



**Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica**

Tese de Doutorado Nº 84

**CONTRIBUIÇÕES PARA ESTUDOS TECTÔNICOS E
HIDROLÓGICOS A PARTIR DE ANÁLISE DE SÉRIES
TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS NO BRASIL**

YELLINSON DE MOURA ALMEIDA

Área de concentração: Geofísica

BRASÍLIA-DF

2025



Universidade de Brasília
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica

YELLINSON DE MOURA ALMEIDA

**CONTRIBUIÇÕES PARA ESTUDOS TECTÔNICOS E
HIDROLÓGICOS A PARTIR DE ANÁLISE DE SÉRIES
TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS NO BRASIL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e Geodinâmica como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Geociências Aplicadas e Geodinâmica.

Orientador

Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta
Universidade de Brasília

BRASÍLIA-DF

2025

YELLINSON DE MOURA ALMEIDA

**CONTRIBUIÇÕES PARA ESTUDOS TECTÔNICOS E
HIDROLÓGICOS A PARTIR DE ANÁLISE DE SÉRIES
TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS NO BRASIL**

*Tese de Doutorado apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas e
Geodinâmica como parte dos requisitos
necessários à obtenção do grau de Mestre em
Geociências Aplicadas e Geodinâmica.*

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Giuliano Sant'Anna Marotta - UnB
Orientador

Prof. Dr. Lucas Gonzales Lima Pereira Calado - UFPE
Examinador Externo

Prof. Dr. Wagner Carrupt Machado - UFU
Examinador Externo

Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha - UnB
Examinador Interno

BRASÍLIA-DF

2025

Ficha Catalográfica

dc de Moura Almeida, Yellinson
CONTRIBUIÇÕES PARA ESTUDOS TECTÔNICOS E HIDROLÓGICOS A
PARTIR DE ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS DE COORDENADAS GNSS NO
BRASIL / Yellinson de Moura Almeida; orientador Giuliano
Sant'Anna Marotta. -- Brasília, 2025.
95 p.

Tese(Doutorado em Geociências Aplicadas) -- Universidade
de Brasília, 2025.

1. séries temporais GNSS. 2. análise de ruído. 3.
hidrogeodésia. I. Sant'Anna Marotta, Giuliano, orient. II.
Título.

Ao vô Geraldo (em memória)

AGRADECIMENTOS

Ao meu eu do futuro, saiba: foi difícil, foi intenso, mas foi gratificante!

Ao meu orientador e amigo Giuliano Sant'Anna Marotta, pelos longos anos em que tem se dedicado a me ensinar e, com sua sabedoria e exemplo, a me desenvolver como pesquisador. A missão é árdua e, por isso, serei eternamente grato!

À minha mãe, meu pai e minha irmã que, cada um ao seu modo, sempre me apoiaram na decisão de seguir lutando pelo que acredito.

À minha noiva, Giovanna, que mais uma vez esteve ao meu lado, não apenas com sua paciência, mas também como minha força nos momentos em que eu não conseguia ser forte. Sem você eu não teria conseguido.

Aos coautores dos artigos apresentados nesta tese, meus sinceros agradecimentos. João Francisco Galera Monico, Gabriela de Oliveira Nascimento Brassarote, George Sand França e Alice César Fassoni de Andrade, obrigado pelas considerações e correções. Foi uma satisfação aprender com vocês.

Aos membros da banca examinadora, professores Lucas Gonzales Lima Pereira Calado, Wagner Carrupt Machado e Luciano Soares da Cunha, agradeço por todas as correções e sugestões que fizeram para a melhoria desta tese.

Ao Observatório Sismológico da Universidade de Brasília, pelo suporte de sempre e por ter sido tão importante em cada uma das minhas etapas acadêmicas. Viva o SIS!

Ao café coado, por existir.

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

“Viver é etecetera”

Guimarães Rosa

RESUMO

O posicionamento por GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) é fundamental para estudos tectônicos, geodinâmicos e hidrológicos. No Brasil, a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC) tem operado estações com alta precisão, permitindo um avanço significativo nas possibilidades de utilização desses dados em diversas áreas. No entanto, ainda não se conhece completamente a influência das características regionais e locais na estimativa de incertezas nas coordenadas GNSS no Brasil. Essas informações são fundamentais para a integração de dados geodésicos e geofísicos na determinação de modelos tectônicos e hidrológicos. Nesse sentido, este trabalho buscou analisar as estações GNSS da RBMC quanto ao nível e tipo de ruído, em especial o ruído causado pela instabilidade das monumentações geodésicas. Também se buscou analisar como características geológicas influenciam a correlação entre séries temporais GNSS e variações do armazenamento de água provenientes da missão GRACE. Os resultados mostraram que parte das estações GNSS da RBMC são afetadas pelo *random walk*, detectado pela análise de índice espectral e magnitude de ruído. Essas estações estão majoritariamente localizadas em zonas costeiras ou próximas de grandes cursos hídricos. Além disso, a análise de correlação entre GNSS e GRACE mostrou que a variabilidade de características geológicas influencia as séries temporais GNSS e, conseqüentemente, suas correlações com as observações gravimétricas, que possuem caráter regional. A caracterização geológica dos locais onde as estações GNSS estão materializadas também contribui para a análise do comportamento da superfície em resposta à carga hidrológica.

Palavras-chave: séries temporais GNSS; análise de ruído; dados GRACE; hidrogeodésia

ABSTRACT

GNSS positioning is fundamental for tectonic, geodynamic and hydrological studies. In Brazil, the Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems (RBMC) has operated stations with high precision, allowing a significant advance in the possibilities of using this data in several proposals. However, the influence of regional and local characteristics on the estimation of uncertainties and the composition of the GNSS signal in Brazil is still not completely known. This information is fundamental for the integration of geodetic and geophysical data in determining tectonic and hydrological models. In this sense, this work aim to analyze the RBMC GNSS stations regarding the level and type of noise, in particular the noise caused by the instability of geodetic monuments. We also aim to analyze how geological characteristics influence the correlation between GNSS time series and variations in water storage from the GRACE mission. The results indicated that part of the RBMC GNSS stations are affected by random walk, detected by spectral index and noise magnitude analysis. These stations are mostly located in coastal areas or close to large watercourses. Furthermore, the correlation analysis between GNSS and GRACE showed that the variability of geological characteristics influences the GNSS time series and consequently their correlations with gravity observations, which are regional. The geological characterization of the sites where the GNSS stations are located also contributes to the understanding of the surface behavior in response to hydrological load.

Keywords: GNSS time series, noise analysis; GRACE data; hydrogeodesy

SUMÁRIO

RESUMO	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Siglas.....	x
1. Introdução	14
1.1 Objetivos.....	16
1.1.1 <i>Objetivos específicos</i>	16
1.2 Justificativa.....	16
1.3 Estrutura da Tese.....	17
2. Fundamentação Teórica.....	18
2.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS).....	18
2.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS	19
2.3 Séries temporais GNSS	21
2.4 Hidrogeodésia.....	22
3. Estimativa e Análise da Estabilidade de Estações GNSS Brasileiras para Estudos Tectônicos.....	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Ruídos nas séries temporais de soluções GNSS	26
3.3 Estimativa de modelos de velocidade por MMQ com análise de ruído por MLE ...	29
3.4 Análise da influência dos diferentes tipos de monumentações geodésicas presentes na RBMC.....	31
3.5 Resultados e Discussão.....	33
3.6 Conclusão.....	43
3.7 Referências.....	44
4. Explorando relações entre séries temporais GNSS, armazenamento de água terrestre e características geológicas no Brasil	49
4.1 Introdução.....	49
4.2 Dados e Métodos.....	52
4.2.1 <i>Séries temporais GNSS</i>	52
4.2.2 <i>Armazenamento de água baseado em observações gravimétricas</i>	53
4.2.3 <i>Dados auxiliares</i>	53
4.2.4 <i>Decomposição, Correlação e Análise de Componentes</i>	54
4.3 Resultados e Discussão.....	56
4.3.1 <i>Decomposição de séries temporais</i>	56
4.3.2 <i>Correlações entre GNSS e armazenamento total de água</i>	57
4.3.3 <i>Características geológicas e suas implicações nos resultados</i>	59

4.4 Conclusão.....	63
4.5 Referências.....	64
5. Conclusões e Considerações Finais.....	69
6. Referências	71
7. Anexos	80
7.1 Estações GNSS utilizadas no artigo “Estimativa e Análise de Estações GNSS Brasileiras para Estudos Tectônicos”	80
7.2 Estações GNSS utilizadas no artigo “Explorando Relações entre Séries Temporais GNSS, Armazenamento de Água Terrestre e Características Geológicas no Brasil” ..	84

Lista de Figuras

- Figura 01: Constelação de satélites do Global Positioning System (GPS). Crédito da imagem: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)._____18
- Figura 02: Exemplos de monumentações GNSS da RBMC. À esquerda: monumentação em pilar de concreto em laje de edifício. À direita: monumentação em pilar de concreto no solo._____20
- Figura 03: Espectro de potência do ruído estocástico. Modificado de Aimiri-Simkooei *et al.*, 2007._____22
- Figura 04: Espectro de potência do ruído estocástico. Modificado de Aimiri-Simkooei *et al.*, 2007._____23
- Figura 05: Estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (a). b) tempo de observação das estações GNSS. c) número de saltos presentes nas estações._____32
- Figura 06: Índice espectral das estações GNSS nas componentes norte (a), leste (b) e vertical (c)._____34
- Figura 07: Amplitude do ruído $WN+RW$, em $\text{mm} \times \text{ano}^{-\frac{1}{2}}$, nas componentes norte (a), leste (b) e vertical (c)._____37
- Figura 08: Estações GNSS com índice espectral ou amplitude de ruído acima dos limites estabelecidos para classificação da estabilidade da monumentação._____38
- Figura 09: Espectro de potência das séries temporais das 11 estações instáveis._____40
- Figura 10: Modelo de velocidades das estações GNSS. O modelo de ruído das séries temporais utilizado é a combinação de white noise e flicker noise.____43

Figura 11: Localização das estações GNSS e características geológicas da área de estudo. a) macrorregiões hidrográficas; b) classes de rochas; c) sistemas aquíferos; d) eras geológicas. _____ 54

Figura 12: Decomposição de séries temporais em quatro estações da área de estudo: ILHA (vermelho), MGMC (ciano), PAIT (azul), TOGU (preto) (localização das estações na Figura 3). a) e b) dados observados, c) e d) componente sazonal, e) e f) tendência linear e g) e h) tendência pela SSA, respectivamente para dados GNSS e GRACE. _____ 57

Figura 13: Correlação entre as tendências lineares de séries temporais GNSS e GRACE. As taxas de variação do armazenamento de água apresentadas ao fundo correspondem ao período de 2019 a 2023. _____ 58

Figura 14: Correlações entre séries temporais GNSS e de armazenamento total de água. a) correlação entre as componentes sazonais b) correlações entre as tendências estimadas pela SSA. _____ 59

Figura 15: Espessura de sedimentos da área de estudo e correlações entre a componente sazonal GNSS e de armazenamento total de água. _____ 60

Figura 16: Regiões hidrográficas e correlações entre GNSS e variação de armazenamento de água na componente sazonal e tendência pela SSA. As estações da bacia do Tietê estão representadas por quadrados. _____ 61

Figura 17: Componentes sazonais GNSS e de Armazenamento Total de Água das estações BABJ, BABR, MGMC e MGRP da RH São Francisco – localização das estações indicada na Figura 16. _____ 62

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tipos de monumentos das estações GNSS da RBMC utilizadas nesse estudo. _____ 29

Tabela 2: Magnitude de ruído das estações com índice espectral inferior a -1 em pelo menos uma componente. RW+WN trata do modelo de ruído combinado entre random walk e white noise. FN+WN refere-se ao modelo de ruído combinado entre ruído branco e flicker. _____ 35

Tabela 3: Magnitudes de ruído classificadas pelo GESD (Generalized Extreme Studentized Deviation) como outliers nas componentes norte, leste e/ou vertical. _____ 35

Tabela 4: Tipo de solo, monumentação e tempo de observação das estações removidas. PBCS= Pilar em base de concreto no solo. TMLE= tripé metálico em laje de edifício. PCLE= Pilar de concreto em laje de edifício. TMS= Torre metálica no solo. _____ 41

Lista de Siglas

CATS	<i>Create and Analyze Time Series</i>
FN	<i>Flicker Noise</i>
GESD	<i>Generalized Extreme Studentized Deviation</i>
GLONASS	<i>Global Orbiting Navigation Satellite System</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GRACE	<i>Gravity Recovery and Climate Experiment</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
InSAR	<i>Interferometric Synthetic Aperture Radar</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
MLE	Máxima Verossimilhança
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
NGL	<i>Nevada Geodetic Laboratory</i>
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
PBCS	Pilar em Base de Concreto no Solo
PCLE	Pilar de Concreto em Laje de Edifício
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS
RW	<i>Random Walk Noise</i>
SAR	<i>Synthetic Aperture Radar</i>
SGB	Sistema Geodésico Brasileiro
TMLE	Torre Metálica em Laje de Edifício
TMS	Torre Metálica no Solo
WN	<i>White Noise</i>

1. Introdução

O posicionamento pelo GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) revolucionou a forma como entendemos os processos de movimentação da crosta. Para além das aplicações mais conhecidas, como o posicionamento preciso para obras de infraestrutura, o georreferenciamento de imóveis rurais e urbanos e a agricultura de precisão, por exemplo, o GNSS possibilitou um conhecimento sem precedentes da cinemática da superfície terrestre, incluindo tanto os processos tectônicos, quanto os diversos fenômenos geodinâmicos que envolvem as movimentações observadas na geodésia e geofísica (Monico, 2008; Calais, 2006).

Dentre essas movimentações, podemos citar deformações causadas por ajustes isostáticos, terremotos, esforços tectônicos, efeitos de maré e cargas hidrológicas. Esses processos possuem diferentes amplitudes, escalas temporais e espaciais. Outros processos também estão associados às movimentações observadas nas séries temporais GNSS e devem ser considerados em quaisquer estudos que utilizem essas informações (Williams, 2008).

Trata-se de movimentações locais causadas pela monumentação geodésica ou por condições físicas e geológicas no local da estação, como tipo de solo, condições climáticas, propriedades das rochas, dentre outros. Somam-se a isso, também, os efeitos instrumentais, de propagação do sinal e de processamento das observações, que geram descontinuidades, *outliers* e ruídos nas séries temporais (Williams *et al.*, 2004).

A utilização do GNSS para estudos em geodésia e geofísica foi fortemente influenciada pela melhoria na acurácia dos dados e pela implementação de grandes redes de monitoramento contínuo (Ramos *et al.*, 2022). Isso permitiu que as movimentações observadas pudessem ser caracterizadas quanto à origem e, também, que as incertezas dos parâmetros estimados a partir desses dados pudessem ser quantificadas.

Uma vez conhecidas as fontes de erros e os fatores que influenciam as observações, o posicionamento GNSS passou a ser utilizado para uma infinidade de aplicações em diversas áreas do conhecimento. Destacam-se a estimativa de modelos de velocidades de placas tectônicas, deformações induzidas por terremotos e atividade vulcânica e a modelagem de cargas

hidrológicas, bem como suas variações no tempo e espaço (Argus *et al.*, 2017; Marotta *et al.*, 2013a).

Em geral, os esforços aos quais o território brasileiro está submetido são bem conhecidos. Movimentos convergentes causados pela subducção da placa de Nazca a oeste e movimentos divergentes gerados pela cadeia meso-oceânica a leste dão origem às duas principais forças atuantes na placa Sul-americana (Marotta *et al.*, 2013a). No entanto, existem fatores locais que são complexos de determinar em escala local ou regional. Dentre eles, está a resistência associada às falhas no interior da placa, as movimentações de blocos e sub-blocos e as variações laterais de densidade das rochas (Assumpção *et al.*, 2008).

Também são de fundamental importância a modelagem e o monitoramento do armazenamento e da dinâmica de águas continentais. Esses estudos fornecem um bom indicador da disponibilidade total de água em uma região e o conhecimento de suas variações espaço-temporais, algo cada vez mais importante em um cenário global de mudanças do clima (Ferreira *et al.*, 2019, Kierulf *et al.*, 2021).

Apesar de se tratar de aplicações distintas, um aspecto chave nesse tema permanece sem a devida atenção. Os fatores geológicos e geofísicos locais e regionais que influenciam as estações GNSS e suas séries temporais no Brasil ainda são pouco estudados. Portanto, estimar e analisar esses fatores, e como influenciam as coordenadas GNSS, é fundamental para que esses dados sejam utilizados de forma adequada nas mais diversas propostas.

Considerando o exposto, entende-se ser imprescindível a estimativa e análise dos processos estocásticos presentes nas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), bem como a caracterização de feições geológicas e geofísicas nos locais em que essas estações estão materializadas e a análise de suas influências nas séries temporais GNSS. Isso permitirá maior compreensão dos fatores intrínsecos ao monitoramento GNSS contínuo em território brasileiro e também a integração dos dados GNSS com outras técnicas geodésicas para fins de estudos ambientais, geofísicos e hidrológicos.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa volta-se à análise (quantitativa e qualitativa) de processos estocásticos das estações GNSS da RBMC, quanto à instabilidade das monumentações geodésicas e a caracterização geofísica e geológica dos locais em que estão materializadas. Além disso, estimar e analisar como os fatores geológicos influenciam as séries temporais de coordenadas GNSS e suas correlações com observações de variação do armazenamento hidrológico, provenientes da missão GRACE-FO (*Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On*).

1.1.1 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, tem-se:

- i) Estimar a amplitude do ruído *random walk* nas estações GNSS da RBMC e propor análise estatística para identificação de estações onde a magnitude do ruído e/ou o índice espectral apontem para instabilidade da monumentação;
- ii) Analisar características e processos geofísicos ou geológicos que afetam a estabilidade das monumentações geodésicas;
- iii) Análisar a influência de características geológicas nas séries temporais GNSS e na correlação destas com as variações de armazenamento de água terrestre.

1.2 Justificativa

Considera-se que essa pesquisa apresenta potencial de contribuição em diversas aplicações do posicionamento pelo GNSS em território brasileiro, uma vez que se busca o estabelecimento de critérios para análise de incertezas realistas das velocidades e posições das estações. Também, espera-se identificar a existência, na região de estudo, de fatores que influenciem direta ou indiretamente a estabilidade das monumentações geodésicas.

Além disso, pretende-se analisar a influencia da geologia na integração de

dados GNSS e gravimétricos para a estimativa de armazenamento hídrico e de suas variações no território brasileiro, o que fornece subsídio para elaboração de políticas e ações para mitigação ou adaptação às mudanças climáticas.

1.3 Estrutura da Tese

Esta tese está dividida em cinco capítulos: introdução; fundamentação teórica; dois capítulos que contemplam artigos desenvolvidos no âmbito desta pesquisa; e conclusão e considerações finais.

Neste capítulo, é apresentada uma breve introdução ao tema estudado, além dos objetivos e justificativas para o desenvolvimento desta pesquisa. No capítulo 2, serão apresentadas as bases teóricas necessárias à compreensão dos principais assuntos relacionados à tese. Parte da fundamentação teórica também está contida nos capítulos 3 e 4, no escopo dos artigos científicos apresentados.

No terceiro capítulo, encontra-se o artigo intitulado “Estimativa e Análise de Estações GNSS Brasileiras para Estudos Tectônicos”, onde se buscou analisar o tipo e magnitude de ruído nas séries temporais GNSS da RBMC, além de identificar estações com presença de ruído *random walk*, o que aponta para a instabilidade da monumentação geodésica. No artigo, também são analisadas variáveis geofísico/geológicas que podem influenciar no ruído observado nas séries temporais.

No quarto capítulo, foi desenvolvido o artigo intitulado “Explorando Relações entre Séries Temporais GNSS, Armazenamento de Água Terrestre e Características Geológicas no Brasil”, onde o objetivo é analisar a influência de características geológicas como litologia, espessura de sedimentos, sistema aquífero e regiões hidrográficas na correlação existente entre as séries temporais GNSS da RBMC e de armazenamento de água provenientes da missão GRACE.

Por fim, o capítulo 5 trás as principais conclusões da tese e recomendações para estudos futuros.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS)

Um Sistema Global de Navegação por Satélite é um sistema que utiliza satélites para fornecer informações de posição em qualquer ponto do planeta (Monico, 2008). O sistema pioneiro e mais conhecido é o GPS (*Global Positioning System*), desenvolvido e mantido pelos Estados Unidos e amplamente utilizado para fins de pesquisa. A Figura 01 ilustra a constelação de satélites que compõe o GPS. Outros sistemas também estão ativos globalmente, como o Galileo, GLONASS (*Global Orbiting Navigation Satellite System*) e BeiDou.

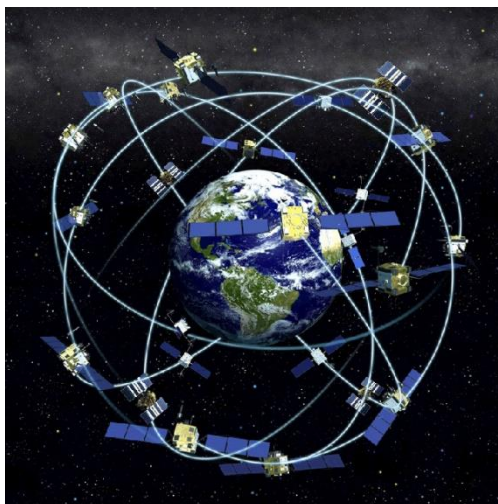


Figura 01: Constelação de satélites do *Global Positioning System* (GPS). Crédito da imagem: *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA).

A determinação da posição de um ponto qualquer no planeta, por meio do GNSS, se baseia no mesmo princípio, independente do sistema utilizado. O posicionamento é determinado com base na solução de um sistema de equações linearizadas contendo quatro incógnitas, que são as coordenadas tridimensionais do ponto (X , Y , Z) e o erro do relógio do receptor. Assim, cada satélite sincronizado ao receptor fornece uma equação de observação, sendo necessários, portanto, ao menos quatro satélites para a determinação das incógnitas. Esse processo é iterativo, considerando que o modelo é, de fato, não linear (Monico, 2008).

A sincronização simultânea de mais satélites em um receptor GNSS permite, portanto, melhor acurácia nas coordenadas estimadas (Monico,

2008).

Para grande parte das aplicações do GNSS, como a navegação cotidiana, onde não se necessita grande acurácia, a estimativa de coordenadas pela pseudodistância atende à precisão exigida. Nessa técnica, as coordenadas são obtidas por meio do tempo de propagação entre o centro de fase dos satélites e do receptor, que fornece a chamada “pseudodistância”, por possuir uma série de erros associados.

No entanto, para fins científicos e outros onde a acurácia desejada é da ordem de alguns milímetros, é necessário o conhecimento dos erros associados aos satélites, à propagação do sinal, ao processamento e às estações GNSS. Nestes casos, é imprescindível a utilização da fase da onda portadora. Nessa técnica, o receptor GNSS emite uma réplica do sinal enviado pelo satélite ao sincronizarem. Isso permite identificar a diferença de fase entre o sinal enviado pelo satélite e o replicado pelo receptor. Como os comprimentos de onda emitidos são conhecidos, o resultado dessa observável fornece uma fração de um ciclo de onda, possibilitando precisão muito superior às pseudodistâncias.

Além disso, em uma ampla variedade de propostas, o que se deseja é o monitoramento da variação das coordenadas tridimensionais de um ponto ao longo do tempo. Assim, tem-se a importância das redes de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS, que reúnem estações implementadas com diferentes objetivos, mas que apresentam as séries temporais das estações e a possibilidade, portanto, de sua utilização para fins em estudos geodésicos e geofísicos (Ramos *et al.*, 2022).

2.2 Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS

A RBMC é uma rede de estações GNSS implantada e mantida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com o intuito de disponibilizar acesso público ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (Machado e Aguiar, 2016). A rede consiste em um conjunto de estações geodésicas equipadas com receptores GNSS de alta precisão para a determinação de coordenadas (IBGE, 2023). Desde 2020, a RBMC tem

disponibilizado as observações GNSS com intervalo de rastreo de 1 segundo. Além desse produto, também são disponibilizadas observações com intervalo de 15 segundos e soluções diárias para todas as estações da rede.

Desde o início de sua operação, em 1996, a RBMC saltou de apenas 4 estações GNSS para mais de 100 estações atualmente (IBGE, 2023; Machado e Aguiar, 2016). Essa expansão do número de estações em território brasileiro é fruto de, dentre outras coisas, uma série de parcerias realizadas pela RBMC, o que tem possibilitado maior densificação da rede e, consequentemente, a sua utilização em diversas aplicações.

As estações GNSS da RBMC são instaladas buscando atender o cumprimento de uma série de critérios quanto à localização e tipo de monumentação, a fim de minimizar efeitos de instabilidade, tais como: evitar a proximidade de falhas ativas ou outras fontes de deformação ou subsidência; desconsiderar locais sujeitos a deslizamentos de terra, afundamento, mudanças nas águas subterrâneas e qualquer fator que possa afetar a estabilidade do pilar da estação; selecionar, preferencialmente, construções que não excedam dois andares; verificar se o prédio ultrapassou o período de assentamento ou recalque (aproximadamente 5 anos) (IBGE, 2013). Apesar disso, a maior parte das estações GNSS da RBMC são instaladas em pilares de concreto em lajes de edifícios ou diretamente no solo (Figura 02), sem ancoragem no embasamento, o que, para aplicações em estudos tectônicos e geodinâmicos, é o mais recomendado.



Figura 02: Exemplos de monumentações GNSS da RBMC. À esquerda: monumentação em pilar de concreto em laje de edifício. À direita: monumentação em pilar de concreto no solo.

2.3 Séries temporais GNSS

Uma série temporal é um conjunto de observações registradas sequencialmente ao longo do tempo. Geralmente, são estudadas com o objetivo de modelar os processos que geram dependência temporal entre as observações, que podem possuir diferentes períodos e magnitudes.

Algumas características das séries temporais são importantes de serem consideradas: as observações são correlacionadas no tempo; pode haver complexidades como tendências, variações sazonais e cíclicas; é difícil lidar com lacunas de observações e com dados discrepantes (Moreira, 2013).

As séries temporais GNSS possuem, em geral, duas componentes: uma determinística e uma estocástica. A parte determinística é aquela que pode ser definida a partir de um modelo matemático funcional, o que permite estimar sua previsão. A parte estocástica diz respeito à componente aleatória presente nas séries temporais, que, apesar disso, podem ser descritos como um processo de lei de potência (Mandelbrot, 1983; Agnew, 1992; e Williams *et al.*, 2004) ou com comportamento no domínio do tempo que possui espectro de potência (P_y) na forma:

$$P_y = P_0 \left(\frac{f}{f_0} \right)^k \quad (1)$$

f é a frequência temporal, P_0 e f_0 são as constantes de normalização e k é o índice espectral, cujos valores variam no intervalo $[-3, 1]$.

Na Equação 1, os níveis de ruído podem ser analisados em relação ao índice espectral k , no qual é possível classificar o ruído da estação quanto a presença de movimento Browniano fraccionário, para $-3 < k < -1$, e ruído gaussiano fraccionário, para $-1 < k < 1$. Também, quando $k = 0$ tem-se o ruído branco clássico, quando $k = -1$ tem-se o ruído denominado fractal, ou *flicker*, e quando $k = -2$ tem-se o ruído denominado passeio aleatório, ou *random walk*.

Enquanto o ruído branco está associado a erros nas observações e características do hardware do receptor GNSS, o ruído *flicker* está associado ao multicaminho (Dmetriva *et al.*, 2015) e a uma ampla variedade de processos dinâmicos, incluindo oscilação da Terra em torno do seu eixo, incertezas no tempo medido pelos relógios atômicos e efeitos atmosféricos

(Williams *et al.*, 2004). Já o *random walk*, também segundo Williams *et al.* (2004), está muito associado à instabilidade do monumento geodésico devido a condições variáveis do local de fixação, seja em solo, rocha, edifícios, etc...

Pelas características do ruído, ao contrário do ruído branco, os ruídos *flicker* e *random walk* são correlacionados no tempo. Portanto, com o aumento da série temporal, espera-se menor influência do ruído branco e maior influência dos ruídos *flicker* e *random walk*. Além disso, quanto maior a série temporal, maior a possibilidade de identificar o *random walk* em relação ao ruído *flicker* (Calais *et al.*, 2006).

Observando o espectro de potência do ruído, tem-se que nas altas frequências o ruído branco é dominante. O ruído *flicker* está presente principalmente em frequências médias, ao passo que o *random walk* apresenta os maiores comprimentos de onda (Figura 03).

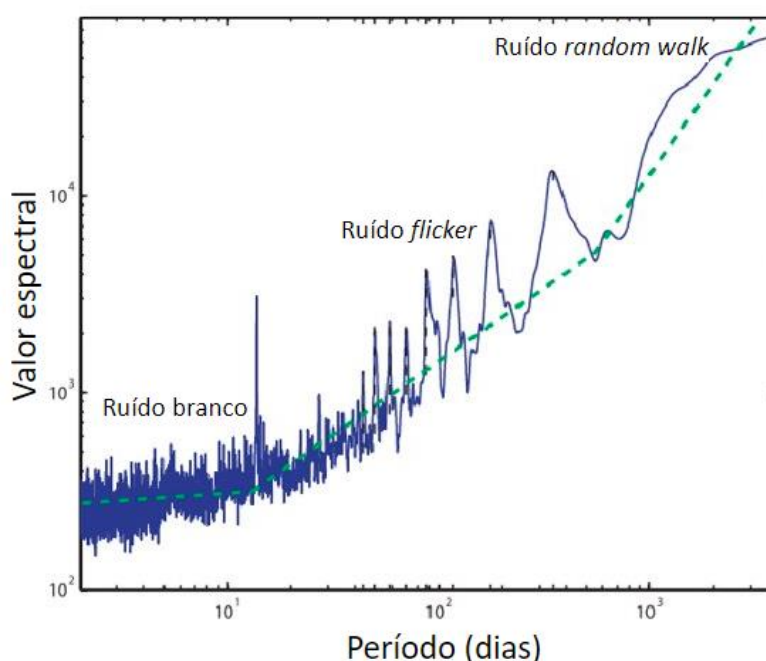


Figura 03: Espectro de potência do ruído estocástico. Modificado de Aimiri-Simkooei *et al.* (2007).

2.4 Hidrogeodésia

A hidrogeodésia é um campo de estudo que integra técnicas de geodésia e hidrologia, permitindo o monitoramento e a análise das mudanças no armazenamento total de água e o entendimento de processos do ciclo hidrológico da Terra. A hidrogeodésia utiliza dados provenientes de diversas

fontes, como o GNSS, InSAR (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*), gravimetria, satélites altimétricos e modelos hidrológicos (Figura 04). Esses dados são fundamentais para entender os fluxos hídricos e seu armazenamento, tanto na superfície quanto na subsuperfície (Jaramillo *et al.*, 2024; Adams *et al.*, 2022).

As deformações da superfície terrestre estudadas pela hidrogeodésia são causadas pelas mudanças na distribuição da massa de água. A análise dessas deformações, que podem ser verticais ou horizontais, permite inferir sobre as variações do armazenamento de água. Por exemplo, um aumento no armazenamento de água em uma bacia hidrográfica pode resultar em subsidência da superfície, enquanto uma diminuição pode levar à elevação (Argus *et al.*, 2014; Ferreira *et al.*, 2018). Estações GNSS são empregadas para monitorar localmente essas deformações com alta precisão e resolução temporal, enquanto as técnicas de InSAR e gravimetria satelital são utilizadas para medir deformações em grandes áreas ou em locais onde as estações GNSS são escassas.

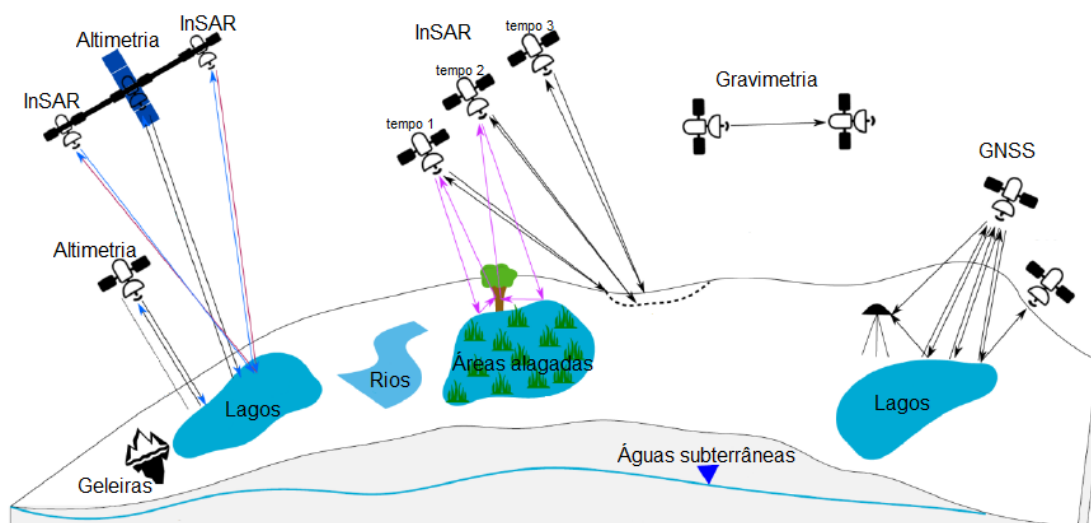


Figura 04: Ilustração das tecnologias em hidrogeodésia e suas aplicações (Modificado de Jaramillo *et al.*, 2024).

As observações realizadas pela missão GRACE são essenciais na hidrogeodésia, pois fornecem medições da variação do campo gravitacional da Terra, sensíveis às mudanças no armazenamento hídrico (Long *et al.*, 2015). Ao combinar as informações sobre deformação da superfície obtidas por GNSS com as medições de variação gravitacional do GRACE, é possível obter uma compreensão mais abrangente das alterações nas reservas

hídricas. Também é possível integrar observações satelitais e *in situ*, como realizado por Costa *et al.* (2012), que obtiveram boa correspondência entre GRACE e dados de linígrafos na bacia amazônica.

As discrepâncias entre observações hidrogeodésicas e modelos hidrológicos também ajudam a identificar processos que não foram modelados ou que não são totalmente entendidos, especialmente em escalas temporais plurianuais e decadais (Pfeffer *et al.*, 2022).

Compreender melhor os padrões de armazenamento e movimentação da água permite tomar decisões melhor embasadas sobre o uso e a preservação desse recurso. Por exemplo, a hidrogeodésia tem sido utilizada para identificar áreas afetadas por secas prolongadas, monitorar o esgotamento de aquíferos e avaliar o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos (Ferreira *et al.*, 2018; Montecino *et al.*, 2016; Fu *et al.*, 2015; Borsa *et al.*, 2014). Além disso, essa abordagem oferece uma ferramenta valiosa para estudar a interação entre o ciclo hidrológico e os sistemas terrestres.

3. Estimativa e Análise da Estabilidade de Estações GNSS Brasileiras para Estudos Tectônicos

Yellinson de Moura Almeida¹, Giuliano Sant'Anna Marotta¹, João Francisco Galera Monico², Gabriela de Oliveira Nascimento Brassarote² George Sand França³

¹Instituto de Geociências, Universidade de Brasília; ²Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente; ³Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo.

Artigo publicado na *Brazilian Journal of Geophysics*.

3.1 Introdução

As principais componentes dos esforços que atuam na Placa Sul-Americana são geradas pela subducção da Placa de Nazca e pela formação de crosta jovem na dorsal meso-atlântica (Rocha *et al.*, 2016; Marotta *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2000; Norabuena *et al.*, 1998). Diante disso, modelos globais de esforços tendem a caracterizar a região intraplaca da América do Sul conforme essas componentes regionais (Assumpção *et al.*, 2016). No entanto, diversos estudos têm apontado a existência de esforços decorrentes de características reológicas e estruturais locais, que tem potencial tanto de modificar a direção e magnitude ou intensificar o campo de esforços tectônicos, quanto influenciar de forma significativa as deformações observadas (Calais *et al.*, 2006; Agurto-Detzel *et al.*, 2014; Assumpção *et al.*, 2016; Ferreira *et al.*, 2020).

O estudo detalhado de esforços e/ou deformações resultantes é fundamental para aplicações geofísicas e geodésicas, pois viabiliza o desenvolvimento de modelos de movimentação de placas e de blocos geológicos, de processos geodinâmicos crustais e mantélicos e subsidia estudos de mudanças climáticas, por exemplo, além de permitir o entendimento dos fenômenos e processos associados (Kierulf *et al.*, 2021).

No Brasil, alguns estudos têm trazido hipóteses e observações importantes a respeito do campo de esforços. Agurto-Detzel *et al.* (2014) apontaram a dificuldade de caracterizar esses esforços a partir de estudos sismológicos, por meio de mecanismos focais, devido a baixa magnitude dos eventos

sísmicos intraplaca. Já Assumpção *et al.* (2004), Barros *et al.* (2009), Chimplinganond *et al.* (2010) e Rocha *et al.* (2016), dentre outros, apontam o afinamento crustal e litosférico de algumas regiões, e a presença de bacias sedimentares, de falhas preexistentes e de outros fatores geológicos, como favoráveis para a concentração de esforços.

Para evoluir na estimativa e análise dos processos e mecanismos citados, o posicionamento GNSS vem sendo amplamente utilizado, em que as séries temporais de coordenadas permitem estimar as taxas de movimentação e deformação (Marotta *et al.*, 2013a; Marotta *et al.*, 2013b; Marotta *et al.*, 2015) das estações de forma a auxiliar no entendimento de processos tectônicos e geodinâmicos regionais. No entanto, pela acurácia necessária, sugere-se ser fundamental uma avaliação mais rigorosa do comportamento das estações GNSS e de suas séries temporais de coordenadas.

Diante do exposto, e com ênfase no Brasil, este trabalho buscou analisar a influência dos diferentes tipos de monumentações geodésicas presentes na RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), por meio da estimativa e caracterização de ruídos nas séries temporais e da investigação de variáveis que podem afetar a estabilidade das estações GNSS, a fim de estabelecer critérios para utilização desses dados em estudos tectônicos e geodinâmicos.

Cabe ressaltar que, majoritariamente, as estações da RBMC não foram projetadas para estudos geotectônicos, sendo fundamental o desenvolvimento de uma estratégia para identificar estações que apresentem níveis de instabilidade incompatíveis com a aplicação desejada, uma vez que processos superficiais também afetam as séries temporais GNSS e se propagam para as estimativas de velocidade e deformação. Portanto, além da análise proposta, as velocidades para cada uma das estações GNSS também foram estimadas nesta pesquisa.

3.2 Ruídos nas séries temporais de soluções GNSS

Para utilizar soluções de séries temporais GNSS com o objetivo de estimar um modelo que descreva a movimentação de uma placa ou bloco geológico, há que se observar que estas séries registram tanto o fenômeno de interesse

quanto outros fenômenos. Assim, deve-se considerar o estabelecimento de um modelo funcional que expresse os fenômenos presentes e que permita sua distinção.

Atualmente, um modelo funcional (Equação 2) bastante aceito e que engloba os fenômenos citados é apresentado por Nikolaidis (2002), Cenni *et al.* (2012) e Farolfi e Ventisette (2015):

$$y(t_i) = a + b(t_i - t_0) + \sum_{k=1}^2 c_k \sin(2\pi k t_i + \varphi_k) + \sum_{j=1}^J d_j H(t_j - t_i) + v_i \quad (2)$$

onde $y(t_i)$ representa a posição observada no ponto para cada direção (n, e, u), no tempo t_i ; a é a posição no tempo t_0 ; b é a velocidade para cada direção (n, e, u), c_k são as amplitudes anuais e semianuais; φ_k são as fases; d_j é a descontinuidade introduzida na época t_j ; H é a função salto, sendo $H(t_j - t_i) = 0$ se $t_i < t_j$ e $H(t_j - t_i) = 1$ se $t_i \geq t_j$; e v_i é o resíduo.

O modelo apresentado na Equação 2 pode ser estimado de forma determinística, porém, considerando que os resíduos (v) podem representar tanto efeitos não modelados quanto erros associados às observações, estes podem influenciar na estimativa dos parâmetros incógnitos e nas suas incertezas. Portanto, assumindo que as soluções das coordenadas GNSS são fortemente correlacionadas no tempo (Amagua *et al.*, 2018), considera-se importante utilizar um método estocástico para a estimativa de incertezas mais realistas dos parâmetros estimados por meio dos dados observados.

De forma geral, os resíduos estimados podem ser considerados ruído estocástico, e podem ser descritos por um processo de Lei de potência (Mandelbrot, 1983; Agnew, 1992; Willians *et al.*, 2004), ou por meio de um comportamento no domínio do tempo que possui a forma:

$$P_y = P_0 \left(\frac{f}{f_0}\right)^k \quad (3)$$

f é a frequência temporal, P_0 e f_0 são as constantes de normalização e k é o índice espectral, cujos valores variam no intervalo $[-3, 1]$.

Na Equação 3, os níveis de ruído podem ser analisados em relação ao índice k , no qual é possível classificar o ruído da estação quanto a presença de movimento Browniano fraccionário, no intervalo $-3 < k < -1$, e ruído gaussiano fraccionário, para $-1 < k < 1$. Quando $k = 0$, tem-se o ruído

branco clássico, quando $k = -1$, tem-se o ruído denominado fractal, ou *flicker*, e quando $k = -2$, tem-se o ruído denominado *random walk* (Williams *et al.*, 2004).

Enquanto o ruído branco está associado a erros nas observações e características do hardware do receptor GNSS, o ruído *flicker* está associado ao multicaminho (Dmetriva *et al.*, 2015) e a uma ampla variedade de processos dinâmicos, incluindo a oscilação da Terra em torno do seu eixo e incertezas no tempo medido pelos relógios atômicos, além de efeitos atmosféricos (Williams *et al.*, 2004).

Já o *random walk*, também segundo Williams *et al.* (2004), está principalmente associado à instabilidade do monumento geodésico, devido a condições variáveis do local de fixação, seja em solo, rocha, edifícios, etc. No mesmo estudo, Williams *et al.* (2004), por meio da análise de oito tipos diferentes de monumentações geodésicas, desde as ancoradas em embasamento até as instaladas em lajes e diretamente no solo, observaram que as estações instaladas em pilares de concreto no solo só performaram melhor que as estações instaladas em plataformas de petróleo, que estão suscetíveis a uma ampla variedade de movimentações.

Cabe aqui ressaltar que o *random walk* é um tipo de ruído não estacionário e, portanto, sua caracterização não permite previsão futura e sua detecção nas séries temporais depende da quantidade de dados, da frequência de amostragem, das amplitudes relativas a outros tipos de ruído, dentre outros fatores. Também, em relação à instabilidade do monumento geodésico, esta pode ser minimizada utilizando estruturas cuidadosamente projetadas, ancoradas em embasamento rochoso, desacopladas da superfície e contrabalanceadas em relação aos ventos (Wyatt *et al.*, 1989; Bock *et al.*, 1997).

Apesar do exposto, em se tratando da RBMC, há a prevalência de estações localizadas em lajes de edifícios públicos e em pilares de concreto no solo (Tabela 1), priorizando a perenidade, a segurança e a infraestrutura (energia elétrica e internet) necessária para o funcionamento ininterrupto dos equipamentos. Em trabalhos desenvolvidos por Amagua *et al.* (2018) e Ramos *et al.* (2022), foi observado que os níveis de ruído branco estimados são

significativos para as estações da RBMC, na comparação com os demais tipos de ruído, e que a combinação de ruído branco e *flicker* é a que melhor descreve o ruído do conjunto de estações

Tabela 1: Tipos de monumentos das estações GNSS da RBMC utilizadas nesse estudo.

Tipo de monumento	Número de estações
Pilar de concreto em laje de edifício	59
Pilar de concreto no solo	40
Pilar em coluna estrutural de edifício	8
Torre metálica em laje de edifício	6
Outros	6

Neste ponto, há de se considerar que existem diversas vantagens em utilizar um modelo único de ruído para todas as estações, pois, podem-se comparar as características de ruído para cada estação que compõe uma rede, assumindo que, até certo nível, todas as estações são afetadas pelas mesmas fontes de ruído e possuem, portanto, espectro de potência semelhante (Williams *et al.*, 2004). No entanto, sugere-se que, dependendo da aplicação, é necessário utilizar modelos diferentes de ruído.

3.3 Estimativa de modelos de velocidade por MMQ com análise de ruído por MLE

Modelos de velocidade podem ser estimados pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) ponderado, utilizando o modelo funcional expresso pela Equação 2, no qual os parâmetros são estimados por meio das séries temporais de coordenadas GNSS. Simultaneamente, o tipo e a amplitude do ruído estocástico são avaliados com base nos resíduos. Esta avaliação é usualmente realizada com o objetivo de proporcionar a estimativa mais realista das incertezas para os modelos de velocidade.

Considerando a análise de ruído por Máxima Verossimilhança (MLE), há a necessidade de maximizar a função de verossimilhança ajustando a covariância (C) dos dados. Assim, assumindo uma distribuição gaussiana, a função de verossimilhança (l) pode ser dada por (Williams, 2008):

$$l(x, C) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{N}{2}} (\det C)^{\frac{1}{2}}} \exp(-0.5 \hat{v}^T C^{-1} \hat{v}) \quad (4)$$

$$\ln[l(x, C)] = -\frac{1}{2} [\ln(\det C) + \hat{v}^T C^{-1} \hat{v} + N \ln(2\pi)] \quad (5)$$

$$C = \sum_{i=1}^m \sigma^2 J_i \quad (6)$$

onde x representa o vetor dos dados observados; J a matriz covariância para ruído temporalmente correlacionado, representada através da combinação de diferentes modelos estocásticos; m é o número de modelos estocásticos; $\hat{v}$ o vetor dos resíduos; N o número de observações; e σ^2 a variância do modelo estocástico.

Se a matriz covariância consiste em uma fonte de ruído, então, tem-se:

$$C = \sigma^2 J \quad (7)$$

$$\ln[l(x, \sigma)] = -\frac{1}{2} [2N \ln(\sigma) + \ln(\det J) + \frac{\hat{v}^T J^{-1} \hat{v}}{\sigma^2} + N \ln(2\pi)] \quad (8)$$

Com as considerações realizadas, os resíduos e parâmetros estimados (mas não suas incertezas) são invariantes a uma mudança de escala na matriz de covariância. Neste caso, é possível derivar a Equação 8 em relação a σ e encontrar o valor que nos proporcione máxima verossimilhança (Williams, 2008) por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\hat{v}^T J^{-1} \hat{v}}{N}} \quad (9)$$

Caso a matriz covariância C dependa de mais de uma fonte de ruído, é necessário transformá-la. Portanto, no caso de duas fontes de ruído, uma matriz de covariância bidimensional deve precisar apenas de uma maximização numérica unidimensional. Neste caso, podem-se transformar duas amplitudes de ruído para duas variáveis alternativas (um ângulo “ $\emptyset$ ” e um escalar “ r ”) e, para um dado ângulo, é possível calcular uma matriz covariância unitária (C_{unit}) contendo as razões corretas destas duas variáveis.

$$\sigma_1 = r \cos \emptyset \quad (10)$$

$$\sigma_2 = r \sin \emptyset \quad (11)$$

$$C_{\text{unit}} = r^2 [\cos^2(\emptyset) J_1 + \sin^2(\emptyset) J_2] \quad (12)$$

3.4 Análise da influência dos diferentes tipos de monumentações geodésicas presentes na RBMC

Nesta pesquisa, foram utilizadas soluções diárias das séries temporais de 119 estações ativas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), disponibilizadas pelo *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL; Blewitt *et al.*, 2018) (Figura 6). Estas soluções, que compõem as séries temporais de coordenadas das estações, foram referenciadas ao IGS14 e estimadas por meio do software GipsyX (Blewitt *et al.*, 2020), desenvolvido pelo *Jet Propulsion Laboratory*.

As estações selecionadas possuem período de observação igual ou superior a 3 anos (Figura 6), uma vez que, segundo Blewitt e Lavallée (2002) e Calais *et al.* (2006), períodos menores que três anos de observação podem não mostrar efeitos a serem modelados.

Também, além das soluções diárias, os saltos identificados nas estações foram inseridos na modelagem das séries temporais (Equação 2). Os saltos (Figura 05) correspondem aos eventos onde a posição da estação pode sofrer mudança brusca em decorrência de troca de antena ou receptor, de evento sísmico e da constatação de interferência no registro da posição da estação por outro fator, como mudanças em *software*. No entanto, os saltos dizem respeito apenas aos eventos onde se conhece a fonte da mudança de posição da estação.

Para estimativa e análise de ruído das séries temporais das estações GNSS selecionadas, utilizou-se o *software* CATS (*Create and Analyze Time Series*), desenvolvido por Williams (2008), que permite tanto estimar e comparar processos estocásticos de ruído em séries temporais contínuas, utilizando análise por MLE, quanto estimar o índice espectral k das séries temporais por meio de soluções periódicas de posição.

Além da análise de ruído, foi realizada a estimativa das velocidades e incertezas para as estações selecionadas, por meio do MMQ, utilizando diferentes modelos de ruído, combinando os índices espectrais inteiros. Essa abordagem é recomendada para grandes redes de estações GNSS, onde a combinação de ruído branco e *flicker* (WN+FN) ou ruído branco e *random walk* (WN+RW) é considerada adequada para descrever o conteúdo de ruído

da maioria das estações.

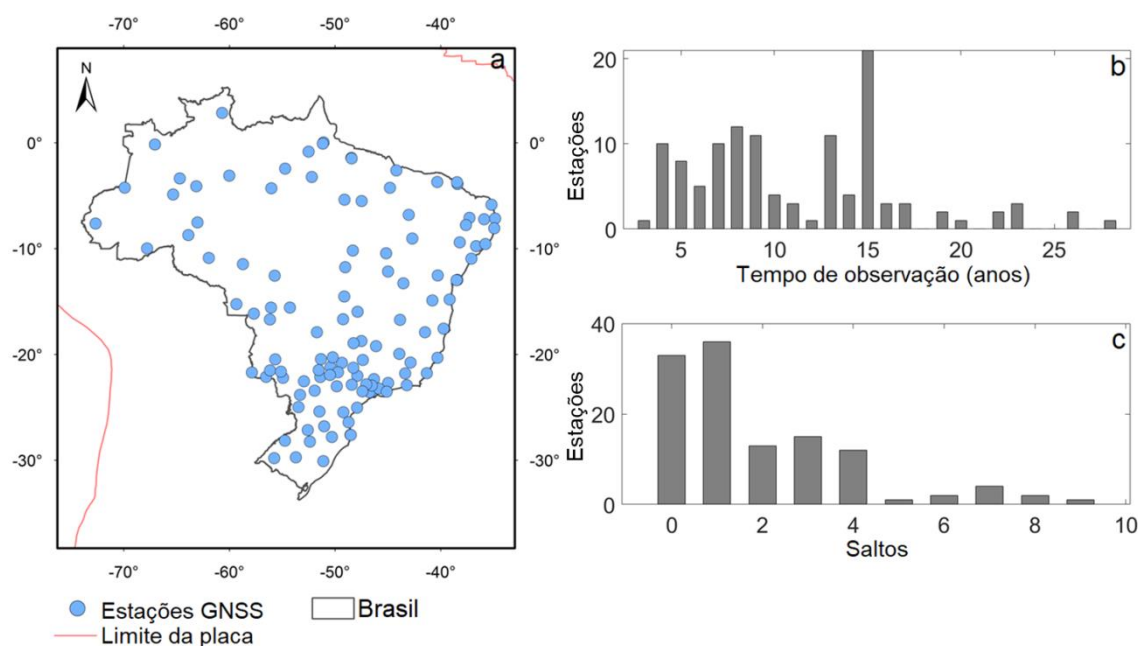


Figura 05: Estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (a). b) tempo de observação das estações GNSS. c) número de saltos presentes nas estações.

Por fim, assumindo que não há limite preestabelecido de magnitude de ruído para caracterizar a instabilidade de uma estação, foi necessário definir critérios para classificação de uma estação como instável em relação à monumentação ou a efeitos não tectônicos. Para isto, foi realizada a análise do índice espectral k , de cada componente em cada estação, e a análise da amplitude do ruído WN+RW por meio de teste estatístico GESD (*Generalized Extreme Studentized Deviation*), proposto por Rosner (1983), tradicionalmente utilizado para identificação de *outliers*.

O GESD (Rosner, 1983), utilizado neste trabalho para identificação de instabilidade das estações e apresentado na Equação 13, é comumente aplicado em amostras com distribuição aproximadamente normal, onde é necessário definir um limite r de possíveis outliers. Neste estudo, foi considerado outlier qualquer componente de uma estação GNSS que apresente amplitude de ruído WN+RW superior ao definido pelo teste estatístico.

Assim, uma estação é considerada instável na comparação com as demais estações da rede. Após definição, r testes são realizados separadamente: um

teste para um *outlier*, um teste para dois *outliers*, até r *outliers*. A hipótese nula do teste é de não existência de outliers na amostra. A hipótese alternativa é de que existem até r *outliers*.

$$R_i = \frac{\max |x_i - \bar{x}|}{s} \quad (13)$$

$\bar{x}$ e s são a média amostral e o desvio-padrão amostral, respectivamente. O teste foi realizado para cada componente de cada estação, a 95% de confiança. Após o cálculo da primeira estatística R , com todas as observações, aquela observação que maximiza $|x_i - \bar{x}|$ é removida e o teste é novamente realizado com $n - 1$ observações, até r testes serem realizados. Os valores críticos de cada teste devem ser calculados segundo a equação:

$$\lambda_i = \frac{(n-i)t_{p,n-i-1}}{\sqrt{(n-i-1+t_{p,n-i-1}^2)(n-i+1)}} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (14)$$

onde $t_{p,n-i-1}$ é o ponto percentual da distribuição t para $n - i - 1$ graus de liberdade, e p é:

$$p = 1 - \frac{\alpha}{2(n-i+1)} \quad (15)$$

sendo α o nível de significância do teste. Por fim, o número de outliers é definido encontrando o maior i , tal que $R_i > \lambda_i$.

3.5 Resultados e Discussão

A Figura 06 apresenta o índice espectral nas componentes norte, leste e vertical (n,e,u) para as estações GNSS estudadas. O índice espectral médio do conjunto de estações é $k = -0,67$, $k = -0,64$, e $k = -0,60$ para as componentes n, e, u, respectivamente.

Esses resultados corroboram as conclusões de Amagua *et al.* (2018) e Ramos *et al.* (2022), de que a combinação de ruído branco e *flicker* é a que melhor descreve o ruído do conjunto de estações da RBMC. No entanto, índices $k < -1$ observados nos resultados (Figura 06) são mais uma evidência de que o *random walk* está presente de forma significativa em algumas estações da rede.

As estações (BEPA, BRFT, SALU, SMAR), com $k < -1$, correspondem a

aproximadamente 3% do total. Nelas, as amplitudes de ruído, quando se utiliza o modelo WN+RW, são superiores às amplitudes do modelo WN+FN (Tabela 2). Entretanto, considerando a influência do *random walk* nas séries temporais, entende-se que as incertezas obtidas por esse modelo (WN+RW) são mais realistas. Das estações citadas, BEPA, SALU e SMAR apresentaram índice $k < -1$ nas componentes norte e leste, o que ressalta a correlação entre as componentes horizontais.

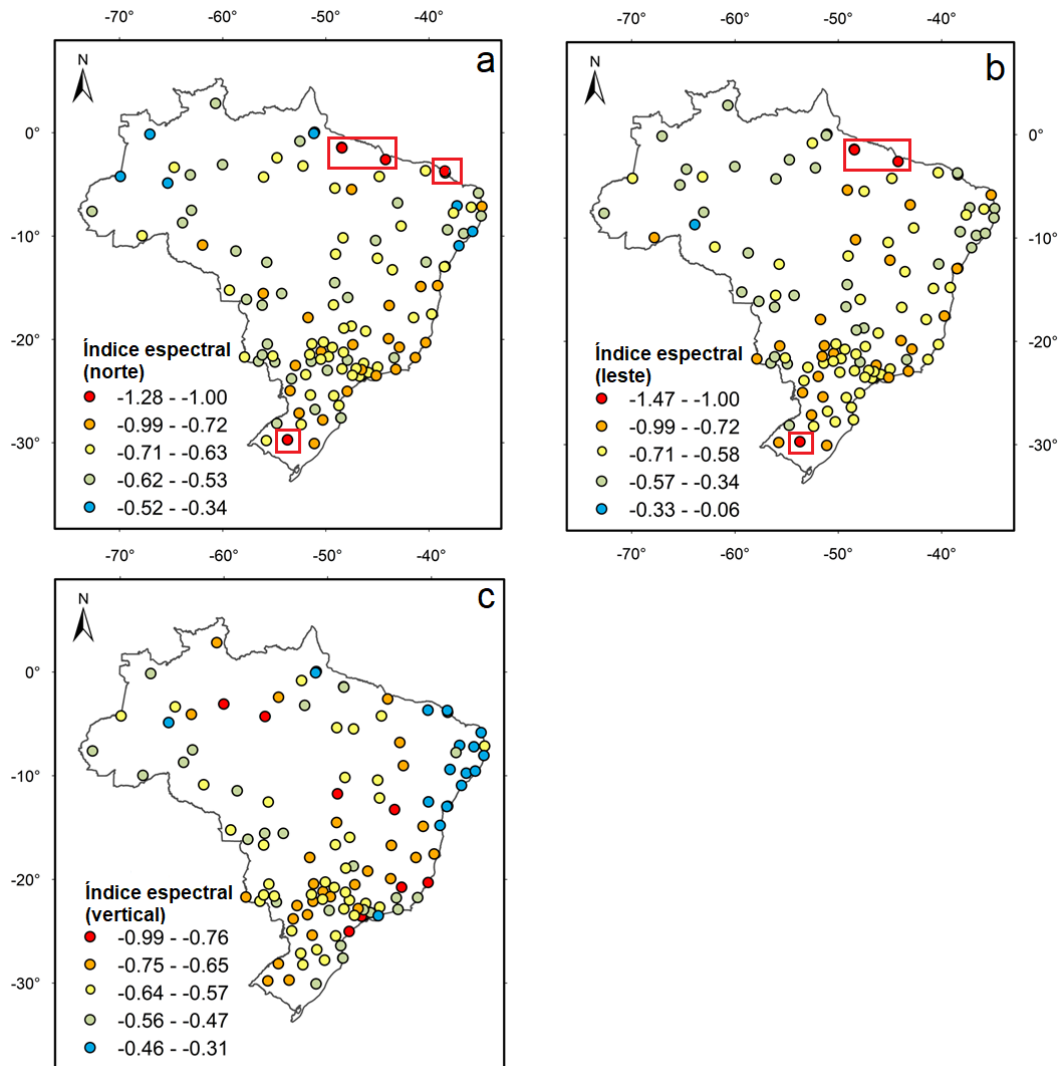


Figura 06: Índice espectral das estações GNSS nas componentes norte (a), leste (b) e vertical (c).

Nas 119 estações utilizadas, foi aplicado o teste GESD (*Generalized Extreme Studentized Deviation*) para identificação de instabilidade. O número máximo de supostos *outliers* foi definido em 20% do total de estações (utilizou-se $r = 24$). O número de *outliers* em cada componente ficou significativamente abaixo do número de testes realizados, dando consistência

à análise estatística. O teste identificou um total de 10 estações com amplitude de ruído classificadas como *outliers* em pelo menos uma componente (Tabela 3). Dessas, BEPA, SALU e SMAR já haviam sido classificadas como instáveis por apresentarem índice espectral menor que -1 nas componentes norte e leste. Das 10 estações, 6 foram identificadas como *outliers* na componente norte, 7 na componente leste e 3 na componente vertical (Tabela 3).

Tabela 2: Magnitude de ruído das estações com índice espectral inferior a -1 em pelo menos uma componente. RW+WN trata do modelo de ruído combinado entre *random walk* e white noise. FN+WN refere-se ao modelo de ruído combinado entre ruído branco e *flicker*.

Estação	RW+WN $\left(mm \times ano^{-\frac{1}{2}}\right)$			FN+WN $\left(mm \times ano^{-\frac{1}{2}}\right)$		
	Norte	Leste	Vertical	Norte	Leste	Vertical
BEPA	20,66	26,12	12,05	9,48	10,27	11,72
BRFT	8,33	4,67	8,45	6,15	3,85	9,55
SALU	16,59	35,10	30,67	7,96	12,71	18,32
SMAR	28,19	46,97	19,96	10,12	11,93	15,95

Tabela 3: Magnitudes de ruído classificadas pelo GESD (*Generalized Extreme Studentized Deviation*) como *outliers* nas componentes norte, leste e/ou vertical.

Estação	Amplitude de ruído RW+WN $\left(mm \times ano^{-\frac{1}{2}}\right)$		
	Norte	Leste	Vertical
BEPA	20,66	26,12	-
MGIN	-	8,84	-
NEIA	-	-	42,63
PIFL	-	9,68	-
POLI	-	-	66,38
PRCV	9,09	-	-
SALU	16,59	35,10	30,67
SCCH	12,70	1,55	-
SMAR	28,19	46,97	-
VICO	9,30	11,16	-

Contração do solo, compactação de sistemas aquíferos, movimentos descendentes impulsionados pela gravidade, efeitos poroelásticos e deformação do monumento por dilatação ou contração térmica, são apenas alguns exemplos de fatores não modelados que podem influenciar a estimativa de incertezas realistas das velocidades GNSS (Ferreira *et al.*, 2019; Calais *et al.*, 2006; Galloway *et al.*, 1999). Portanto, entende-se que a estratégia de utilizar uma combinação de WN+FN para todas as estações, após a remoção daquelas onde a magnitude de WN+RW é classificada como discrepante, pode minimizar a quantidade de fatores que afetam os processos estocásticos das estações que serão utilizadas para estudos tectônicos e geodinâmicos.

O modelo que inclui o ruído *flicker*, além de já ter sido indicado como mais adequado para a RBMC, considera que as estações estão submetidas, como um todo, a uma base física comum, que pode estar sendo afetada por fenômenos sazonais diversos, como cargas atmosféricas, hidrológicas, ruído atmosférico e/ou efeitos ionosféricos de segunda ordem (Kedar *et al.*, 2003; Dong *et al.*, 2003; Williams *et al.*, 2004).

As magnitudes de WN+RW apresentaram média de $5,79 \text{ mm} \times \text{ano}^{-\frac{1}{2}}$ na componente norte, $6,23 \text{ mm} \times \text{ano}^{-\frac{1}{2}}$ na componente leste e $14,65 \text{ mm} \times \text{ano}^{-\frac{1}{2}}$ na vertical (Figura 07). Esses valores concordam com o que foi apresentado em trabalhos anteriores, onde as componentes horizontais são menos ruidosas que a vertical (Mao *et al.*, 1999; Langbein, 2004; Amagua *et al.*, 2018).

A Figura 9 apresenta as estações GNSS onde a magnitude de ruído foi superior ao estabelecido estatisticamente, além daquelas onde o índice $k < -1$, em pelo menos uma componente. Das estações que apresentaram índice k inferior a -1, somente a estação BRFT não foi classificada como *outlier* no teste GESD.

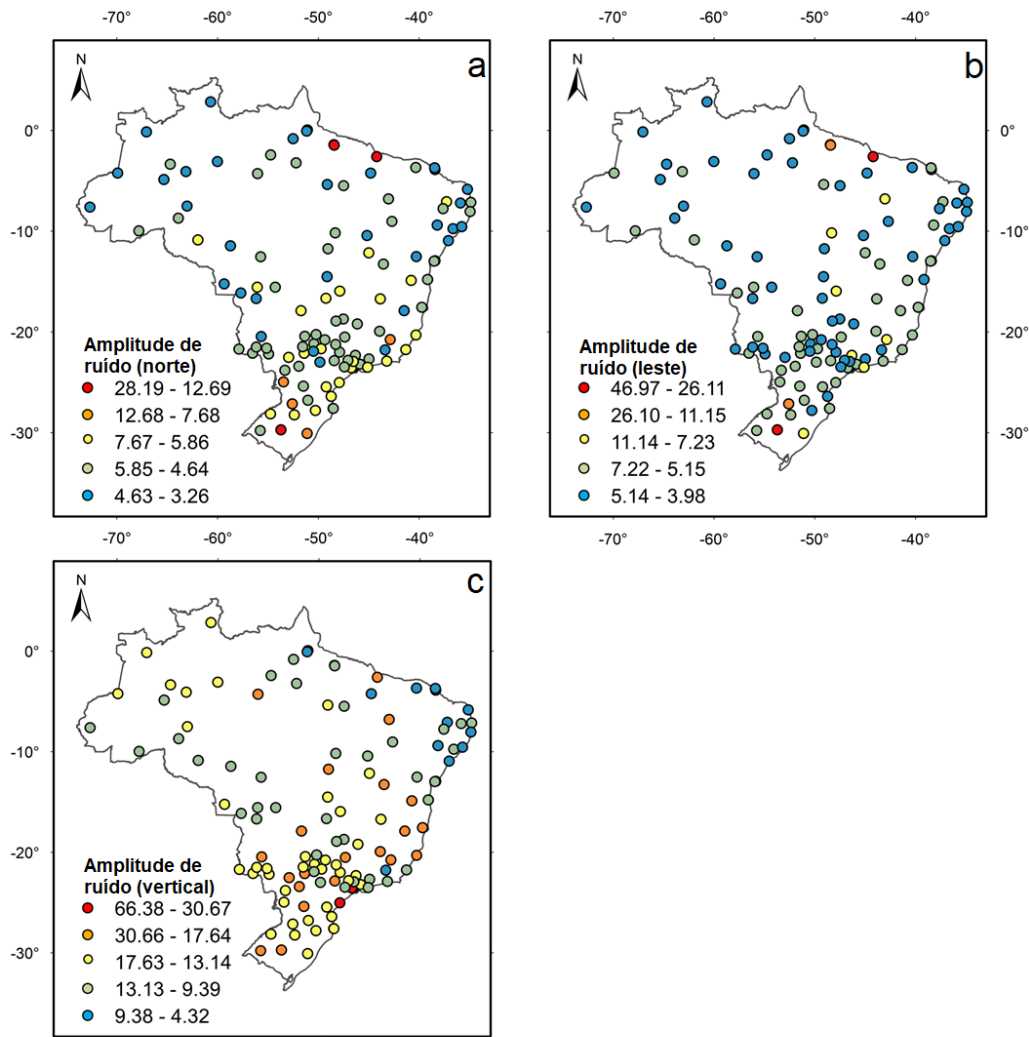


Figura 07: Amplitude do ruído WN+RW, em $\text{mm} \times \text{ano}^{-\frac{1}{2}}$, nas componentes norte (a), leste (b) e vertical (c).

Das estações com magnitude de ruído superior ao valor estabelecido pelo teste GESD, ou com índice espectral $k < -1$ (instáveis), em um total de 11 estações, 4 estão localizadas em regiões costeiras ou de bacias hidrográficas (Figura 08), o que corrobora com os resultados apresentados por Amagua *et al.* (2018), que afirmam que as propriedades estocásticas das séries temporais dessas estações podem estar sofrendo influência de sinais típicos dessas localidades, como efeitos de cargas hidrológicas. A estação POLI, com mais de 16 anos de observação, está localizada a aproximadamente 500 m do Rio Pinheiros e está instalada em torre metálica no solo, podendo estar submetida a diversos efeitos causadores de instabilidade.

Considerando que o ruído branco predomina nas altas frequências do espectro de potência das séries temporais, o *flicker* nas frequências

intermediárias e o *random walk* apenas nas baixas frequências, é possível notar a presença desses ruídos nas 11 estações apresentadas na Figura 08 (a partir de agora referidas com instáveis). A Figura 09 mostra esse comportamento, em que a densidade de potência do sinal, a partir de um período de aproximadamente 10^3 dias, é correspondente ao *random walk*. Essa também é uma evidência de que, para caracterizar esse tipo de ruído, é necessário longo período de observação. A componente norte da estação SALU ilustra bem a predominância de cada tipo de ruído no espectro de potência da série temporal, conforme citado anteriormente.

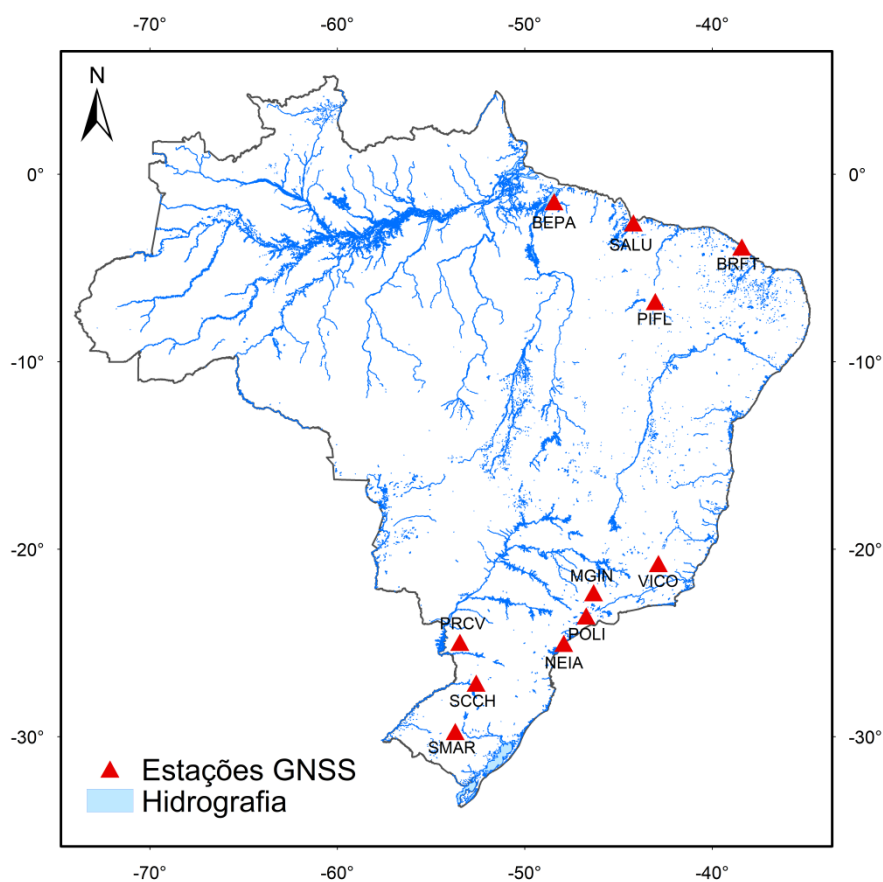


Figura 08: Estações GNSS com índice espectral ou amplitude de ruído acima dos limites estabelecidos para classificação da estabilidade da monumentação.

Ferreira *et al.* (2022), em um estudo local na cidade de Manaus, observaram variações anuais de cerca de 5 metros no nível de águas subterrâneas, sugerindo, inclusive, que essa é a principal fonte das variações locais no sinal de gravidade. A estação estudada pelos autores apresenta uma série de fatores que podem ser observados, de forma análoga, nas estações classificadas como instáveis neste estudo, como a localização em bacias

sedimentares espessas, a presença de sedimentos inconsolidados no local da monumentação geodésica e a proximidade a rios que apresentam grande amplitude de variação do nível de água.

Nesse sentido, é possível sugerir que, tanto os resultados da estação BEPA, localizada na bacia hidrográfica amazônica, quanto das estações BRFT, SALU e NEIA, localizadas em áreas litorâneas, podem ser influenciados por variações locais do nível de água presente nos solos e nas rochas.

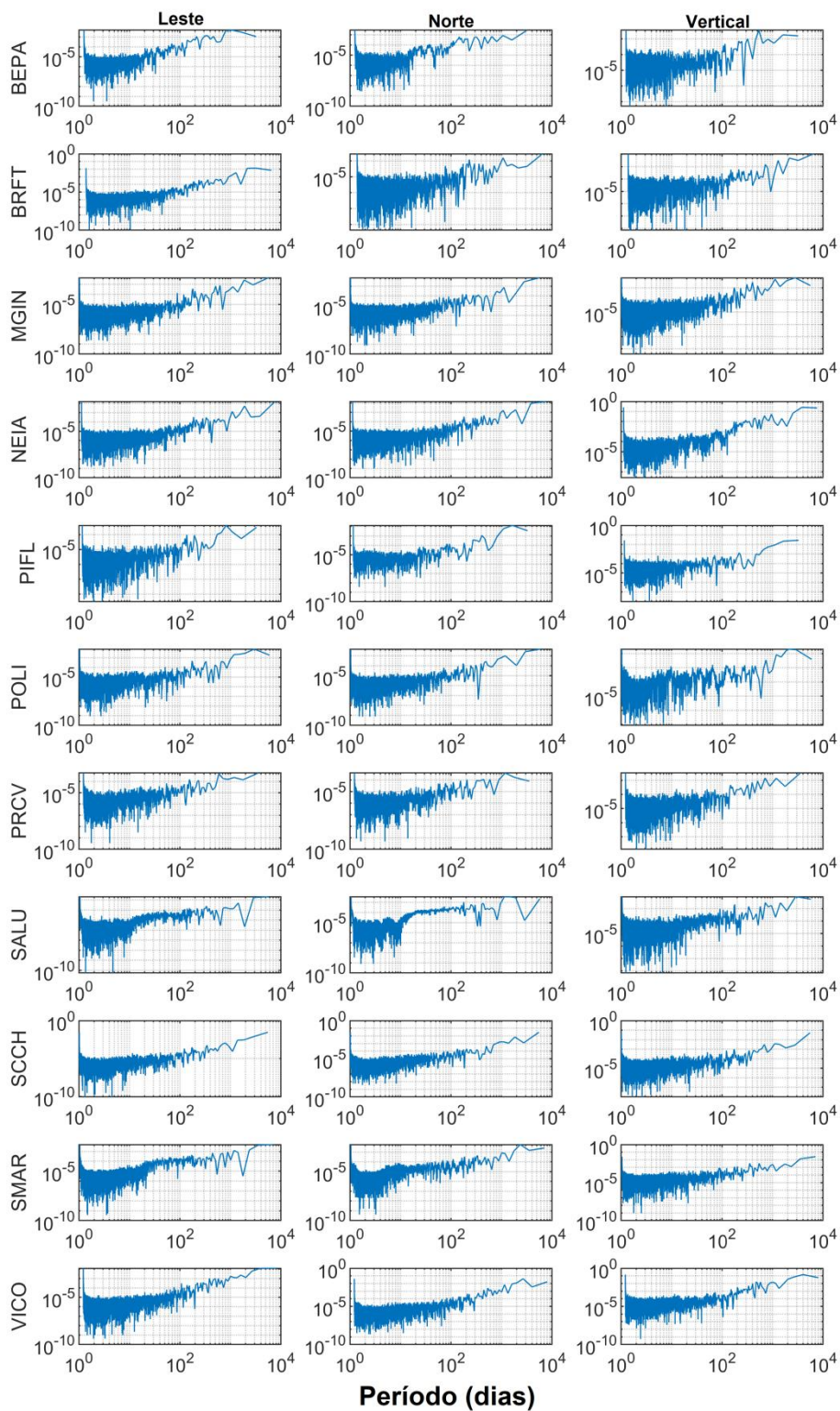


Figura 09: Espectro de potência das séries temporais das 11 estações instáveis.

As outras 6 estações classificadas como instáveis (MGIN, PIFL, PRCV, SCCH, SMAR e VICO) têm pelo menos 9 anos de observação cada. Uma hipótese para a identificação da instabilidade dessas estações é o tempo de observação, que quanto mais longo, maior a possibilidade de identificação de ruído do tipo *random walk*.

Quanto ao tipo de solo onde se situam as estações classificadas como instáveis, tem-se mais de 70% localizadas em latossolos ou argissolos (Tabela 4). Apesar de serem solos profundos, o que poderia contribuir para a instabilidade da estação, 58% do território nacional é recoberto por esses tipos solo (Santos *et al.*, 2018), não sendo possível, portanto, correlacionar diretamente a pedologia com a instabilidade das estações.

Tabela 4: Tipo de solo, monumentação e tempo de observação das estações removidas. PBCS= Pilar em base de concreto no solo. TMLE= tripé metálico em laje de edifício. PCLE= Pilar de concreto em laje de edifício. TMS= Torre metálica no solo.

Estação	Solo	Monumentação	Tempo de observação (anos)
BEPA	Gleissolo	TMLE	8,8
BRTF	Argissolo	PBCS	17,63
MGIN	Latossolo	PCLE	15,33
NEIA	Cambisol	PCLE	20,85
PIFL	Argissolo	PBCS	9,00
POLI	Argissolo	PCLE	16,20
PRCV	Latossolo	TMS	9,70
SALU	Latossolo	PCLE	15,70
SCCH	Neossolo	PBCS	15,10
SMAR	Argissolo	TMLE	19,34
VICO	Latossolo	PCLE	22,03

Ainda na Tabela 4, tem-se a distribuição das 11 estações com relação ao tipo de monumentação. É possível observar que 8 das estações classificadas como instáveis têm monumentação do tipo “pilar de concreto em laje de edifício” ou “pilar em base de concreto no solo”. Neste caso, não foi possível estabelecer correlação entre a magnitude de ruído e o tipo de monumentação, uma vez que, do conjunto total de estações, aproximadamente 80% das estações possuem esses tipos de monumentação, valor semelhante ao observado nas estações classificadas como instáveis. Portanto, sugere-se que nas condições apresentadas, a análise do índice espectral e da magnitude de

ruído de cada uma das estações da rede, individualmente, tende a ser a estratégia mais apropriada para classificação de estações instáveis no território brasileiro.

Com relação ao tempo de observação das estações classificadas como instáveis, tem-se que o menor tempo de observação presente entre elas é de 8,8 anos (BEPA) (Tabela 4). Isso levanta a hipótese de que, nas estações com menor tempo de observação, pode não ter sido possível caracterizar o *random walk* apropriadamente, devido à magnitude dos ruídos tipo branco e *flicker* ou a outros fatores. Calais *et al.* (2006) observaram que, possivelmente, a estimativa confiável dos parâmetros do *random walk* se dá em estações com tempo de observação significativamente superior a 5 anos. Nesse caso, sugere-se que na RBMC, para aplicação em estudos geodinâmicos e tectônicos, seja considerado o tempo mínimo de observação de 9 anos, que permite identificar e classificar os diferentes tipos ruídos.

A Figura 10 apresenta as velocidades horizontais estimadas para as estações, considerando o modelo de ruído que combina ruído branco e *flicker*. As velocidades apresentam magnitude média de 13 mm/ano, com desvio padrão de 0,07 mm/ano. Analisando as componentes horizontais, têm-se as velocidades da componente norte com média de 12 mm/ano e da componente leste -0,3 mm/ano, com desvios-padrão de 0,06 mm/ano e 0,07 mm/ano, respectivamente.

O fato de as velocidades horizontais estimadas serem concordantes em magnitude e direção mostra que a componente regional de movimentação da placa é predominante. Assim, para estudos de esforços e/ou deformações locais, é necessária a remoção da componente regional e análise das componentes residuais, que podem ou não serem adequadas para essa finalidade, a depender do nível das incertezas estimadas.

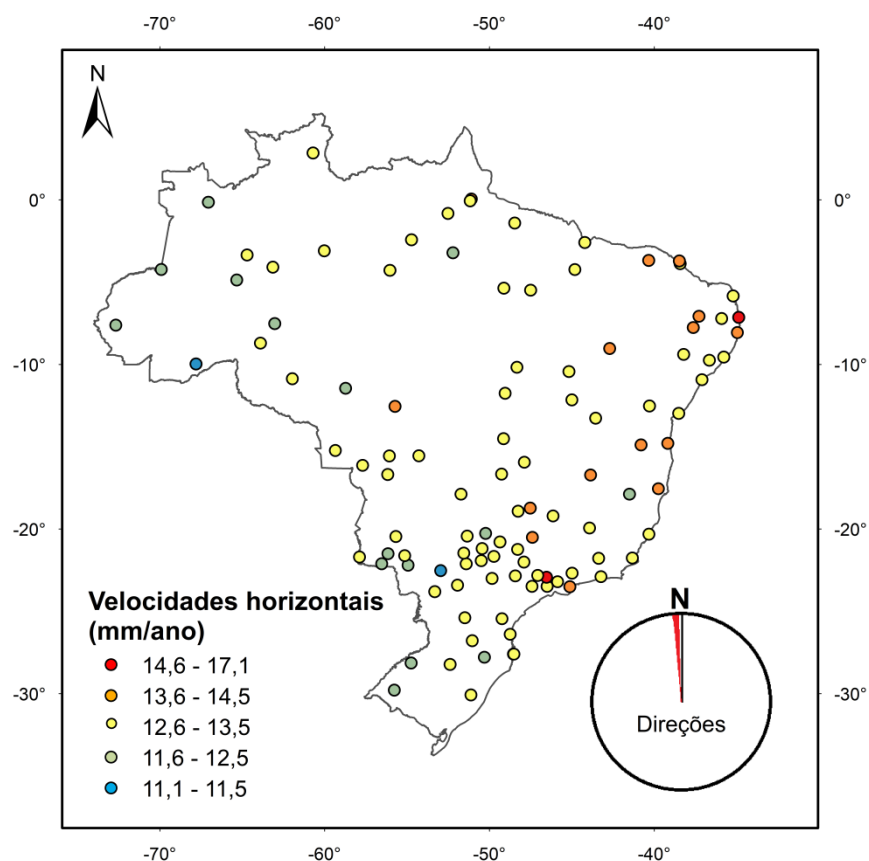


Figura 10: Modelo de velocidades das estações GNSS. O modelo de ruído das séries temporais utilizado é a combinação de white noise e flicker noise.

3.6 Conclusão

A avaliação de 119 estações GNSS presentes em todo o território brasileiro aponta a presença significativa de ruído *random walk* em algumas dessas estações, detectada a partir da análise da magnitude de ruído em um modelo que combina o ruído branco e o *random walk* e, também, na análise do índice espectral das estações.

Entretanto, a análise de elementos como localização e tipo de monumentação da estação geodésica mostrou que os fatores locais, conhecidos ou não, afetam individualmente a estabilidade das estações GNSS, não sendo possível, portanto, modelar completamente o comportamento dos dados. Assim, sugere-se que a adoção de uma estratégia quantitativa para caracterização e remoção de estações consideradas instáveis pode proporcionar melhor qualidade para estudos tectônicos e geodinâmicos.

Em relação às estações onde se identificou instabilidade da monumentação geodésica, tem-se que, em sua maioria, estão localizadas em zonas costeiras ou sob influência de grandes cursos d'água. Nessas localidades, uma variedade de fatores pode estar contribuindo com a instabilidade da estação GNSS, como, por exemplo, as variações do nível de água, a presença de sedimentos inconsolidados ou efeitos atmosféricos locais.

Além do exposto, considerando que as estações onde se detectou instabilidade da monumentação possuem no mínimo 8 anos de observação, e que a identificação de ruído *random walk* é dependente da quantidade de dados, é possível sugerir que as estações com período de observação entre 3 e 8 anos podem estar sendo afetadas por este tipo de ruído, porém, não devidamente caracterizado em razão da extensão da série temporal. Portanto, sugere-se que, em aplicações tectônicas e/ou geodinâmicas, sejam utilizadas, no Brasil, apenas estações com mais de 9 anos de observação.

Por fim, as velocidades horizontais das estações, calculadas utilizando um modelo de ruído que combina ruído branco e *flicker*, evidenciam que o território brasileiro se move conforme esforços regionais. Assim, para estudos de movimentações de blocos e sub-blocos intraplaca, é necessário adotar uma abordagem que permita a análise das velocidades residuais após a remoção de uma componente regional comum a todas as estações.

3.7 Referências

- Agnew, D., 1992. The time domain behavior of power law noises, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 333– 336.
- Agurto-Detzel, H., Assumpcao, M., Ciardelli, C., Albuquerque, D.F., Barros, L.V., Franca, G.S.L., 2014. The 2012 e 2013 Montes Claros earthquake series in the Sao Francisco Craton, Brazil: new evidence for non-uniform intraplate stresses in mid-plate South America. *Geophys. J. Int.* 200 (1), 216 e 226. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggu333>.
- Amagua, C.G.P., Krueger, C.P., Criollo, A.R.T., 2018. Stochastic Model of the Brazilian GPS Network Coordinates Time Series. *Bulletin of Geodetic Sciences*, Vol. 24 (4): 545-563.
- Assumpção, M., Dias, F.L., Zevallos, I., Naliboff, J.B., 2016. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, v71 p278-295, ISSN 0895-9811 <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005>.

Assumpção, M., Schimmel, M., Escalante, C., Barbosa, J.R., Rocha, M., Barros, L.V., 2004. Intraplate seismicity in SE Brazil: stress concentration in lithospheric thin spots. *Geophys. J. Int.* 159, 390–399. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02357.x>.

Assumpção, M., 1998. Seismicity and stresses in the Brazilian passive margin. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 (1), 160e169.

Barros, L.V., Assumpção, M., Quinteros, R., Caixeta, D., 2009. The intraplate Porto dos Gaúchos seismic zone in the Amazon craton d Brazil. *Tectonophysics* 469 (1e4), 37e47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.006>.

Bawden, G.W., Thatcher, W., Stein, R.S., Hudnut, K.W., Peltzer, G., 2001. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects, *Nature*, 412, 812– 815.

Blewitt, G., and D. Lavalée (2002), Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107(B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.

Blewitt, G., W. C. Hammond, and C. Kreemer (2018), Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science, *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.

Bock, Y., *et al.*, 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Continuous measurements of the regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 102, 18,013– 18,033.

Calais, E., J. Y. Han, C. DeMets, J. M. Nocquet, 2006. Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 111, B06402, doi:10.1029/2005JB004253.

Cenni, N., Mantovania, E., Baldib, P., Vitia, M., 2012. Present kinematics of Central and Northern Italy from continuous GPS measurements. *Journal of Geodynamics* 58, 62–72. doi: 10.1016/j.jog.2012.02.004.

Chimpliganond, C.N., Assumpção, M., von Huelsen, M.G., França, G.S., 2010. The intracratonic Caraíbas-Itacarambi earthquake of December 09, 2007 (4.9 mb), Minas Gerais state, Brazil. *Tectonophysics* 480, 48e56.

Dmitrieva, K., Segall, P. Bradley, A.M., 2016. Effects of linear trends on estimation of noise in GNSS position time-series. *Geophysical Journal International*, 208, 281-288. doi: 10.1093/gji/ggw391

Dong, D., P. Fang, Y. Bock, M. K. Cheng, S. Miyazaki, 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 2075, doi:10.1029/2001JB000573.

Farolfi, G., Ventisette, C., 2015. Contemporary crustal velocity field in Alpine Mediterranean area of Italy from new geodetic data. *GPS Solution*. doi: 10.1007/s10291-015-0481-1.

Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Nascimento, A.F., S_a, J.M., França, G.S., 2008. The role of Precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the

coseismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics* 456, 111e126.

Ferreira, L., Marotta, G.S., Madden, E.H., Horbe, A.M.C., Santos, R.V., Costa, J.M.N., 2021. Vertical displacement caused by hydrological influence in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020691. <https://doi.org/10.1029/2020JB020691>

Ferreira, V.G., Ndehedehe, C.E., Montecino, H.C., Yong, B., Yuan, P., Abdalla, A., Mohammed, A.S., 2019. Prospects for Imaging Terrestrial Water Storage in South America Using Daily GPS Observations. *Remote Sens.*, 11, 679. <https://doi.org/10.3390/rs11060679>

Galloway, D.; Jones, D.R., 1999. Land Subsidence in the United States; Technical Report Circular 1182; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA.

Gardner, M., 1978. Mathematical games: White and brown music, fractal curves and one-over-fluctuations, *Sci. Am.*, 238(4), 16–32.

Johnson, H., Agnew, D.C., 1995. Monument motion and measurements of crustal velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2905– 2908.

Kedar, S., Hajj, G.A., Wilson, B.D., Heflin, M.B., 2003. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, *Geophys. Res. Lett.*, 30(16), 1829, doi:10.1029/2003GL017639.

Kierulf, H.P., Steffen, H., Barletta, V.R., Lidberg, M., Johansson, J., Kristiansen, O., Tarasov, L., 2021. A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia, *Journal of Geodynamics*, v146, <https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101845>.

Kreemer, C., Young, Z. M., 2022. Crustal Strain Rates in the Western United States and Their Relationship with Earthquake Rates, *Seismol. Res. Lett.* 93, 2990–3008, doi: 10.1785/0220220153.

Langbein, J., Johnson, H., 1997. Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation, *J. Geophys. Res.*, 102, 591–603.

Langbein, J., 2004. Noise in two-color electronic distance meter measurements revisited. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*. doi: 10.1029/2003JB002819.

Lima, C.C., 2000. Ongoing compression across intraplate South America: observations and some implications for petroleum exploitation and exploration. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (1), 203e207.

Mandelbrot, B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman, New York.

Mao, A., Harrison, C.G.A., Dixon, T.H., 1999. Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.*, 104, 2797– 2816.

Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Fuck, R.A., 2013a. Strains arising by seismic events in the SIRGAS-CON network region. *J. Geod. Sci.* 3 (1), 12e21.

- Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Fuck, R.A., Araújo-Filho, J.O.d., 2013b. Strain rate of the South American lithospheric plate by SIRGAS-CON geodetic observations. *J. S. Am. Earth Sci.* 47, 136–141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2013.07.004>.
- Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Bezerra, F.H.R., Fuck, R.A., 2015. Strain rates estimated by geodetic observations in the Borborema Province, Brazil *J. S. Am. Earth Sci.*, 58, pp. 1-8
- Nikolaidis, R., 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. thesis, University of California, San Diego, 305p.
- Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I.S., Ocola, L., Ellis, M., 1998. Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the Central Andes. *Science*, 229 (358).
- Pelletier, J.D., Broxton, P.D., Hazenberg, P., Zeng, X., Troch, P.A., Niu, G., Williams, Z.C., Brunke, M.A., Gochis, D., 2016. Global 1-km Gridded Thickness of Soil, Regolith, and Sedimentary Deposit Layers. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1304>
- Ramos, M.P., Poz, W.R.D., Carvalho, A.S., 2022. Propagação de Incertezas no Processo de Compatibilização de Referenciais e Época de Coordenadas GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.74, n. 2, p. 305–321, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n2- 64767.
- Rocha, M.P., Azevedo, P.A., Marotta, G.S., Schimmel, M., Fuck, R.A. 2016. Causes of intraplate seismicity in central Brazil from travel time seismic tomography. *Tectonophysics*, v. 680, p1-7, ISSN 0040-1951, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.005>.
- Rosner, B., 1983. Percentage Points for a Generalized ESD Many-Outlier Procedure, *Technometrics*, 25(2), pp. 165-172.
- Santos, H.G., 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.
- Uieda, L., Barbosa, V.C.F., 2016. Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the South American Moho. *Geophysical Journal International*, v208, pp162-176 <https://doi.org/10.1093/gji/ggw390>
- Watson, K. M., Bock, Y., Sandwell, D.T., 2001. Satellite interferometric observations of displacements associated with seasonal ground water in the Los Angeles basin, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), doi:10.1029/2001JB000470.
- Williams, S.D.P., 2008. CATS: GPS coordinate time series analysis software. *GPS Solutions*, 2, pp. 147–153. doi: 10.1007/s10291-007-0086-4.
- Williams, S.D.P., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, M., Johnson, D.J., 2004. Error analysis of continuous GPS position time series, *J. Geophys. Res.*, 109, B03412, doi:10.1029/2003JB002741.

Wyatt, F. K., 1989. Displacements of surface monuments: Vertical motion. *J. Geophys. Res.*, 94, 1655– 1664.

Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowinski, S., Behr, J., 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities, *J. Geophys. Res.*, 102(B8), 18,035–18,055

4. Explorando relações entre séries temporais GNSS, armazenamento de água terrestre e características geológicas no Brasil

Yellinson de Moura Almeida¹, Giuliano Sant'Anna Marotta, Alice César Fassoni de Andrade¹

¹Instituto de Geociências, Universidade de Brasília

4.1 Introdução

Nas próximas décadas, a combinação de mudanças climáticas e aumento da população global irá pressionar a disponibilidade de recursos hídricos. Essa disponibilidade está diretamente ligada à segurança hídrica, energética e alimentar (Adams *et al.*, 2022; Famiglietti, 2014, Giordano *et al.*, 2009). Além disso, a água será o principal recurso através do qual a população global sentirá essas mudanças, seja pela ocorrência de eventos extremos (secas e inundações) ou pela diminuição de sua qualidade (salinização crescente, aumento de patógenos) (Adams *et al.*, 2022).

A distribuição heterogênea de precipitação, a variabilidade espacial demográfica e a concentração de áreas de cultivo intensivo, são fatores que impactam os recursos hídricos de formas bastante distintas no Brasil. Esses fatores comprovadamente influenciam as variações de armazenamento de água, como se pode observar em estudos que apontam que a alta densidade populacional afeta a hidrologia através de intervenções como barragens e bombeamento de água para agricultura (Boergens *et al.* 2024; Getirana *et al.*, 2016; Rodell *et al.*, 2018; Argus *et al.*, 2017).

Associados aos fatores antropogênicos, tem-se a influência de fatores naturais, que apresentam variações ainda maiores. Nesse sentido, o Brasil apresenta grande complexidade e variabilidade climática e geológica (Silva *et al.*, 2021; Bizzi *et al.*, 2003). Pfeffer *et al.*, (2022) detectaram, em um estudo global, que as bacias do Amazonas, São Francisco e Paraná apresentaram as maiores diferenças entre dados gravimétricos satelitais e modelos hidrológicos globais. Os autores apontam que parte dessas diferenças é devida a previsões imprecisas dos modelos hidrológicos.

As bacias hidrográficas brasileiras sofrem variações anuais e interanuais

significativas no armazenamento hídrico, devido a padrões climáticos recorrentes como o *El Niño*, Oscilação Decadal do Pacífico e Oscilação do Atlântico Norte (Pfeffer *et al.*, 2022). Qiu *et al.* (2024), destacam que a Bacia do Paraná é uma região vulnerável a eventos climáticos extremos, dadas suas características climáticas e geológicas. Essa complexidade, como mencionado acima, se estende a todas as regiões brasileiras.

Considerando isso, existe uma grande dificuldade em modelar as reservas de água terrestre e suas variações no Brasil. Existem muitos desafios, por exemplo, no monitoramento de águas subterrâneas, que estão em profundidade abaixo da superfície (Adams *et al.*, 2022). As técnicas de monitoramento *in situ* são limitadas pela heterogeneidade espacial de tipo e textura do solo, estrutura e produtividade de aquíferos, etc (Upton *et al.*, 2019; van Bussel *et al.*, 2015; Berg e Illman, 2011). Ainda que estes dados estejam disponíveis em grande quantidade e densidade espacial, o que não é o caso do Brasil, existem desafios significativos na integração e interpretação das observações (Adams *et al.*, 2022).

Por isso, nos últimos anos, têm aumentado consideravelmente os estudos no campo da hidrogeodésia. O termo hidrogeodésia é uma combinação de geodésia, que estuda a forma, tamanho e campo gravitacional da Terra e suas variações no tempo e hidrologia, que estuda a ocorrência, distribuição, fluxos e propriedades da água na Terra (Jaramilo *et al.*, 2024).

Dentre as principais técnicas utilizadas na hidrogeodésia, tem-se o posicionamento pelo GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) e a gravimetria satelital. Estudos utilizando o posicionamento pelo GNSS para hidrologia têm sido realizados por todo o mundo em diferentes escalas temporais e espaciais (Young *et al.*, 2024; Zhan *et al.*, 2021; Knappe *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2019; Ferreira *et al.*, 2018; Larochelle *et al.*, 2018; Miliner *et al.*, 2018; Montecino *et al.*, 2016; Argus *et al.*, 2014).

Um dos preceitos dessa aplicação é que as transferências de massa d'água, processo associado ao ciclo hidrológico, causam deformações elásticas temporais na superfície terrestre (Tregoning *et al.*, 2009). Os dados GNSS são significativamente sensíveis a essas variações (Heki e Jin, 2023).

Nos períodos chuvosos, a água entra no sistema, gerando uma carga

hídrica que, por sua vez, causa subsidência na superfície. No período de seca, a água sai do sistema e, como consequência, tem-se o soerguimento da superfície (Young *et al.*, 2024).

Isso ocorre em locais onde a resposta à carga é elástica. No entanto, em sistemas aquíferos, é possível que o comportamento da superfície seja regido por características poroelásticas. Nesses casos, pode-se observar uma resposta inversa ao carregamento hídrico, uma vez que o preenchimento dos poros pode gerar expansão do pacote de rochas.

Já as observações gravimétricas satelitais, como as provenientes da missão GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*), têm a vantagem de possuir cobertura global, porém com resolução espacial de cerca de 300 km. Os dados GRACE também são amplamente utilizados em estudos hidrogeodésicos para estimativa de mudanças no armazenamento de água, avaliação do balanço hídrico, potencial de secas e inundações e inúmeras outras propostas (Lehmann *et al.*, 2022; Tapley *et al.*, 2019; Long *et al.*, 2015; Reager e Famiglietti, 2009). Uma das principais vantagens dos dados da missão GRACE é a obtenção de informações em regiões onde não se tem acesso a dados terrestres. Assim, é comum a combinação de dados GRACE e GNSS para análise, integração e/ou validação de modelos.

Quando se trata da utilização de observações GNSS, diversos fatores podem ser registrados e influenciar as séries temporais, como cargas atmosféricas e oceânicas, expansão térmica e estabilidade da monumentação, movimentações de placas tectônicas e blocos intraplaca, outros efeitos geodinâmicos e não geodinâmicos, além do efeito hidrológico (Almeida *et al.*, 2024; Ferreira *et al.*, 2018; Williams, 2008). As variações desses efeitos, tanto em escala local quanto regional, dependem das características geológicas e climáticas de cada local.

Tiwari *et al.* (2014) apontaram a necessidade de comparar observações GNSS e gravimétricas em terrenos cristalinos. Zhu *et al.* (2023) observaram, com dados GNSS, heterogeneidades em períodos de seca na província de Yunnan (China), que podem estar relacionadas a características geológicas locais. Fu *et al.* (2015), observaram que as variações de armazenamento de água inferidas por GNSS são altamente correlacionadas com províncias

fisiográficas nos estados de Washington e Oregon (Estados Unidos). Assim, o entendimento de como as características geológicas afetam as séries temporais GNSS e a integração destas séries com dados gravimétricos é fundamental para aplicações dessas técnicas em estudos hidrológicos, climáticos e ambientais.

Como apresentado por Jaramillo *et al.* (2024), incorporar dados GNSS em modelos hidrológicos permite avaliar a resposta de diferentes unidades hidrogeológicas aos fluxos de água. Além disso, os autores apontam que os dados gravimétricos são úteis no monitoramento de mudanças de armazenamento de água em áreas hidrologicamente homogêneas. Por fim, mencionam que a combinação de GNSS e gravimetria permite fechar o balanço hídrico em escala de bacia, o que ajuda a estimar o impacto das atividades humanas nas variações de armazenamento hídrico.

Considerando o exposto, neste trabalho, buscou-se avaliar como as características geológicas, em todo o território brasileiro, influenciam a concordância entre séries temporais GNSS e de armazenamento total de água, provenientes da missão GRACE. O objetivo é contribuir, após a observação e caracterização dessa influência, para o entendimento dos processos hidrológicos de curto, médio e longo prazo no Brasil, delimitados conforme características espaciais. Entende-se que esse é um passo importante para que o potencial da hidrogeodésia seja mais explorado no Brasil, fomentando a implementação de ações e políticas de gestão de recursos hídricos, a sustentabilidade das atividades humanas e mitigando os efeitos das mudanças climáticas.

4.2 Dados e Métodos

4.2.1 Séries temporais GNSS

Foram utilizadas séries temporais das componentes verticais de 108 estações GNSS pertencentes à RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) e operadas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), no período de 57 meses, entre 2019 a 2023 (Figura 11). Essas estações integram a Rede SIRGAS (Sistema de Referência Geodésico para as Américas) e seus dados são processados pelo DGFI-TUM (*Deutsches*

Geodatisches Forschungsinstitut – Technical University of Munich; Dados disponíveis em <http://www.sirgas.org>; Sánchez *et al.*, 2022).

O intervalo de tempo adotado considera a atividade do maior número de estações GNSS na área de estudo e a disponibilidade contínua dos dados gravimétricos, uma vez que a transição da missão GRACE para GRACE-FO (*Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-on*) implicou em uma lacuna de 11 meses de observações, entre 2017 e 2018.

As séries temporais de coordenadas GNSS são disponibilizadas em soluções semanais referenciadas ao IGS14 e corrigidos dos efeitos de maré e pressão atmosférica (Sánchez *et al.*, 2022). As soluções semanais foram reamostradas para soluções mensais, como forma de minimizar a presença e influência de dados espúrios e tornar a amostragem concordante com os dados de variação de armazenamento de água.

Cabe ressaltar que aproximadamente 90% das estações da RBMC estão instaladas em pilares de concreto diretamente no solo ou em lajes de edifícios (Almeida *et al.*, 2024).

4.2.2 Armazenamento de água baseado em observações gravimétricas

Foram utilizados dados provenientes da missão GRACE-FO, processados e disponibilizados pelo GSFC (*Goddard Space Flight Center*) (Loomis *et al.*, 2019). Os dados correspondem à realização 06v02, disponíveis na resolução de 1°x1° (Loomis *et al.*, 2019). As missões GRACE e GRACE-FO medem as variações do campo de gravidade da Terra por meio de dois satélites gêmeos que rastreiam as variações da distância entre eles em órbita (Tapley *et al.*, 2004).

As variações do campo de gravidade são disponibilizadas como altura equivalente de água, que representa a altura de uma lâmina de água que produziria a mesma variação gravitacional observada (Rowlands *et al.*, 2005). Isso é feito considerando toda a água armazenada em um volume de controle, isto é, água superficial, subterrânea, água em vegetação, neve e umidade do solo.

4.2.3 Dados auxiliares

Para analisar os resultados, utilizaram-se dados geológicos de diversas

fontes (Figura 11): mapa de regiões hidrográficas do Brasil (ANA, 2020), geologia e litologia do Brasil (Bizzi *et al.*, 2003; Schobbenhaus *et al.*, 2001), espessura de sedimentos (Laske *et al.*, 2013) (Figura 16) e sistemas aquíferos (Diniz *et al.*, 2014).

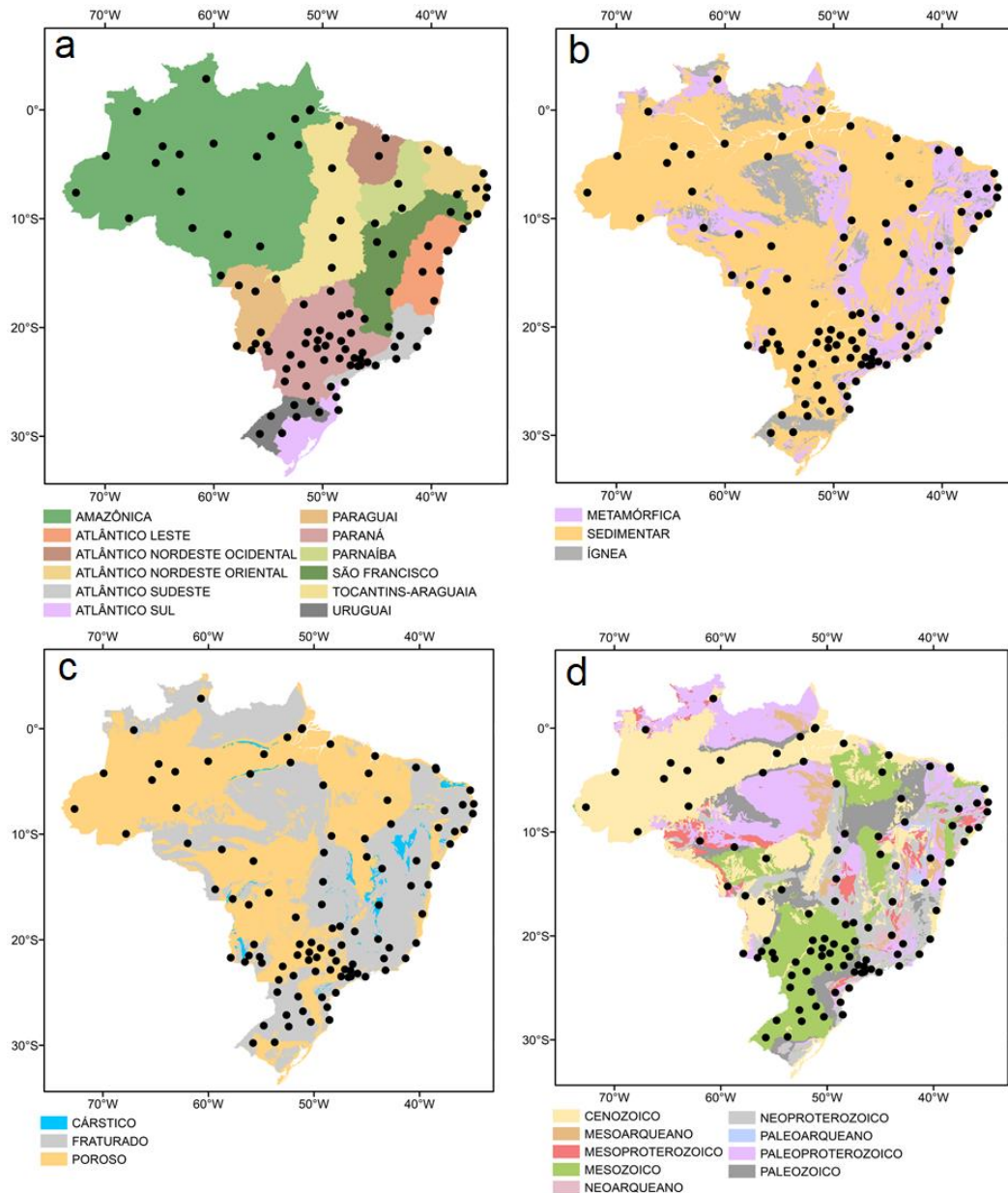


Figura 11: Localização das estações GNSS e características geológicas da área de estudo. a) macrorregiões hidrográficas; b) classes de rochas; c) sistemas aquíferos; d) eras geológicas.

4.2.4 Decomposição, Correlação e Análise de Componentes

As séries temporais mensais GNSS e de variação de armazenamento de água foram decompostas seguindo o mesmo procedimento. Primeiramente,

utilizou-se um processo de regressão linear para extrair a tendência das séries temporais. Esse procedimento foi realizado para verificar o comportamento dos dois conjuntos de dados em cada estação.

Considerando que as séries temporais influenciadas por efeitos hidrológicos podem apresentar variações interanuais não lineares e não estacionárias (Boergens *et al.*, ano; Ferreira *et al.*, 2018; Sun *et al.*, 2016), utilizou-se a análise espectral singular (SSA, *Singular Spectrum Analysis*) para decompor as séries em três componentes: variação interanual, sazonal e resíduos. Li *et al.* (2017) verificaram que essa abordagem é mais apropriada do que a regressão multilinear na decomposição de séries temporais que apresentam sinais periódicos modulados.

A SSA é um método não paramétrico e adaptativo aos dados (Rocco, 2013), e é descrito a seguir.

Uma matriz de correlação C_x para uma série temporal x_i e uma janela de tamanho M , onde cada diagonal tem um valor constante em função da janela, é expressa pela Equação 16 (Li *et al.* 2017):

$$C_x = \begin{pmatrix} c_0 & c_1 & \cdots & c_{M-1} \\ c_1 & c_0 & \cdots & \vdots \\ c_2 & c_1 & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{M-1} & \cdot & \cdot & c_0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

onde c_j são as covariâncias de x_i com um atraso j . Essas covariâncias têm a forma:

$$c_j = \frac{1}{N-j} \sum_{i=1}^{N-j} x_i x_{i+j} \quad (17)$$

sendo N o tamanho da série temporal, ou o índice de sua última observação. Os autovalores λ_k e os autovetores E^k (ou funções ortogonais) da matriz são determinados adotando a decomposição de autovalores para C_x . Eles são organizados em ordem decrescente de λ_k , onde k varia de 1 a M . A k -ésima componente principal (PC) é:

$$\alpha_i^k = \sum_{j=1}^M x_{i+j} E_j^k \quad (17)$$

onde k é o conjunto de funções ortogonais em que a reconstrução de componentes é baseada. Cada componente da série temporal original, como

tendências e termos sazonais, pode ser obtida pela combinação linear das componentes reconstruídas. Mais detalhes podem ser encontrados em Li *et al.* (2017) e Vautard e Ghil (1989).

Uma vez estimadas as componentes interanuais e sazonais, foram calculadas as correlações entre as observações GNSS e gravimétricas para cada componente de cada estação. Esses procedimentos foram implementados computacionalmente no software MATLAB.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Decomposição de séries temporais

A decomposição das séries temporais possui algumas características importantes. Dentre as estações GNSS utilizadas, na Figura 12 são apresentadas as decomposições de 4 estações localizadas em diferentes regiões do Brasil, também com características geológicas distintas: ILHA, MGMC, PAIT e TOGU (Localização das estações na Figura 13). É possível observar que existem diferenças de fase na componente sazonal dos dados GNSS (Figura 12c) que são mais sutis nos dados GRACE (Figura 12d). Esse comportamento se repete em diferentes regiões da área de estudo e essas diferenças podem estar relacionadas a características locais das estações, considerando que os dados GRACE são regionalizados.

Na decomposição dos dados GNSS, não existem diferenças significativas entre a tendência obtida por regressão linear (Figura 12e) e por SSA (Figura 12g). Nos dados GRACE, em geral, essas diferenças são evidentes (Figura 12h), uma vez que a SSA tende a capturar variações na tendência das séries temporais, em especial quando existem inflexões, que podem indicar mudanças transitórias ou mesmo permanentes nas variações de armazenamento de água em diferentes escalas temporais.

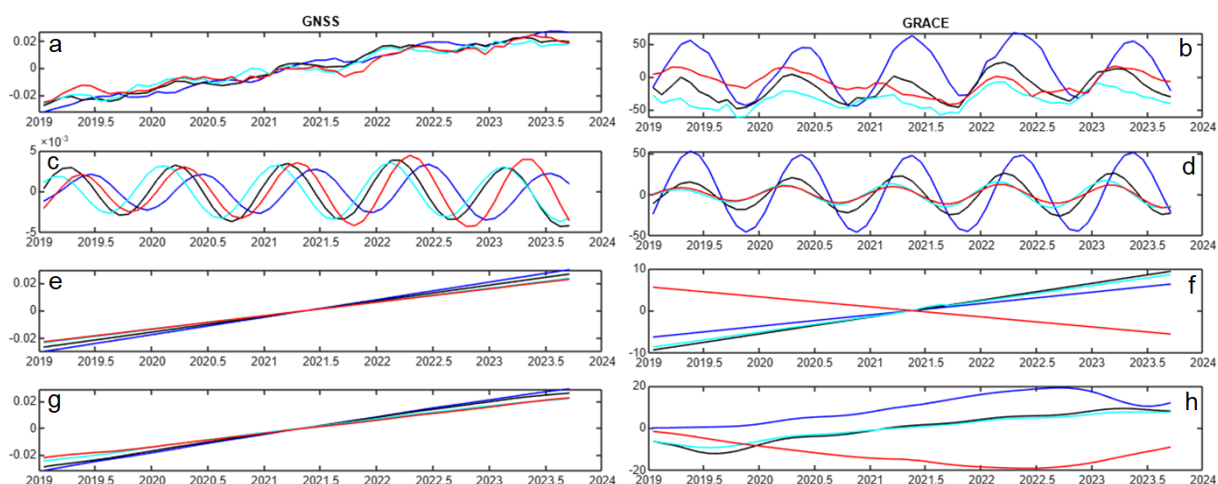


Figura 12: Decomposição de séries temporais em quatro estações da área de estudo: ILHA (vermelho), MPMC (ciano), PAIT (azul), TOGU (preto) (localização das estações na Figura 3). a) e b) dados observados, c) e d) componente sazonal, e) e f) tendência linear e g) e h) tendência pela SSA, respectivamente para dados GNSS e GRACE.

4.3.2 Correlações entre GNSS e armazenamento total de água

As correlações das tendências lineares das séries temporais GNSS e GRACE apontaram comportamentos positivos ou negativos (Figura 13). Correlações negativas indicam que a posição vertical da estação GNSS e as variações de armazenamento de água possuem comportamentos opostos em médio prazo. No entanto, deve-se levar em consideração que a resposta a esforços tectônicos nas séries GNSS pode possuir magnitude muitas vezes superior ao carregamento hídrico de médio e longo prazo, superando a influência hidrológica (Ray *et al.*, 2021). Assim, essas correlações devem ser analisadas no sentido de observar comportamentos distintos em estações próximas.

A ocorrência de correlações divergentes na tendência em estações próximas é um indicativo da influência de fatores geológicos ou condições físicas que afetam as séries temporais GNSS, uma vez que a escala destes dados é local e, em contrapartida, as variações de armazenamento de água são similares (Almeida *et al.*, 2024; Amagua *et al.*, 2018).

Notadamente, existe coerência espacial nas correlações lineares entre GNSS e GRACE, uma vez que se observam agrupamentos de estações com o mesmo comportamento. No entanto, considerando toda a área de estudo,

mesmo em regiões com tendência de variação de armazenamento de água negativa (vermelho no mapa da Figura 13), existem correlações positivas e negativas. O contrário também se aplica. A hipótese é que essas diferenças ocorrem, em parte, devido aos fatores analisados neste estudo e isso é explorado em detalhe na seção 4.3.3.

A Figura 14 mostra as correlações entre GNSS e variação de armazenamento de água para a componente sazonal e de tendência obtida pela SSA. Os resultados são classificados em cinco níveis de correlação que representam, positiva ou negativamente: correlação muito forte (igual ou maior que 0,8 e igual ou menor que -0,8), forte (entre $\pm 0,6$ e $\pm 0,8$) e fraca (demais).

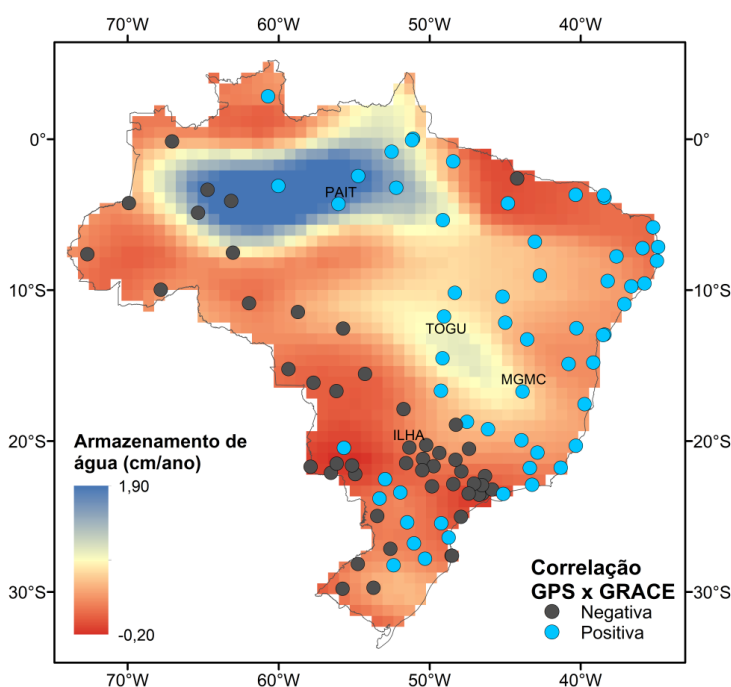


Figura 13: Correlação entre as tendências lineares de séries temporais GNSS e variação de armazenamento de água proveniente do GRACE. As taxas de variação do armazenamento de água apresentadas ao fundo correspondem ao período de 2019 a 2023.

Nota-se uma concentração de correlações sazonais fracas na região nordeste do Brasil. Quando se observam as correlações de tendência estimada pela SSA essas estações apresentam correlações positivas fortes, implicando em uma concordância do deslocamento vertical das estações GNSS e do armazenamento de água, com exceção de algumas estações em zonas costeiras. Na região sudeste, nota-se correlações sazonais fracas, em sua maioria. No entanto, a componente de tendência apresenta correlações

negativas fortes. Na próxima seção, discutiremos algumas dessas observações.

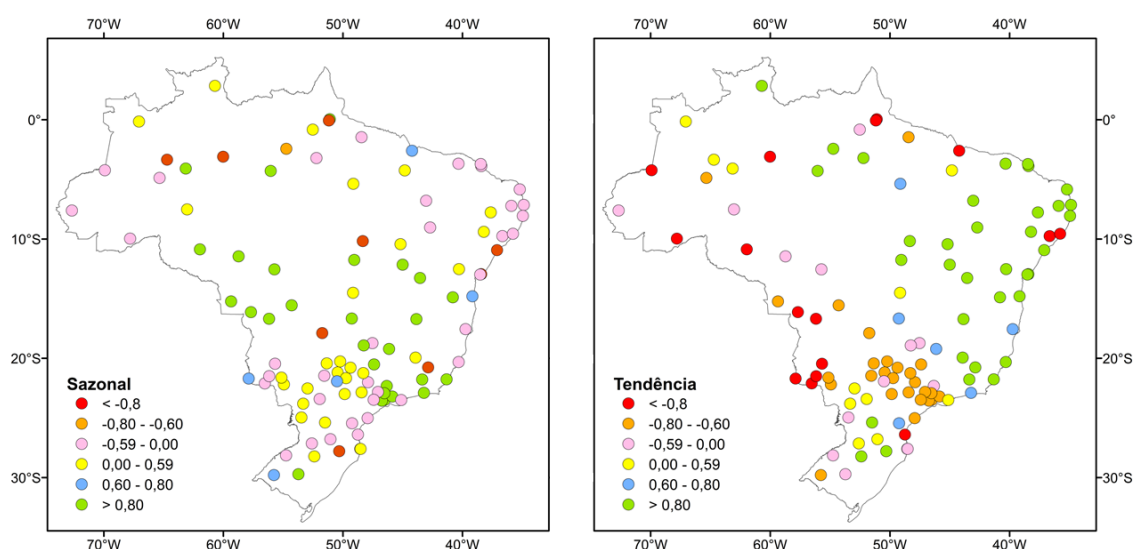


Figura 14: Correlações entre séries temporais GNSS e de armazenamento total de água.
a) correlação entre as componentes sazonais b) correlações entre as tendências estimadas pela SSA.

4.3.3 Características geológicas e suas implicações nos resultados

Quando observamos a espessura de sedimentos da área de estudo (Figura 15), a região amazônica e a bacia do Paraná se destacam, com espessuras maiores que 4.000 m em alguns pontos. Analisando as correlações sazonais entre deslocamentos verticais GNSS e armazenamento de água, 32 estações apresentam correlações maiores que 0,6 (~30% do total). Destas, cerca de 85% estão em regiões com menos de 1.000 m de sedimento. Ferreira *et al.* (2020), observaram que os deslocamentos verticais GNSS na região amazônica são menores em áreas com menor espessura de sedimentos. Isso pode influenciar, portanto, nas correlações entre esses deslocamentos e o armazenamento de água. Nas correlações abaixo de -0,6, a variabilidade de espessura de sedimentos é maior.

Nespoli *et al.* (2021), conseguiram distinguir o deslocamento sazonal elástico e poroelástico em séries temporais GNSS na Itália, observando que a resposta poroelástica predomina em regiões de bacia sedimentar. No entanto, observamos que na área de estudo, a espessura do pacote de rochas sedimentares, por si só, não revela o comportamento da superfície ao

carregamento hidrológico.

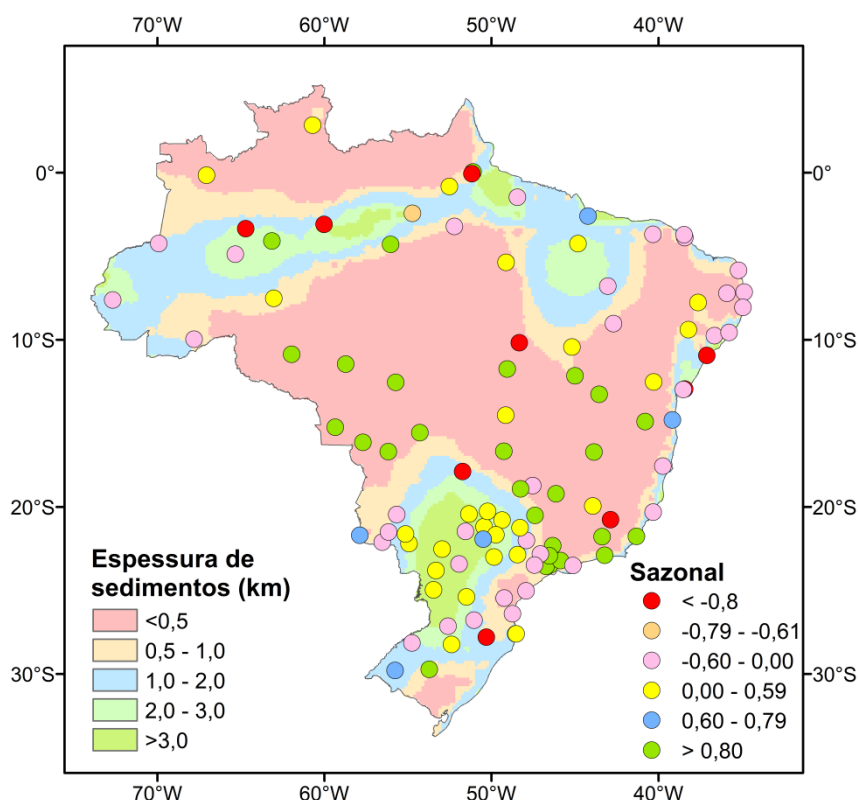


Figura 15: Espessura de sedimentos da área de estudo e correlações entre a componente sazonal GNSS e de armazenamento total de água.

As regiões hidrográficas (RH) permitem uma boa distinção entre as correlações observadas, apresentando agrupamentos de estações com comportamentos similares (Figura 16). Essas regiões hidrográficas são definidas como “um espaço territorial compreendido por uma bacia ou grupos de bacias com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou semelhantes, para fins de gestão dos recursos hídricos” (ANA, 2015).

Na RH São Francisco, por exemplo, existem 8 estações GNSS avaliadas neste estudo. Destas, 7 apresentam correlação de tendência estimada pela SSA superior a 0,7. Quanto à correlação sazonal, metade das estações apresentam correlações positivas superiores a 0,8, enquanto as demais apresentam correlações fracas. As correlações positivas muito fortes estão na porção da RH mais distante da zona costeira, o que concorda com o observado por Ferreira *et al.* (2018). Nessa região, as fortes correlações sazonais positivas mostram um comportamento poroelástico da superfície (Figura 17).

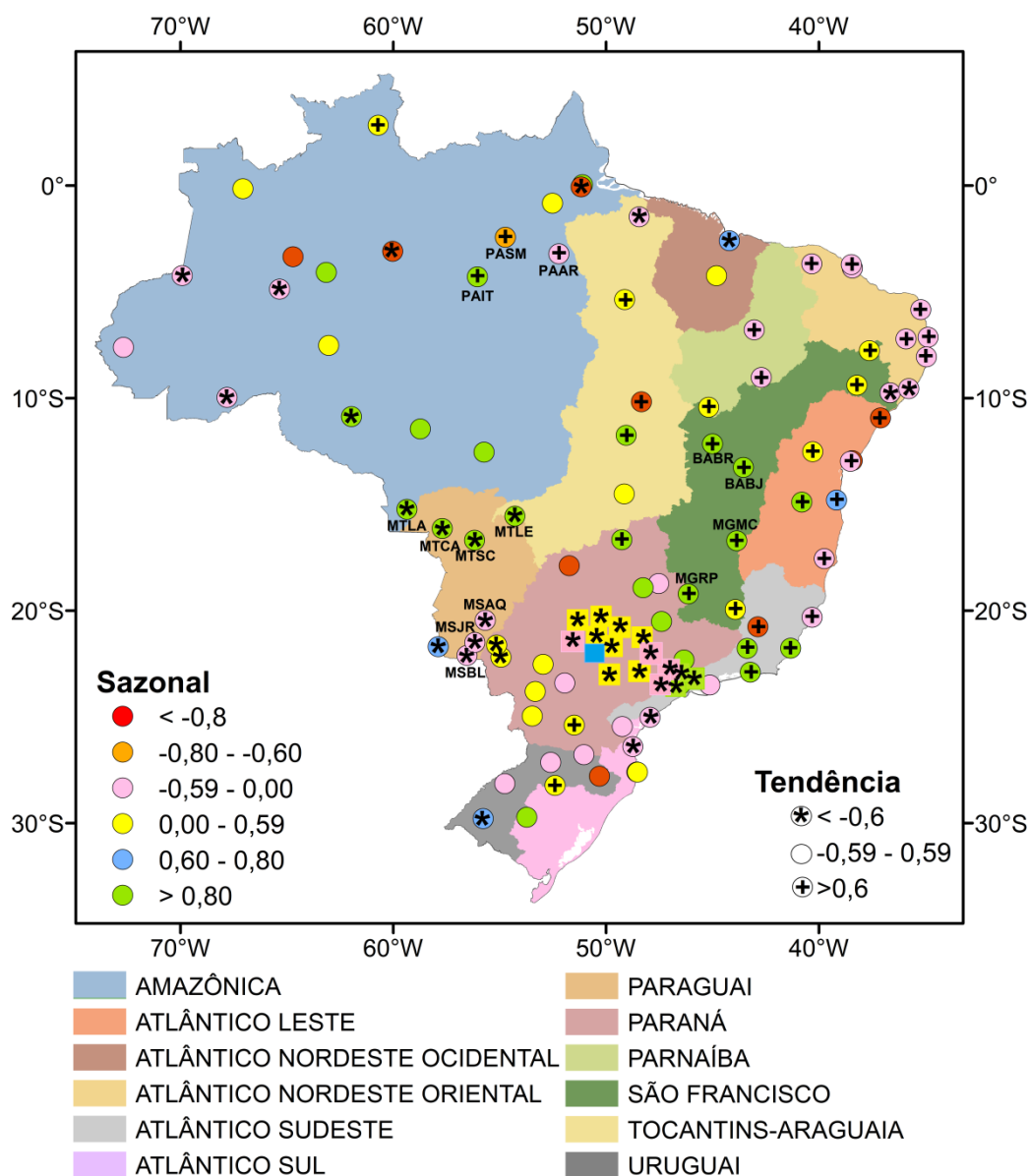


Figura 16: Regiões hidrográficas e correlações entre GNSS e variação de armazenamento de água na componente sazonal e tendência pela SSA. As estações da bacia do Tietê estão representadas por quadrados.

Na RH Paraguai, que contém 7 estações analisadas neste estudo, 3 apresentam correlações sazonais positivas muito forte (MTCA, MTSC, MTLE) (Figura 16). Essas estações apresentam correlações similares (sazonal e tendência) à estação MTLA, localizada na RH Amazônica, mas a apenas 200 km de distância da estação MTCA. Apesar de estarem na RH Paraguai, as estações MSAQ, MSJR e MSBL não têm coerência sazonal com as estações MTCA, MTSC e MTLE. A hipótese é que isso se dá em razão das características geológicas das estações: MTCA, MTSC, MTLE e MTLA estão em sedimento inconsolidado do Cenozoico, enquanto MSAQ, MSJR e MSBL

estão em rochas metamórficas ou sedimentares do Paleozoico e Mesozoico (Figuras 12 e 17).

A RH Amazônica engloba 20 estações analisadas neste estudo. Somente 4 destas estações apresentam correlação de tendência positiva, superior a 0,8. Destas, 3 estações (PAAR, PAIT e PASM) estão na área onde a tendência do armazenamento total de água, em mm/ano, é positivo (ver Figura 13). Outras estações também estão nessa área, no entanto, somente as estações PAAR e PAIT não estão localizadas sobre o Cenozoico (Mesozoico e Paleozoico, respectivamente) (Figuras 12 e 17).

Na RH Paraná, segunda maior RH do Brasil, existem algumas subdivisões importantes do ponto de vista social e econômico. Uma delas é a Bacia do Tietê, que apresenta criticidade quali-quantitativa, devido à alta demanda por água da região metropolitana da cidade de São Paulo (ANA, 2015). Nesta bacia (ver Figura 16), 11 das 12 estações apresentam correlação de tendência negativa forte. Isso aponta para um comportamento elástico da superfície diante da carga hídrica.

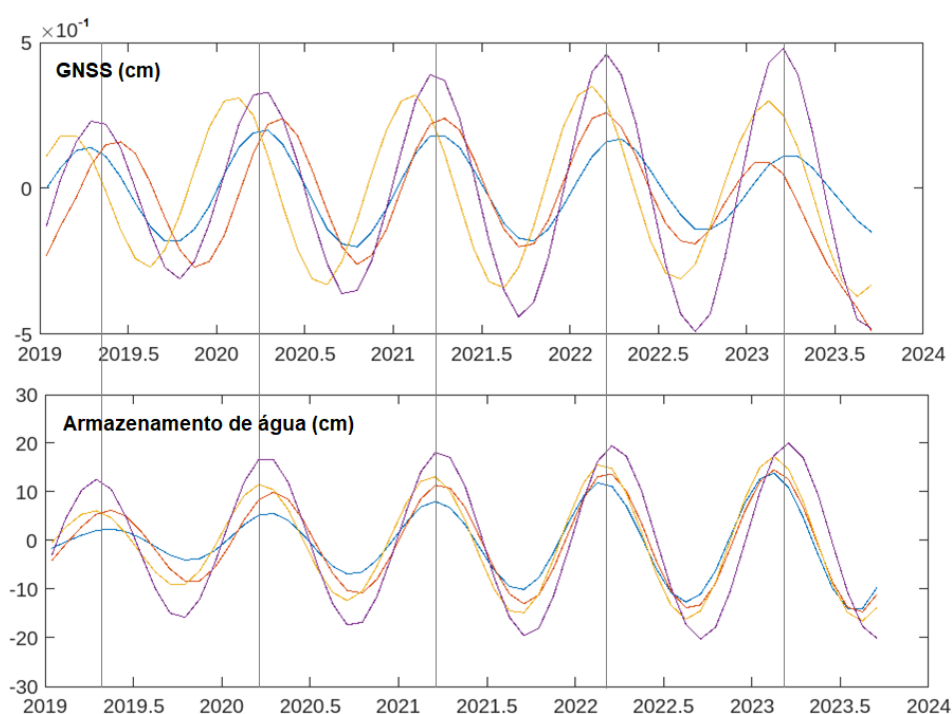


Figura 17: Componentes sazonais GNSS e de Armazenamento Total de Água das estações BABJ, BABR, MGMC e MGRP da RH São Francisco – localização das estações indicada na Figura 16.

Das 10 estações que apresentam correlação sazonal negativa forte ou muito forte, 9 estão em aquíferos porosos (Figuras 12 e 15). Do total de

estações, 54% estão nesse tipo de sistema aquífero. No entanto, esse resultado deve ser avaliado com bastante cautela, considerando que a variabilidade das propriedades físicas dos aquíferos é alta, além da própria heterogeneidade da estratigrafia em profundidade (Berg e Illman, 2011).

A variabilidade de correlações observadas conforme a litologia da área de estudo é alta (Figuras 12 e 15). Porém, para estudos realizados em escala de bacia ou sub-bacia, essa é uma informação importante que pode denotar comportamentos distintos nas séries temporais GNSS.

Considera-se importante que a divisão do território brasileiro em regiões hidrográficas apresente concordância com os resultados obtidos neste estudo, uma vez que a gestão dos recursos hídricos pode ser realizada de forma espacializada, compreendendo características naturais das bacias hidrográficas que ultrapassam divisões políticas do território.

4.4 Conclusão

Foram estimadas as correlações entre séries temporais GNSS e de variação do armazenamento total de água proveniente da missão GRACE-FO, para a componente sazonal e de tendência, em 108 estações distribuídas por todo território brasileiro. As tendências foram estimadas por regressão linear e análise espectral singular. Nos séries temporais de coordenadas GNSS, não existem diferenças significativas entre as duas técnicas. Nos dados GRACE, a análise espectral singular tende a capturar inflexões, que podem estar relacionadas a mudanças temporárias no armazenamento de água.

As correlações foram avaliadas em relação a características geológicas de cada estação, bem como quanto à coerência espacial que apresentaram. No geral, foi possível estabelecer boa correspondência entre dados locais, GNSS e dados regionais, GRACE, observadas pelos agrupamentos de estações geograficamente próximas. No entanto, diferenças observadas em estações próximas podem ser atribuídas, em parte, a características geológicas e físicas de cada estação, como se pode observar na RH Paraguai.

As regiões hidrográficas utilizadas para fins de análise espacial das correlações se apresentaram como adequadas para agrupar as correlações obtidas. Isso significa que os estudos realizados em escala de região

hidrográfica podem aproveitar-se da combinação de resoluções dos dados GNSS e GRACE.

Além disso, as correlações sazonais entre os dados também permitem identificar regiões em que o comportamento da superfície à carga hidrológica é poroelástico ou elástico, como parte da RH São Francisco e a bacia do Tietê, respectivamente.

4.5 Referências

Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., *et al.*, 2022. Remote Sensing of Groundwater: Current Capabilities and Future Directions. *Water Resources Research*, 58(10), e2022WR032219. <https://doi.org/10.1029/2022WR032219>

Agência Nacional de Águas (Brasil), 2020. Report: Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil. Brasília: ANA

Agência Nacional De Águas (Brasil), 2015. Report: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. Brasília: ANA.

Almeida, Y.M., Marotta, G.S., Monico, J.F.G., Brassarote, G.O.N., França, G.S., 2024. Estimating and Analyzing the Stability of Brazilian GNSS Stations for Tectonic Studies. *Brazilian Journal of Geophysics*, ISSN 2764-8044, v42 n2, <http://dx.doi.org/10.22564/brjg.v42i2.2317>.

Amagua, C.G.P., Krueger, C.P., Criollo, A.R.T., 2018. Stochastic Model of the Brazilian GPS Network Coordinates Time Series. *Bulletin of Geodetic Sciences*, 24 (4): 545-563.

Argus, D. F., Landerer, F. W., Wiese, D. N., Martens, H. R., Fu, Y., Famiglietti, J. S., *et al.*, 2017. Sustained water loss in California's mountain ranges during severe drought from 2012 to 2015 inferred from GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(12), 10559–10585. <https://doi.org/10.1002/2017JB014424>

Argus, D. F., Y. Fu, and F. W. Landerer, 2014. Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical motion, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1971–1980, doi:10.1002/2014GL059570.

Berg, S. J., Illman, W. A., 2011. Capturing aquifer heterogeneity: Comparison of approaches through controlled sandbox experiments. *Water Resources Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1029/2011WR010429>

Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H., 2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília, DF: CPRM.

Boergens, E., Güntner, A., Sips, M., Schwatke, C., Dobsław, H., 2024. Interannual variations of terrestrial water storage in the East African Rift region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, 4733–4754, 2024 <https://doi.org/10.5194/hess-28-4733-2024>

Diniz, J.A.O., Bonfim, L.F.C., Freitas, M.A., 2014. Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: Sistema de Informações Geográficas -SIG. Recife: CPRM.

Famiglietti, J. The global groundwater crisis. *Nature Clim Change* 4, 945–948 (2014). <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>

Fassoni, A.C.A., Fleischmann, A.S., Papa, F., Paiva, R.C.D., Wongchuig, S., Melack, J. M., *et al.*, 2021. Amazon hydrology from space: Scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000728. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

Ferreira, L., Marotta, G.S., Madden, E.H., Horbe, A.M.C., Santos, R.V., Costa, J.M.N., 2021. Vertical displacement caused by hydrological influence in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020691. <https://doi.org/10.1029/2020JB020691>

Ferreira, V.G., Montecino, H.C., Ndehedehe, C.E., Heck, B., Gong, Z., Freitas, S.R.C., Westerhaus, M., 2018. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil, *Science of The Total Environment*, Volume 644, 2018, p256-273, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>.

Fu, Y., Argus, D. F., Landerer, F. W., 2015. GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 552–566. <https://doi.org/10.1002/2014JB011415>

Getirana, A., 2016. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *J Hydrometeorol* 17(2):591–599

Giordano, M., 2009. Global groundwater? Issues and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 153–178. <https://doi.org/10.1146/annurev.enviro.030308.100251>

Heki, K., Jin, S., 2023. Geodetic study on earth surface loading with GNSS and GRACE. *Satell Navig* 4, 24. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00113-6>

Jaramillo, F., Aminjafari, S., Castellazzi, P., Fleischmann, A., Fluet-Chouinard, E., Hashemi, H., *et al.*, 2024. The Potential of Hydrogeodesy to Address Water-Related and Sustainability Challenges, *Water Resources Research*, ISSN- 0043-1397 <https://doi.org/10.1029/2023WR037020>

Knappe, E., Bendick, R., Martens, H.R., Argus, D.F., Gardner, W P., 2019. Downscaling vertical GPS observations to derive watershed-scale hydrologic loading in the northern rockies. *Water Resources Research*, 55(1), 391–401. <https://doi.org/10.1029/2018WR023289>

Larochelle, S., Gualandi, A., Chanard, K., Avouac, J.P., 2018. Identification and extraction of seasonal geodetic signals due to surface load variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12), 2018JB016607. <https://doi.org/10.1029/2018JB016607>

Laske, G., Masters, G., Ma, Z., Pasyanos, M., 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-2658.

Lehmann, F., Vishwakarma, B. D., Bamber, J., 2022. How Well Are We Able to Close the Water Budget at the Global Scale?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 35–54, <https://doi.org/10.5194/hess-26-35-2022>, 2022.

Li, Z., Yue, J., Li, W., Lu, D., 2017. Investigating mass loading contributes of annual GPS observations for the Eurasian plate. *J. Geodyn.* 111, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2017.07.001>.

Lima, F.V.M.S., Gonçalves, R.M., Castro, H.D.M., Vila Nova, R.A. Assessment of hydrological mass losses in the northeast Atlantic eastern hydrographic region, Brazil. *Bulletin of Geodetic Sciences*. 26(3): e2020013, 2020.

Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B.R., 2015. Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites. *Water Resour. Res.* 51 (4), 2574–2594. <https://doi.org/10.1002/2014wr016853>.

Loomis, B.D., Luthcke, S.B. Sabaka, T.J., 2019. Regularization and error characterization of GRACE mascons. *J Geod* 93, 1381–1398. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y>

Milliner, C., Materna, K., Bürgmann, R., Fu, Y., Moore, A. W., Bekaert, D., *et al.*, 2018. Tracking the weight of Hurricane Harvey's stormwater using GPS data. *Science Advances*, 4(9), eaau2477. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2477>

Montecino, H.C., Staub, G., Ferreira, V.G., Parra, L.B., 2016. Monitoring Groundwater Storage in Northern Chile Based on Satellite Observations and Data Simulation. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, p. 1–15.

Nespoli, M., Cenni, N., Belardinelli, M. E., & Marcaccio, M., 2021. The interaction between displacements and water level changes due to natural and anthropogenic effects in the Po Plain (Italy): The different point of view of GNSS and piezometers. *Journal of Hydrology*, 596, 126112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126112>

Pfeffer, J., Cazenave, A., Barnoud, A., 2022. Analysis of the inter-annual variability in satellite gravity solutions: detection of climate modes fingerprints in water mass displacements across continents and oceans, *Clim. Dynam.*, 58, 1065–1084.

Pfeffer, J., Seyler, F., Bonnet, M.P., Calmant, S., Frappart, F., Papa, F., Paiva, R.C.D., Satgé, F., Silva, J.S.D., 2014. Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1981–1987, <https://doi.org/10.1002/2013GL059134>, 2014.

Qiu, K., You, W., Jiang, Z., Tang, M., 2024. Tracking the water storage and runoff variations in the Paraná basin via GNSS measurements, *Science of The Total Environment*, Volume 912, 168831, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168831>.

Ray, J.D., Vijayan, M.S.M., Godah, W., 2021. Seasonal horizontal deformations obtained using GPS and GRACE data: Case study of North-East India and Nepal Himalaya. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(1), 61–76. <https://doi.org/10.1007/s40328-020-00331-3>

Reager, J.T., Famiglietti, J.S., 2009. Global Terrestrial Water Storage Capacity and Flood Potential Using GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23402, <https://doi.org/10.1029/2009GL040826>, 2009.

Rocco, C.M.S., 2013. Singular spectrum analysis and forecasting of failure time series. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 114, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2013.01.007>.

Rodell, M., Famiglietti, J.S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Beau-doing, H.K., Landerer, F.W., Lo, M.-H., 2018. Emerging Trends in Global Freshwater Availability, *Nature*, 557, 651–659, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>.

Rowlands, D.D., Luthcke, S.B., Klosko, S.M., Lemoine, F.G.R., Chinn, D.S., McCarthy, J.J., Cox, C.M., Anderson, O.B., 2005. Resolving mass flux at high spatial and temporal resolution using GRACE intersatellite measurements. *Geophysical Research Letters*, v32, L04310, doi:10.1029/2004GL021908.

Sánchez L., 2022. SIRGAS Regional Network Associate Analysis Centre Technical Report 2021. IGS Technical Report, 129–141, <https://doi.org/10.48350/169536>

Schobbenhaus, C., Bellizia, A., 2001. Geological map of South America, 1:5000000. Brasilia: CGMW-CPRM-DNPM-UNESCO.

Sun, T., Ferreira, V., He, X., Andam-Akorful, S., 2016. Water availability of São Francisco River basin based on a space-borne geodetic sensor. *Water* 8, 213. <https://doi.org/10.3390/w8050213>.

Tapley B.D., Watkins M.M., Flechtner F., Reigber C., Bettadpur S., Rodell M., *et al.*, 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat Clim Chang* 9(5):358–369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C., 2004. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results: GRACE Mission Overview And Early Results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>, 2004

Tiwari, V.M.M., Srinivas, N., Singh, B., 2014. Hydrological changes and vertical crustal deformation in south India: inference from GRACE, GPS and absolute gravity data. *Phys. Earth Planet. Inter.* 231, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.03.002>.

Tregoning, P., Watson, C., Ramillien, G., McQueen, H., Zhang, G., 2009. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15401, doi:10.1029/2009GL038718.

Upton, J.C., Hammond, W.C., Blewitt, G., 2022. Understanding the Geodetic Signature of Large Aquifer Systems: Example of the Ozark Plateaus in Central United States. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3), e2021JB023097. <https://doi.org/10.1029/2021JB023097>

van Bussel, L.G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., *et al.*, 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>

Vautard, R., Ghil, M., 1989. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Phys. D: Nonlinear Phenom.* 35, 395–424.

Williams, S.D.P., 2008. CATS: GPS coordinate time series analysis software. *GPS Solutions*, 2, pp. 147–153. doi: 10.1007/s10291-007-0086-4.

Young, Z.M., Martens, H.R., Hoylman, Z.H., Gardner, W.P., 2024. Drought characterization with GPS: Insights into groundwater and surface-reservoir storage in California. *Water Resources Research*, 60, e2024WR037404. <https://doi.org/10.1029/2024WR037404>

Zhang, L., Tang, H., Sun, W., 2021. Comparison of GRACE and GNSS Seasonal Load Displacements Considering Regional Averages and Discrete Points. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 126(8), e2021JB021775.

Zhu, H., Chen., K., Hu, S., Liu, J., Shi, H., Wei, G., Chai, H., Li, J., Wang, T., 2023. Using the Global Navigation Satellite System and Precipitation Data to Establish the Propagation Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought in Yunnan, China. *Water Resources Research*, v59 ISSN0043-1397 <https://doi.org/10.1029/2022WR033126>

5. Conclusões e Considerações Finais

A análise de séries temporais de coordenadas tridimensionais determinadas com GNSS em todo o Brasil revelou uma presença significativa de ruído *random walk* em algumas estações, detectada por meio da análise de magnitude de ruído e do índice espectral. A localização e o tipo de monumentação das estações geodésicas demonstraram que fatores locais, tanto conhecidos quanto desconhecidos, influenciam a estabilidade das estações, o que dificulta a modelagem completa dos dados.

Para aprimorar a qualidade dos estudos tectônicos e geodinâmicos, recomenda-se a adoção de uma estratégia quantitativa para caracterizar e eliminar as estações consideradas instáveis. Em relação às estações com instabilidade na monumentação, a maioria está localizada em áreas costeiras ou nas proximidades de grandes cursos d'água. Fatores como flutuações no nível da água, presença de sedimentos inconsolidados e efeitos de pressão atmosférica locais podem contribuir para essa instabilidade.

Além disso, as estações com menos de 9 anos de observação podem, também, estar sujeitas ao ruído *random walk*, mas essa influência não é adequadamente caracterizada devido à curta duração das séries temporais. Portanto, sugere-se que apenas estações com mais de 9 anos de dados sejam utilizadas em aplicações tectônicas.

Também foram estimadas correlações sazonais e de tendência entre séries temporais GNSS e dados de variação do armazenamento total de água estimado pelo GRACE. Essas correlações foram avaliadas em função das características geológicas de cada estação e das coerências espaciais observadas.

As tendências das séries temporais foram estimadas por regressão linear e análise espectral singular. Os resultados mostram que não há diferenças significativas entre as tendências obtidas pelas duas técnicas nas séries temporais de coordenadas GNSS. No entanto, nas séries temporais de variação de armazenamento de água proveniente do GRACE, a análise espectral singular apresentou, em alguns casos, inflexões que podem representar mudanças no armazenamento de água.

Existem boas correspondências espaciais quando se observam as correlações dos dados. A compartimentação do território brasileiro em regiões hidrográficas possibilita uma análise inicial do comportamento das correlações entre GNSS e GRACE, que pode ser melhorada conforme se distinguem as características geológicas dentro dessas regiões, como se apresentou nas regiões hidrográficas do Paraguai e Paraná. Essa caracterização geológica apresenta maior influência nos dados GNSS, uma vez que estes são locais, enquanto os dados GRACE são regionais.

Portanto, considerar os fatores analisados neste estudo e outros fatores pode contribuir para a integração de dados geodésicos provenientes de diferentes fontes.

Além disso, as correlações sazonais também possibilitam uma melhor compreensão da resposta da superfície à carga hidrológica, sendo possível distinguir regiões com comportamento poroelástico, onde a influência do sistema aquífero nos deslocamentos observados é significativa, como na porção central da RH São Francisco.

Por fim, sugere-se que em estudos futuros envolvendo esses temas, as análises aqui realizadas possam ser consideradas em associação com novas abordagens, na tentativa de elucidar os fatores não modelados ou não caracterizados que também influenciam as séries temporais GNSS. Levantamentos geofísicos gravimétricos ou sísmicos podem ser utilizados, por exemplo, para inferir a densidade das rochas e, nesse caso, substituir a classificação qualitativa das rochas por um critério quantitativo, o que pode trazer uma nova perspectiva sobre a influência das propriedades físicas das rochas na hidrogeodésia.

6. Referências

- Adams, K. H., Reager, J. T., Rosen, P., Wiese, D. N., Farr, T. G., Rao, S., *et al.*, 2022. Remote Sensing of Groundwater: Current Capabilities and Future Directions. *Water Resources Research*, 58(10). <https://doi.org/10.1029/2022WR032219>.
- Agência Nacional de Águas (Brasil), 2020. Report: Bacias e Divisões Hidrográficas do Brasil. Brasília: ANA
- Agência Nacional De Águas (Brasil), 2015. Report: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. Brasília: ANA.
- Agnew, D., 1992. The time domain behavior of power law noises, *Geophys. Res. Lett.*, 19, 333– 336.
- Agurto-Detzel, H., Assumpcao, M., Ciardelli, C., Albuquerque, D.F., Barros, L.V., Franca, G.S.L., 2014. The 2012 e 2013 Montes Claros earthquake series in the Sao Francisco Craton, Brazil: new evidence for non-uniform intraplate stresses in mid-plate South America. *Geophys. J. Int.* 200 (1), 216 e 226. <http://dx.doi.org/10.1093/gji/ggu333>.
- Almeida, Y.M., Marotta, G.S., Monico, J.F.G., Brassarote, G.O.N., França, G.S., 2024. Estimating and Analyzing the Stability of Brazilian GNSS Stations for Tectonic Studies. *Brazilian Journal of Geophysics*, ISSN 2764-8044, v42 n2, <http://dx.doi.org/10.22564/brjg.v42i2.2317>.
- Amagua, C.G.P., Krueger, C.P., Criollo, A.R.T., 2018. Stochastic Model of the Brazilian GPS Network Coordinates Time Series. *Bulletin of Geodetic Sciences*, Vol. 24 (4): 545-563.
- Amiri-Simkooei, A. R., Tiberius, C. C. J. M., Teunissen, P. J. G., 2007. Assessment of noise in GPS coordinate time series: Methodology and results. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, B07413, doi:10.1029/2006JB004913.
- Argus, D. F., Landerer, F. W., Wiese, D. N., Martens, H. R., Fu, Y., Famiglietti, J. S., *et al.*, 2017. Sustained water loss in California's mountain ranges during severe drought from 2012 to 2015 inferred from GPS. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(12), 10559–10585. <https://doi.org/10.1002/2017JB014424>
- Argus, D.F., Fu, Y.N., Landerer, F.W., 2014. Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion. *Geophys. Res. Lett.* 41, 1971–1980. <https://doi.org/10.1002/2014GL059570>.
- Assumpção, M., Dias, F.L., Zevallos, I., Naliboff, J.B., 2016. Intraplate stress field in South America from earthquake focal mechanisms. *Journal of South American Earth Sciences*, v71 p278-295, ISSN 0895-9811, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005>.
- Assumpção, M. S. de, Lopes, A. E., Barros, L. V., Chimpliganond, C. N., Barbosa, J. R., 2008. Intraplate stress patterns in Brazil with recent focal mechanism studies:

predominance of mid-continent compressional stresses and flexural effects at the continental margin. In: Eos Transactions AGU, v. 89, n.23, Joint Assembly Supplement, abstract S34A-03, 2008. Washington: American Geophysical Union.

Assumpção, M., Schimmel, M., Escalante, C., Barbosa, J.R., Rocha, M., Barros, L.V., 2004. Intraplate seismicity in SE Brazil: stress concentration in lithospheric thin spots. *Geophys. J. Int.* 159, 390–399. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02357.x>.

Assumpção, M., 1998. Seismicity and stresses in the Brazilian passive margin. *Bull. Seism. Soc. Am.* 88 (1), 160e169.

Barros, L.V., Assumpção, M., Quinteros, R., Caixeta, D., 2009. The intraplate Porto dos Gaúchos seismic zone in the Amazon craton d Brazil. *Tectonophysics* 469 (1e4), 37e47. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.006>.

Bawden, G.W., Thatcher, W., Stein, R.S., Hudnut, K.W., Peltzer, G., 2001. Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects, *Nature*, 412, 812– 815.

Berg, S. J., Illman, W. A., 2011. Capturing aquifer heterogeneity: Comparison of approaches through controlled sandbox experiments. *Water Resources Research*, 47(9). <https://doi.org/10.1029/2011WR010429>

Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R.M., Gonçalves, J.H., 2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília, DF: CPRM.

Blewitt, G., and D. Lavalley (2002), Effect of annual signals on geodetic velocity, *J. Geophys. Res.*, 107(B7), 2145, doi:10.1029/2001JB000570.

Blöschl, G., Bierkens, M. F. P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., *et al.* (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology(UPH) – A community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>

Bock, Y., *et al.*, 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Continuous measurements of the regional crustal deformation between the 1992 Landers and 1994 Northridge earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 102, 18,013– 18,033.

Boergens, E., Güntner, A., Sips, M., Schwatke, C., Dobsław, H., 2024. Interannual variations of terrestrial water storage in the East African Rift region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 28, 4733–4754, 2024 <https://doi.org/10.5194/hess-28-4733-2024>

Borsa, A. A., Agnew, D. C., Cayan, D. R., 2014. Ongoing drought-induced uplift in the Western United States. *Science*, 345(6204), 1587–1590. <https://doi.org/10.1126/science.1260279>

Calais, E., J. Y. Han, C. DeMets, J. M. Nocquet, 2006. Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 111, B06402, doi:10.1029/2005JB004253.

Cenni, N., Mantovania, E., Baldib, P., Vitia, M., 2012. Present kinematics of Central and Northern Italy from continuous GPS measurements. *Journal of Geodynamics* 58, 62–72. doi: 10.1016/j.jog.2012.02.004.

Chimpliganond, C.N., Assumpção, M., von Huelsen, M.G., França, G.S., 2010. The intracratonic Caraíbas-Itacarambi earthquake of December 09, 2007 (4.9 mb), Minas Gerais state, Brazil. *Tectonophysics* 480, 48e56.

Costa, S.M.A., Matos, A.C.O.C., Blitzkow, D., 2012. Validation of the Land Water Storage from Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) with Gauge in the Amazon Basin. *Bol. Ciên. Geod*, vol18 nº2, p262-281.

Diniz, J.A.O., Bonfim, L.F.C., Freitas, M.A., 2014. Mapa hidrogeológico do Brasil ao milionésimo: Sistema de Informações Geográficas -SIG. Recife: CPRM.

Dmitrieva, K., Segall, P. Bradley, A.M., 2016. Effects of linear trends on estimation of noise in GNSS position time-series. *Geophysical Journal International*, 208, 281-288. doi: 10.1093/gji/ggw391

Dong, D., P. Fang, Y. Bock, M. K. Cheng, S. Miyazaki, 2002. Anatomy of apparent seasonal variations from GPS-derived site position time series, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), 2075, doi:10.1029/2001JB000573.

Famiglietti, J. The global groundwater crisis. *Nature Clim Change* 4, 945–948 (2014). <https://doi.org/10.1038/nclimate2425>

Farolfi, G., Ventisette, C., 2015. Contemporary crustal velocity field in Alpine Mediterranean area of Italy from new geodetic data. *GPS Solution*. doi: 10.1007/s10291-015-0481-1.

Fassoni, A.C.A., Fleischmann, A.S., Papa, F., Paiva, R.C.D., Wongchuig, S, Melack, J. M., *et al.*, 2021. Amazon hydrology from space: Scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics*, 59, e2020RG000728. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>

Ferreira, L., Marotta, G.S., Madden, E.H., Horbe, A.M.C., Santos, R.V., Costa, J.M.N., 2021. Vertical displacement caused by hydrological influence in the Amazon Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020691. <https://doi.org/10.1029/2020JB020691>

Ferreira, V.G., Ndehedehe, C.E., Montecino, H.C., Yong, B., Yuan, P., Abdalla, A., Mohammed, A.S., 2019. Prospects for Imaging Terrestrial Water Storage in South America Using Daily GPS Observations. *Remote Sens.*, 11, 679. <https://doi.org/10.3390/rs11060679>

Ferreira, V.G., Montecino, H.C., Ndehedehe, C.E., Heck, B., Gong, Z., Freitas, S.R.C., Westerhaus, M., 2018. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil, *Science of The Total Environment*, Volume 644, 2018, p256-273, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>.

Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Nascimento, A.F., S_a, J.M., França, G.S., 2008. The role of Precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the

coseismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics* 456, 111e126.

Fu, Y., Argus, D. F., Landerer, F. W., 2015. GPS as an independent measurement to estimate terrestrial water storage variations in Washington and Oregon. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(1), 552–566. <https://doi.org/10.1002/2014JB011415>

Galloway, D.; Jones, D.R., 1999. Land Subsidence in the United States; Technical Report Circular 1182; U.S. Geological Survey: Reston, VA, USA.

Gardner, M., 1978. Mathematical games: White and brown music, fractal curves and one-over-fluctuations, *Sci. Am.*, 238(4), 16–32.

Getirana, A., 2016. Extreme water deficit in Brazil detected from space. *J Hydrometeorol* 17(2):591–599

Giordano, M., 2009. Global groundwater? Issues and solutions. *Annual Review of Environment and Resources*, 34(1), 153–178. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.030308.100251>

Heki, K., Jin, S., 2023. Geodetic study on earth surface loading with GNSS and GRACE. *Satell Navig* 4, 24. <https://doi.org/10.1186/s43020-023-00113-6>

IBGE, 2013. Orientações para instalação de Estações de Monitoramento Contínuo GNSS compatíveis com a RBMC. 2ª edição. ISSN 0103-9598.

IBGE, 2023. RBMC – Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS. 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> >

Jaramillo, F., Aminjafari, S., Castellazzi, P., Fleischmann, A., Fluet-Chouinard, E., Hashemi, H., *et al.*, 2024. The Potential of Hydrogeodesy to Address Water-Related and Sustainability Challenges, *Water Resources Research*, ISSN- 0043-1397 <https://doi.org/10.1029/2023WR037020>

Johnson, H., Agnew, D.C., 1995. Monument motion and measurements of crustal velocities, *Geophys. Res. Lett.*, 22, 2905– 2908.

Kedar, S., Hajj, G.A., Wilson, B.D., Heflin, M.B., 2003. The effect of the second order GPS ionospheric correction on receiver positions, *Geophys. Res. Lett.*, 30(16), 1829, doi:10.1029/2003GL017639.

Kierulf, H.P., Steffen, H., Barletta, V.R., Lidberg, M., Johansson, J., Kristiansen, O., Tarasov, L., 2021. A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia, *Journal of Geodynamics*, v146, <https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101845>.

Knappe, E., Bendick, R., Martens, H.R., Argus, D.F., Gardner, W P., 2019. Downscaling vertical GPS observations to derive watershed-scale hydrologic loading in the northern

rockies. *Water Resources Research*, 55(1), 391–401.
<https://doi.org/10.1029/2018WR023289>

Kreemer, C., Young, Z. M., 2022. Crustal Strain Rates in the Western United States and Their Relationship with Earthquake Rates, *Seismol. Res. Lett.* 93, 2990–3008, doi: 10.1785/0220220153.

Langbein, J., Johnson, H., 1997. Correlated errors in geodetic time series: Implications for time-dependent deformation, *J. Geophys. Res.*, 102, 591–603.

Langbein, J., 2004. Noise in two-color electronic distance meter measurements revisited. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*. doi: 10.1029/2003JB002819.

Larochelle, S., Gualandi, A., Chanard, K., Avouac, J.P., 2018. Identification and extraction of seasonal geodetic signals due to surface load variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12), 2018JB016607. <https://doi.org/10.1029/2018JB016607>

Laske, G., Masters, G., Ma, Z., Pasyanos, M., 2013. Update on CRUST1.0—A 1-degree Global Model of Earth's Crust. *Geophysical Research Abstracts*, 15, EGU2013-2658.

Lehmann, F., Vishwakarma, B. D., Bamber, J., 2022. How Well Are We Able to Close the Water Budget at the Global Scale?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 35–54, <https://doi.org/10.5194/hess-26-35-2022>, 2022.

Li, Z., Yue, J., Li, W., Lu, D., 2017. Investigating mass loading contributes of annual GPS observations for the Eurasian plate. *J. Geodyn.* 111, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.jgeodyn.2017.04.001>.

Lima, F.V.M.S., Gonçalves, R.M., Castro, H.D.M., Vila Nova, R.A. Assessment of hydrological mass losses in the northeast Atlantic eastern hydrographic region, Brazil. *Bulletin of Geodetic Sciences*. 26(3): e2020013, 2020.

Lima, C.C., 2000. Ongoing compression across intraplate South America: observations and some implications for petroleum exploitation and exploration. *Revista Brasileira de Geociências*, 30 (1), 203e207.

Long, D., Longuevergne, L., Scanlon, B.R., 2015. Global analysis of approaches for deriving total water storage changes from GRACE satellites. *Water Resour. Res.* 51 (4), 2574–2594. <https://doi.org/10.1002/2014wr016853>.

Loomis, B.D., Luthcke, S.B. Sabaka, T.J., 2019. Regularization and error characterization of GRACE mascons. *J Geod* 93, 1381–1398. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01252-y>

Machado, W.C., Aguiar, C.R., 2016. Impacto da densificação da RBMC entre 2012 e 2014 sobre a capacidade de monitoramento do TEC, *Revista Brasileira de Cartografia* N68/1: 211-221

Mandelbrot, B., 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. W. H. Freeman and Company, New York.

Mao, A., Harrison, C.G.A., Dixon, T.H., 1999. Noise in GPS coordinate time series, *J. Geophys. Res.*, 104, 2797– 2816.

Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Fuck, R.A., 2013a. Strains arising by seismic events in the SIRGAS-CON network region. *J. Geod. Sci.* 3 (1), 12e21.

Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Fuck, R.A., Araújo-Filho, J.O.d., 2013b. Strain rate of the South American lithospheric plate by SIRGAS-CON geodetic observations. *J. S. Am. Earth Sci.* 47, 136–141. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2013.07.004>.

Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Bezerra, F.H.R., Fuck, R.A., 2015. Strain rates estimated by geodetic observations in the Borborema Province, Brazil. *J. S. Am. Earth Sci.*, 58, pp. 1-8

Milliner, C., Materna, K., Bürgmann, R., Fu, Y., Moore, A. W., Bekaert, D., *et al.*, 2018. Tracking the weight of Hurricane Harvey's stormwater using GPS data. *Science Advances*, 4(9), eaau2477. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aau2477>

Monico, J. F. G., 2008. Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações, Ed. UNESP, São Paulo, 2ª ed., 480p

Montecino, H.C., Staub, G., Ferreira, V.G., Parra, L.B., 2016. Monitoring Groundwater Storage in Northern Chile Based on Satellite Observations and Data Simulation. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, p. 1–15.

Moreira, R.J.S., 2013. Análise das Características de Ruído em Séries Temporais GPS (Mestrado em Engenharia Geográfica), Faculdade de Ciências, Universidade de Lisboa

Nespoli, M., Cenni, N., Belardinelli, M. E., & Marcaccio, M., 2021. The interaction between displacements and water level changes due to natural and anthropogenic effects in the Po Plain (Italy): The different point of view of GNSS and piezometers. *Journal of Hydrology*, 596, 126112. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126112>

Nikolaidis, R., 2002. Observation of geodetic and seismic deformation with the Global Positioning System. Ph.D. thesis, University of California, San Diego, 305p.

Norabuena, E., Leffler-Griffin, L., Mao, A., Dixon, T., Stein, S., Sacks, I.S., Ocola, L., Ellis, M., 1998. Space geodetic observations of Nazca-South America convergence across the Central Andes. *Science*, 229 (358).

Pelletier, J.D., Broxton, P.D., Hazenberg, P., Zeng, X., Troch, P.A., Niu, G., Williams, Z.C., Brunke, M.A., Gochis, D., 2016. Global 1-km Gridded Thickness of Soil, Regolith, and Sedimentary Deposit Layers. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1304>

Pfeffer, J., Seyler, F., Bonnet, M.P., Calmant, S., Frappart, F., Papa, F., Paiva, R.C.D., Satgé, F., Silva, J.S.D., 2014. Low-water maps of the groundwater table in the central Amazon by satellite altimetry, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 1981–1987, <https://doi.org/10.1002/2013GL059134>, 2014.

Pfeffer, J., Cazenave, A., Barnoud, A., 2022. Analysis of the inter-annual variability in satellite gravity solutions: detection of climate modes fingerprints in water mass displacements across continents and oceans, *Clim. Dynam.*, 58, 1065–1084.

- Qiu, K., You, W., Jiang, Z., Tang, M., 2024. Tracking the water storage and runoff variations in the Paraná basin via GNSS measurements, *Science of The Total Environment*, Volume 912, 168831, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168831>.
- Ramos, M.P., Poz, W.R.D., Carvvalho, A.S., 2022. Propagação de Incertezas no Processo de Compatibilização de Referenciais e Época de Coordenadas GNSS. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.74, n. 2, p. 305–321, 2022. DOI: 10.14393/rbcv74n2- 64767.
- Ray, J.D., Vijayan, M.S.M., Godah, W., 2021. Seasonal horizontal deformations obtained using GPS and GRACE data: Case study of North-East India and Nepal Himalaya. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 56(1), 61–76. <https://doi.org/10.1007/s40328-020-00331-3>
- Reager, J.T., Famiglietti, J.S., 2009. Global Terrestrial Water Storage Capacity and Flood Potential Using GRACE, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L23402, <https://doi.org/10.1029/2009GL040826>, 2009.
- Rocco, C.M.S., 2013. Singular spectrum analysis and forecasting of failure time series. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 114, 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.res.2013.01.007>.
- Rocha, M.P., Azevedo, P.A., Marotta, G.S., Schimmel, M., Fuck, R.A. 2016. Causes of intraplate seismicity in central Brazil from travel time seismic tomography. *Tectonophysics*, v. 680, p1-7, ISSN 0040-1951, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.05.005>.
- Rodell, M., Famiglietti, J.S., Wiese, D.N., Reager, J.T., Beau-doing, H.K., Landerer, F.W., Lo, M.-H., 2018. Emerging Trends in Global Freshwater Availability, *Nature*, 557, 651–659, <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0123-1>.
- Rosner, B., 1983. Percentage Points for a Generalized ESD Many-Outlier Procedure, *Technometrics*, 25(2), pp. 165-172.
- Rowlands, D.D., Luthcke, S.B., Klosko, S.M., Lemoine, F.G.R., Chinn, D.S., McCarthy, J.J., Cox, C.M., Anderson, O.B., 2005. Resolving mass flux at high spatial and temporal resolution using GRACE intersatellite measurements. *Geophysical Research Letters*, v32, L04310, doi:10.1029/2004GL021908.
- Sánchez L., 2022. SIRGAS Regional Network Associate Analysis Centre Technical Report 2021. IGS Technical Report, 129–141, <https://doi.org/10.48350/169536>
- Santos, H.G., 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018. 356 p.
- Schobbenhaus, C., Bellizia, A., 2001. Geological map of South America, 1:5000000. Brasília: CGMW-CPRM-DNPM-UNESCO.
- Sun, T., Ferreira, V., He, X., Andam-Akorful, S., 2016. Water availability of São Francisco River basin based on a space-borne geodetic sensor. *Water* 8, 213. <https://doi.org/10.3390/w8050213>.

Tapley B.D., Watkins M.M., Flechtner F., Reigber C., Bettadpur S., Rodell M., *et al.*, 2019. Contributions of GRACE to understanding climate change. *Nat Clim Chang* 9(5):358–369. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0456-2>

Tapley, B.D., Bettadpur, S., Watkins, M., Reigber, C., 2004. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission Overview and Early Results: GRACE Mission Overview And Early Results, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L09607, <https://doi.org/10.1029/2004GL019920>, 2004

Tiwari, V.M.M., Srinivas, N., Singh, B., 2014. Hydrological changes and vertical crustal deformation in south India: inference from GRACE, GPS and absolute gravity data. *Phys. Earth Planet. Inter.* 231, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.03.002>.

Tregoning, P., Watson, C., Ramillien, G., McQueen, H., Zhang., G., 2009. Detecting hydrologic deformation using GRACE and GPS, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L15401, doi:10.1029/2009GL038718.

Uieda, L., Barbosa, V.C.F., 2016. Fast nonlinear gravity inversion in spherical coordinates with application to the South American Moho. *Geophysical Journal International*, v208, pp162-176 <https://doi.org/10.1093/gji/ggw390>

Upton, J.C., Hammond, W.C., Blewitt, G., 2022. Understanding the Geodetic Signature of Large Aquifer Systems: Example of the Ozark Plateaus in Central United States. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 127(3), e2021JB023097. <https://doi.org/10.1029/2021JB023097>

van Bussel, L.G., Grassini, P., Van Wart, J., Wolf, J., Claessens, L., Yang, H., *et al.*, 2015. From field to atlas: Upscaling of location-specific yield gap estimates. *Field Crops Research*, 177, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.03.005>

Vautard, R., Ghil, M., 1989. Singular spectrum analysis in nonlinear dynamics, with applications to paleoclimatic time series. *Phys. D: Nonlinear Phenom.* 35, 395–424.

Watson, K. M., Bock, Y., Sandwell, D.T., 2001. Satellite interferometric observations of displacements associated with seasonal ground water in the Los Angeles basin, *J. Geophys. Res.*, 107(B4), doi:10.1029/2001JB000470.

Williams, S.D.P., Bock, Y., Fang, P., Jamason, P., Nikolaidis, R.M., Prawirodirdjo, L., Miller, M., Johnson, D.J., 2004. Error analysis of continuous GPS position time series, *J. Geophys. Res.*, 109, B03412, doi:10.1029/2003JB002741.

Williams, S.D.P., 2008. CATS: GPS coordinate time series analysis software. *GPS Solutions*, 2, pp. 147–153. doi: 10.1007/s10291-007-0086-4.

Wyatt, F. K., 1989. Displacements of surface monuments: Vertical motion. *J. Geophys. Res.*, 94, 1655– 1664.

Young, Z.M., Martens, H.R., Hoylman, Z.H., Gardner, W.P., 2024. Drought characterization with GPS: Insights into groundwater and surface-reservoir storage in California. *Water Resources Research*, 60, e2024WR037404. <https://doi.org/10.1029/2024WR037404>

Zhang, L., Tang, H., Sun, W., 2021. Comparison of GRACE and GNSS Seasonal Load Displacements Considering Regional Averages and Discrete Points. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 126(8), e2021JB021775.

Zhang, J., Bock, Y., Johnson, H., Fang, P., Williams, S., Genrich, J., Wdowinski, S., Behr, J., 1997. Southern California Permanent GPS Geodetic Array: Error analysis of daily position estimates and site velocities, *J. Geophys. Res.*, 102(B8), 18,035–18,055

Zhu, H., Chen., K., Hu, S., Liu, J., Shi, H., Wei, G., Chai, H., Li, J., Wang, T., 2023. Using the Global Navigation Satellite System and Precipitation Data to Establish the Propagation Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought in Yunnan, China. *Water Resources Research*, v59 ISSN0043-1397 <https://doi.org/10.1029/2022WR033126>

7. Anexos

7.1 Estações GNSS utilizadas no artigo “Estimativa e Análise de Estações GNSS Brasileiras para Estudos Tectônicos”

Estação	Longitude	Latitude	Altitude	Monumentação	Província
ALAR	-49.2547	-30.074	76.76038	Pilar de concreto em laje de edifício	Tocantins
ALMA	-49.1436	-29.7894	117.1842	Pilar de concreto em laje de edifício	Tocantins
AMCO	-49.0491	-21.1847	410.3412	Pilar em coluna estrutural de edifício	Tocantins
AMCR	-45.1732	-22.6871	617.4191	Pilar em base de concreto no solo	São Francisco
AMHA	-54.9304	-18.8556	178.5872	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
AMTE	-37.3255	-22.1199	431.0518	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
AMUA	-67.8028	-23.022	381.6689	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
APLJ	-47.925	-4.08582	42.38395	Pilar em base de concreto no solo	Mantiqueira
APMA	-48.4414	-6.13177	224.2722	Pilar em base de concreto no solo	Parnaíba
APS1	-40.2887	-7.13628	49.03881	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
BABJ	-64.7067	-8.70934	119.5908	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
BABR	-48.6557	-27.7928	940.7601	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
BAIL	-51.7261	-25.384	1043.182	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
BAIT	-45.8617	-16.6875	132.2053	Pilar em base de concreto no solo	Mantiqueira
BAPA	-42.793	-23.2071	605.0562	Pilar de concreto em laje de edifício	Parnaíba
BATF	-35.2077	-24.9628	777.2909	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
BAVC	-43.0412	-17.884	390.5523	Pilar em base de concreto no solo	Parnaíba
BELE	-40.3375	-21.7649	10.0053	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
BEPa	-38.4255	-18.7135	73.4368	Tripé de metal em laje de edifício	Borborema
BOAV	-40.3777	-22.1941	478.5897	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
BRAZ	-43.8583	-7.53381	226.8862	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
BRFT	-35.7771	-0.822	36.00393	Pilar em base de concreto no solo	Borborema
CEEU	-51.1665	-3.87755	21.7435	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
CEFE	-47.0627	-28.2281	710.6885	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
CEFT	-36.6534	-3.09184	27.46131	Pilar em cumeeira	Borborema
CESB	-42.7028	-25.0202	6.08059	Pilar em base de concreto no solo	São Francisco
CHPI	-49.8433	-21.6652	463.2646	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
CRUZ	-41.3262	-15.5538	627.6257	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
CUIB	-51.3434	-27.1376	744.2963	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
EACH	-51.5543	-15.9475	1106.022	Torre metálica em laje de edifício	Paraná
EESC	-40.5061	-15.2283	267.6304	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
ESNV	-43.3726	-5.49177	105.0513	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
GOGY	-47.4168	-12.5452	391.6593	Pilar em base de concreto no solo	Paraná

GOJA	-34.9504	-9.55471	84.80881	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
GOUR	-56.1743	-21.5426	957.2071	Pilar em base de concreto no solo	Tocantins
GVA1	-44.2125	-6.78813	109.4786	Pilar em base de concreto no solo	Parnaíba
IFSC	-43.7669	-29.7189	113.1354	Pilar em base de concreto no solo	São Francisco
ILHA	-48.3307	-21.4616	368.975	Pilar de concreto em laje de edifício	Parnaíba
IMBT	-48.5195	-12.9752	-2.11417	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
IMPZ	-55.7274	-7.51675	69.78445	Pino em coluna estrutural de edifício	Amazonas Sul
JAMG	-42.87	-3.87745	21.67925	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
MABA	-60.055	-4.87199	75.88936	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
MABB	-54.1921	-19.2099	1123.481	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
MABS	-38.2068	-23.8061	475.2938	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
MGBH	-47.8779	-20.3108	14.36852	Pilar em coluna estrutural de edifício	Tocantins
MGIN	-37.632	-0.14385	94.93243	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
MGJF	-57.6908	-12.9392	76.37893	Pilar em base de concreto no solo	Tocantins
MGMC	-51.0393	-10.4302	443.6095	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
MGMT	-72.6721	-26.3938	17.27576	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
MGRP	-63.8963	-20.4278	375.047	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
MGTO	-52.3906	-5.36238	79.87838	Pilar em coluna estrutural de edifício	Paraná
MGUB	-52.9521	-21.2411	570.1578	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
MGV1	-37.1043	-16.1305	147.293	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
MSAQ	-38.2155	-7.76411	533.009	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
MSBL	-53.7166	-22.9256	893.7129	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
MSDR	-50.2287	-22.3186	883.7737	Torre metálica em laje de edifício	Paraná
MSJR	-53.3207	-21.6182	361.9467	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
MSMJ	-52.4176	-1.46081	-17.8006	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
MSNV	-54.2825	-14.5092	516.9042	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
MSPM	-39.7433	-8.0588	12.24932	Pilar em cumeeira	Mantiqueira
MTCA	-48.4626	-5.83614	45.99346	Pilar de concreto em laje de edifício	Parnaíba
MTCN	-38.5165	-22.0049	824.5582	Pilar em base de concreto no solo	São Francisco
MTJI	-46.5345	-23.4815	744.2528	Pilar em base de concreto no solo	Tocantins
MTLA	-52.5995	-9.03069	366.8274	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
MTLE	-38.4729	-21.7768	921.3377	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
MTNX	-56.5309	-14.8883	875.2439	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
MTSC	-34.8734	-4.28766	9.19473	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
MTSR	-51.0971	-9.39015	245.1488	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
NAUS	-43.5471	-3.71081	4.91441	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
NEIA	-63.0284	-2.42797	24.11185	Pilar de concreto no interior de edifício	Amazonas Norte
ONRJ	-55.6712	-12.5213	267.506	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
PAAR	-56.0699	-27.5994	17.01843	Pilar de concreto em laje de edifício	Tocantins

PAIT	-63.1422	-3.21168	94.17051	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
PASM	-44.9949	-3.68127	56.821	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
PBCG	-47.4972	-20.7855	535.9119	Pilar de concreto em laje de edifício	Parnaíba
PBJP	-56.159	-19.9419	974.925	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
PEAF	-39.1724	-7.21368	534.1706	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
PEPE	-46.1326	-10.1711	256.6079	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
PERC	-52.5156	-10.8639	182.9602	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
PICR	-58.7236	-15.5553	237.4615	Pilar em coluna estrutural de edifício	Amazonas Sul
PIFL	-65.334	-3.02292	93.94093	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
PISR	-67.0578	-4.24096	6.6079	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
PITN	-59.3505	-16.6647	734.1895	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Sul
POAL	-38.4323	-2.59346	19.04552	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
POLI	-49.36	-14.6975	299.0243	Torre metálica no solo	Paraná
POVE	-35.9071	-7.61116	236.087	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
PPTE	-60.7011	-10.9296	1.614	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
PRCV	-46.7303	-25.4484	925.8614	Torre metálica no solo	Mantiqueira
PRGU	-46.328	-1.4088	9.08045	Pilar em coluna estrutural de edifício	Tocantins
PRUR	-47.5238	-5.10248	67.9952	Pilar de concreto em laje de edifício	Tocantins
RIOB	-54.7289	2.845183	69.56454	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
RJCG	-48.2561	-12.15	443.0565	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
RNMO	-48.7374	-15.3627	475.2373	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
RNNA	-48.2867	-9.74922	266.2863	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
RNPF	-60.0182	-9.96546	172.6744	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
ROJI	-47.3866	-11.7467	272.6276	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
ROSA	-52.2128	0.047037	-11.1419	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Norte
RSAL	-40.8027	-5.20423	23.48733	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
RSCL	-44.8157	-22.8163	622.9742	Pilar em base de concreto no solo	Parnaíba
RSPE	-49.231	-23.5556	730.7007	Pilar em base de concreto no solo	Mantiqueira
RSPF	-55.138	-16.7164	618.2121	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
SAGA	-49.1223	-22.8525	803.0919	Pilar em base de concreto no solo	Parnaíba
SALU	-51.4876	-21.4984	289.7946	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
SAVO	-45.1189	-20.2629	496.1072	Pilar em base de concreto no solo	Mantiqueira
SCAQ	-44.9852	-31.8024	37.07909	Pilar em base de concreto no solo	Mantiqueira
SCCA	-45.435	-14.7966	44.68378	Pilar de concreto em laje de edifício	Tocantins
SCCH	-57.884	-9.38442	369.1468	Pilar em base de concreto no solo	Tocantins
SCFL	-52.3492	-18.7241	912.4958	Pilar em base de concreto no solo	Tocantins
SCLA	-41.9576	-28.1419	280.9033	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco

SEAJ	-47.8992	-18.9192	869.3021	Torre metálica em laje de edifício	Paraná
SJRP	-46.0397	-20.5106	1030.965	Pilar de concreto em laje de edifício	Parnaíba
SJSP	-46.4997	-17.8833	755.37	Pilar em coluna estrutural de edifício	Mantiqueira
SMAR	-50.4398	-13.5558	423.2163	Torre metálica em laje de edifício	Paraná
SPAR	-61.9597	-22.5233	299.7118	Pilar de concreto em laje de edifício	Amazonas Sul
SPBO	-41.4985	-13.2615	428.3443	Pilar em base de concreto no solo	Mantiqueira
SPBP	-48.5421	-26.7797	969.1579	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
SPC1	-48.4323	-11.4487	328.2981	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
SPDR	-55.7688	-22.9992	507.9212	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
SPFE	-56.0364	-0.05951	-12.6956	Pilar em base de concreto no solo	Amazonas Norte
SPFR	-53.4663	-22.1069	207.7612	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
SPJA	-38.4255	-27.5944	26.47054	Pilar de concreto em laje de edifício	Borborema
SPLI	-54.7548	-23.4792	633.774	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
SPOR	-51.4085	-20.4529	188.1076	Pilar em base de concreto no solo	Paraná
SPS1	-40.3195	-28.2348	31.45596	Pilar de concreto em laje de edifício	Mantiqueira
SPTU	-50.3043	-21.6977	97.34188	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
SSA1	-43.9249	-21.9291	508.789	Pilar de concreto em laje de edifício	São Francisco
TOGU	-43.2243	-3.34569	45.81603	Torre metálica em laje de edifício	Mantiqueira
TOPL	-52.2714	-20.7615	665.9545	Pilar em coluna estrutural de edifício	Amazonas Sul
UBA1	-51.1198	-23.5002	6.17564	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná
UFPR	-49.7337	-17.5549	108.9393	Pilar em cumeeira	Paraná
VICO	-50.4924	-22.8957	35.68403	Pilar de concreto em laje de edifício	Paraná

7.2 Estações GNSS utilizadas no artigo “Explorando Relações entre Séries Temporais GNSS, Armazenamento de Água Terrestre e Características Geológicas no Brasil”

Nesse material, são apresentadas as Estações GNSS utilizadas no estudo, juntamente com suas características geológicas e as correlações estimadas entre GNSS e GRACE.

Estação	Latitude	Longitude	Correlação (Sazonal)	Correlação (Tendência)	Sedimento (km)	Região Hidrográfica	Era	Classe de rocha	Sistema Aquífero
ALAR	-9.75	-36.65	-0.1372	-0.9069	1.0	São Francisco	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
ALMA	-9.55	-35.78	-0.4801	-0.8286	3.3	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
AMCO	-4.87	-65.33	-0.1493	-0.7066	2.9	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
AMCR	-4.09	-63.14	0.9613	0.4581	2.5	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
AMHA	-7.52	-63.03	0.1282	-0.155	0.8	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
AMTE	-3.35	-64.71	-0.9121	0.5616	2.1	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
AMTG	-4.23	-69.91	-0.1217	-0.9636	1.1	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
AMUA	-3.09	-60.02	-0.9091	-0.8077	2.1	Amazônica	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
APLJ	-0.82	-52.52	0.1535	-0.3726	0.7	Amazônica	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
APMA	0.05	-51.10	-0.2042	-0.8077	1.4	Amazônica	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
APS1	-0.06	-51.17	-0.9691	-0.8846	1.4	Amazônica	Cenozoico	Material	Poroso

								superficial	
BABJ	-13.26	-43.55	0.8298	0.9852	0.2	São Francisco	Neoproterozoico	Sedimentar	Faturado
BABR	-12.15	-44.99	0.8711	0.9812	0.4	São Francisco	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado
BAIL	-14.80	-39.17	0.7578	0.9889	1.0	Atlântico Leste	Paleoproterozoico	Metamórfica	Faturado
BAIT	-12.52	-40.29	0.2771	0.9943	0.1	Atlântico Leste	Mesoarqueano	Metamórfica	Faturado
BAPA	-9.39	-38.22	0.3694	0.9691	0.8	São Francisco	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado
BATF	-17.55	-39.74	-0.5204	0.6737	1.0	Atlântico Leste	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
BAVC	-14.89	-40.80	0.8262	0.993	0.0	Atlântico Leste	Cenozoico	Material superficial	Faturado
BEPA	-1.46	-48.44	-0.2698	-0.729	2.9	Tocantins-Araguaia	Cenozoico	Material superficial	Poroso
BOAV	2.85	-60.70	0.1896	0.9067	0.2	Amazônica	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
BRFT	-3.88	-38.43	-0.0983	0.968	1.4	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
CEFE	-20.31	-40.32	-0.3328	0.9865	1.6	Atlântico	Cenozoico	Material	Poroso

						Sudeste		superficial	
CEFT	-3.71	-38.47	-0.3842	0.9708	1.8	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Material superficial	Poroso
CESB	-3.68	-40.34	-0.1256	0.8529	0.5	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Material superficial	Faturado
CRUZ	-7.61	-72.67	0.1032	-0.1479	2.4	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
EACH	-23.48	-46.50	0.9696	-0.6468	0.1	Paraná	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
EESC	-22.00	-47.90	-0.4803	-0.7362	1.2	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
GOGY	-16.66	-49.25	0.9739	0.6944	0.0	Paraná	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado
GOJA	-17.88	-51.73	0.939	-0.753	1.3	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
GOUR	-14.51	-49.14	0.0791	0.3385	0.0	Tocantins- Araguaia	Paleoproterozoico	Metamórfica	Faturado
IFSC	-27.59	-48.54	-0.2608	-0.5341	1.0	Atlântico Sul	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado
ILHA	-20.43	-51.34	0.1766	-0.7813	3.6	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
MABA	-5.36	-49.12	0.1267	0.7348	0.3	Tocantins- Araguaia	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
MABB	-4.24	-44.82	0.1715	0.5797	2.3	Atlântico Nordeste	Mesozoico	Sedimentar	Poroso

						Ocidental			
MGBH	-19.94	-43.92	0.4882	0.8925	0.1	São Francisco	Paleoproterozoico	Metamórfica	Faturado
MGIN	-22.32	-46.33	0.9753	-0.5232	0.1	Paraná	Mesoarqueano	Metamórfica	Faturado
MGJF	-21.78	-43.37	0.9784	0.8985	0.1	Atlântico Sudeste	Paleoproterozoico	Metamórfica	Faturado
MGMC	-16.72	-43.86	0.9206	0.9879	0.3	São Francisco	Neoproterozoico	Metamórfica	Carstico
MGMT	-18.72	-47.52	-0.1574	-0.5994	0.2	Paraná	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado
MGRP	-19.21	-46.13	0.9926	0.7071	0.1	São Francisco	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
MGUB	-18.92	-48.26	0.9181	-0.458	0.5	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
MSAQ	-20.45	-55.67	-0.375	-0.8269	1.0	Paraguai	Paleozoico	Metamórfica	Poroso
MSBL	-22.11	-56.53	-0.2091	-0.8864	0.9	Paraguai	Paleozoico	Metamórfica	Poroso
MSDR	-22.19	-54.93	0.1737	-0.7945	2.3	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
MSJR	-21.50	-56.16	-0.1906	-0.8661	0.9	Paraguai	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
MSMJ	-21.62	-55.14	0.535	-0.7717	1.8	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
MSPM	-21.70	-57.88	-0.6727	-0.9293	0.7	Paraguai	Cenozoico	Material superficial	Poroso

MTCA	-16.13	-57.69	0.9609	-0.8663	0.3	Paraguai	Cenozoico	Material superficial	Poroso
MTJI	-11.45	-58.72	0.9772	-0.4077	0.0	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Faturado
MTLA	-15.23	-59.35	0.9588	-0.6819	0.1	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Faturado
MTLE	-15.55	-54.28	0.9389	-0.7607	0.4	Paraguai	Cenozoico	Material superficial	Poroso
MTSC	-16.69	-56.17	0.9861	-0.9018	0.3	Paraguai	Cenozoico	Material superficial	Poroso
MTSR	-12.55	-55.73	0.9542	-0.581	0.2	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
NEIA	-25.02	-47.92	-0.1962	-0.6197	0.6	Atlântico Sudeste	Cenozoico	Material superficial	Poroso
ONRJ	-22.90	-43.22	0.955	0.6593	0.9	Atlântico Sudeste	Cenozoico	Material superficial	Poroso
PAAR	-3.21	-52.21	-0.1779	0.8797	0.5	Amazônica	Mesozoico	Metamórfica	Faturado
PAIT	-4.29	-56.04	0.9379	0.8718	0.9	Amazônica	Paleozoico	Sedimentar	Carstico
PASM	-2.43	-54.73	-0.6951	0.8262	1.8	Amazônica	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
PBCG	-7.21	-35.91	-0.2116	0.9881	0.2	Atlântico Nordeste Oriental	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado

PBJP	-7.14	-34.87	-0.4504	0.963	1.0	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Material superficial	Poroso
PEAF	-7.76	-37.63	0.1752	0.9948	0.1	São Francisco	Paleoproterozoico	Metamórfica	Faturado
PERC	-8.06	-34.95	-0.318	0.901	1.1	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Material superficial	Poroso
PICR	-10.43	-45.17	0.1687	0.9705	0.6	Parnaíba	Paleoproterozoico	Metamórfica	Faturado
PIFL	-6.79	-43.04	-0.1487	0.9266	1.6	Parnaíba	Paleozoico	Sedimentar	Poroso
PISR	-9.03	-42.70	-0.1105	0.9662	0.4	Parnaíba	Paleoarqueano	Metamórfica	Faturado
POLI	-23.56	-46.73	0.9363	-0.648	0.3	Paraná	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
PRCV	-24.96	-53.47	0.0754	-0.5235	4.2	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
PRGU	-25.38	-51.49	0.236	0.8244	2.7	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
PRMA	-23.41	-51.94	-0.1232	0.5081	4.1	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
PRUR	-23.81	-53.32	0.0563	0.5144	4.7	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
RIOB	-9.97	-67.80	-0.2444	-0.9554	0.8	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Poroso
RJCG	-21.76	-41.33	0.9806	0.9463	1.0	Atlântico Sudeste	Cenozoico	Material superficial	Poroso

RNNA	-5.84	-35.21	-0.4142	0.9931	1.0	Atlântico Nordeste Oriental	Cenozoico	Metamórfica	Poroso
ROJI	-10.86	-61.96	0.9485	-0.8636	0.2	Amazônica	Cenozoico	Material superficial	Faturado
ROSA	-22.52	-52.95	0.1651	0.5099	4.8	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
RSAL	-29.79	-55.77	0.6716	-0.7714	1.4	Uruguai	Mesozoico	Ígnea	Faturado
RSCL	-28.14	-54.75	-0.1429	-0.4961	2.0	Uruguai	Mesozoico	Ígnea	Faturado
RSPF	-28.23	-52.39	0.4894	0.9189	2.3	Uruguai	Mesozoico	Ígnea	Faturado
SAGA	-0.14	-67.06	0.3135	0.2099	0.4	Amazônica	Mesoproterozoico	Ígnea	Faturado
SALU	-2.59	-44.21	0.7807	-0.8063	2.2	Atlântico Nordeste Ocidental	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SAVO	-12.94	-38.43	-0.8405	0.9604	2.6	Atlântico Leste	Nearqueano	Metamórfica	Poroso
SCAQ	-26.39	-48.74	-0.5899	-0.9899	0.7	Atlântico Sul	Nearqueano	Metamórfica	Faturado
SCCA	-26.78	-51.04	-0.1117	0.5479	1.6	Uruguai	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
SCCH	-27.14	-52.60	-0.3356	0.5266	2.9	Uruguai	Mesozoico	Ígnea	Faturado
SCFL	-27.60	-48.52	0.2073	-0.5354	1.0	Atlântico Sul	Neoproterozoico	Metamórfica	Faturado
SCLA	-27.79	-50.30	-0.8146	0.9482	1.0	Uruguai	Paleozoico	Sedimentar	Poroso

SEAJ	-10.93	-37.10	-0.8608	0.8718	2.2	Atlântico Leste	Cenozoico	Material superficial	Poroso
SJRP	-20.79	-49.36	0.167	-0.7528	2.4	Paraná	Mesozoico	Ígnea	Faturado
SJSP	-23.21	-45.86	0.9681	-0.6492	0.3	Atlântico Sudeste	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
SMAR	-29.72	-53.72	0.9179	-0.568	0.8	Atlântico Sul	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPAR	-21.18	-50.44	0.4552	-0.7468	3.3	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPBO	-22.85	-48.43	0.2022	-0.7053	1.4	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
SPBP	-22.93	-46.53	0.9573	-0.6468	0.2	Paraná	Neoproterozoico	Ígnea	Faturado
SPC1	-22.82	-47.06	-0.4407	-0.709	0.5	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPDR	-21.46	-51.55	-0.1501	-0.7509	4.5	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPFE	-20.26	-50.23	0.197	-0.7472	2.7	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPFR	-20.51	-47.39	0.9666	-0.6681	0.9	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPJA	-21.24	-48.29	0.4924	-0.7212	1.6	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPLI	-21.67	-49.73	0.1852	-0.7507	2.8	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso
SPOR	-23.00	-49.84	0.1825	-0.6692	2.3	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Faturado
SPS1	-23.48	-47.42	-0.4736	-0.7127	0.6	Paraná	Paleozoico	Sedimentar	Poroso
SPTU	-21.93	-50.49	0.6835	-0.5591	3.4	Paraná	Mesozoico	Sedimentar	Poroso

SSA1	-12.98	-38.52	-0.2324	0.9526	2.6	Atlântico Leste	Neoarqueano	Metamórfica	Fraturado
TOGU	-11.75	-49.05	0.9373	0.9751	0.1	Tocantins-Araguaia	Neoproterozoico	Metamórfica	Fraturado
TOPL	-10.17	-48.33	-0.8713	0.8826	0.2	Tocantins-Araguaia	Paleozoico	Sedimentar	Poroso
UBA1	-23.50	-45.12	0.0497	0.4681	0.7	Atlântico Sudeste	Neoproterozoico	Metamórfica	Fraturado
UFPR	-25.45	-49.23	-0.1406	0.6319	0.3	Paraná	Cenozoico	Sedimentar	Poroso
VICO	-20.76	-42.87	-0.8623	0.9167	0.0	Atlântico Sudeste	Paleoproterozoico	Metamórfica	Fraturado

