas descritas nas Eq. (14 a 17) nos dados originais até obter uma série livre de tendência. No segundo procedimento, considerou-se que a tendência poderia ser expressa por um polinômio de baixo grau e, portanto, aplicou-se o método de suavização denominado LOWESS (*Locally Weighted Scatterplot Smoothing*), também chamado de LOESS (*locally weighted smoothing*), para a determinação da componente de tendência das séries e, em seguida, subtraiu-se a tendência determinada da série original. Evidencia-se que o método LOWESS consiste no ajuste progressivo de retas de mínimos quadrados ponderados a subconjuntos que formam as séries consideradas. Detalhes sobre ambos os procedimentos utilizados podem ser consultados em Morettin e Tolo (2006).

De posse da série livre de tendência procedeu-se à análise das componentes periódicas. Morettin e Tolo (2006) destacam que a análise harmônica (ou análise de Fourier) tem sido largamente empregada na análise das componentes periódicas em séries temporais, pois permitem buscar periodicidades nos dados observados. Nesse sentido, Bevis, Bedford e Caccamise (2020) evidenciam que se deve extrair, identificar e evidenciar os sinais periódicos definidos pela trajetória das séries. Para tal finalidade, aplicou-se o método de demodulação complexa associada a um filtro passa-baixa (*low pass filter*) do tipo *Butterworth*. O filtro passa-baixa suaviza a série demodulada removendo os componentes de frequência maiores que uma frequência de passagem (f_p), mitigando os efeitos dos *outliers* (BLOOMFIELD, 2004).

Bloomfield (2004) e Richardson (2019) ressaltam que a demodulação complexa efetua a extração da amplitude e fase variável no tempo de um determinado sinal de entrada. Este método funciona em três etapas: primeiro demodula o sinal de entrada; em seguida, suaviza o sinal demodulado com um filtro passa-baixa e, por fim, extrai a amplitude e a fase do sinal suavizado na etapa anterior. Neste trabalho aplicou-se a demodulação complexa considerando a frequência de demodulação $f_0 = 1/365$ (ciclo anual) com frequência de passagem $f_p =$

0,005. Destaca-se que a f_p utilizada foi especificada de forma empírica, por proporcionar um ajuste mais suave às estimativas da componente periódica. A determinação da f_p corresponde a parte mais subjetiva dos filtros, pois dependem de diversos fatores, o que torna este procedimento complexo. Nesse sentido, deve-se estabelecer a partir de onde as componentes de frequência tem amplitudes irrelevantes ou que se confundam com o ruído e, em seguida, definir qual maior atenuação aceitável para a frequência de passagem (PINO, 2015). Detalhes sobre o método de demodulação complexa e o filtro passa-baixa podem ser verificados em Bloomfield (2004) e Hamming (2013), respectivamente.

As séries demoduladas e livre de tendência (K_{p_t}) foram decompostas no domínio das frequências de Fourier para avaliação da ocorrência de periodicidade (sazonalidade ou ciclo) e, em caso positivo, determinou-se a ordem do *lag* periódico. Neste procedimento utilizou-se o periodograma, que consiste em um gráfico desenvolvido com a finalidade de detecção de fatores periódicos que possui em suas abscissas as frequências de Fourier (f_i) e nas ordenadas as intensidades delas $I(f_i)$ (MORETTIN; TOLOI, 2006). Cryer e Chan (2008) afirmam que as intensidades correspondentes às frequências de Fourier são determinadas a partir da Eq. (29):

$$I(f_i) = \frac{2}{n} \left[\left(\sum_{t=1}^n K_{p_t} \cos(2\pi f_i t) \right)^2 + \left(\sum_{t=1}^n K_{p_t} \sen(2\pi f_i t) \right)^2 \right] \quad (29)$$

em que $n = N/2$ é o número de observações utilizadas.

Na sequência, fundamentando-se nos valores das intensidades, obteve-se o *lag* periódico, denotado por $s = 1/f_c$, em que f_c é a frequência de Fourier crítica e corresponde à frequência responsável pela maior intensidade (pico), ou seja, $I(f_c)$.

No entanto, Morettin e Toloí (2006) destacam que mesmo apresentando diversos picos, não é possível afirmar a partir do periodograma, a priori, que cada pico corresponde a uma componente periódica da série. Nesse sentido, a aplicação do teste G de Fisher (FISHER, 1929) deve ser efetuada para atestar a significância estatística do *lag* periódico encontrado, testando-se a hipótese H_0 : O *lag* periódico encontrado não é significativo. Sua estatística de teste (g_{calc}) é dada pela Eq. (30):

$$g_{calc} = \frac{\max(I(f_i))}{\sum_{i=1}^n I(f_i)} \quad (30)$$

Os valores críticos (g_{crit}) do teste G, associados ao nível de significância α , são determinados pela Eq. (31):

$$g_{crit} = 1 - \left(\frac{\alpha}{n}\right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (31)$$

Morettin e Toloi (2006) afirmam que uma boa aproximação do valor p para o teste G de Fisher é dado pela Eq. (32):

$$P(g_{calc} > g_{crit}) \cong n(1 - g_{calc})^{n-1} \quad (32)$$

Ademais, com o intuito de avaliar o tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica (defasagens), foram determinados os valores máximos e mínimos anuais nas séries temporais das variáveis utilizadas, bem como suas respectivas épocas. Evidencia-se que tais valores referem-se aos eventos máximos (cheias e secas) ocorridos na área de estudo.

Todos os procedimentos estatístico-matemáticos aplicados no desenvolvimento metodológico, bem como os gráficos gerados, foram implementados em *scripts* no *software* R. Dentre os pacotes (*packages*) utilizados destaca-se: *utils* (R CORE TEAM, 2020), *stats* (R CORE TEAM, 2020), *ggplot2* (WICKHAM, 2016), *forecast* (HYNDMAN et al., 2020), *tsoutliers* (LACALLE, 2019), *urca* (PFAFF, 2008), *swdft* (RICHARDSON, 2019), *signal* (SIGNAL DEVELOPERS, 2013), *GeneCycle* (AHDESMAKI; FOKIANOS; STRIMMER, 2019). O *software* R caracteriza-se como uma ferramenta robusta para tais aplicações e é disponibilizado gratuitamente por R Core Team (2020).

4.3 Resultados e discussões

Inicialmente, observou-se que a série de cotas linimétricas do porto de Manaus, disposta nas Figuras 4, 5, 7, 9 e 11, não apresentou períodos de falhas. No entanto, as séries posicionais de todas as estações consideradas apresentaram períodos de falhas e, portanto, efetuou-se a imputação dos dados faltantes.

De forma a facilitar as análises destacou-se nos gráficos de todas as estações os períodos vinculados as redes originais de referência. Adicionalmente, a trajetória (tendência + sinais periódicos) das séries posicionais estão livres dos ruídos aleatórios gerados no processamento e, portanto, são utilizadas no ajuste dos modelos de regressão linear. Adicionalmente, para melhorar a visualização e evidenciar as características dos sinais periódicos das componentes Δn e Δe em relação aos sinais de Δu e das cotas linimétricas, aplicou-se um fator de escala de seis vezes (exagero horizontal/vertical = 6).

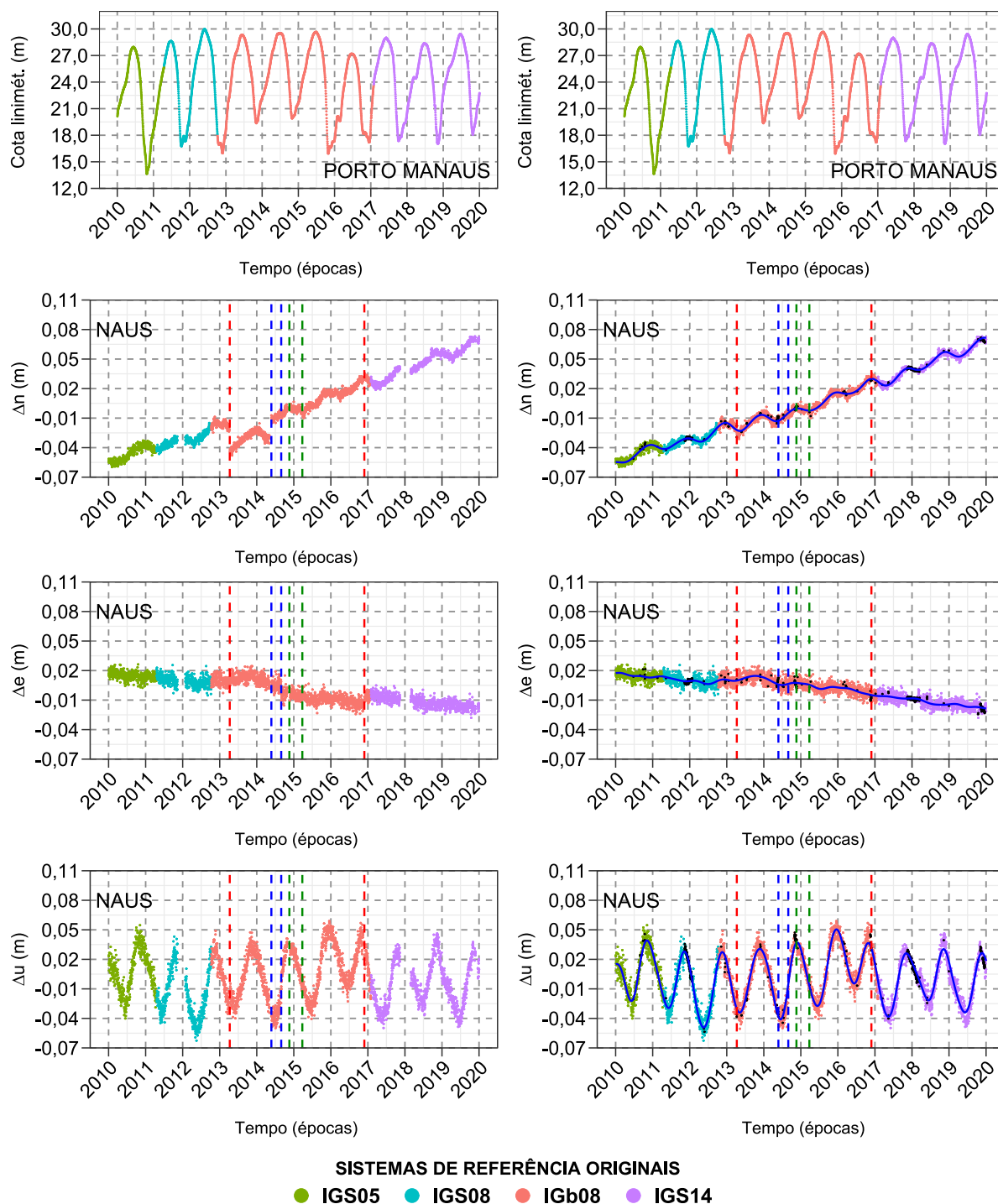
Ademais, visando a melhor fundamentação das análises, manteve-se a série de cotas

linimétricas nos gráficos em conjunto com as componentes posicionais e sinais periódicos para as estações utilizadas. Por fim, objetivando dar fluência e clareza à leitura subdividiu-se os resultados por estação, como apresentado na sequência.

4.3.1 Estação NAUS

Observou-se nesta estação a ocorrência de saltos referentes a causas artificiais em suas séries de componentes Δn e Δe , como pode ser observado na Figura 3. Tais saltos foram corrigidos aplicando-se a metodologia de Box e Jenkins e o procedimento iterativo de Chen e Liu. De início, aplicou-se a metodologia de Box e Jenkins onde obteve-se os modelos *ARIMA* (2,1,3) e *ARIMA* (4,1,5) ajustados para as séries de componentes Δn e Δe , com *BIC* iguais a -34999 e -30495, respectivamente. A partir do teste de Ljung-Box aplicado aos resíduos com 5% de significância obteve-se as estatísticas de teste Q iguais a 0,0056 e 0,0064, com os respectivos valores p iguais a 0,940 e 0,936 para os modelos ajustados. Nesse contexto, não se pode rejeitar a hipótese nula, concluindo-se que os resíduos do modelo são não autocorrelacionados e, portanto, o modelo está bem ajustado pela metodologia de Box e Jenkins. Em seguida, os modelos ajustados foram aplicados no procedimento iterativo de Chen e Liu, onde obteve-se as séries ajustadas e com os saltos corrigidos. Dessa forma, as novas observações referentes aos trechos corrigidos dos saltos foram incorporadas às séries originais, como apresentado na Figura 4. Após a correção dos saltos, prosseguiu-se para a análise das tendências.

Figura 4 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior), posicionais da estação NAUS com saltos e falhas (à direita) e com saltos corrigidos, períodos imputados e trajetória (à esquerda). As linhas verticais correspondem à época de troca de antena (azul), troca de receptor (verde) e troca do conjunto de antena e receptor (vermelha). Os pontos em preto correspondem aos períodos imputados.



Fonte: O autor (2021).

Fundamentando-se nos resultados obtidos no teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF) dispostos na Tabela 2, constatou-se que as séries Δn , Δe , Δu e de cotas linimétricas em estudo não apresentam raiz unitária e, portanto, não possuem tendência estocástica, pois a regressão é

estimada com uma diferença já aplicada. A hipótese de raiz unitária foi rejeitada a 5% de significância com os valores p apresentados. Analisando o coeficiente para tendência determinística observou-se que as séries Δn e Δe possuem valor significativo com valor $p \ll 0,0001$, ou seja, rejeitou-se a hipótese de nulidade que afirma que as séries não possuem tendência determinística. Desta forma, eliminou-se a tendência determinística com aplicação dos dois procedimentos anteriormente mencionados. Considerando as séries Δu e de cotas linimétricas não se pode rejeitar a hipótese de nulidade (valor p igual a 0,713 e 0,901, respectivamente) constatando que estas não possuem tendência determinística. No entanto, deve-se considerar a modelagem dos fatores periódicos na análise de tendências e no ajuste de modelos de regressão linear para as séries Δu , uma vez que suas amplitudes são significativamente maiores do que as encontradas nas séries Δn e Δe , podendo assim levar a resultados imprecisos.

Tabela 2 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries posicionais da estação NAUS e de cota linimétrica.

Componentes	Parâmetros	β_1	β_2	π
Cotas Linimétricas	Estimativa	$1,124e^{-02}$	$-8,293e^{-08}$	$-4,600e^{-04}$
	Erro-padrão	$4,302e^{-03}$	$6,715e^{-07}$	$1,723e^{-04}$
	Estatística do teste	2,614	-0,123	-2,669
	Valor p	0,009	0,901	0,007
Δn	Estimativa	$-3,849e^{-03}$	$2,243e^{-06}$	$-6,834e^{-02}$
	Erro-padrão	$4,121e^{-04}$	$2,362e^{-07}$	$7,152e^{-03}$
	Estatística do teste	-9,340	9,495	-9,556
	Valor p	$< 2,0e^{-16}$	$< 2,0e^{-16}$	$< 2,0e^{-16}$
Δe	Estimativa	$6,135e^{-03}$	$-2,984e^{-06}$	$-3,137e^{-01}$
	Erro-padrão	$3,199e^{-04}$	$1,546e^{-07}$	$1,488e^{-02}$
	Estatística do teste	19,180	-19,300	-21,080
	Valor p	$< 2,0e^{-16}$	$< 2,0e^{-16}$	$< 2,0e^{-16}$
Δu	Estimativa	$-4,824e^{-05}$	$3,772e^{-08}$	$-2,459e^{-02}$
	Erro-padrão	$2,161e^{-04}$	$1,025e^{-07}$	$4,338e^{-03}$
	Estatística do teste	-0,223	0,368	-5,670
	Valor p	0,823	0,713	$1,54e^{-08}$

Fonte: O autor (2021).

Após a comprovação de tendência determinística ajustou-se modelos de regressão linear às componentes Δn e Δe , determinando-se as deformações contínuas (velocidades) conforme apresentado na Tabela 3. Comparando-se as velocidades V_n e V_e com as mesmas estimadas com as séries temporais no Capítulo 3, verificou-se que estas diferem em 0,0003 m/ano e 0,0002 m/ano respectivamente. Tal diferença pode estar associada à utilização das trajetórias livres dos ruídos aleatórios causados no processamento no ajuste dos modelos. Além disso, tais trajetórias foram determinadas após a correção dos saltos ocasionados pelas trocas de equipamentos.

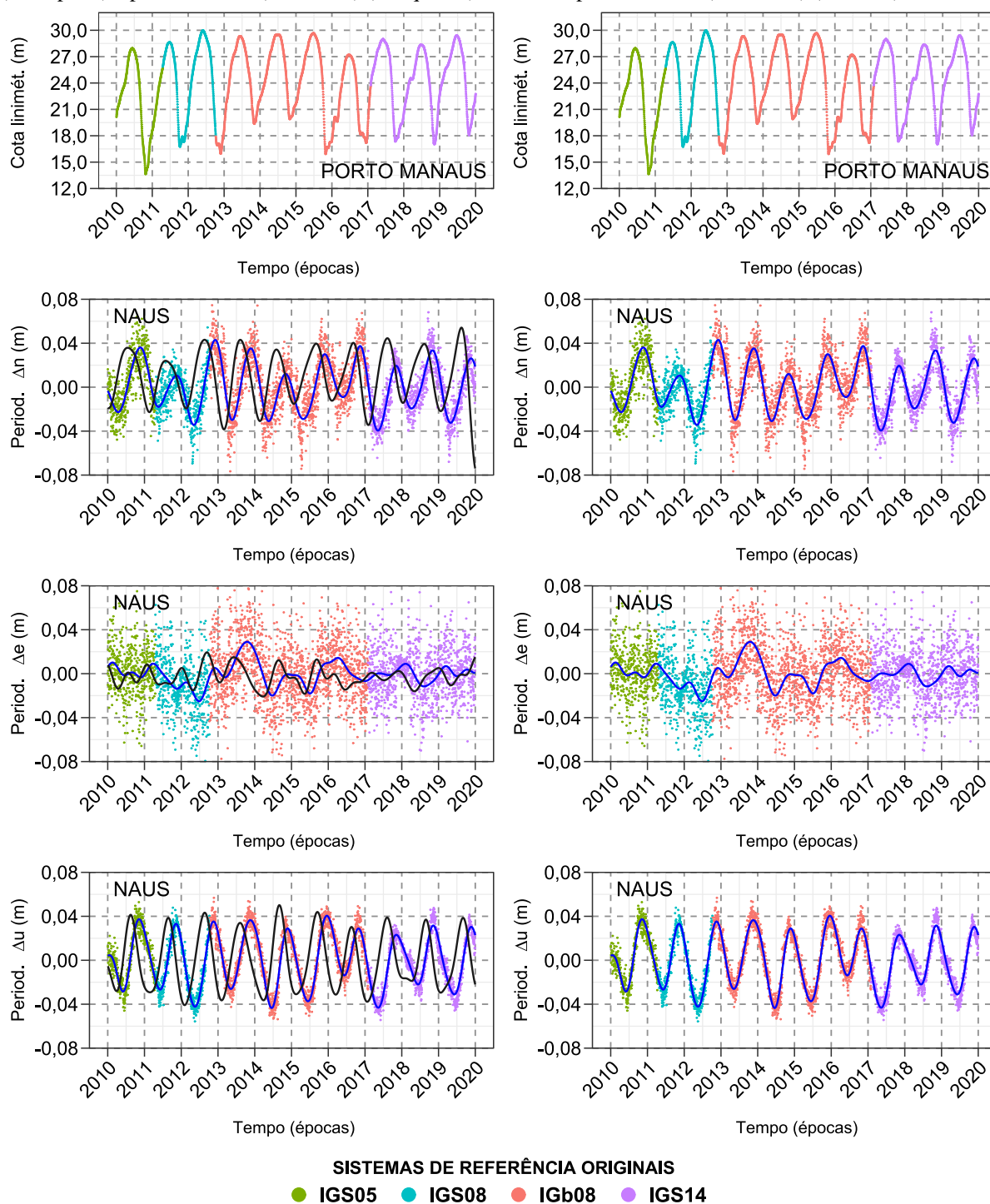
Tabela 3 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação NAUS.

Componentes	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	Estatística t	Valor p
Δn	Intercepto	-24,150	$5,132e^{-02}$	-470,5	$< 2e^{-16}$
	Vn (m/ano)	0,01198	$2,547e^{-05}$	470,5	$< 2e^{-16}$
Δe	Intercepto	7,00588	$3,788 e^{-02}$	184,9	$< 2e^{-16}$
	Ve (m/ano)	-0,00347	$1,880 e^{-05}$	-184,9	$< 2e^{-16}$

Fonte: O autor (2021).

De posse das séries livre de tendência efetuou-se a análise das componentes periódicas. Inicialmente, optou-se por utilizar os sinais periódicos extraídos com a demodulação complexa das séries diferenciadas. No entanto, percebeu-se que tais sinais apresentaram um retardo quando associadas às séries livres de tendência. Tal fato compromete as análises das defasagens atreladas aos períodos de eventos extremos, como secas e cheias. Salienta-se que o retardo apresentado nos sinais extraídos das séries diferenciadas não ocorreu para os sinais extraídos das séries em que a tendência foi removida com o procedimento LOWESS e, portando, estes foram utilizados nas análises das estações em estudo. Ambos os sinais periódicos podem ser observados na Figura 5.

Figura 5 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior), sinais periódicos das séries diferenciadas (linha preta) e por LOWESS (linha azul) (à esquerda) e somente por LOWESS (linha azul) (à direita).

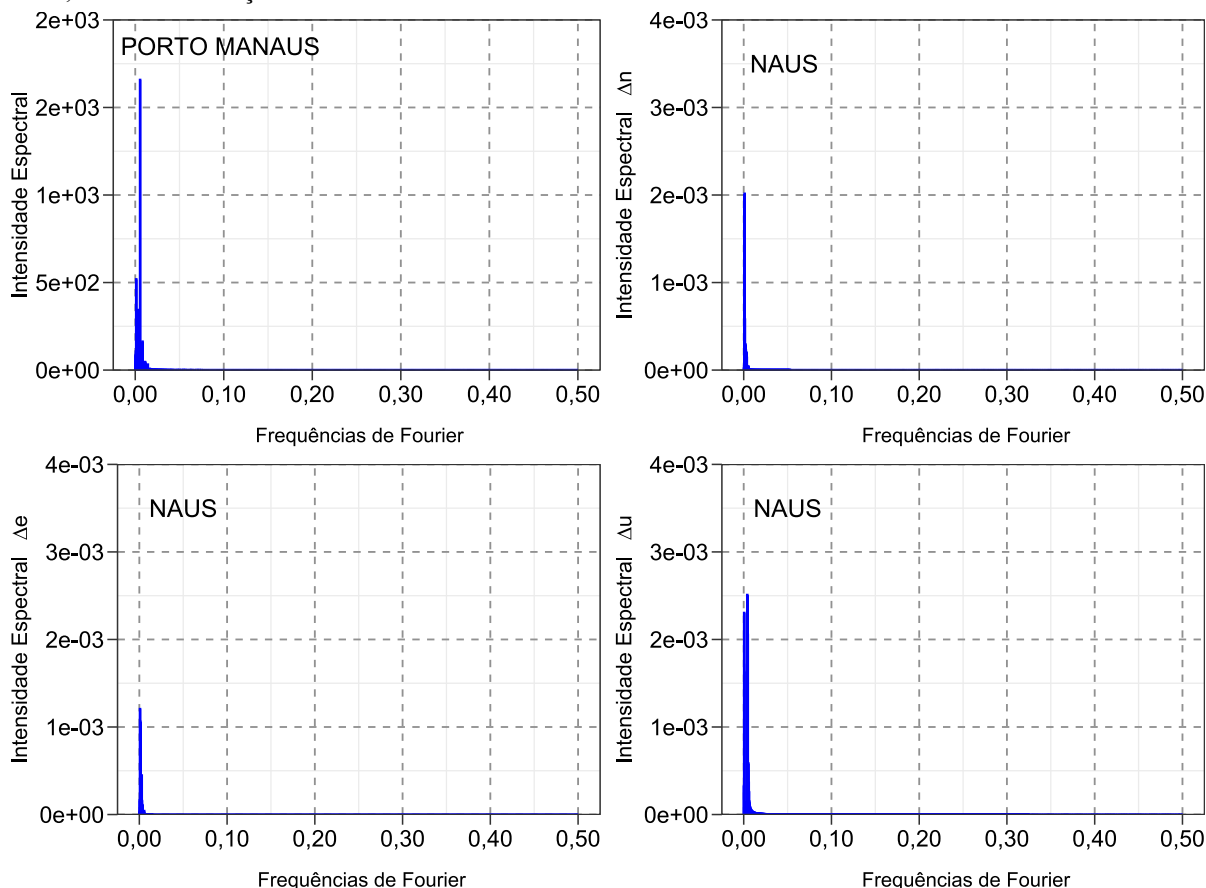


Fonte: O autor (2021).

A partir dos sinais periódicos, determinou-se os periodogramas referentes às componentes Δn , Δe e Δu da estação NAUS e à série de cotas linimétricas, apresentados na Figura 6. Observou-se a ocorrência de picos associados às frequências críticas e, portanto, caracterizam possíveis *lags* periódicos, conferindo características cíclicas ou sazonais às componentes em análise. A significância dos *lags* periódicos foi validada com aplicação do

teste G de Fisher, cujos resultados podem ser verificados na Tabela 4.

Figura 6 – Periodogramas referentes à série de cotas linimétricas do porto de Manaus e às componentes periódicas de Δn , Δe e Δu da estação NAUS.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 4 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação NAUS e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.

Componentes	Frequência crítica f_c (ciclos/dia)	Periodicidade $1/f_c$ (dias)	Estatística G (g_{calc})	g_{crit}	Valor p
Cotas linimétricas	0,002738	365,2	0,8489	0,0057	$\ll 0,00001$
Δn	0,002738	365,2	0,7951	0,0057	$\ll 0,00001$
Δe	0,000821	1217,3	0,2306	0,0057	$\ll 0,00001$
Δu	0,002738	365,2	0,8518	0,0057	$\ll 0,00001$

Fonte: O autor (2021).

Considerando os resultados apresentados na Tabela 4 pode-se concluir que as periodicidades encontradas foram significativas a 5% de significância. De fato, os valores apresentados para estatística G foram superiores aos valores críticos g_{crit} , com os valores p $\ll 0,00001$, o que confirma que os lags periódicos são significativos. A periodicidade da componente Δe evidenciou uma característica cíclica, pois o valor obtido foi superior a dois anos (730 dias). Já as componentes Δn , Δu e de cotas linimétricas evidenciaram uma característica sazonal. Nesse sentido, pode-se confirmar a forte relação entre as variações

hidrológicas e as deformações transitórias associadas ao efeito da carga hidrológica nas componentes Δn e Δu . Adicionalmente, evidencia-se que as periodicidades determinadas a partir dos sinais periódicos extraídos com a demodulação complexa das séries diferenciadas foram similares às apresentadas na Tabela 4.

Cabe ressaltar que Bouzada (2012) e Lee, Lee e Lee (2013) destacam que a componente cíclica é caracterizada como padrões oscilatórios de longo prazo que não têm periodicidade exata, ou seja, não estão relacionados ao comportamento sazonal. Nesse caso, os ciclos não são necessariamente regulares, mas seguem padrões bastante suaves de subidas e descidas, onde cada oscilação dura mais de dois ou três anos. Ademais, ressaltam que a sazonalidade corresponde às oscilações periódicas de prazos mais curtos, aproximadamente, anuais ou menores.

Ao observar a série de cotas linimétricas e os sinais periódicos dispostos na Figura 5, verifica-se que as componentes Δn e Δu , quando comparadas às de cotas linimétricas, estão aproximadamente fora de fase ($\sim 180^\circ$), enquanto as componentes Δn e Δu estão aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$), quando comparadas entre si. A componente Δe apresentou comportamento diferente do observado para as componentes Δn e Δu , evidenciando assim que fatores adicionais à carga hidrológica estão presentes em Δe , o que deve ser investigado. Ressalta-se que a distância entre as estações NAUS e linimétrica é de aproximadamente 12,93 quilômetros.

Nesse sentido, Bevis, Bedford e Caccamise (2020) justificam que o comportamento quase em fase apresentado pelas componentes Δn e Δu ocorre devido à orientação média das massas d'água nas proximidades de Manaus, que é aproximadamente oeste-leste. Nos períodos de cheia, os rios aumentam sua massa e, portanto, o solo na estação NAUS é puxado para baixo em direção ao centro da mudança de massa local, que está quase ao sul.

No entanto, os termos ionosféricos de ordem superior são desconsiderados no IBGE-PPP (IBGE, 2020), podendo assim serem transformados em movimentos artificiais diurnos, sazonais e interanuais, que podem ser mal interpretados como efeitos de maré e deformação crustal (KEDAR et al., 2003). Nesse sentido, a correção do efeito destes termos pode melhorar os resultados obtidos para as séries posicionais. Salienta-se que a correção do efeito dos termos ionosféricos de ordem superior contribui, em parte, para as variações sazonais, especialmente na componente vertical. Para a Δe , no entanto, resultados razoáveis podem ser obtidos com base nas correções dos termos ionosféricos de ordem superior (JIANG et al., 2014). Entretanto, devem ter seu comportamento e magnitude avaliados para a região considerada nesta pesquisa.

O tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica foi analisado

considerando as defasagens entre os sinais periódicos e a série de cotas linimétricas apresentadas na Tabela 5. Importa ressaltar que cotas linimétricas foram consideradas como referência para os cálculos. Dessa forma, os sinais (+) e (-) que acompanham os valores anuais evidenciam se as deformações ocorreram, respectivamente, antes ou depois dos picos e vales dos eventos máximos (cheias e secas). Considerando as cheias, observou-se as deformações sofridas pelas componentes Δn e Δu ocorreram antes dos picos em 100% dos anos para Δn e 90% para Δu . Portanto, pode-se constatar que o limite viscoelástico da deformação é atingido antes dos picos das cheias, ou seja, a saturação do solo ocorre antes do nível linimétrico máximo. De fato, Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (2001) afirmam que a saturação e dessaturação dos solos pela água modifica seu volume poroso, o que resulta em deslocamentos. Entre as componentes Δn e Δu , as defasagens mostram que as deformações em Δn ocorrem antes dos picos ocorridos em Δu em 80% dos anos. Contudo, deve-se atentar para o fato de que a magnitude referente a Δn é significativamente menor, quando comparada a Δu .

Tabela 5 – Defasagens referentes à estação NAUS.

Evento extremo	Comp.	Defasagens (dias)												
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Máx.	Mín.	Méd.
Cheia	Δn e Linimétrica	-58	-40	-24	-24	-25	-63	-20	-25	-77	-53	77	20	40,9
	Δu e Linimétrica	-10	-24	-13	-37	+4	-16	-7	-23	-12	-16	4	37	16,2
	Δn e Δu	-48	-16	-11	+13	-29	-47	-13	-2	-65	+37	65	2	28,1
Seca	Δn e Linimétrica	+27	+36	+7	+19	+6	+30	-31	+29	-4	+25	36	4	29,7
	Δu e Linimétrica	+14	+30	-10	+14	+26	+50	-47	+32	+4	+27	50	4	31,5
	Δn e Δu	+13	+6	+17	+5	-20	-20	+16	-3	-8	-2	20	2	16,7

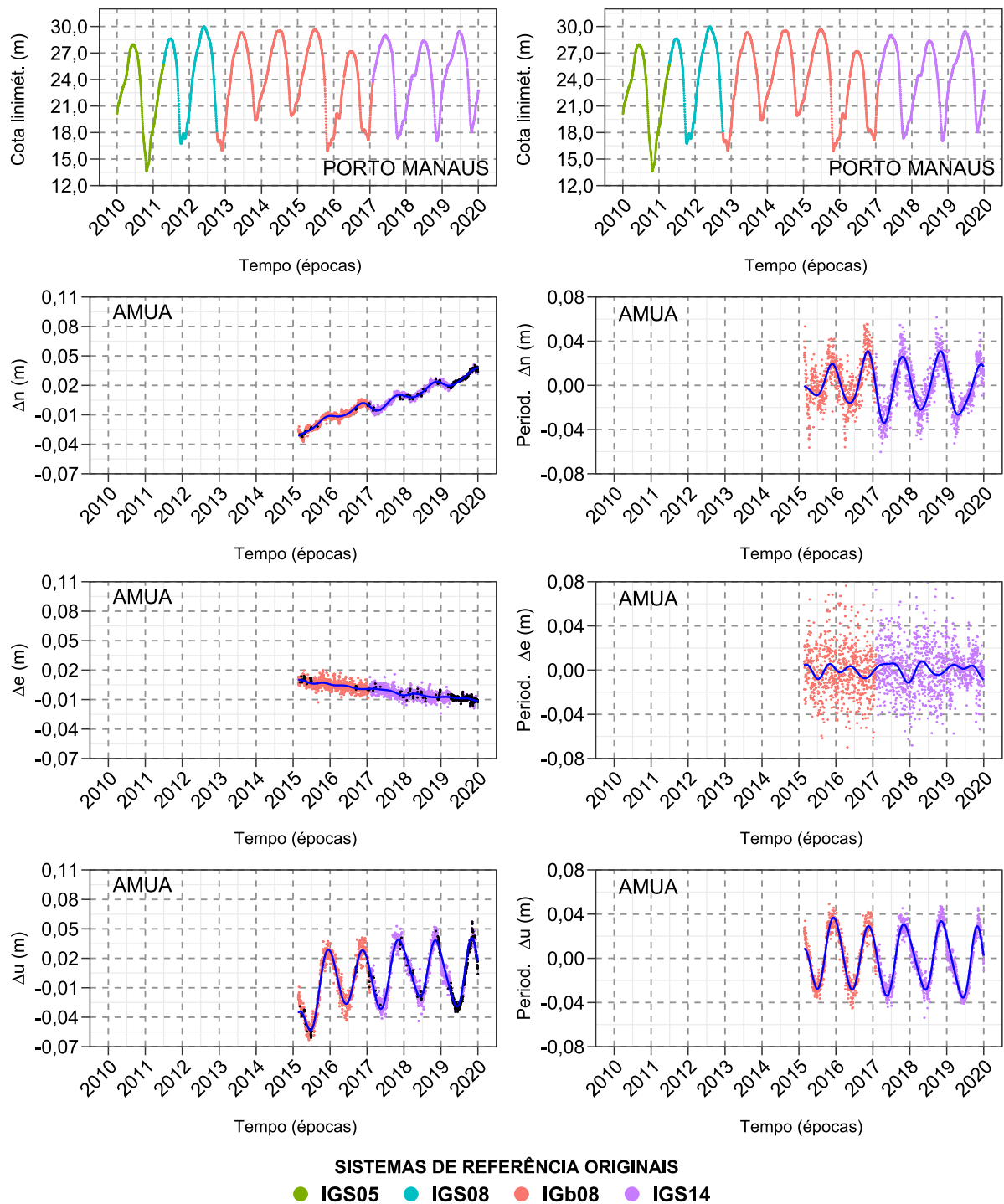
Fonte: O autor (2021).

Para as secas, as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram após os vales em 80% dos anos para ambas as componentes. Nesse sentido, observa-se que a ocorrência do relaxamento das deformações após o nível linimétrico mínimo está associado ao processo de vazante vinculado às zonas úmidas e de remanso, recorrentes na região (SILVA, 2010; ALVES, 2018). Entre as componentes Δn e Δu , as defasagens mostram que as deformações em Δn ocorrem após os vales em Δu em 50% dos anos. Desconsiderou-se as componentes Δe nas defasagens por apresentarem comportamento irregular, com picos locais interanuais que podem ser ocasionados por fatores adicionais ao de carga hidrológica e que devem ser investigados. De fato, Rosa (2008) e Knowles, Bennett e Harig (2020) destacam que apesar da parte majoritária dos efeitos estarem associados ao efeito causado pela carga hidrológica, ainda permanecem, na série temporal posicional, outros efeitos que requerem um estudo mais detalhado. De fato, como mencionado anteriormente, os efeitos dos termos ionosféricos de ordem superior podem afetar as séries temporais posicionais.

4.3.2 Estação AMUA

Verificou-se que esta estação não apresentou troca de antena e/ou receptor, não acarretando saltos artificiais em suas séries posicionais, como mostrado na Figura 7. Nesse sentido, seguiu-se para a análises das tendências.

Figura 7 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior), séries posicionais da estação AMUA com períodos imputados (pontos em preto) e trajetória (linha azul) à esquerda, com seus respectivos sinais periódicos (em azul) à direita.



Fonte: O autor (2021).

Fundamentando-se nos resultados obtidos no teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF) dispostos na Tabela 6, constatou-se que as séries Δn , Δe , Δu e de cotas linimétricas em estudo não apresentam raiz unitária e, portanto, não possuem tendência estocástica, pois a regressão é estimada com uma diferença já aplicada. A hipótese de raiz unitária foi rejeitada a 5% de significância com os valores p apresentados. Analisando o coeficiente para tendência determinística observou-se que as séries Δn e Δe possuem valor significativo, com valor $p < 2e^{-16}$ e, nesse caso, rejeitou-se a hipótese de nulidade que afirma que as séries não possuem tendência determinística. Considerando as séries Δu e de cotas linimétricas, não se pode rejeitar a hipótese de nulidade (valor p igual a 0,255 e 0,901, respectivamente) constatando que estas não possuem tendência determinística.

Tabela 6 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries posicionais da estação AMUA e de cota linimétrica.

Componentes	Parâmetros	β_1	β_2	π
Cotas linimétricas	Estimativa	1,124e ⁻⁰²	-8,293e ⁻⁰⁸	-4,600e ⁻⁰⁴
	Erro-padrão	4,302e ⁻⁰³	6,715e ⁻⁰⁷	1,723e ⁻⁰⁴
	Estatística do teste	2,614	-0,123	-2,669
	Valor p	0,009	0,901	0,007
Δn	Estimativa	-1,974e ⁻⁰³	2,610e ⁻⁰⁶	-7,863e ⁻⁰²
	Erro-padrão	2,920e ⁻⁰⁴	3,703e ⁻⁰⁷	1,089e ⁻⁰²
	Estatística do teste	-6,761	7,049	-7,223
	Valor p	1,85e ⁻¹¹	2,58e ⁻¹²	7,50e ⁻¹³
Δe	Estimativa	5,179e ⁻⁰³	-6,718e ⁻⁰⁶	-5,829e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	2,968e ⁻⁰⁴	3,570e ⁻⁰⁷	2,762e ⁻⁰²
	Estatística do teste	17,451	-18,820	-21,101
	Valor p	< 2e ⁻¹⁶	< 2e ⁻¹⁶	< 2e ⁻¹⁶
Δu	Estimativa	-2,769e ⁻⁰⁴	3,333e ⁻⁰⁷	-2,080e ⁻⁰²
	Erro-padrão	2,959e ⁻⁰⁴	2,930e ⁻⁰⁷	5,743e ⁻⁰³
	Estatística do teste	-0,936	1,138	-3,622
	Valor p	0,3496	0,255	0,0003

Fonte: O autor (2021).

Com a ocorrência de tendência determinística comprovada para as componentes Δn e Δe , ajustou-se modelos de regressão linear determinando-se as deformações contínuas, conforme apresentado na Tabela 7. Efetuando a comparação das velocidades V_n e V_e aqui estimadas com as estimadas no Capítulo 3, nota-se que seus valores foram coincidentes. Tal fato pode ser justificado pelo tamanho das séries posicionais.

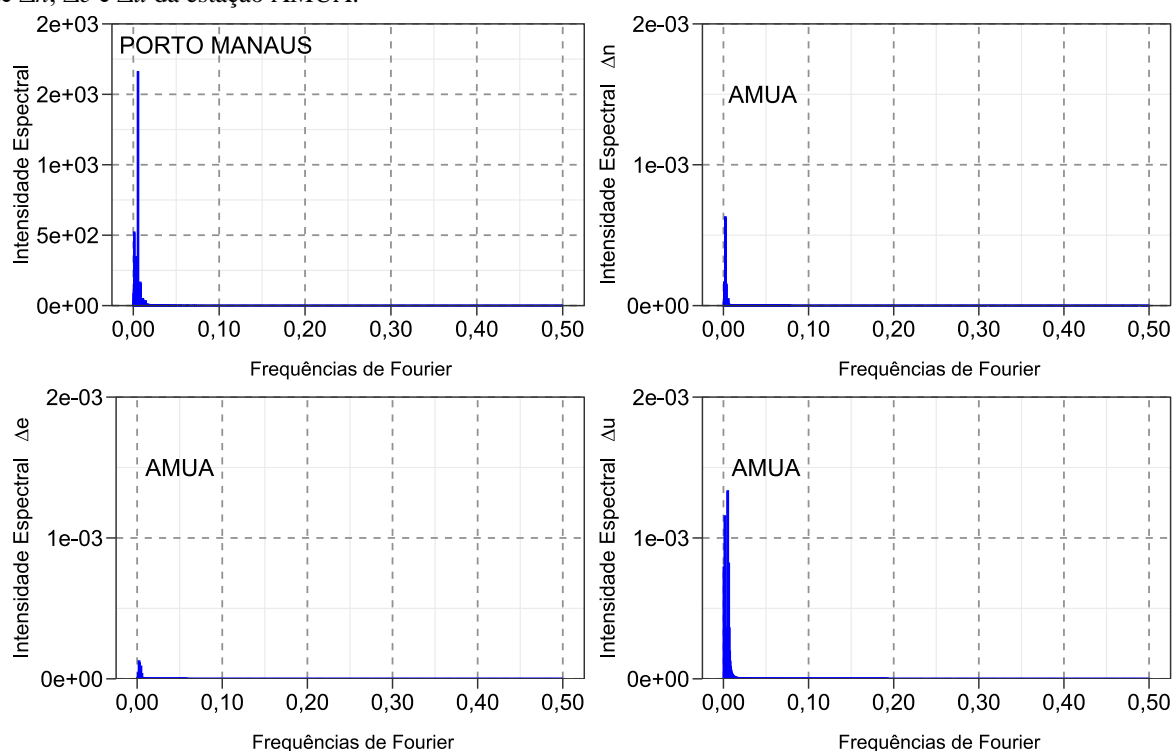
Tabela 7 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMUA.

Componentes	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	Estatística t	Valor p
Δn	Intercepto	-24,50	$1,175e^{-01}$	-208,5	$< 2e^{-16}$
	Vn (m/ano)	0,0122	$5,825e^{-05}$	208,5	$< 2e^{-16}$
Δe	Intercepto	8,454	$3,132e^{-02}$	269,9	$< 2e^{-16}$
	Ve (m/ano)	-0,0042	$1,552e^{-05}$	-270,0	$< 2e^{-16}$

Fonte: O autor (2021).

Após a remoção da tendência com o procedimento LOWESS, determinou-se os periodogramas referentes aos sinais periódicos da série de cotas linimétricas e das componentes Δn , Δe e Δu da estação AMUA, apresentados na Figura 8. Verificou-se a presença de picos associados as frequências críticas e, portanto, confere características cíclicas ou sazonais às componentes em análise. Ademais, tais picos caracterizam possíveis *lags* periódicos, que foram validados com aplicação do teste G de Fisher, cujos resultados constam na Tabela 8.

Figura 8 – Periodogramas referentes à série de cotas linimétricas do porto de Manaus e às componentes periódicas de Δn , Δe e Δu da estação AMUA.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 8 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMUA e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.

Componentes	Frequência crítica f_c (ciclos/dia)	Periodicidade $1/f_c$ (dias)	Estatística G (G_{calc})	G_{crit}	Valor p
Cotas linimétricas	0,002738	365,2	0,8489	0,0057	$\ll 0,00001$
Δn	0,002815	355,2	0,8271	0,0109	$\ll 0,00001$
Δe	0,002252	444	0,2271	0,0109	$\ll 0,00001$
Δu	0,002815	355,2	0,9330	0,0109	$\ll 0,00001$

Fonte: O autor (2021).

Considerando os resultados apresentados na Tabela 8 conclui-se que as periodicidades encontradas foram significativas a 5% de significância. De fato, os valores apresentados para estatística G foram superiores aos valores críticos g_{crit} , com os valores $p \ll 0,00001$, o que confirma a hipótese de que os *lags* periódicos encontrados são significativos. As componentes Δn e Δu apresentaram características sazonais, com periodicidade similar. Nesse sentido, pode-se observar que tais periodicidades apresentam uma diferença de aproximadamente dez dias em relação ao obtido para a série de cotas linimétricas, o que pode estar associado à distância entre as estações AMUA e linimétrica, de aproximadamente 5,09 quilômetros. No entanto, mesmo com esta diferença, ficou evidente a forte relação entre as variações hidrológicas e as deformações transitórias associadas ao efeito da carga hidrológica. De forma análoga à componente Δe da estação NAUS, Δe da estação AMUA obteve periodicidade maior (comportamento cíclico), quando comparadas às demais componentes posicionais desta estação, ressaltando que fatores adicionais à carga hidrológica afetam aquela componente e devem ser investigados. Contudo, deve-se considerar que o quantitativo de observações das séries posicionais da estação AMUA correspondem a, aproximadamente, metade do quantitativo apresentado para estação NAUS, justificando assim a diferença nas periodicidades das componentes Δe .

Adicionalmente, observando a série de cotas linimétricas e os sinais periódicos dispostos na Figuras 6 verifica-se que as componentes Δn e Δu , quando comparadas às de cotas linimétricas, estão aproximadamente fora de fase ($\sim 180^\circ$), enquanto as componentes Δn e Δu estão aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$), quando comparadas entre si.

Nesse sentido, de forma similar à estação NAUS, o comportamento aproximadamente em fase apresentado pelas componentes Δn e Δu é justificável devido à orientação média das massas d'água nas proximidades de Manaus, que é aproximadamente oeste-leste. Ademais, o aumento de massa d'água nos rios devido às cheias puxam o solo na estação AMUA para baixo em direção ao centro da mudança de massa local, que está quase ao sul.

De forma a avaliar o tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica, determinou-se as defasagens entre os sinais periódicos e a série de cotas linimétricas apresentadas na Tabela 9. Salienta-se que foram consideradas as cotas linimétricas como referência nos cálculos das defasagens e, portanto, os sinais (+) e (-) que acompanham seus valores evidenciam se as deformações ocorreram, respectivamente, antes ou depois dos picos e vales dos eventos máximos (cheias e secas).

Tabela 9 – Defasagens referentes à estação AMUA.

Evento extremo	Comp.	Defasagens (dias)											Máx.	Mín.	Méd.
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019				
Cheia	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	-6	-29	-43	-68	-61	68	6	41,38	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	*	*	2	-6	-15	-19	-12	19	2	10,79	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	-12	-7	-11	-6	38	38	6	14,79	
Seca	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	28	-32	15	-5	41	41	5	24,18	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	*	*	40	-25	26	1	3	40	1	18,99	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	-8	-23	-28	-49	-49	49	8	31,39	

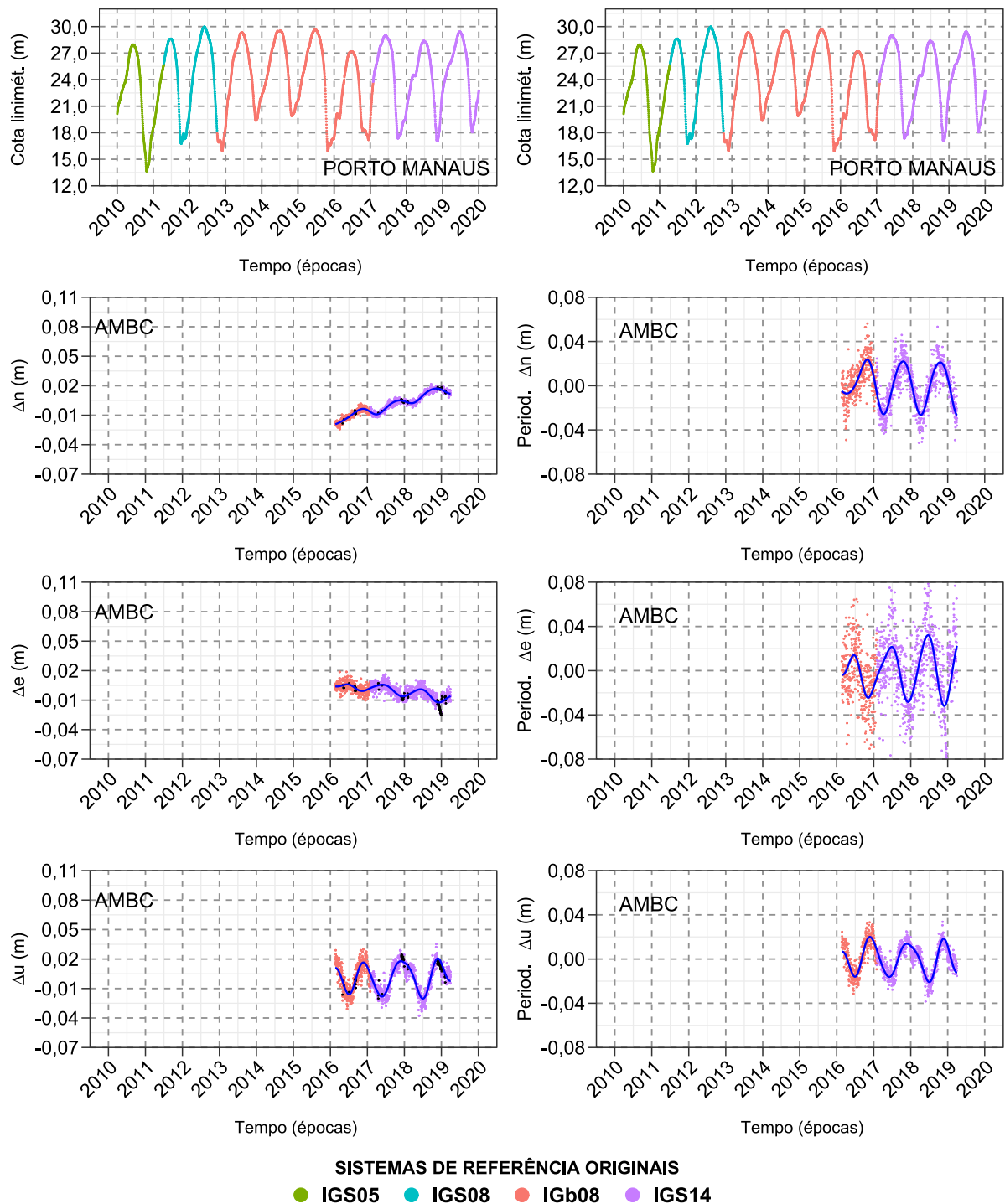
Fonte: O autor (2021).

Observou-se que no período das cheias, as deformações sofridas pelas componentes Δn e Δu atingem os extremos antes dos picos em 100% dos anos para Δn e 80% para Δu . Portanto, pode-se constatar que o limite viscoelástico de deformação é atingido antes dos picos das cheias, ou seja, a saturação do solo ocorre antes do nível linimétrico máximo. Entre as componentes Δn e Δu , as defasagens mostram que as deformações em Δn ocorrem antes dos picos ocorridos em Δu em 80% dos anos. Nos períodos das secas, as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram após os vales em 60% e 80% dos anos, respectivamente. Nesse sentido, observa-se que a ocorrência do relaxamento das deformações após o nível linimétrico mínimo está associado ao processo de vazante associado ao remanso e às zonas úmidas, recorrentes na região de Manaus (SILVA, 2010; ALVES, 2018). Entre as componentes Δn e Δu , as defasagens mostram que as deformações em Δn ocorrem antes dos vales de Δu em 100% dos anos. De forma análoga a estação NAUS, desconsiderou-se as componentes Δe nas defasagens para a estação AMUA por apresentarem comportamento irregular, com picos locais interanuais que podem ser ocasionados por fatores adicionais ao de carga hidrológica e devem ser investigados.

4.3.3 Estação AMBC

De forma similar à estação AMUA, constatou-se que as séries das componentes Δn , Δe e Δu da estação AMBC dispostas na Figura 9 não tiveram saltos devido a trocas de antenas e/ou receptores, como os apresentados em NAUS. Assim sendo, prosseguiu-se para a análise das tendências.

Figura 9 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior) e séries temporais posicionais da estação AMBC com períodos imputados, representados pelos pontos em preto e trajetória em azul (à esquerda) com seus respectivos sinais periódicos em azul (à direita).



Fonte: O autor (2021).

De posse dos resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado dispostos na Tabela 10, afirma-se que as séries Δn , Δe , Δu em estudo não apresenta raiz unitária e, portanto, não possuem tendência estocástica, pois a regressão é estimada com uma diferença já aplicada. A hipótese de raiz unitária foi rejeitada a 5% de significância com os valores p apresentados.

Fundamentando-se nos coeficientes para tendência determinística observou-se que as séries Δn e Δe possuem valor significativo com valor $p \ll 0,0001$, ou seja, rejeitou-se a hipótese de nulidade que afirma que as séries não possuem tendência determinística. Portanto, eliminou-se a tendência determinística aplicando o procedimento LOWESS. Considerando a série Δu e de cotas linimétricas não se pode rejeitar a hipótese de nulidade (valor p igual a 0,473 e 0,901, respectivamente) constatando que tais séries não possuem tendência determinística.

Tabela 10 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries de componentes posicionais da estação AMBC e de cota linimétrica.

Componentes	Parâmetros	β_1	β_2	π
Cotas linimétricas	Estimativa	1,124e ⁻⁰²	-8,293e ⁻⁰⁸	-4,600e ⁻⁰⁴
	Erro-padrão	4,302e ⁻⁰³	6,715e ⁻⁰⁷	1,723e ⁻⁰⁴
	Estatística do teste	2,614	-0,123	-2,669
	Valor p	0,009	0,901	0,007
Δn	Estimativa	-1,587e ⁻⁰³	2,977e ⁻⁰⁶	-1,018e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	2,731e ⁻⁰⁴	4,887e ⁻⁰⁷	1,547e ⁻⁰²
	Estatística do teste	-5,813	6,092	-6,577
	Valor p	7,99e ⁻⁰⁹	1,52e ⁻⁰⁹	7,30e ⁻¹¹
Δe	Estimativa	1,975e ⁻⁰³	-3,897e ⁻⁰⁶	-3,125e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	3,006e ⁻⁰⁴	5,032e ⁻⁰⁷	2,709e ⁻⁰²
	Estatística do teste	6,572	-7,745	-11,537
	Valor p	7,57e ⁻¹¹	2,11e ⁻¹⁴	< 2e ⁻¹⁶
Δu	Estimativa	-1,718e ⁻⁰⁴	3,722e ⁻⁰⁷	-6,530e ⁻⁰²
	Erro-padrão	3,398e ⁻⁰⁴	5,181e ⁻⁰⁷	1,250e ⁻⁰²
	Estatística do teste	-0,506	0,718	-5,222
	Valor p	0,613	0,473	2,1e ⁻⁰⁷

Fonte: O autor (2021).

Com a comprovação de tendência determinística para as componentes Δn e Δe ajustou-se modelos de regressão linear para a determinação das deformações contínuas, cujos resultados são apresentados na Tabela 11. Ao comparar as velocidades V_n e V_e com as mesmas componentes estimadas com as séries temporais do Capítulo 3, verificou-se que valores similares foram obtidos para V_n , enquanto uma diferença de 0,001 m/ano foi verificada para V_e . Tal diferença pode estar associada à utilização das trajetórias livres dos ruídos aleatórios causados no processamento no ajuste dos modelos.

Tabela 11 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMBC.

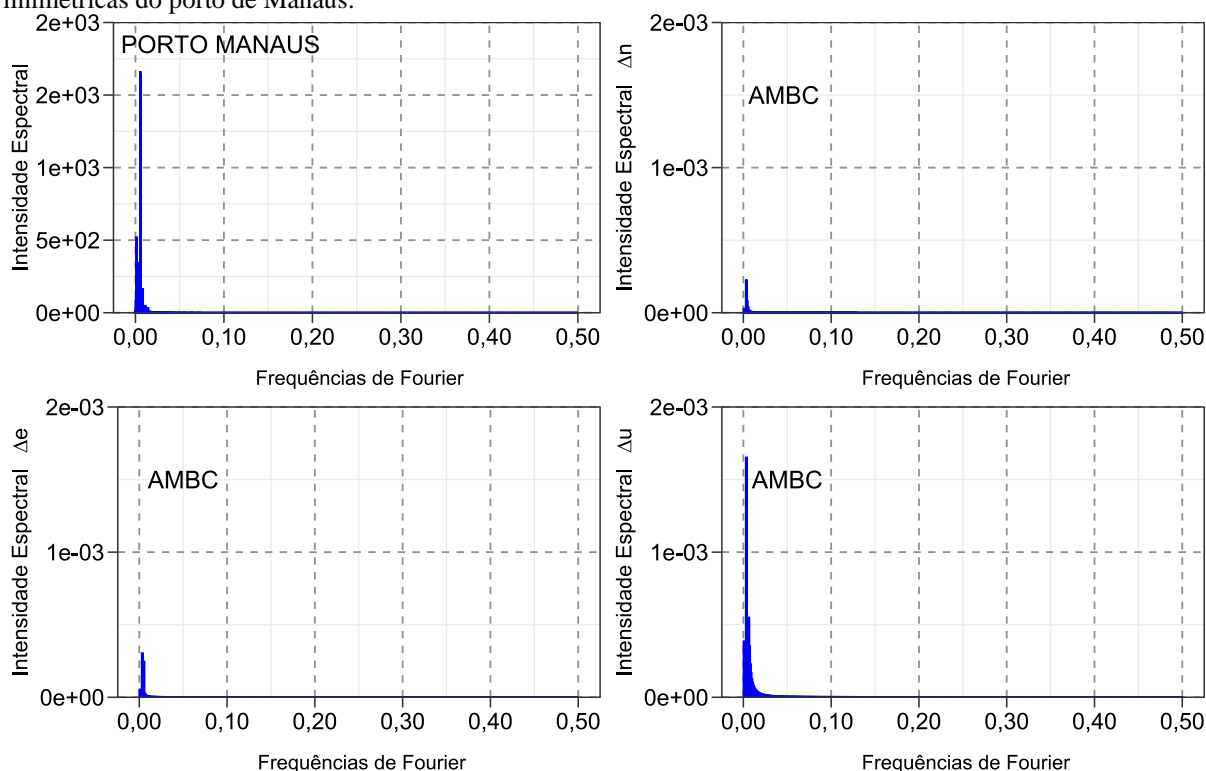
Componentes	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	Estatística t	Valor p
Δn	Intercepto	-21,87	2,006e ⁻⁰¹	-109	< 2e ⁻¹⁶
	V_n (m/ano)	0,01084	9,943e ⁻⁰⁵	109	< 2e ⁻¹⁶
Δe	Intercepto	9,608	2,134 e ⁻⁰¹	45,02	< 2e ⁻¹⁶
	V_e (m/ano)	-0,00476	1,058 e ⁻⁰⁴	-45,03	< 2e ⁻¹⁶

Fonte: O autor (2021).

Fundamentando-se nos periodogramas referentes aos sinais periódicos das componentes

Δn , Δe e Δu da estação AMBC, apresentados na Figura 10, verificou-se que ocorreram picos associados às frequências críticas e, portanto, caracterizam possíveis *lags* periódicos. O teste G de Fisher foi aplicado para atestar a significância dos *lags* periódicos encontrados, cujos valores e os resultados do teste G podem ser verificados na Tabela 12.

Figura 10 – Periodogramas referentes aos sinais periódicos de Δn , Δe e Δu da estação AMBC e da série de cotas linimétricas do porto de Manaus.



Fonte: O autor (2021).

Tabela 12 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMBC e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.

Componentes	Frequência crítica f_c (ciclos/dia)	Periodicidade $1/f_c$ (dias)	Estatística G (g_{calc})	g_{crit}	Valor p
Cotas linimétricas	0,002738	365,2	0,8489	0,0057	$\ll 0,00001$
Δn	0,002633	379,6	0,8874	0,0163	$\ll 0,00001$
Δe	0,002633	379,6	0,8268	0,0163	$\ll 0,00001$
Δu	0,002633	379,6	0,7857	0,0163	$\ll 0,00001$

Fonte: O autor (2021).

Baseando-se nos resultados apresentados na Tabela 12, concluiu-se que as periodicidades encontradas foram significativas a 5% de significância, cujos valores apresentados para estatística G foram superiores aos valores críticos g_{crit} , com os valores $p \ll 0,00001$, o que confirma que os *lags* periódicos são significativos. A periodicidade encontrada foi idêntica para todas as componentes em análises, evidenciando uma característica sazonal. No entanto, as periodicidades de AMBC diferiram das encontrados para as estações NAUS,

AMUA e para as cotas linimétricas, evidenciando que as deformações se comportam de forma diferente nas estações consideradas. De fato, as estações AMBC e linimétrica distam, aproximadamente, 401,50 quilômetros entre si.

Comparando-se os sinais periódicos Δn e Δu de AMBC com a série de cotas linimétricas dispostos na Figura 8, verifica-se que estas estão aproximadamente fora de fase ($\sim 180^\circ$), enquanto as componentes Δn e Δu estão aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$), quando comparadas entre si. Os sinais periódicos Δe apresentaram-se aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$), quando comparados à série de cotas linimétricas, diferentemente do resultado apresentado pela mesma em NAUS e AMUA.

Nesse contexto, fundamentando-se nas colocações de Bevis, Bedford e Caccamise (2020) para a estação NAUS, pode-se verificar que a divergência no comportamento dos sinais periódicos Δe das estações consideradas pode ser justificado pela orientação média das massas d'água nas proximidades de Barcelos (AMBC), que é aproximadamente sul-leste. Essa mudança de orientação pode alterar a direção da mudança do centro de massa local e, portanto, puxa o solo na direção sudeste, distribuindo a magnitude das deformações de forma similar nas componentes Δn e Δe .

Quanto ao tempo de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica destacados na Tabela 13, pode-se observar que as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram antes dos picos e vales das cotas linimétricas em 100% dos anos, evidenciando que o limite elástico da deformação é atingido antes dos máximos e mínimos dos eventos extremos. O contrário é observado na Δe , em que as deformações ocorrem após os picos e vales das cotas linimétricas em 100% dos anos.

Tabela 13 – Defasagens referentes à estação AMBC.

Evento extremo	Comp.	Defasagens (dias)											Máx.	Mín.	Méd.
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019				
Cheia	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-118	-106	-125	*	125	106	116,3	
	Δe e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	+14	+26	+6	*	26	6	15,3	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-36	-50	-40	*	50	36	42	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	*	-83	-56	-85	*	85	56	74,6	
Seca	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-96	-40	-69	*	96	40	68,3	
	Δe e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	+15	+83	+53	*	83	15	50,3	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	-69	-4	-33	*	69	4	35,3	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	*	-26	-36	-36	*	36	26	32,6	

Fonte: O autor (2021).

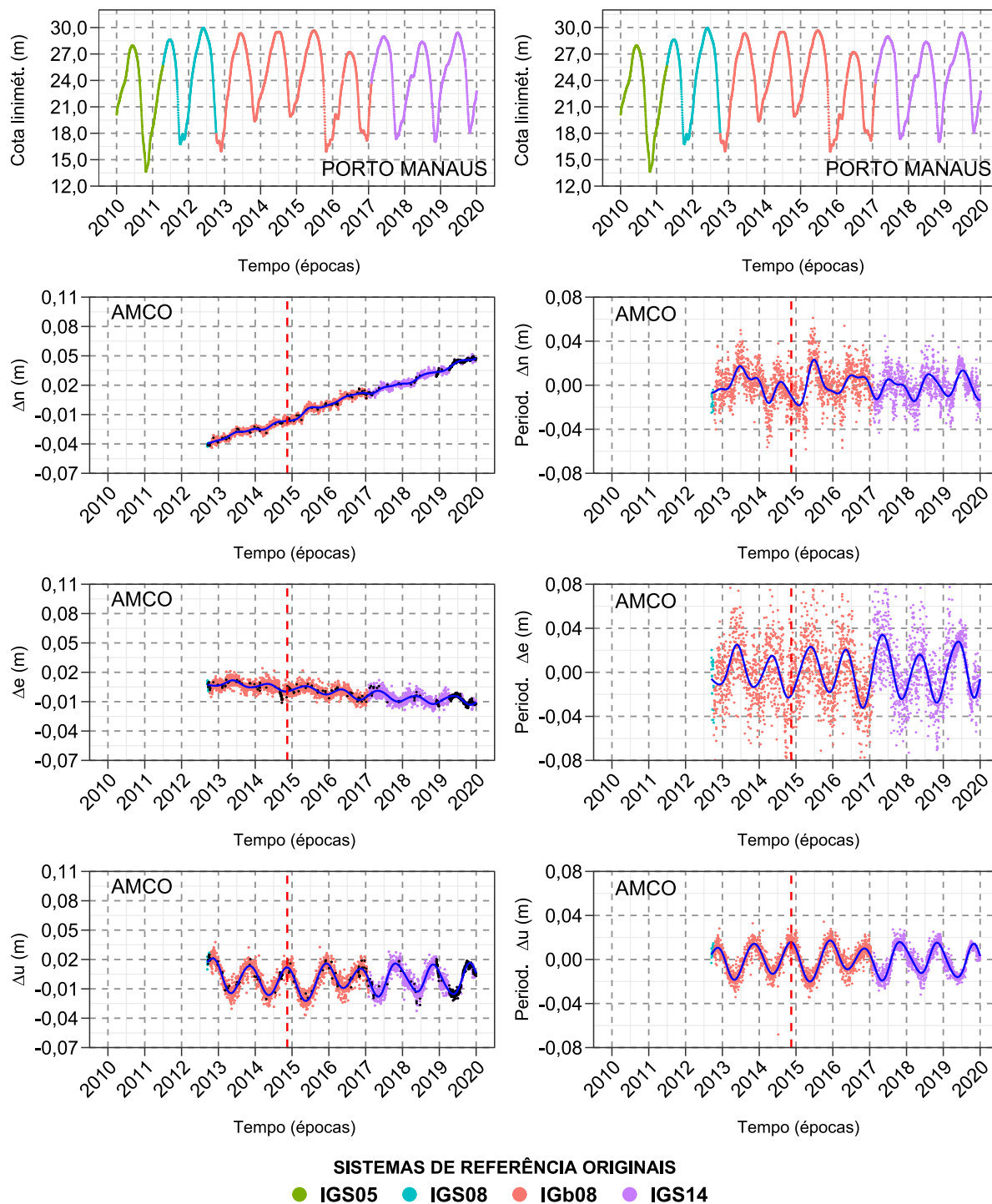
No entanto, deve-se atentar para o fato de que AMBC está localizada a aproximadamente 401,50 quilômetros de Manaus e, portanto, se encontra fora da zona de

remanso causada pelo encontro do Rio Negro com o Rio Solimões para a formação do Rio Amazonas, o que influencia diretamente as variações linimétricas em Manaus. Adicionalmente, ao se utilizar as cotas linimétricas de Manaus na determinação das defasagens em AMBC, deve-se considerar o tempo de deslocamento das massas de água entre as estações, pois grande parte do volume que flui em Barcelos, também fluirá em Manaus. Além disso, deve-se considerar também a propagação do efeito da carga hidrológica associados à estação NAUS e AMUA, que conforme Bevis et al. (2005) e Costa, Matos e Blitzkow (2012) ocorre de forma mais significativa em um raio de até 200 quilômetros, porém são perceptíveis a até 1000 quilômetros. Dessa forma, justifica-se o comportamento apresentado pelas deformações a partir das defasagens.

4.3.4 Estação AMCO

Nesta estação observou-se a ocorrência de uma troca do conjunto antena/receptor, como se pode observar na Figura 11. No entanto, tal procedimento não ocasionou saltos nas séries das componentes Δn , Δe e Δu e, portanto, prosseguiu-se para a análise das tendências.

Figura 11 – Série de cotas linimétricas do porto de Manaus (superior) e séries posicionais da estação AMCO com períodos imputados, representados pelos pontos em preto e trajetória em azul (à esquerda) com seus respectivos sinais periódicos em azul (à direita).



Fonte: O autor (2021).

De posse dos resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado dispostos na Tabela 14, afirma-se que as séries Δn , Δe , Δu em estudo não apresentam raiz unitária e, portanto, não possuem tendência estocástica, pois a regressão é estimada com uma diferença já aplicada. A hipótese de raiz unitária foi rejeitada a 5% de significância com os valores p apresentados.

Fundamentando-se nos coeficientes para tendência determinística observou-se que as séries Δn e Δe possuem valor significativo com valor $p \ll 0,0001$, ou seja, rejeitou-se a hipótese de nulidade que afirma que as séries não possuem tendência determinística. Portanto, eliminou-se a tendência determinística aplicando o procedimento LOWESS. Considerando a série Δu e de cota linimétrica não se pode rejeitar a hipótese de nulidade (valor p igual a 0,870 e 0,901, respectivamente) constatando que tais séries não possuem tendência determinística.

Tabela 14 – Resultados do teste de Dickey-Fuller aumentado para as séries de componentes posicionais da estação AMCO e série de cotas linimétricas do porto de Manaus.

Componentes	Parâmetros	β_1	β_2	π
Cotas linimétricas	Estimativa	1,124e ⁻⁰²	-8,293e ⁻⁰⁸	-4,600e ⁻⁰⁴
	Erro-padrão	4,302e ⁻⁰³	6,715e ⁻⁰⁷	1,723e ⁻⁰⁴
	Estatística do teste	2,614	-0,123	-2,669
	Valor p	0,009	0,901	0,007
Δn	Estimativa	-6,754e ⁻⁰³	5,556e ⁻⁰⁶	-1,695e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	5,142e ⁻⁰⁴	4,188e ⁻⁰⁷	1,270e ⁻⁰²
	Estatística do teste	-13,13	13,27	-13,35
	Valor p	< 2e ⁻¹⁶	< 2e ⁻¹⁶	< 2e ⁻¹⁶
Δe	Estimativa	3,130e ⁻⁰³	-2,533e ⁻⁰⁶	-3,275e ⁻⁰¹
	Erro-padrão	2,261e ⁻⁰⁴	1,682e ⁻⁰⁷	1,787e ⁻⁰²
	Estatística do teste	13,84	-15,06	-18,33
	Valor p	< 2e ⁻¹⁶	< 2e ⁻¹⁶	< 2e ⁻¹⁶
Δu	Estimativa	2,269e ⁻⁰⁵	-2,481e ⁻⁰⁸	-8,883e ⁻⁰²
	Erro-padrão	2,342e ⁻⁰⁴	1,521e ⁻⁰⁷	9,571e ⁻⁰³
	Estatística do teste	0,097	-0,163	-9,281
	Valor p	0,923	0,870	< 2e ⁻¹⁶

Fonte: O autor (2021).

Com a comprovação de tendência determinística para as componentes Δn e Δe ajustou-se modelos de regressão linear para a determinação das deformações contínuas, cujos resultados são apresentados na Tabela 15. A partir da comparação entre as velocidades Vn e Ve aqui estimadas e as estimadas no Capítulo 3, nota-se que seus valores foram similares, o que pode ser justificado pelo tamanho das séries posicionais.

Tabela 15 – Resultados dos modelos de regressão linear ajustados para a estação AMCO.

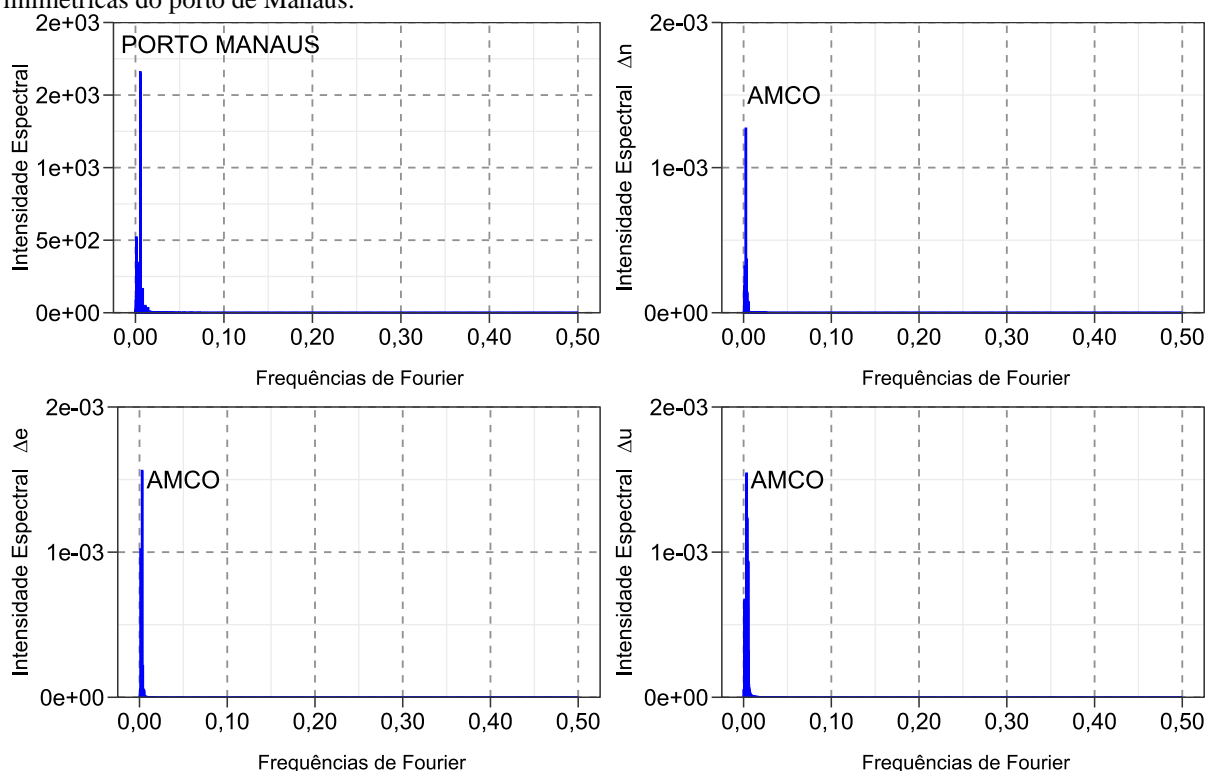
Componentes	Parâmetros	Estimativa	Desvio padrão	Estatística t	Valor p
Δn	Intercepto	-24,10	3,468e ⁻⁰²	-694,9	< 2e ⁻¹⁶
	Vn (m/ano)	0,0119	1,720e ⁻⁰⁵	695,0	< 2e ⁻¹⁶
Δe	Intercepto	5,77	5,242e ⁻⁰²	110,1	< 2e ⁻¹⁶
	Ve (m/ano)	-0,0029	2,600e ⁻⁰⁵	-110,1	< 2e ⁻¹⁶

Fonte: O autor (2021).

De posse das séries das componentes Δn , Δe e Δu da estação AMCO livres de tendência, determinou-se os sinais periódicos e seus respectivos periodogramas, como se pode observar

na Figura 12. Constatou-se a ocorrência de picos associados às frequências críticas que caracterizam possíveis *lags* periódicos, que tiveram sua significância atestada com a aplicação do teste G de Fisher. Os valores dos *lags* periódicos bem como os resultados do teste G podem ser verificados na Tabela 16.

Figura 12 – Periodogramas referentes aos sinais periódicos de Δn , Δe e Δu da estação AMCO e das cotas linimétricas do porto de Manaus.



Fonte: O autor (2021).

Fundamentando-se nos resultados apresentados na Tabela 16, concluiu-se que as periodicidades encontradas foram significativas a 5% de probabilidade, cujos valores apresentados para estatística G foram superiores aos valores críticos g_{crit} , com os valores $p \ll 0,00001$, o que confirma que os *lags* periódicos encontrados são significativos. A periodicidade encontrada foi idêntica para todas as componentes em análise, evidenciando uma característica sazonal, com periodicidades maiores que as encontrados nas estações NAUS e AMUA e similar às obtidas na estação AMBC. No entanto, o comportamento apresentado pela componente Δn da AMCO se assemelha ao apresentado pela componente Δe da NAUS e AMUA. Isto evidencia uma “inversão” no comportamento das deformações em tais estações, que pode ser justificada por fatores como a distância entre as estações NAUS, AMUA e linimétrica; e AMBC (aproximadamente 620,8 Km), bem como pela propagação do efeito da orientação média das massas d’água dos grandes rios, principalmente do Rio Negro por sua grande massa d’água, para a estação AMCO. Registra-se ainda, por oportuno que tal orientação altera a direção da

mudança do centro de massa local deslocando o sentido de movimentação do solo e, consequentemente, a distribuição das deformações nas componentes posicionais.

Tabela 16 – Periodicidades e valores para o teste G de Fisher para a estação AMCO e de cotas linimétricas do porto de Manaus.

Componentes	Frequência crítica f_c (ciclos/dia)	Periodicidade $1/f_c$ (dias)	Estatística G (g_{calc})	g_{crit}	Valor p
Cotas linimétricas	0,002738	365,2	0,8489	0,0057	<< 0,00001
Δn	0,002624	381	0,4239	0,0076	<< 0,00001
Δe	0,002624	381	0,6577	0,0076	<< 0,00001
Δu	0,002624	381	0,6772	0,0076	<< 0,00001

Fonte: O autor (2021).

Comparando-se o sinal periódico Δe de AMCO com a série de cotas linimétricas, verifica-se que estas estão aproximadamente fora de fase ($\sim 180^\circ$), enquanto a componentes Δu estão aproximadamente em fase ($\sim 0^\circ$) em relação às cotas linimétricas. As componentes Δe e Δu estão aproximadamente fora de fase ($\sim 180^\circ$), quando comparadas entre si. Os sinais periódicos de Δn não apresentaram delineamento bem definido, evidenciando picos locais interanuais que podem ser ocasionados por fatores adicionais ao efeito de carga hidrológica e devem ser investigados.

Tabela 17 – Defasagens referentes à estação AMCO.

Evento extremo	Comp.	Defasagens (dias)											Máx.	Mín.	Méd.
		2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019				
Cheia	Δn e Linimétrica	*	*	*	11	50	10	31	47	59	31	59	10	34,13	
	Δe e Linimétrica	*	*	*	16	17	1	14	26	6	7	26	1	12,42	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	-46	-29	-42	-20	-29	-26	-31	46	20	31,85	
	Δn e Δu	*	*	*	-141	-101	-150	-117	-97	-71	-99	150	71	110,8	
Seca	Δn e Linimétrica	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	Δe e Linimétrica	*	*	*	56	62	62	15	83	53	64	83	15	56,42	
	Δu e Linimétrica	*	*	*	10	14	39	-33	19	-5	5	39	5	25,95	
	Δn e Δu	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

Fonte: O autor (2021).

Considerando os tempos de resposta das deformações ao efeito da carga hidrológica destacados na Tabela 17, observou-se que as deformações na componente Δe ocorreram antes dos picos e vales das cotas linimétricas em 100% dos anos, evidenciando que o limite elástico da deformação é atingido após os máximos e mínimos dos eventos extremos. Para a componente Δu , verificou-se que as deformações ocorrem anteriormente aos picos e vales das cotas linimétricas em 100% e 71,4% dos anos, respectivamente. Na componente Δn foi possível constatar que as deformações ocorrem após os picos das cotas linimétricas em 100% dos anos.

Devido ao comportamento de Δn , não foi possível determinar as defasagens para os períodos de seca.

4.4 Conclusões

Pode-se observar que as séries de componentes Δn , Δe e Δu são suscetíveis às deformações periódicas associadas, majoritariamente, ao efeito da carga hidrológica, evidenciadas pelos seus comportamentos quando comparadas à série de cotas linimétricas. Contudo, as magnitudes associadas às componentes planimétricas Δn e Δe foram significativamente menores, quando comparadas as das componentes verticais Δu . Nesse sentido, ficou evidente que tanto a localização das estações quanto o sentido de deslocamento das massas de água exercem influência no comportamento das deformações periódicas e, conseqüentemente, em seus *lags* periódicos. Considerando a estação NAUS pode-se constatar que a periodicidade é bem definida para Δn e Δu , cujo valor obtido foi idêntico quando comparadas à periodicidade das cotas linimétricas (365,2 dias), mostrando assim a forte relação sazonal entre o ciclo hidrológico local e as deformações periódicas sazonais. No entanto, foi evidenciado um comportamento periódico adverso na componente Δe , com um fator periódico semianual em alguns anos. Além disso, seu *lag* periódico foi longo (1217,3 dias), caracterizando um movimento periódico cíclico nesta componente. De fato, conforme destaca Nahmani et al. (2012) a deformação nas componentes horizontais aponta para o centro de massa da anomalia hidrológica.

Comportamento similar ao verificado na estação NAUS foi observado na estação AMUA, porém com *lags* periódicos menores (355,2 dias) para as componentes Δn e Δu , quando comparados ao *lag* periódico das cotas linimétricas (365,2 dias), destacando a forte relação sazonal entre o ciclo hidrológico local e as deformações periódicas. Sua componente Δe apresentou comportamento periódico indefinido, cujo *lag* periódico foi maior (444 dias) em relação ao das cotas linimétricas. Pode-se justificar a redução nos *lags* devido à maior proximidade da estação AMUA do porto de Manaus e, conseqüentemente, do Rio Negro.

Noutro ângulo, as séries de componentes Δn , Δe e Δu da AMBC apresentaram comportamento periódico sazonal bem definido e com *lags* periódicos idênticos entre si (379,6 dias), porém um pouco maiores quando comparados ao *lag* das cotas linimétricas. As séries de componentes Δn , Δe e Δu da AMCO também apresentaram comportamento periódico sazonal e *lags* periódicos idênticos entre si (381 dias), porém maior quando comparado ao *lag* das cotas linimétricas. Nesse sentido, ficou evidente que o efeito da carga hidrológica ocasionado pelo remanso e zonas úmidas em Manaus se propaga para todas as componentes das estações

circunvizinhas. No entanto, fatores adicionais ao efeito da carga hidrológica também afetam as séries posicionais e devem ser investigados.

Fundamentando-se nas defasagens, constatou-se que o limite viscoelástico da deformação é atingido antes dos picos das cotas linimétricas (pico das cheias) para as componentes Δn e Δu das estações NAUS e AMUA, ou seja, a saturação do solo ocorre antes do nível linimétrico máximo. Considerando as secas (vales das cotas linimétricas) verificou-se que as deformações referentes a tais componentes ocorrem após os vales, evidenciando assim que o relaxamento da crosta está associado ao processo de vazante vinculado ao remanso e às zonas úmidas, recorrentes em Manaus. A componente Δe apresentou comportamento irregular, com picos locais interanuais que podem ser ocasionados por fatores adicionais ao de carga hidrológica e, portanto, não foram incluídas na determinação das defasagens. Nesse caso, é interessante avaliar a magnitude e o comportamento dos efeitos dos termos ionosféricos de ordem superior nas séries posicionais.

Para a estação AMBC, localizada a aproximadamente 401,5 quilômetros de Manaus e margeando o Rio Negro, observou-se que as deformações nas componentes Δn e Δu ocorreram antes dos picos e vales das cotas linimétricas, evidenciando que o limite elástico da deformação nesta estação é atingido antes dos máximos e mínimos dos eventos extremos (secas e cheias), ressaltando que as deformações obedecem ao comportamento definido pelo ciclo hidrológico. Ademais, comportamento oposto foi observado para a componente Δe , em que as deformações ocorreram após os picos e vales das cotas linimétricas.

Considerando a estação AMCO, distante aproximadamente 620,8 quilômetros de Manaus e fora das margens do Rio Negro, pode-se verificar que esta sofre o efeito da carga hidrológica ocasionado pela expressividade do sistema do Rio Negro no transporte de massa d'água, o que foi ressaltado ao utilizar as cotas linimétricas de Manaus. A partir das defasagens, observou-se que o limite viscoelástico da deformação é atingido antes dos picos das cotas linimétricas (pico das cheias) para a componente Δu da AMCO. Adicionalmente, comportamento similar ao apresentado pelas componentes Δn e Δu das estações NAUS e AMUA foi observado para as componentes Δe e Δu da estação AMCO, ressaltando a “inversão” na distribuição das deformações.

Respalhando-se nas análises das tendências, verificou-se que as componentes Δn e Δe apresentaram tendência (deformação contínua) significativa para as estações GNSS consideradas, o que não ocorreu para a componente Δu . Contudo, deve-se considerar a necessidade de se modelar os efeitos sazonais predominantes na região em estudo para as séries Δu , o que proporcionará uma estimativa coerente para a tendência. Ademais, utilizar as

trajetórias reconstruídas para determinação dos movimentos lineares de Δn e Δe é interessante, uma vez que estas se constituem da soma da tendência com os sinais periódicos, isentos dos efeitos de *outliers* e das flutuações ocasionadas no processamento dos dados, refletindo assim os efeitos de fenômenos locais, o que pode (ou poderá) tornar as estimativas mais coerentes à realidade. Contudo, efeitos adicionais à carga hidrológica como os efeitos dos termos ionosféricos de ordem superior devem ser considerados nas análises.

Por fim, faz-se necessário aplicar outras soluções de PPP que permita ao usuário maior domínio sobre os parâmetros de processamento é importante, uma vez que possibilitam ao usuário investigar efeitos adicionais, permitindo uma melhor avaliação da influência da carga hidrológica. Ademais, deve-se efetuar análises sobre o efeito do fenômeno aqui abordado sob uma perspectiva multidisciplinar, envolvendo principalmente a geologia e a geofísica, de forma a melhor fundamentar seu entendimento. Além disso, desenvolver estudos considerando a propagação de variâncias das posições estimadas para as deformações analisadas é interessante.

Referências

- AHDESMAKI, M.; FOKIANOS, K.; STRIMMER, K. **GeneCycle**: Identification of Periodically Expressed Genes. R package version 1.1.4. 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=GeneCycle>>. Acesso em: 14 set. 2020.
- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **In: IEEE Transactions on Automatic Control**. Notre Dame, FR, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- ALVES, L. G. S. **Aprimoramentos de série de dados de vazão em regimes sob efeito de remanso hidráulico variável: impactos na modelagem hidrológica e hidrodinâmica da bacia Amazônica**. 76 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.
- BARZAGHI, R.; BETTI, B.; DE GAETANI, C.I. Estimating Crustal Deformations by GNSS Time Series Data Analysis. In: Cefalo R., Zieliński J., Barbarella M. (eds) **New Advanced GNSS and 3D Spatial Techniques. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography**. Springer, Cham, 2018. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56218-6_3.
- BEVIS, M.; ALSDORF, D.; KENDRICK, E.; FORTES, L. P.; FORSBERG, B.; SMALLEY JUNIOR, R.; BECKER, J. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophys. Res. Lett.** Berlin, DD, v. 32, n. 16, p. 4., 2005. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005GL023491>.
- BEVIS, M.; BEDFORD, J.; CACCAMISE, II D. J. The Art and Science of Trajectory Modelling. In: Montillet JP., Bos M. (eds) **Geodetic Time Series Analysis in Earth Sciences**. Springer Geophysics. Springer, Cham. 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-21718-1_1.
- BLOOMFIELD, P. **Fourier Analysis of Time Series: An Introduction**. John Wiley & Sons. 2004. 261 p.

BOGUSZ, J.; KLOS, A. On the significance of periodic signals in noise analysis of GPS station coordinates time series. **GPS Solutions**, v. 20, n. 4, p. 655–664, 2016. DOI: 10.1007/s10291-015-0478-9.

BOGUSZ, J.; KLOS, A.; GRUSZCZYNSKA, M.; GRUSZCZYNSKI, M. Towards reliable velocities of permanent GNSS stations. **Reports on Geodesy and Geoinformatics Varsóvia**, CR, v. 100, p. 17-26, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/rgg-2016-0003>.

BOUZADA, M. A. C. Aprendendo Decomposição Clássica: Tutorial para um Método de Análise de Séries Temporais. ANPAD - Tecnologias de Administração e Contabilidade, Rio de Janeiro, RJ, v. 2, n. 1, p. 1-18, Jan./Jun. 2012. Disponível em: http://www.anpad.org.br/periodicos/arq_pdf/a_1320.pdf. Acesso em: 08 de jun. 2019.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M.; REINSEL, G. C. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons. 2008, 768 p.

BOX, G. E. P.; PIERCE, D. A. Distribution of residual autocorrelation in autoregressive-integrated moving average Time Series models. **Journal of the American Statistical Association**. Alexandria, EG, v. 65, n. 332, p. 1509-1526, 1970. DOI: <https://doi.org/10.2307/2284333>.

CHEN, C.; LIU, L. M. Joint Estimation of Model Parameters and Outlier Effects in Time Series. **Journal of the American Statistical Association**. v. 88, n. 421, 1993. p. 284-297, 1993. DOI: <https://doi.org/10.2307/2290724>.

COSTA, S. M. A.; MANTOVANI, G.; SCOFANO, F.; LIMA, M. A. A.; SILVA, A. L.; MOURA JÚNIOR, N. J. Ampliação e modernização da RBMC. In: VII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 2018, Recife. **Anais do VII SIMGEO**. p. 440-450.

COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validation of the land water storage from gravity recovery and climate experiment (GRACE) with gauge data in the amazon basin. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 18, n. 2, p. 262-281, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-21702012000200006>.

CRYER, J. D.; CHAN, K. S. **Time series analysis with applications in R**. 2. ed. Nova York: Springer, 2008. 492 p.

DICKEY, D. A.; FULLER, W. A. Distribution of the estimators for autoregressive time series with a unit root. **Journal of the American Statistical Association**, Boston, MA, v. 74, n. 366, p. 427-431, 1979.

EMILIANO, P. C. **Crítérios de informação: como eles se comportam em diferentes modelos?** Tese (Doutorado em Estatística e Experimentação Agropecuária) - Universidade Federal de Lavras. Programa de Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, Lavras, 2013. 193 p.

FAZILOVA, D.; EHGAMBERDIEV, SH.; KUZIN, S. Application of time series modeling to a national reference frame realization. **Geodesy and Geodynamics**, v. 9, p. 281-287, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2018.04.003>.

FISHER, R. A. Tests of significance in harmonic analysis. **Proceeding of the Royal Societ**, Series A, v. 125, n. 796, p. 54-59, 1929.

FRITSCH, M.; DÖLL, P.; DIETRICH, R. Global-scale validation of model-based load deformation of the Earth's crust from continental watermass and atmospheric pressure variations using GPS. **Journal of Geodynamics**, v. 59, n. 60, p. 133-142, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2011.04.001>.

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

GIACOMETTI, J. P. S.; ALBARICI, F. L.; TRABANCO, J. L. A.; GUIMARÃES, G. N. Influência da carga hídrica na altitude geométrica da estação RBMC de Inconfidentes/MG. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 5, n. 1, p. 043-061, 2017. DOI: 10.3895/rbgeo.v5n1.5425.

GÜLAL, E.; ERDOGAN, H.; TIRYAKIOGLU, I. Research on the stability analysis of GNSS reference stations network by time series analysis. **Digital Signal Processing**, v. 23, n. 6, p. 1945-1957, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2013.06.014>.

HAMMING, R. W. Digital Filters. Dover Publications. 2013. 306 p.

HERRING, T. A.; FLOYD, M. A.; KING, R. W. Time series and error analysis. UNAVCO Headquarters, Boulder, Colorado, USA 19–23 June 2017. Disponível em: http://geoweb.mit.edu/~floyd/courses/gg/201706_UNAVCO/pdf/31-error_analysis.pdf. Acesso em: 22 set. 2020.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS J. **Global Positioning System: Theory and Practice**, Ed: 5. Wien: Springer-Verlag Wien. 2001. ISBN 978-3-7091-6199-9.

HYNDMAN, R.; ATHANASOPOULOS, G.; BERGMEIR, C.; CACERES, G.; CHHAY, L.; O'HARA-WILD, M.; PETROPOULOS, F.; RAZBASH, S.; WANG, E.; YASMEEN, F. forecast: Forecasting functions for time series and linear models. R package version 8.12. 2020. Disponível em: [URL: http://pkg.robjhyndman.com/forecast](http://pkg.robjhyndman.com/forecast). Acesso em: 10 set. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - PPP (IBGE-PPP). Serviço online para pós-processamento de dados GNSS - IBGE-PPP. 2020. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/servicos-para-posicionamento-geodesico/16334-servico-online-para-pos-processamento-de-dados-gnss-ibge-ppp.html?=&t=saiba-mais-geociencias>. Acesso em: mai. 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE-PPP: Serviço on-line para Pós-Processamento de dados GNSS: manual do usuário. Versão Maio de 2020. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101677.pdf>. Acesso em: jul. 2020.

JIANG, W.; DENG, L.; LI, Z.; ZHOU, X.; LIU, H. Effects on noise properties of GPS time series caused by higher-order ionospheric corrections. **Advances in Space Research**, v. 53, n. 7, p. 1035–1046, 2014. DOI:10.1016/j.asr.2013.12.037.

KNOWLES, L. A.; BENNETT, R. A.; HARIG C. Vertical displacements of the Amazon basin from 2 GRACE and GPS. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 125, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1029/2019JB018105>.

KOWALCZYK, K.; RAPINSKI, J. Verification of a GNSS Time Series Discontinuity Detection Approach in Support of the Estimation of Vertical Crustal Movements. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 149, p. 1-15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi7040149>.

LACALLE, J. L. **tsoutliers**: Detection of Outliers in Time Series. R package version 0.6-8. 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=tsoutliers>>. Acesso em: 10 set. 2020.

LEE, C. F.; LEE, J. C.; LEE, A. C. **Statistics for Business and Financial Economics**. 3. ed. New York: Springer, 2013. DOI 10.1007/978-1-4614-5897-5.

LJUNG, G. M.; BOX, G. E. P. On a measure of lack of fit in time series models. **Biometrika**, Oxford, v. 65, n. 2, p. 297-303, 1978. DOI: <https://doi.org/10.2307/2335207>.

MATTOS, R. S. Tendências e Raízes Unitárias. 2018. Disponível em: <https://www.ufjf.br/wilson_rotatori/files/2011/05/Tendencias-e-Raizes-Unitarias-2018.pdf>. Acesso em: mar. 2021.

MOREIRA, D. M., S.; CALMANT, S.; PEROSANZ, F.; XAVIER, L.; ROTUNNO FILHO, O. C.; SEYLER, F.; MONTEIRO, A. C. Comparisons of observed and modeled elastic responses to hydrological loading in the Amazon basin. **Geophys. Geophysical Research Letters**. v. 43, p. 262-281, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016GL070265>.

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

MORITZ, S.; SARDÁ, A.; BARTZ-BEIELSTEIN, T.; ZAEFFERER, M.; STORK, J. Comparison of different Methods for Univariate Time Series Imputation in R. ResearchGate, p. 1-20, out. 2015. Disponível em: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1510/1510.03924.pdf>.

NAHMANI, S.; BOCK, O.; BOUIN, M. N.; SANTAMARÍA-GÓMEZ, A., BOY, J. P.; COLLILIEUX, X.; MÉTIVIER, L.; PANET, I.; GENTHON, P.; LINAGE, C.; WPPELMANN, G. Hydrological deformation induced by the west african monsoon: Comparison of gps, grace and loading models. **J. Geophys. Res. Solid Earth**, 117, B05409, 2012. Doi: 10.1029/2011JB009102.

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

OLDS, S.; ERIKSSON, S.; MUNSON, D.; DAHLMAN L. Analyzing Plate Motion Using EarthScope GPS Data. 2011. Disponível em: <<https://serc.carleton.edu/eet/platemotion/index.html>>. Acesso em: abr. 2020.

OLIVEIRA, J. R. S. **Uso de informações geodésicas para estudos tectônicos no Pantanal**. 59 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Meio Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

PETIT, G.; LUZUM, B. IERS Conventions (2010). **IERS Technical Note N° 36**, Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. ISBN 3-89888-989-6.

PFÄFF, B. **Analysis of Integrated and Cointegrated Time Series with R**. Second Edition.

Springer, New York, 2008. ISBN 0-387-27960-1.

PINO, A. V. Princípios de Instrumentação Biomédica: Filtros. COB785 – Princípios de Instrumentação Biomédica. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, versão 1, 46 p., 2015. Disponível em: <http://www.peb.ufrj.br/cursos/cob785/COB785_Filtros.pdf>. Acesso em: mar. de 2021.

R CORE TEAM. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. Disponível em: <https://www.R-project.org/>.. Acesso em: 20 ago. 2020.

RAJNER, M.; LIWOSZ, T. Studies of crustal deformation due to hydrological loading on GPS height estimates. **Geodesy and Cartography**, v. 60, n. 2, p. 135- 144, 2012. DOI: 10.2478/v10277-012-0012-y.

REDE BRASILEIRA DE MONITORAMENTO CONTÍNUO DOS SISTEMAS GNSS (RBMC). Dados diários e situação operacional. 2020. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-contínuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=dados-diaricos-e-situacao-operacional>>. Acesso em: mai. 2020.

RICHARDSON, L. F. **swdft**: Sliding Window Discrete Fourier Transform (SWDFT). R package version 1.0.0, 2019. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=swdft>>. Acesso em: 16 set. 2020.

ROSA, G. P. S. **Análise de séries temporais de coordenadas estimadas com GPS: uma proposta metodológica para eliminação de efeitos sazonais**. 106 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

SÁNCHEZ, L.; DREWES H. Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. **Journal of Geodynamics**, United Kingdom, v. 102, p. 1-23, dez. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.06.005>.

SCHWARZ, G. Estimating the dimensional of a model. *Annals of Statistics*. **Hayward**, vol. 6, nº 2, p. 461-464, 1978. Disponível em: https://www.andrew.cmu.edu/user/kk3n/sim_plicity/schwarzbic.pdf .

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. **Time Series Analysis and Its Applications With R Examples**. 3ª ed. New York: Springer-Verlag, 2010.

SIGNAL DEVELOPERS. signal: Signal processing. 2013. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org/projects/signal/>>. Acesso em: 14 set. 2020.

SILVA. J. S. **Altimetria espacial aplicada aos estudos de processos hídricos em zonas úmidas da bacia amazônica**. 279 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

SING, H. C.; THORNE, D. R.; HEGGE, F. W. Trend and rhythm analysis of time-series data using complex demodulation. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*. v. 17, n.6, p. 623-629, 1985.

SUGIURA, N. Further analysts of the data by akaike's information criterion and the finite

corrections. **Communications in Statistics - Theory and Methods**, Ontario, v. 7, n. 1, p. 13-26, 1978. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03610927808827599>.

TREGONING, P.; WATSON, C.; RAMILLIEN, G.; MCQUEEN, H.; ZHANG, J. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 15, p. 1-6, 2009. DOI: 10.1029/2009GL038718.

VAN DAM, T.; WAHR, J.; MILLY, P. C. D.; SHMAKIN, A. B.; BLEWITT, G.; LAVALLÉE, D.; LARSON, K. M. Crustal displacements due to continental water loading. **Geophysical Research Letters**, v. 28, n. 4, p. 651-654, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000GL012120>.

WICKHAM, H. **ggplot2**: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões gerais

Fundamentando-se nas hipóteses levantadas e nos estudos apresentados nos capítulos anteriores sobre o tema proposto, apresentam-se as seguintes conclusões:

- a) As soluções referenciadas ao SIRGAS2000-ECD compatibilizadas com o conjunto de parâmetros aplicados a partir de 17 de maio de 2020 no IBGE-PPP se mostraram alinhadas às soluções IGS14-ECD ao nível menor ou igual a 0,002 m. Considerando que o IGS14-ECD é uma realização atual e consistente do ITRS, conclui-se que as soluções SIRGAS2000-ECD em questão podem ser diretamente aplicadas em estudos associados às séries temporais posicionais referentes ao território brasileiro. No entanto, as séries das soluções SIRGAS2000-ECD fornecidas pelo IBGE-PPP, compatibilizadas com o conjunto de parâmetros aplicados anteriormente a 17 de maio de 2020, induziu uma descontinuidade de aproximadamente 0,020 m ($\cong 2\text{cm}$) para o período de referente ao IGS14, inviabilizando assim sua utilização para a determinação das velocidades. Ademais, observou-se que as séries de discrepâncias também apresentaram divergências, admitindo diferenças de comportamento em função da evolução temporal das realizações do IGS.
- b) Quanto ao efeito da carga hidrológica, verificou-se que todas as componentes posicionais (Δn , Δe e Δu) são afetadas, porém com magnitudes diferentes. Dessa forma, justificou-se a recomendação da utilização das séries temporais para a determinação das componentes de velocidade V_n , V_e e V_u . Tal efeito foi mais expressivo nas séries de componentes verticais (Δu), apresentando maiores amplitudes médias, seguido de menores amplitudes para as séries de componentes planimétricas (Δn e Δe). Nesse sentido, os maiores valores de amplitude média observados foram referentes às séries Δn (0,020 m) e Δu (0,073 m) da estação NAUS e Δn (0,019 m) e Δu (0,072 m) da estação AMUA, o que comprovou que pontos situados em locais de grande concentração de massa d'água, associada às zonas úmidas e de remanso, como Manaus, são mais suscetíveis ao efeito da carga hidrológica. Quando comparadas Δn e Δu às séries de cotas linimétricas, observou-se uma diferença de fase de aproximadamente 180° , o que ressalta o comportamento inverso das deformações da crosta em resposta ao efeito carga hidrológica. Contudo, as séries Δe apresentaram variação no comportamento para

algumas estações específicas (AMBC, AMTE e AMCO), situando-se fora de fase (aproximadamente 180°) quando comparadas às séries Δn e Δu , e aproximadamente em fase (aproximadamente 0°) quando comparadas às séries de cotas linimétricas.

- c) No que concerne a propagação do efeito da carga hidrológica, não foi estabelecida uma relação inversa entre as distâncias e amplitudes, ou seja, estações com maiores distâncias relativas à NAUS não apresentaram menores amplitudes médias.
- d) Considerando as velocidades planimétricas (V_n e V_e) estimadas com as séries posicionais sem tratamento prévio dos dados, pode-se verificar que seus valores diferiram quando comparadas às mesmas componentes derivadas do VEMOS2009 e disponibilizadas pela rede SIRGAS-CON. Tais diferenças podem estar associadas à incorporação de fatores locais às séries posicionais, cujo efeito predominante para a área considerada é o da carga hidrológica. Adicionalmente, os tipos de soluções (semanais) e a estratégia de processamento PPP utilizadas nas séries posicionais da rede SIRGAS-CON pode influenciar os resultados. Contudo, as velocidades V_n e V_e estimadas com as séries posicionais devem ter sua significância avaliada. Comparando as velocidades planimétricas determinadas a partir das séries temporais sem tratamento prévio de dados com as determinadas após aplicação de tratamento aos dados, pode-se observar que não houve alteração significativa em seus valores, cujas diferenças foram de 0,0002 m/ano para V_n e V_e e de 0,001 m/ano para V_e das estações NAUS e AMBC, respectivamente. Ademais, para que se obtenha uma estimativa precisa na determinação das componentes V_u , deve-se aplicar uma modelagem aos efeitos sazonais caracterizados pelas expressivas amplitudes das séries Δu . Adotando-se tal procedimento, destaca-se que sua inserção pode (ou poderá) proporcionar resultados mais acurados no processo de atualização/redução de coordenadas.
- e) A modelagem *ARIMA* proposta por Box e Jenkins em conjunto com a metodologia desenvolvida por Chen e Liu se mostrou eficiente para identificação e correção dos saltos apresentados nas séries posicionais da estação NAUS. Ademais, a utilização do método de demodulação complexa associada ao filtro passa-baixa (*low pass filter*) do tipo *Butterworth* também se mostrou eficiente, uma vez que possibilitou extrair e avaliar as deformações periódicas definidas nas trajetórias das séries posicionais de forma coerente.
- f) Constatou-se que tanto a localização das estações quanto o sentido de deslocamento das massas d'água exercem influência no comportamento das deformações periódicas associadas às estações GNSS, afetando sua trajetória e suas periodicidades. Tal

constatação é concordante com os resultados apresentados em outros estudos associados a diferentes locais da Terra. Entretanto, a metodologia aplicada nestes estudos, bem como os dados auxiliares, difere dos utilizados nessa pesquisa. Ademais, estações localizadas em Manaus (NAUS e AMUA) apresentaram trajetória e periodicidade bem definida para as componentes Δn e Δu , com valores similares aos das cotas linimétricas, mostrando assim a forte relação sazonal entre o ciclo hidrológico local e as deformações periódicas das estações GNSS. Adicionalmente, a estação AMUA apresentou uma pequena variação na periodicidade de tais componentes em relação às cotas linimétricas, o que pode estar associado à sua maior proximidade do Rio Negro. Comportamento periódico similar foi verificado para a componente Δe de ambas as estações, com periodicidades maiores que as obtidas nas componentes Δn e Δu , caracterizando assim movimentos cíclicos. Além disso, um fator periódico semianual foi observado, reforçando a evidencia de que efeitos adicionais ao da carga hidrológica também afetam as séries posicionais e devem ser investigados. Ademais, o comportamento indefinido observado nas estações NAUS e AMUA em sua componente Δe é similar ao verificado na componente Δn da AMCO, evidenciando assim uma “inversão” no comportamento das deformações nas estações consideradas, justificável por fatores como a distância entre as estações (620,8 Km), bem como pela propagação do efeito da orientação média dos grandes rios, principalmente do Rio Negro por sua grande massa d’água, para a estação AMCO, localizada fora das margens do Rio Negro.

- g) Considerando as estações NAUS, AMUA e AMBC, situadas às margens do Rio Negro, verificou-se que as componentes Δn , Δe e Δu da AMBC, a noroeste de Manaus, apresentou trajetória bem definida e com periodicidades idênticas entre si, porém maiores quando comparados às periodicidades das cotas linimétricas do porto de Manaus e das componentes Δn e Δu das estações NAUS e AMUA, evidenciando assim a influência da orientação do deslocamento de massa d’água nas deformações as deformações periódicas. Nesse sentido, estudos desenvolvidos evidenciaram que as deformações horizontais se orientam no sentido do centro de massa da anomalia hidrológica.
- h) A partir das defasagens calculadas, constatou-se que o limite viscoelástico de deformação é atingido antes dos picos das cotas linimétricas (pico das cheias) para as estações que margeiam o Rio Negro, evidenciando que a saturação do solo ocorre antes do nível linimétrico máximo. No entanto, nos períodos de vales (mínimo das secas), as deformações nas componentes Δn e Δu ocorrerem após os vales na maioria dos anos

considerados para as estações NAUS e AMUA, destacando a influência da retenção de massa d'água pelas zonas úmidas no processo de vazante em Manaus. Tal fato não foi observado em AMBC, em que as deformações nas componentes Δn e Δu ocorrem antes dos vales das cotas linimétricas em todos os anos considerados, justificável por AMBC estar situada a aproximadamente 401,5 quilômetros de Manaus e, portanto, fora da zona úmida e de remanso que interfere diretamente nas deformações em Manaus.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Muitas questões motivadoras para o desenvolvimento desta pesquisa foram respondidas. No entanto, algumas outras surgiram no sentido de complementar os resultados obtidos. Nesse contexto, destaca-se como sugestões e recomendações para trabalhos futuros:

- i. Utilizar outras soluções de PPP que permita ao usuário maior domínio sobre os parâmetros de processamento, pois possibilitam avaliar alguns dos efeitos adicionais, permitindo uma melhor avaliação da influência da carga hidrológica;
- ii. Avaliar as deformações periódicas bem como as periodicidades das séries de componentes posicionais a partir da aplicação de análises e modelagem *wavelet*;
- iii. Investigar os impactos da propagação do efeito carga hidrológica de estações base para as estações móveis (*rover*) no posicionamento relativo de alta precisão, com variação no comprimento das linhas de base;
- iv. Efetuar a propagação das incertezas das componentes cartesianas tridimensionais (X , Y , Z) para as componentes no sistema geodésico local (Δn , Δe e Δu) ou para as diferenças curvilíneas em unidade linear de forma a possibilitar o desenvolvimento de análises específicas sobre a determinação das velocidades a partir das séries temporais, com suas respectivas propagações de variâncias e análise de precisão e acurácia no processo de atualização/redução de coordenadas;
- v. Aplicar métodos interpoladores, como a *Krigagem*, ou outras técnicas de modelagem para o desenvolvimento de modelos locais de deformação;
- vi. Efetuar uma análise multivariada, de forma multidisciplinar, fundamentando-se em algoritmos de Redes Neurais Artificiais ou Aprendizado de Máquina de forma a correlacionar variáveis geológicas, geofísicas, sedimentares, gravimétricas, hidrométricas, geomorfológicas, meteorológicas etc. para avaliar, de forma mais aprofundada, a dinâmica e propagação das deformações associadas ao efeito de carga hidrológica na região amazônica brasileira.