



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEODÉSICAS E
TECNOLOGIA DA GEOINFORMAÇÃO

JÚLIA ISABEL PONTES

**VARIAÇÕES DA DEFORMAÇÃO CRUSTAL NA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO DE 2017 A 2022**

Recife

2023

JÚLIA ISABEL PONTES

**VARIAÇÕES DA DEFORMAÇÃO CRUSTAL NA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO DE 2017 A 2022**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologia da Geoinformação.

Área de concentração: Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Orientador: Prof. Dr. Henry Montecino.

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves

Recife

2023

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

P814v Pontes, Júlia Isabel.
 Variações da deformação crustal na bacia do rio são francisco de
 2017 a 2022 / Júlia Isabel Pontes, 2023.
 42 f.: il.

 Orientador: Prof. Dr. Henry Montecino.
 Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves.
 Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.
CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e
Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2023.
 Inclui referências.

 1. Ciências geodésicas. 2. GNSS. 3. Carregamento hidrológico. 4.
Deformação vertical crustal. 5. Sinais sazonais. I. Monteiro, Henry
(Orientador). II. Gonçalves, Rodrigo Mikosz (Coorientador). III. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG / 2023 - 127

JÚLIA ISABEL PONTES

**VARIAÇÕES DA DEFORMAÇÃO CRUSTAL NA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO DE 2017 A 2022**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação.

Aprovada em: 22/03/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henry D. Montecino C. (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco e Universidad de Concepción – Chile

Prof. Dr. Vagner Gonçalves Ferreira, (Examinador Interno)

Universidade Federal de Pernambuco e Universidade de Hohai - China

Prof. Dr. Daniele Barroca Marra Alves, (Examinador Externo)

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

À minha mãe Fabiana (*in memoriam*), que me incentivou desde o início.

AGRADECIMENTOS

Gratidão à Deus por me sustentar e dar forças mesmo quando tudo parecia perdido. Agradeço a minha mãe por sua dedicação e incentivo. Mãe, no final do ano passado, no meio do mestrado te perdi, obrigada por ter me ensinado a ser resiliente, ser como uma fênix e ter força de vontade. Agradeço também ao meu pai Júlio Cesar pelo suporte, cuidado e acreditar em mim. Gratidão à minha irmã Juliane e a minha tia Kelma por todo suporte durante essa caminhada, principalmente durante o mestrado. Agradeço ao meu esposo Renato, pela paciência, por sempre acreditar no meu potencial, por ser muitas vezes meu braço forte, pelo companheirismo e respeito. Agradeço ao Dr. Rodrigo Mikosz pelos ensinamentos e parceria desde a graduação, professor seu incentivo à pesquisa foi essencial por despertar em mim o gosto pela vida acadêmica. Gratidão ao professor Dr. Henry Montecino por me orientar e tanto ensinar durante esses anos de pesquisa. Também agradeço aos meus amigos que estão sempre comigo na caminhada.... Lucas, Pig, Bruno, Bia, Marcella e Flávia. Agradeço aos amigos do GEGEP, em especial a Isabel, Jailson, Wilson, Hanna, Rosane. Agradeço a Vivi por te me encorajado a tentar o doutorado na UNESP.

RESUMO

Neste estudo foram agregadas diversas fontes de observações temporais entre dezembro de 2017 e dezembro de 2021 entre elas os deslocamentos verticais da crosta obtidos via estações GNSS, a variação do nível de água subterrânea derivado dos poços de monitoramento, a variação do nível de reservatórios, a Anomalia do Armazenamento Total de Água (TWSA) e dados de precipitação. Fazem parte da metodologia utilizadas o processamento das séries temporais, o cálculo das médias regionais para o TWSA e GNSS, a aplicação da correlação cruzada e a avaliação do *power spectrum density* (PSD). Como principais resultados foi possível destacar que para região central da BRSF há uma crescente tendência linear ($p < 0.005$) para os dados da Deformação Vertical Crustal (DVC) e decrescente tendência para os dados do TWSA, inferindo possível perda de massa d'água. O resultado da correlação cruzada, demonstrou indicativos que a variação sazonal do conjunto de dados hidrológicos e da DVC são obtidas através de sinais periódicos causados pelos mesmos fatores físicos. Na maioria das estações o DVC apresentou anti-correlação de moderada a forte em relação aos dados hidrológicos observados, com diferenças de fase variando entre 1 e -1 meses. A componente vertical exibe sinais sazonais correlacionados com as estimativas encontradas pelos dados hidrológicos na frequência anual com amplitudes de ~1 - 6 mm e na frequência de 0.33 ciclos por ano, corresponde a amplitudes variando entre ~0.4 - 1.5 mm. A principal conclusão deste estudo sugere que o comportamento transitório dos sinais da deformação encontrados no DVC está correlacionado com padrões do ciclo hidrológico em escala regional, portanto é um importante indicativo para corroborar com a detecção de eventos extremos como a vulnerabilidade a secas e inundações.

Palavras-chave: GNSS; carregamento hidrológico; Deformação Vertical Crustal; Sinais Sazonais.

ABSTRACT

Comprehending the effects of climate variability in an extensive basin that integrates various states in national scope, as is the case of the São Francisco River basin, is a challenge. In this study, multiple temporal observation sources were compiled for the period between December 2017 and December 2021, including the inclined displacements of the crust obtained via GNSS stations, the variation in the groundwater level derived from the monitoring wells, the variation in the level of reservoirs, the Total Water Storage Anomaly (TWSA) and precipitation data. The methodology used includes the processing of time series, regional averages for TWSA and GNSS, the application of cross-correlation and the evaluation of power spectrum density. As main results, it was possible to highlight that for the central region of BRSF there is an increase in the trend ($p < 0.005$) for the Vertical Crustal Deformation (CVD) data and a decreasing in the trend for the TWSA data, inferring possible loss of water mass. The cross-correlation result provides an indicative that the seasonal variation of the hydrological dataset and the DVC are transmitted through periodic signals caused by the same physical factors. In most stations, the DVC showed moderate to strong anti-correlation in relation to the observed hydrological data, with lags varying between 1 and -1 months. The PSD was used in order to explore and identify the seasonal signals present in different datasets. The vertical component displays seasonal signals correlated with the estimates found by the hydrological data at the annual frequency with amplitudes of ~1 - 6 mm and at the frequency of 0.33 cycles per year, corresponding to amplitudes ranging between ~0.4 - 1.5 mm. The main conclusion of this study suggests that the transient of the deformation signals found in the DVC is correlated with hydrological cycle patterns on a regional scale, therefore it is an important indicator to corroborate the detection of extreme events such as vulnerability to droughts and floods.

Keywords: GNSS; hydrological loading; vertical crustal deformation; seasonal signals.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região de estudo.....	15
Figura 2 - Fluxograma do processamento dos dados GNSS.....	21
Figura 3 - Amplitudes e fases anuais das deformações verticais do GNSS (a), do TWSA derivados do GRACE (b) e dos níveis de água subterrânea derivados dos poços (c).....	29
Figura 4 - Média Regional TWSA e DVC. Polígono em vermelho destacando possível período de seca.	32
Figura 5 - Resíduo obtido entre as séries temporais e o modelo ajustado.....	33
Figura 6 - Densidades espectrais de potência de as variáveis analisada e dados da DVC estimados para estações BABJ, PEPE, MGMC e BAPA. Destaca-se a frequência anual presente em todas as séries....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais fontes de dados utilizadas.....	16
Tabela 2 - Estações Pluviométricas e estação GNSS correspondente.....	18
Tabela 3 - Poços de água subterrânea e estação GNSS correspondente.....	19
Tabela 4 - Reservatórios e estações GNSS correspondentes.....	21
Tabela 5 - Amplitude e Fases anuais das séries temporais. As fases são expressas em dias desde 1º de janeiro.....	27
Tabela 6 - Diferença de Fase em dias.....	28
Tabela 7 - Tendência Linear.....	32

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	ÁREA DE ESTUDO.....	14
3	MATERIAIS E METÓDOS.....	16
3.1	MATERAIS.....	16
3.1.1	Dados GNSS.....	16
3.1.2	Dados GRACE (TWSA).....	17
3.1.3	Dados de precipitação.....	18
3.1.4	Dados de armazenamento de água nos reservatórios subterrâneos.....	18
3.1.5	Dados de armazenamento de água nos reservatórios superficiais.....	21
3.2	MÉTODOS.....	21
3.2.1	Processamento das séries temporais.....	21
3.2.2	Média regional TWSA e GNSS.....	24
3.2.3	Correlação cruzada e power spectrum density.....	24
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS SAZONAIS.....	26
4.2	TENDÊNCIA LINEAR.....	31
4.3	ANÁLISE E CORRELAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS HIDROLÓGICAS.....	33
4.4	PSD DOS SINAIS SAZONAIS NAS SÉRIES TEMPORAIS.....	34
5	CONCLUSÕES.....	37
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

O Rio São Francisco é popularmente chamado de “rio de integração nacional” porque atravessa uma variedade de biomas, climas (incluindo o semiárido), paisagens e status socioeconômicos ao longo de sua extensão, ligando as regiões Sudeste e Nordeste do Brasil. A Bacia do Rio São Francisco (BRSF) tem importância estratégica nacional pelo seu potencial para agricultura, energia hidrelétrica, abastecimento de água urbano e industrial, e turismo. A agricultura irrigada é a atividade econômica mais importante da bacia e é responsável por 86% das captações de águas superficiais permitidas (ANA, 2019).

Há uma grande variabilidade nos regimes de precipitação na localização da BRSF (PAREDES-TREJO *et al.*, 2021) . Segundo dados históricos da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), as piores secas registradas ocorreram de 2014 a 2018. Sun *et al.* (2016) utilizaram dados de precipitação e água armazenada presentes na superfície terrestre na região da BRSF, juntamente com a influência do fenômeno *El Niño* e identificaram uma taxa de perda de 3,3 km cúbicos de água por ano ao longo de 13 anos de avaliação (entre 2002 e 2015), causada principalmente pela estiagem que começou em 2012 e terminou em 2017.

Ferreira *et al.* (2019) abordaram o déficit pluviométrico no Brasil, e argumentam que a crosta terrestre responde às secas associadas, que pode resultar em flutuações não lineares em medições contínuas obtidas a partir de diferentes sensores geodésicos. Bevis (2005) mostrou que as estações de monitoramento contínuo estão sujeitas a fatores ambientais, por exemplo a estação MANA (Manaus), instalada na bacia Amazônica apresentou uma variação de 70 mm de amplitude vertical, indicando uma alta correlação com as enchentes e vazantes do rio Amazonas.

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) vêm sendo utilizados para estudos de monitoramento geodinâmicos, devido aos avanços na precisão das observações, e ao fornecimento de dados de posição por meio das séries temporais (LI, W. *et al.*, 2020a). O GNSS pode ser considerado como uma fonte abundante de informações para o estudo de fenômenos geofísicos como movimento do geocentro, (ZAJDEL; SOŚNICA; BURY, 2021) , placas tectônicas (PELTIER; ARGUS, D. F.; DRUMMOND, 2015), monitoramento de efeitos sísmicos (LI, W. *et al.*, 2022), devido a carregamentos (DAM, VAN; WAHR, J.; LAVALLÉE, 2007) , e ajuste isostático

glacial (KIERULF *et al.*, 2021) , entre outras aplicações. Sendo assim, as séries temporais de componentes verticais do GNSS contêm informações geofísicas importantes, que se relacionam com os sinais sazonais e as mudanças de massa regionais ao longo do tempo. Dessa forma é possível destacar a importância do GNSS não apenas para fins de posicionamento geodésico e sim correlacionar suas observações com o ciclo hidrológico ao longo da superfície continental e oceânica (CHANARD, Kristel *et al.*, 2020).

Alguns estudos mostram que o carregamento hidrológico está associado aos deslocamentos identificados na componente vertical (*up*) do posicionamento geodésico. Por exemplo, Fu e Freymueller (2012) sugeriram que as observações contínuas do GRACE, que fornecem meios de observação direta para obter mudanças mensais na redistribuição da massa Terrestre, podem ser usadas para modelar sinais sazonais e então deduzi-los dos dados de estações GNSS. Pan et al. (2019) utilizaram o mesmo princípio, removendo as tendências sazonais e de longo prazo por meio de modelagem das observações GRACE na tentativa de distinguir efeitos hidrológicos e tectônicos.

Liu e Li (2022) destacam que as principais causas da variabilidade dos sinais sazonais em séries temporais contendo coordenadas verticais GNSS estão associadas a efeitos de carregamentos que variam de acordo com diferentes regiões do globo, sendo necessária uma análise regional para sua compreensão. Mudanças de temperatura e alterações no padrão de precipitação em uma determinada região podem diminuir a recarga principalmente no aquífero freático, causando restrição de águas subterrâneas disponíveis, que explicam uma fração significativa destas variações sazonais (HIRATA; CONICELLI, 2012).

Diferentes processos geofísicos fornecem diferentes assinaturas nos sinais geodésicos (PFEFFER *et al.*, 2017), portanto, monitorar os padrões de movimentos verticais em uma determinada região pode trazer indicativos de quais processos estão em ação. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo geral correlacionar e identificar às principais fontes hidrológicas responsáveis dos sinais periódicos da deformação vertical crustal (DVC), nas séries temporais GNSS localizadas na BRSF considerando o intervalo de tempo entre dezembro de 2017 e dezembro de 2021. Considerando a modelagem de informações de níveis potenciométricos de aquíferos, armazenamento de água nos principais reservatórios superficiais, dados pluviométricos e de observações de armazenamento de água (subterrânea e

superficial) obtidas por meio dos satélites GRACE. Os objetivos específicos desse estudo são: (i) analisar a componente GNSS $Up(t)$ e correlacionar com o TWSA, e outros dados hidrológicos in-situ; (ii) identificar as amplitudes e fases anuais que caracterizam o deslocamento crustal obtido por GNSS, e outros dados hidrológicos; (iii) verificar a influência dos sinais hidrológicos na DVC através da análise espectral de cada sinal para todas as estações GNSS aqui utilizadas.

2 ÁREA DE ESTUDO

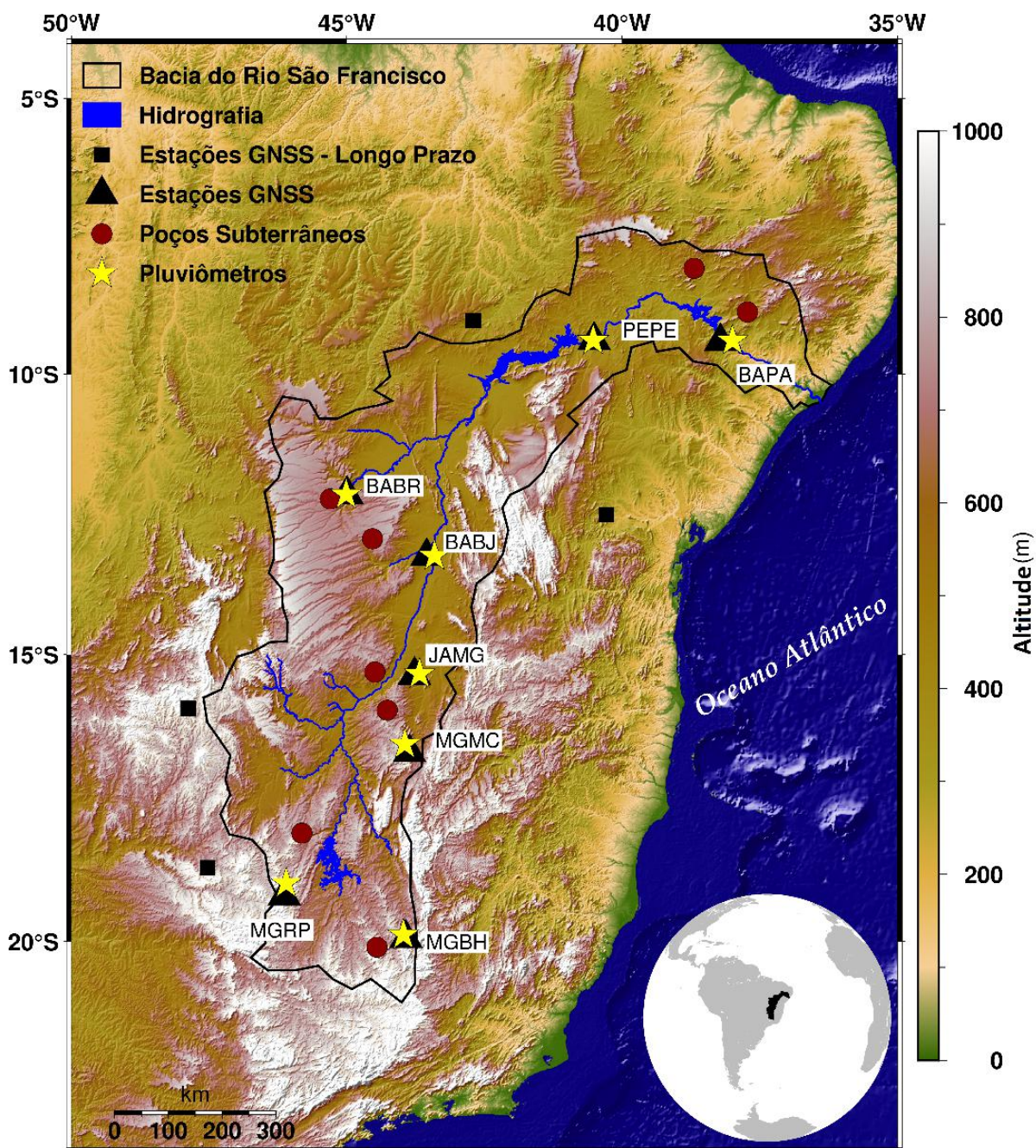
A BRSF se estende pelos Estados de Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Sergipe, Alagoas e o Distrito Federal, inseridos nas regiões Sudeste, Centro-Oeste e Nordeste do Brasil (Figura 1). A área total é de 636.099,73 km², onde se distribuem 508 municípios com população estimada em 20.330.051 de habitantes (IBGE, 2010). A BRSF possui oito reservatórios de água de grande capacidade, além de inúmeras barragens menores, destacando-se: Sobradinho (Próximo à estação BAPA), Três Marias (Próximo à estação MGRP) e Luiz Gonzaga (Próximo à estação PEPE), que estão delimitados na figura 1 destacados na cor azul. Esses reservatórios que representam 58,20%, 31,02% e 6,62%, respectivamente, da água usado para geração de energia no Nordeste (SUN *et al.*, 2016). Na região central e na região Sul da BRSF, está localizado o principal sistema aquífero, denominado São Francisco, caracterizadas por serem áreas de recarga, compostas pelos aquíferos Urucuai-Aerado e Bambuí. A hidrogeologia da BRSF foi representada pelo nível potenciométrico de oitos poços tubulares com localização representada por círculos vermelhos na Figura 1.

Os dados de precipitação foram coletados por meio de 8 estações meteorológicas, com medições automáticas, que estão representadas por estrelas amarelas na Figura 1. Localizado na região tropical do Brasil, o clima é quente e semiúmido com temperaturas médias diárias geralmente variando de 18 a 27 °C com períodos secos tipicamente estendendo-se de 4 a 6 meses (Programa de Ação Estratégica, 2004). Apresenta regiões com precipitação superior a 1500 mm por ano em suas zonas úmidas/subúmidas enquanto no semiárido/árido zonas do Nordeste este número pode ser inferior a 350 mm por ano (ocorrendo principalmente de fevereiro a abril). Cinquenta e oito por cento do SFRB reside dentro da área designada administrativamente como polígono das secas, no interior do Nordeste (SUN *et al.*, 2016). Estudos que projetam cenários futuros de mudanças climáticas relataram um aumento da temperatura média e redução considerável dos índices pluviométricos ao longo da BRSF até final do século.

Devido a sua importância social e econômica, é evidente que os estudos de seca na BRSF são cruciais para fornecer uma melhor compreensão das relações entre os aspectos físicos da bacia e seus impactos na população local (MUTTI *et al.*,

2020). Uma das dificuldades encontradas para o monitoramento da área de estudo, devido sua extensão, é a disponibilidade de informações contínuas.

Figura 1 – Região de estudo: O plano de fundo do mapa mostra a topografia, BRSF delimitada por linha preta e Destaque na BRSF em relação a América do Sul



Fonte: Autores (2023).

3 MATERIAIS E METÓDOS

3.1 MATERIAIS

Foram utilizados diferentes tipos de dados hidrológicos obtidos entre dezembro de 2017 e dezembro de 2021. A Tabela 1 apresenta as fontes para obtenção dos dados, o intervalo de tempo e a descrição das variáveis utilizadas. Destacando que a maior janela de tempo de dados contínuos dos sensores utilizados foi o fator determinante para adoção do período analisado.

Tabela 1– Principais fontes de dados utilizadas

Instrumentação	Período	Fonte de Dados	Descrição
GNSS	2017-2022	Nevada Geodetic Laboratory (http://geodesy.unr.edu/index.php)	Deformação Vertical Crustal
Poços	2017-2021	Serviço Geológico do Brasil (http://rimasweb.cprm.gov.br/)	Variação do Nível de Águas Subterrâneas
Reservatórios	2017-2022	SAR - Sistema de Acompanhamento de Reservatórios (https://www.ana.gov.br/sar/)	Variação do Nível de Água Superficial
Estações Meteorológicas	2017-2022	Instituto Nacional de Meteorologia (https://portal.inmet.gov.br)	Precipitação
GRACE	2017-2022	Goddard Space Flight Center– (https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons)	Armazenamento de águas terrestre

Fonte: O Autor (2023).

3.1.1 Dados GNSS

Para este estudo, foram utilizadas as soluções finais de 24h de oito estações GNSS distribuídas ao longo da extensão da BRSF, representadas por triângulos pretos na figura 1, processadas e disponibilizadas pelo *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL). O processamento das séries temporais, adotado pelo NGL, é realizado

utilizando os produtos diários Repro3.0 e o software (Gipsy-X 1.0) desenvolvido pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL). Sendo o tipo do posicionamento por ponto preciso (PPP) com resolução de ambiguidades (BERTIGER, W. *et al.*, 2010) e tendo como referencial o IGS14 (*International GNSS Service*), com base no *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF2014) (ALTAMIMI *et al.*, 2016). Estas estações foram selecionadas por apresentarem pelo menos 95% dos dados, no período compreendido entre dezembro de 2017 e dezembro de 2021. Uma vez selecionadas as estações, somente a série temporal da componente vertical (Up) foi analisada, isto devido ao fato que o sinal hidrológico é mais forte nessa componente. A média do desvio padrão da série temporal de cada componente Up escolhida é inferior a 3 mm.

Os efeitos das cargas *Non-Tidal Atmospheric* (NTAL) e *Non-Tidal Oceanic Loading* (NTOL) foram removidos das séries temporais originais da componente Up . Essas cargas superficiais foram obtidas por meio do *Earth System Modelling Group Repository of Deutsche Geoforschungszentrum Potsdam* (ESMGFZ), onde são disponibilizadas em metros em uma grade de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ e com taxa de amostragem de 3 horas e estão referenciadas ao centro da figura (CF) (DILL; DOBSLAW, H., 2013)

3.1.2 Dados GRACE (TWSA)

A variação do armazenamento de água terrestre, do inglês *Terrestrial Water Storage Change* - TWSC (TAPLEY *et al.*, 2004), pode ser usada para fazer estimativas globais e regionais do armazenamento d'água continental. A TWSC integra a mudança de armazenamento de água na direção vertical e inclui variações de água armazenada na superfície, ou seja, rios e lagos, camadas de solo, gelo, águas subterrâneas e biomassa (D. Jiang *et al.*, 2014). O TWSC é derivado das Anomalias de armazenamento de água terrestre (TWSA) que é obtido por meio do GRACE. TWSC representa a diferença em TWS (ou seja, fluxo de água) entre dois meses, enquanto TWSA é a anomalia com relação à média calculada em período, normalmente entre 2004 e 2009, onde não há dados faltantes (CHEN, X.; JIANG, J.; LI, Hui, 2018). Aqui nesse estudo será utilizada a definição de TWSA.

Foram utilizadas as soluções de concentração de massa, *mass concentration* (Mascon) GSFC v02.4 (LUTHCKE *et al.*, 2014), para determinar as variações

mensais de TWSA na BRSF. A solução *mascon* GRACE GFSC é resolvida para blocos com grades com grids aproximados de $1^\circ \times 1^\circ$, com resolução temporal de 30 dias. Existem 41.168 blocos de *mascon* cobrindo o globo inteiro com área média de 12.389 km^2 e desvio padrão de $31,3 \text{ km}^2$ (FERREIRA, V. G. *et al.*, 2020). Na maioria dos casos, as soluções *mascon* podem ser usadas diretamente sem aplicar nenhum fator de escala e qualquer esquema de pós-processamento (LANDERER *et al.*, 2020). As soluções GRACE utilizadas nesse estudo, são fornecidas sem os efeitos da carga atmosférica e da carga oceânica. Sendo assim, foram calculadas as TWSA inferidas pelo GRACE nos locais das estações GNSS.

3.1.3 Dados de precipitação

Neste trabalho estão sendo utilizadas informações de precipitação média mensal *in situ*. Na Tabela 2 são apresentadas as oito estações automáticas utilizadas, tendo como critério de escolha a proximidade com as estações GNSS, e que apresentam menos lacunas de dados nas séries temporais.

Tabela 2 - Estações Pluviométricas e estação GNSS correspondente

Pluviômetro	Estação GNSS mais próxima	Distância (km)
Delmiro Gouveia	BAPA	3,1
Petrolina	PEPE	1,8
Bom Jesus da Lapa	BABJ	15,0
Barreiras	BABR	1,6
Colônia do Jatobá	JAMG	10,1
Pampulha	MGBH	7,9
Nova Esperança	MGMC	17,9
Patrocínio	MGRP	23,2

Fonte: O Autor (2023).

3.1.4 Dados de armazenamento de água nos reservatórios subterrâneos

Para este estudo foram selecionadas as séries históricas de oito poços, tendo como critério de escolha a proximidade com as estações GNSS e completude de pelo menos 95% de dados. Todos os poços selecionados são equipados com medidores de nível d'água, sendo de natureza tubular não confinados. Para cada poço são fornecidas as leituras diárias do nível e vazão de água.

Assim como apresentado em Larochelle et al. (2018) a cota do terreno de cada poço foi subtraída para obter apenas a carga hidráulica. Para isolar apenas o valor armazenamento de água subterrânea em cada poço, foi utilizada a Equação (1) (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990):

$$\Delta h = \Delta z S_y \quad (1)$$

Onde Δz é a mudança na elevação do lençol freático, S_y são o rendimento específico e Δh é a espessura de uma camada equivalente de água que é necessária para produzir a mudança medida na gravidade. Os valores de rendimento específicos associados a cada poço foram obtidos a partir de valores publicados em (Morris, Donald, Johson, 1967).

Na **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** são apresentados os códigos dos poços utilizados, com as estações GNSS correspondentes e o tipo de aquífero onde o poço está instalado.

Tabela 3 - Poços de água subterrânea e estação GNSS correspondente

Código do poço	Estação GNSS mais próxima	Distância (km)	Tipo de Aquífero
2600039622	BAPA	70,2	Poroso
2300022135	PEPE	240,1	Poroso
2900029483	BABJ	112,2	Cársiático
2900020686	BABR	34,6	Poroso
3100020883	JAMG	77,4	Fissurado
3100017230	MGBH	124,5	Poroso
3100020889	MGMC	92,3	Poroso
3100020983	MGRP	57,4	Fissurado

Fonte: O Autor (2023).

3.1.5 Dados de armazenamento de água nos reservatórios superficiais

Foram utilizadas as séries temporais das cotas dos reservatórios Três Marias (área de 1.130 km²), Sobradinho (área de 4.214 km²) e Luiz Gonzaga (828 km²), que estão localizados próximos as estações GNSS MGRP, BAPA e PEPE, respectivamente. A série temporal da cota dos reservatórios é dada em metros, com resolução temporal diária. Na Tabela 4 é possível verificar a área total, o volume útil, a estação GNSS mais próxima e a distância entre a estação e a estação onde a medição da cota do reservatório é realizada.

Tabela 4 - Reservatórios e estações GNSS correspondentes

Reservatório	Área (km²)	Volume útil (Hm³)	Estação GNSS mais próxima	Distância (km)
Luiz Gonzaga	828	3.549	BAPA	28,1
Sobradinho	4.214	28.669	PEPE	39,8
Três Marias	1.130	12.369	BABJ	71,0

3.2 METODOS

3.2.1 Processamento das séries temporais

Para a analisar as séries temporais do GNSS assumimos o modelo funcional (BEVIS; BROWN, 2014):

$$Up(t) = Up(t_r) + v(t - t_r) + \sum_{j=1}^{n_j} b_j H(t - t_j) + \sum_{k=1}^{n_F} [s_k \sin(\omega_k t) + c_k \cos(\omega_k t)] \quad (2)$$

Onde $Up(t)$ é a componente vertical da estação no tempo t_r de referência e v é a velocidade da estação. Considerando que as estações estão localizadas no Brasil, onde não há fortes atividades sísmicas, a função Heaviside (WEISSTEIN, 2008; BRACEWELL, 2000) é utilizada para corrigir saltos e offsets causados por troca de antena ou receptores, a variável b_j caracteriza o salto que ocorre em um intervalo

específico de tempo. Para cada estação, as informações de saltos foram obtidas diretamente do site do NGL. Os coeficientes s_k e c_k podem ser estimados a partir do MMQ (no domínio do tempo) para uma frequência ω_k .

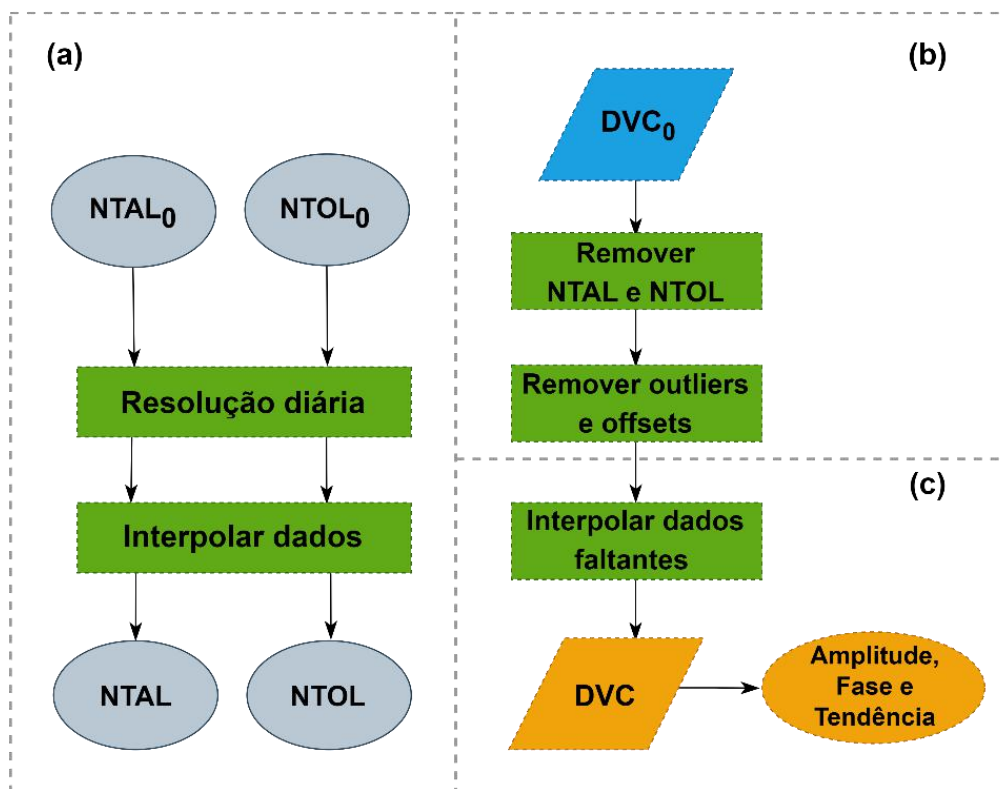
A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** apresenta o fluxograma de processamento das séries temporais GNSS. Inicialmente para isolar os efeitos de cargas hidrológicas nos deslocamentos verticais, as cargas de não maré atmosféricas e oceânicas foram removidas. Essas cargas são representadas respectivamente por $NTAL_0$ e $NTOL_0$ (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.a**). Para compatibilizar com amostragem diária dos dados GNSS, foi calculada a média diária para os efeitos das cargas e em seguida foi feita uma interpolação dos dados gerando uma superfície, para então serem resgatados os efeitos de forma pontual, em cada estação GNSS.

Após remover os efeitos dos carregamentos $NTAL$ e $NTOL$ (**Erro! Autoreferência de indicador não válida.a**), os deslocamentos verticais (DVC_0) foram as variáveis de entrada para a modelagem determinística e estocástica dos dados GNSS no software HECTOR (BOS *et al.*, 2013) (**Erro! Autoreferência de indicador não válida. b**). Neste estudo, foram consideradas a combinação dos modelos ruído Power Law e White (PL+WN) (SANTAMARÍA-GÓMEZ *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2019). O HECTOR utiliza esses modelos de ruído como parâmetro para o uso do método *Maximum Likelihood Estimation* (MLE) reformulado com a falta dos dados nas observações, e maximiza o logaritmo da função de verossimilhança (BOS *et al.*, 2013)

Os *outliers* foram detectados, os resíduos que excederam três limites de intervalo interquartil (IQR) foram excluídos (LANGBEIN, 2004; LI, W. *et al.*, 2020b). Em seguida, foi estimada a tendência linear e as amplitudes e fases para cada frequência estabelecida (**Erro! Autoreferência de indicador não válida. c**). Com propósito de isolar a tendência linear associada ao transporte de água local das series temporais GNSS, foram removidos os efeitos do ajuste isostático glacial (GIA) e o efeito tectônico secular. A contribuição (tendência nominal) do GIA para a deformação da crosta foi removida utilizando o modelo GIA de Geruo, Wahr, Zhong (2013). Os efeitos de longo prazo foram calculados utilizando a média da tendência linear de oito estações fora da BRSF. Como critério de escolha dessas estações foram da BRSF, foi feito um buffer de 100 metros a partir da delimitação da bacia e as estações localizadas fora do limite do buffer e com desvio padrão menor que 4

mm (componente vertical) foram utilizadas. A localização dessas estações foi representada por quadrados pretos na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do processamento dos dados GNSS. Em laranja destaca-se a variável da deformação vertical crustal, em verde as etapas do processamento e em cinza os dados de carregamento não relacionados com maré e com atmosfera



Fonte: Autores (2023).

Para compatibilizar a taxa de amostragem dos dados, as séries temporais com dados diários (Deformação vertical crustal, nível de água subterrânea e no reservatório) foram convertidas para dados mensais. O TWSA é fornecido em soluções mensais e os dados de chuva estão expressos em precipitação média mensal. Para preencher as lacunas dos dados faltantes nas séries do TWSA e em alguns poços, foi utilizado o método de interpolação por convolução cúbica; e nos dados de chuva, foi utilizada uma regressão linear múltipla sendo a mais aconselhada para esse tipo de dado. O processamento outras séries temporais foi realizado utilizando apenas o MMQ para estimar as respectivas amplitudes e fases, diferente da série temporal dos dados da DVC cujo processamento foi ilustrado acima.

Em seguida, para analisar as componentes periódicas das séries temporais do TWSA em cada estação GNSS, do nível de água subterrânea em cada poço e do

nível de água nos reservatórios, foram calculadas as tendências lineares avaliadas com *Teste t de Student* a um nível de confiança de 95%, sendo que para as amplitudes (A) e fases (φ) anuais foi utilizando o método dos mínimos quadrados e o modelo matemático apresentado na Eq. (2). Os valores das fases (φ) foram convertidas em dia do ano para representar o momento do máximo sazonal de forma mais intuitiva.

$$\text{Dia do ano} = \frac{365.25 \varphi}{360} \quad (3)$$

3.2.2 MÉDIA REGIONAL TWSA E GNSS

As séries temporais do TWSA e da DVC foram captadas de forma pontual, ou seja, relacionada a cada estação GNSS. Entretanto, para compreender melhor as variações no armazenamento de água de forma regional, foi calculada uma série temporal média do TWSA e da DVC tendo como delimitação a BRSF. No caso do TWSA, a série temporal média foi calculada sobre a bacia usando a média ponderada de área, considerando o valor e área de cada *pixel* (Ferreira & Asiah, 2015; Sneeuw et al., 2014). Para a série temporal média da DVC, foram criados polígonos de Thiessen a partir das coordenadas das estações GNSS. A área dos polígonos de Thiessen e os valores pontuais da DVC foram usados para o cálculo da média ponderada.

3.2.3 CORRELAÇÃO CRUZADA E POWER SPECTRUM DENSITY

O método de correlação cruzada tem sido usado para várias aplicações em relações ao tempo-*lag* (JIANG, Z. et al., 2021). Ele determina a relação entre as séries calculando os coeficientes de correlação das duas séries com diferentes diferenças de tempo. Com isso, foi possível identificar, por exemplo, o tempo de atraso entre as séries temporais. A significância estatística das correlações estimadas foi avaliada com o teste *t de Student* a um nível de confiança de 95%.

Além da correlação foi construído um espectro de potência para cada uma das séries temporais dos diferentes conjuntos de dados (DVC, TWSA, nível de água subterrânea, nível de água nos reservatórios e precipitação). O PSD foi utilizado com

intuito de explorar e identificar os sinais sazonais presentes nos diferentes conjuntos de dados.

Dentro das séries temporais geológicas e geofísicas é comum encontrar tendências sistemáticas e de longo prazo (BROOKS *et al.*, 2011). Como o objetivo é explorar os sinais periódicos presentes, desconsiderando os efeitos dessas tendências, se fez necessário remover esses efeitos das séries temporais antes de realizar a análise periódica. A remoção do efeito de tendência linear das séries temporais foi realizada mediante um ajuste pelo MMQ usando os dois primeiros termos do lado direito do modelo matemático apresentado na Eq. (2). Para facilitar a comparação entre as séries temporais, foi realizada a normalização dos dados a um desvio padrão = 1.

As séries livres de tendência foram decompostas no domínio das frequências, considerando o intervalo de tempo estudado, para avaliação da ocorrência de periodicidade. Neste procedimento utilizou-se o periodograma *Lomb-Scargle* (LOMB, 1976) . Foram então recuperadas as cinco frequências com maiores potências e foram determinadas as amplitudes e fases utilizando o ajustamento MMQ citado anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS SINAIS SAZONAIS

A Tabela 5 apresenta os resultados das oito estações contendo: as amplitudes e fases anuais obtidas da DVC, o TWSA, as cargas hidráulicas (CH) registradas nos poços subterrâneos e as variações dos níveis de água para os três reservatórios superficiais (RS). Para todos os conjuntos amostrais, foi observado que as amplitudes e fases anuais são mais significativas do que as semianuais. É possível observar que a amplitude média dos sinais anuais para a DVC é 4,47 mm e que 75% das estações apresentam amplitude maiores que 4 mm.

As amplitudes dos sinais anuais do TWSA variam entre 374,46 mm e 1323,70 mm, com amplitude média de 874 mm. Para os dados de nível de água subterrânea é observado que as amplitudes variam entre 39,89 mm e 152,44 mm, com uma média de 464 mm. Em relação aos reservatórios, o Três Marias (representado pela estação MGRP) apresentou maior amplitude anual com 3539 mm, em seguida o reservatório de sobradinho (representado pela estação PEPE) que apresentou 1632,7 mm e por fim o reservatório Luiz Gonzaga com 166,46mm (representado pela estação BAPA). De acordo com a Tabela 4 o reservatório Três Marias que apresentou maior amplitude anual, apresenta a maior fração de Volume útil/área, e o reservatório Luiz Gonzaga que apresentou menor amplitude apresenta a menor fração de Volume útil/área.

75% das estações apresentam fase anual entre 57 e 80 dias, apenas a estação BAPA e PEPE apresentam comportamento diferente, com fase de 165,6 e 100,8 dias, respectivamente. Essa diferença entre os valores de fase encontrados pode ser associada a variabilidade das características climáticas na região. Por exemplo, os diferentes regimes pluviométricos que caracterizam a região nordeste do Brasil, conforme já analisado em diferentes estudos (SILVEIRA *et al.*, 2016; TINÔCO *et al.*, 2018) A fase anual média para os dados TWSA foi de 83,7 dias, estando entre as variáveis analisadas mais próxima da fase média encontrada para os dados de água subterrânea que foi 100,8 dias. As fases anuais dos sinais dos níveis de água subterrânea foram maiores que 70 dias, com exceção do poço associado à estação MGBH que apresentou fase anual de 22 dias. Para os reservatórios a fase média

encontrada foi de 142 dias, valores estes semelhantes para a fase dos três reservatórios.

Tabela 5 – Amplitude e Fases anuais das séries temporais. As fases são expressas em dias desde 1º de janeiro

Estação	Amplitudes Anuais (mm)				Fases Anuais (dias)			
	DVC	TWSA	CH	RS	DVC	TWSA	CH	RS
BAPA	1.04	374.46	129.17	166.46	-49.14	165.59	-165.89	157.85
BABJ	4.95	567.44	32.61	-	-80.25	67.41	71.84	-
BABR	4.87	871.07	45.71	-	-71.59	80.27	91.98	-
JAMG	4.72	1173.08	41.91	-	-91.01	69.75	71.75	-
MGBH	6	1222.89	53.01	-	-78.22	65.19	22.24	-
MGMC	4.41	926.99	39.89	-	-99.14	57.59	111.67	-
MGRP	6.97	1323.70	152.44	3539.03	-96.05	62.81	80.98	126.83
PEPE	2.86	523.01	138.65	1632.68	-60.24	100.83	138.00	143.76

Fonte: Autores (2023)

Considerando um meio completamente elástico, com anti-correlação muito forte (-1) entre a DVC e as fontes hidrológicas, a diferença de fase entre o sinal dos carregamentos hidrológicos e o sinal da DVC deveriam ser 180°. Na Tabela 6, são apresentadas da segunda a quarta coluna, as diferenças de fase entre os carregamentos hidrológicos e a DVC. Nas três últimas colunas são apresentadas a diferença de fase considerando o sinal teórico. Esse cálculo foi realizado com intuito de avaliar o tempo de resposta das deformações ao efeito das variáveis analisada. Valores positivos significam que o pico da amplitude anual da DVC está ocorrendo antes do pico da amplitude anual da componente hidrológica. Valores negativos indicam que o pico da amplitude do carregamento hidrológico está ocorrendo antes do pico da amplitude anual da DVC. Na estação PEPE por exemplo, a diferença de fase entre o TWSA e a DVC é 161.07 dias, a maior amplitude anual do sinal do TWSA acontece 18.93 dias antes da maior amplitude anual da DVC. Os padrões espaciais da estimativa as amplitudes anuais mostram que o TWSA atinge o pico primeiro e o DVC atinge o pico nos dias posteriores em 7 dos 8 locais estudados. Esse comportamento é esperado pois há diversos outros fatores que interferem na

DVC em resposta aos carregamentos hidrológicos como por exemplo chuva, tipo de solo e relevo.

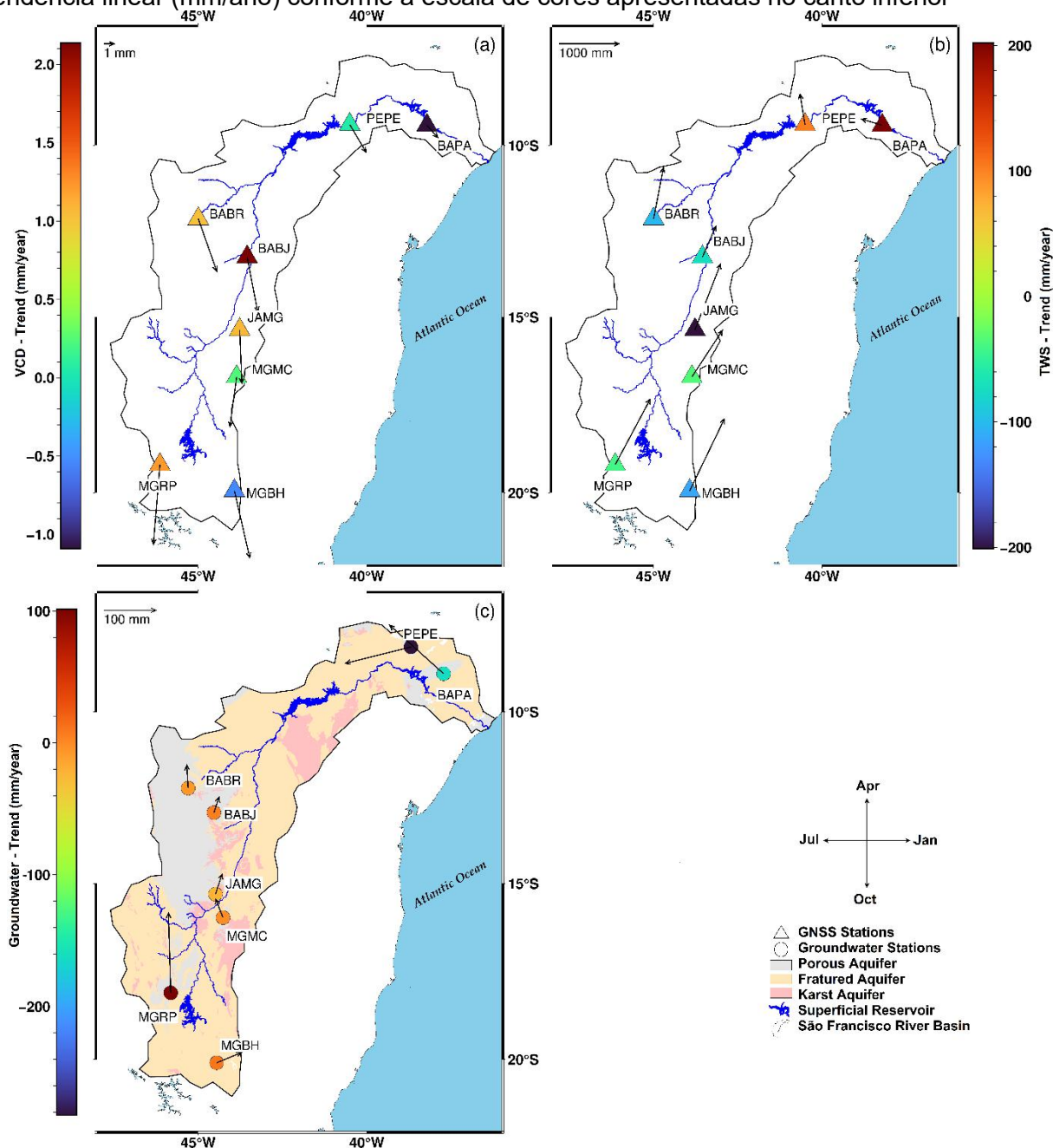
Tabela 6 – Diferença de Fase em dias

Estação	Diferença de Fase entre sinais			Diferença de Fase entre o sinal teórico		
	VCD - TWSA	VCD - CH	VCD - RS	VCD - TWSA	VCD - CH	VCD - RS
BAPA	214.73	-116.75	206.99	34.73	63.24	26.99
BABJ	147.66	152.09	-	-31.84	27.41	-
BABR	151.86	163.57	-	-28.14	16.42	-
JAMG	160.76	162.76	-	-19.24	17.23	-
MGBH	143.41	100.46	-	-36.59	79.54	-
MGMC	156.73	210.81	-	-23.27	-30.81	-
MGRP	158.86	177.03	222.94	-21.14	2.96	42.94
PEPE	161.07	198.24	204	-18.93	-18.24	24

Fonte: Autores (2023)

A Figura 3 apresenta os resultados das amplitudes e fases das séries DVC, TWSA e nível de água subterrânea utilizando o diagrama de fases, também são mostradas as tendências lineares.

Figura 3- Amplitudes e fases anuais das deformações DVC (a), do TWSA (b) e dos níveis de água subterrânea (c). O comprimento dos vetores representa a amplitude anual do local em mm, e a direção do vetor indica a fase anual (valor de maior pico) representada em dias contado no sentido anti-horário a partir do Leste (janeiro a dezembro). A escala dos vetores está marcada no canto superior esquerdo. Os círculos em cada estação representam a tendência linear (mm/ano) conforme a escala de cores apresentadas no canto inferior



Fonte: Autores (2023)

As estações que estão localizadas na região central e na região Sul da BRSF apresentaram maiores amplitudes anuais para as séries temporais DVC e TWSA. A região sul da BRSF é caracterizada por ter aquíferos do tipo fraturado (figura 3 c), com média capacidade de infiltração de água, além disso na superfície, os terrenos

nessa região exibem topografia fortemente ondulada com média a alta capacidade de infiltração, e acidentada com alta capacidade de escoamento de águas superficiais. É importante salientar que às vezes, os sinais verticais de GNSS podem ser atribuídos a mudanças topográficas causadas por processos geodinâmicos subjacente (SERPELLONI *et al.*, 2013).

A estação MGRP se destaca por obter o maior valor de amplitude anual para todas as séries temporais consideradas. Possivelmente a resposta da DVC está associada aos processos hidrológicos da região (Zhang *et al.*, 2019) associaram o aumento das águas subterrâneas na bacia do rio Yangtzé ao escoamento subterrâneo do rio em função do nível de água no reservatório superficial Três Gargantas (localizado na China). De forma similar, percebe-se que de acordo com o período aqui analisado, foi obtido um aumento no nível do reservatório três Marias bem como no poço de monitoramento de águas subterrâneas localizado nas proximidades da estação GNSS que corroboram com os valores de tendência encontrados para essa estação.

É destacado que as respostas de fluidos podem ser interpretadas a partir da carga hidráulica dos poços de água subterrânea e a reação na superfície pode ser medida usando o deslocamento vertical obtido por GNSS (Sneed & Galloway, 2000). Em relação as características hídricas subterrâneas, a maior parte da área de estudo está localizada em uma região de recarga, compostas pelos aquíferos Urucuai-Aerado e Bambuí. As estações BABJ, JAMG, MGMC e MGBH estão localizadas no aquífero Bambuí. Esse aquífero é classificado como cárstico e é caracterizado devido ao seu potencial hídrico subterrâneo, porém apresenta baixa capacidade de infiltração quando comparado a outros tipos de aquíferos presentes na região.

Apesar do elevado potencial hidrogeológico, o aquífero encontra-se frequentemente em situação de elevada vulnerabilidade, devido a extração de água subterrânea, que assume grande importância, principalmente para culturas de irrigação (CPRM, 2009). A principal área de afloramento desse aquífero está compreendida no oeste do estado da Bahia, localizada nas proximidades da estação BABR. A estação BAPA está localizada no aquífero Urucuai, que representa 41% da disponibilidade hídrica subterrânea da BRSF (CBHSF, 2016). Porém, de forma similar ao aquífero Bambuí, a região é caracterizada por ser grande exploradora das águas subterrâneas, tendo início a partir da década de 80, com crescimento agrícola

e implantação de extensas áreas de lavoura (GONÇALVES; ENGELBRECHT; CHANG, 2017).

4.2 TENDÊNCIA LINEAR

Na região central da bacia do rio, encontram-se as tendências lineares positivas para a série DVC considerando todo o período estudado. Overacker et al. (2022) destacam que as mudanças nas condições hidrológicas em aquíferos, especialmente aqueles que são regionalmente extensos e fortemente explorados, podem ser capazes de causar movimento de terra cujo sinal depende das propriedades geológicas do reservatório, condições climáticas e cultura impacto no recurso.

O valor crescente das tendências das séries DVC e decrescentes para as tendências do TWSA, indicam possível perda de massa d'água na região. Na maioria das estações as tendências do TWSA, CH e RS têm uma relação inversa com a tendência da DVC, fornecendo mais evidências para o controle por carregamento hidrológico. Os resultados indicam que a velocidade de elevação da crosta acelera em regiões onde há uma maior dependência dos recursos hídricos subterrâneos e de reservatórios superficiais. Estudos demonstraram que ações antropogênicas causam esgotamento de um reservatório de água subterrânea e/ou superficial e podem acelerar a elevação da DVC (ARGUS, Donald F. *et al.*, 2017; ARGUS, Donald F.; FU, Y.; LANDERER, 2014; KREEMER; BLEWITT, 2021).

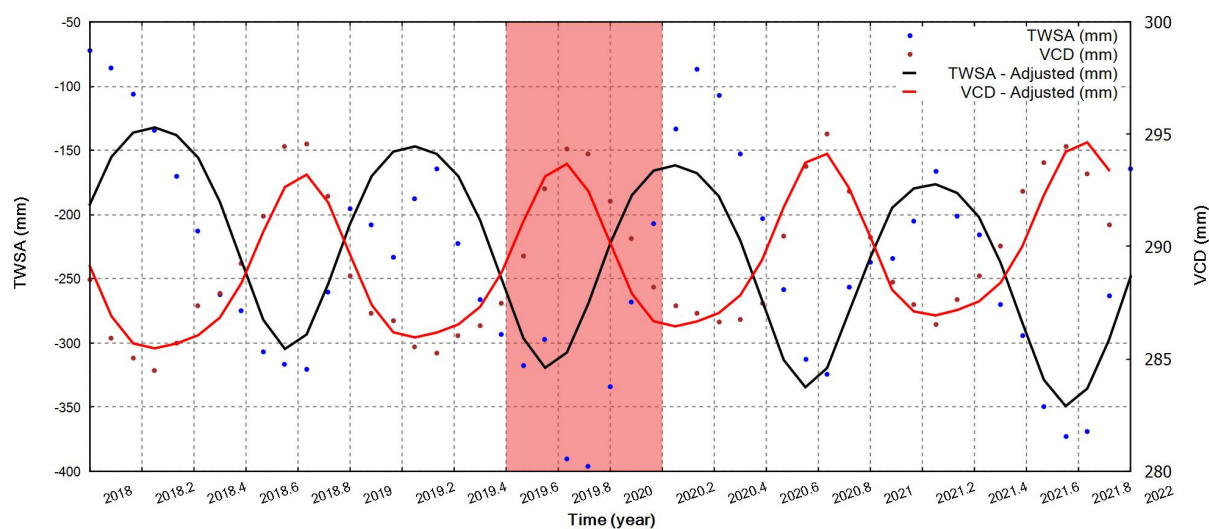
Na tabela 7 são apresentadas as tendências lineares para cada variável e em cada estação. Os valores em negrito indicam tendências não significativas. As tendências lineares para as séries TWSA estão congruentes com a tendência linear da média regional calculada (-24.731 mm/ano). Para série temporal calculada por meio da média regional da DVC, obteve-se uma tendência linear de 0.489 mm/ano, resultado similar (considerando efeitos de tendência de longo prazo) ao comportamento das estações analisadas.

Tabela 7- Tendência Linear (mm/ano)

Estação	DVC	TWSA	CH	RS
BAPA	-1.88	102,06	-769,09	770,24
BABJ	0.39	-73,61	-1568,44	-
BABR	1.28	-101,51	-63,56	-
JAMG	1.49	-201,04	24,53	-
MGBH	0.01	-112,43	44,68	-
MGMC	0.69	-34,89	-135,99	-
MGRP	0.28	-41,14	779,89	1740,88
PEPE	-0.24	102,68	-8,8	1359,44

A Figura 4 apresenta a média regional para o TWSA e a DVC, analisando a figura é possível identificar a anti-correlação entre o sinal da DVC e do TWSA. Ou seja, considerando defasagens presentes entre as séries, quando há picos de aumento do fluxo hídrico (TWSA) há também um maior DVC no sentido de subsidência.

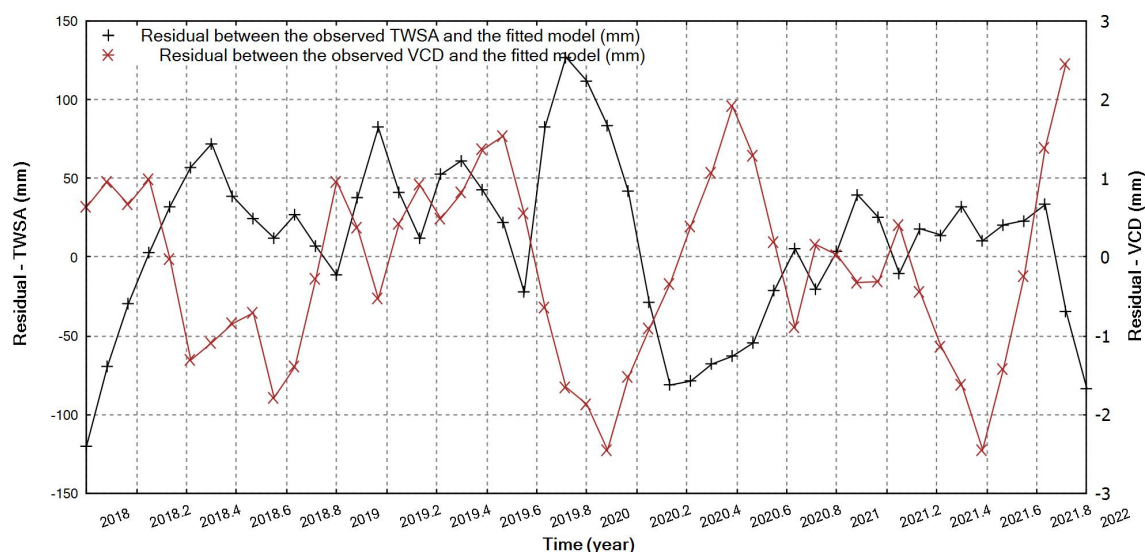
Figura 4 – Média Regional TWSA e DVC. Polígono em vermelho destacando períodos de seca.



Fonte: Autores (2023)

Analisando a Figura 4 Entre o período de 2019.4 e 2020, o TWSA apresentou uma anomalia que pode ser verificada na Figura 5, possivelmente associada a um período de seca.

Figura 5 - Resíduo obtido entre as séries temporais e o modelo ajustado



Fonte: Autores (2023)

4.3 ANÁLISE E CORRELAÇÃO DAS SÉRIES TEMPORAIS HIDROLÓGICAS

É possível observar que as séries temporais de todas as estações, que representam o deslocamento vertical crustal, são fortemente (0.59 a 0.9) anti-correlacionadas com as séries temporais do TWSA. Ou seja, quando o movimento do solo é direcionado para baixo (subsidência), há possivelmente aumento de carga hídrica localmente no terreno. Apenas as estações BAPA e BABJ apresentaram anti-correlação moderada (0.29 a 0.58) com a carga hidráulica local. As demais estações indicaram forte anti-correlação para essa variável. Como foi discutido no tópico anterior, as estações que estão na região central e sul da BRSF, estão localizadas em uma região caracterizada por forte atividade de extração de águas subterrâneas, podendo ser um dos fatores que contribui para forte anti-correlação entre a DVC e a carga hidráulica. Das três estações próximas aos reservatórios superficiais duas apresentaram anti-correlação moderada, apenas a estação BAPA tem forte anti-correlação.

Os resultados indicaram que a correlação máxima para as três variáveis ocorre com um *lag* de tempo entre 0 e 1 mês. Esse resultado mostra que há uma rápida resposta da crosta ao carregamento hidrológico gerando uma deformação vertical em um curto espaço de tempo. Isso é consistente com outros estudos que descobriram que a litosfera e o manto subjacente comportar-se como um elástico

perfeito, ou quase, para períodos de um ano ou menos (A; WAHR, John; ZHONG, 2013; BEVIS, 2005)

As correlações obtidas entre a DVC e os dados de precipitação não foram significativas considerando 95% de confiança. A representação dos dados de precipitação em escala mensal pode não traduzir os efeitos de forma adequada, pois os eventos de chuva ocorrem de forma localizada e em escala horária. Isso sugere que a análise do carregamento hidrológico submensal é importante para estudos GNSS de deslocamento de superfície, especialmente em áreas onde eventos extremos de precipitação são comuns (RAZEGHI et al., 2019; SPRINGER et al., 2019).

Tabela 7 - Correlação Cruzada e defasagens de tempo entre as séries temporais mensais. O primeiro número é o coeficiente de correlação e entre parênteses é o intervalo de tempo em meses. Destacado em negrito correlação cruzada não significativas

Estação GNSS	TWSA	CH	RS
BAPA	-0,60 (0)	-0,33 (0)	-0,76 (0)
BABJ	-0,70 (-1)	-0,45 (0)	-
BABR	-0,73 (-1)	-0,72 (0)	-
JAMG	-0,70 (0)	-0,74 (0)	-
MGBH	-0,82 (-1)	-0,62 (-1)	-
MGMC	-0,61 (0)	-0,42 (2)	-
MGRP	-0,83 (0)	-0,74 (0)	-0,51 (1)
PEPE	-0,59 (-1)	-0,67 (0)	-0,41 (0)

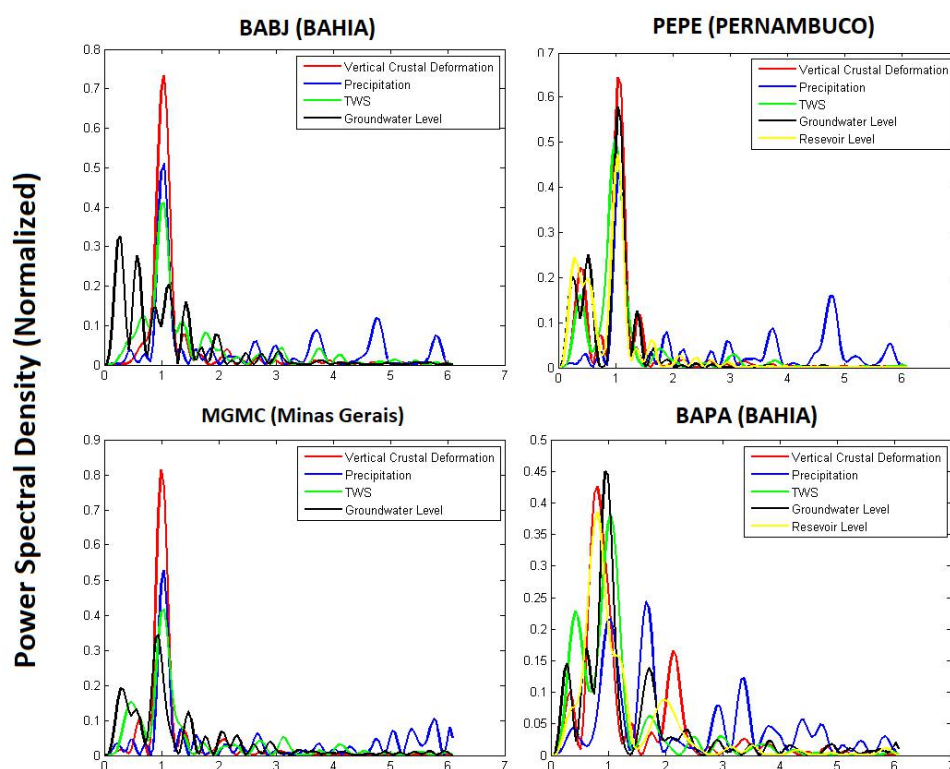
4.4 PSD DOS SINAIS SAZONAIS NAS SÉRIES TEMPORAIS

Para avaliar até que ponto os carregamentos hidrológicos aqui analisados são responsáveis pelas variações sazonais na DCV, foi calculado os espectros para cada série temporal normalizada e livre de tendência. Para todas as estações e em todas as variáveis hidrológicas analisadas o pico mais intenso corresponde a frequências entre 0.808 e 1.045 ciclos por ano (cpy) que corresponde a um período aproximado de 1 ano. Resultado similar ao encontrado por Davis et al. (2012), os autores explicam que picos próximos a 1 cpy podem ser associados a frequência anual climática ou draconítica (1.04 cpy), e para diferenciar essas duas frequências

é necessária uma série temporal de pelo menos 71 anos. A frequência anual climática é dominada por variações climáticas sazonais.

Foram identificadas também as cinco frequências mais significativas para cada fonte de dado, considerando o domínio da frequência. Para as estações JAMG, MGBH, MGMC, BAPA, PEPE e MGRP foram identificados picos nos sinais das séries temporais do TWSA, nível de águas subterrâneas e nível de reservatórios superficiais com frequência de 0.332 cpy. A figura 6 apresenta quatro periodogramas como exemplo de estações dentro da área de estudo.

Figura 6 – Densidades espectrais de potência de as váriaveis analisada e dados da DVC estimados para estações BABJ, PEPE, MGMC e BAPA. Destaca-se a frequência anual presente em todas as séries



Fonte: Autores (2023)

No periodograma da estação BAPA, o nível de água subterrânea e do nível do reservatório superficial apresenta maior potência associada a frequência anual do que a série temporal da precipitação. Esse resultado também foi encontrado para a estação PEPE e MGRP, que são localizadas próximas à reservatórios.

Com a análise espectral foi possível confirmar que as variações sazonais com frequência anual presentes nas séries temporais da DVC, são responsáveis pelas maiores amplitudes sazonais. Essas variações podem estar ligadas as estações do ano e devem ser investigadas. O PSD possibilita compreender para cada estação qual componente hidrológica apresenta variações sazonais anuais com maior potência. Aliado à análise da correlação cruzada, torna-se uma ferramenta importante para entender processos hidrológicos.

5 CONCLUSÕES

Os deslocamentos verticais sazonais observados por séries temporais com estações GNSS podem ser associados a efeitos nas mudanças sazonais locais. Essas variações sazonais na posição, especialmente na componente vertical, são esperadas devido a uma variedade de efeitos de carregamento hidrológicos associados ao transporte em larga escala de fluidos. Medições do TWSA derivados dos satélites GRACE e dados *in-situ* de precipitação, águas subterrâneas e reservatórios superficiais, apresentaram as variações significativas de armazenamento de água na BRSF, tanto espacial quanto temporalmente, que são fortemente anti-correlacionados com dados de deslocamentos verticais. Quando feita a análise com a correlação cruzada, esse comportamento se mantém, com *lags* variando entre 1 e -1 meses. Esse resultado mostra que há uma rápida resposta da crosta ao carregamento hidrológico gerando uma deformação vertical em um curto espaço de tempo que é capturado pela variação da série temporal obtida por GNSS.

Por meio da análise espectral dos sinais dos dados VDC foi possível identificar picos nas frequências anuais (1.04 cpy) que podem ser relacionadas as frequências draconítica e picos com baixas frequências (< 1 cpy), com destaque para a frequência de 0.332 cpy que apresentou forte potência associadas as amplitudes sazonais variando entre 0.43 e 11.46 mm. Foi possível identificar no peridiograma dos sinais das séries temporais do TWSA, do nível de água subterrânea e do nível da água nos reservatórios superficiais, picos com potência significativa também na frequência de 0.332 cpy. Destaca-se que para uma melhor compreensão das frequências anuais induzidas por variáveis climáticas de outras frequências associadas ao posicionamento pelo GNSS (frequência draconítica), é recomendando uma série temporal maior e com maior completude de dados. Sendo esse considerado um fator limitante não só apenas para a bacia estudada como para várias regiões do planeta, devido a baixa disponibilidade de dados.

A região da BRSF é caracterizada por perfuração de poços artesanais e pela utilização de águas subterrâneas para cultura de irrigação, agropecuária e uso doméstico desde o final dos anos 80. Existem inúmeros registros de poços perfurados na BRSF, porém não há disponibilidade de dados para monitoramento e investigação do nível de água. Na região central da BRSF, foram encontradas as

maiores amplitudes na Deformação Crustal Vertical, com tendências lineares positivas caracterizando perda de massa d'água.

Por fim, destaca-se a importância da densificação das redes geodésicas de monitoramento contínuo GNSS para auxiliar na gestão integrada das águas superficiais e subterrâneas, sendo uma alternativa complementar, mesmo que ainda pouco explorada para a compreensão da dinâmica do sistema hidrológico oriunda da variabilidade da crosta terrestre.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil. Brasília: ANA, 2019.

A, G.; WAHR, John; ZHONG, S. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible Earth to surface loading: an application to Glacial Isostatic Adjustment in Antarctica and Canada. **Geophysical Journal International**, 1 fev. 2013. v. 192, n. 2, p. 557–572. Disponível em: <<http://academic.oup.com/gji/article/192/2/557/2889898/Computations-of-the-viscoelastic-response-of-a-3D>>.

ALTAMIMI, Z. *et al.* ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, ago. 2016. v. 121, n. 8, p. 6109–6131. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2016JB013098>>.

ARGUS, Donald F. *et al.* Sustained Water Loss in California's Mountain Ranges During Severe Drought From 2012 to 2015 Inferred From GPS. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, dez. 2017. v. 122, n. 12, p. 10,559-10,585. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2017JB014424>>.

_____; FU, Y.; LANDERER, F. W. Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion. **Geophysical Research Letters**, 28 mar. 2014. v. 41, n. 6, p. 1971–1980.

BERTIGER, W. *et al.* Single receiver phase ambiguity resolution with GPS data. **Journal of Geodesy**, 21 maio. 2010. v. 84, n. 5, p. 327–337. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-010-0371-9>>.

BEVIS, M. Seasonal fluctuations in the mass of the Amazon River system and Earth's elastic response. **Geophysical Research Letters**, 2005. v. 32, n. 16, p. L16308. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2005GL023491>>.

_____; BROWN, A. Trajectory models and reference frames for crustal motion geodesy. **Journal of Geodesy**, 5 mar. 2014. v. 88, n. 3, p. 283–311. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-013-0685-5>>.

BOS, M. S. *et al.* Fast error analysis of continuous GNSS observations with missing data. **Journal of Geodesy**, 2 abr. 2013. v. 87, n. 4, p. 351–360. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00190-012-0605-0>>.

BROOKS, B. A. *et al.* Orogenic-wedge deformation and potential for great earthquakes in the central Andean backarc. **Nature Geoscience**, 8 jun. 2011. v. 4, n. 6, p. 380–383. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/ngeo1143>>.

CHANARD, Kristel *et al.* A warning against over-interpretation of seasonal signals measured by the Global Navigation Satellite System. **Nature Communications**, 13 dez. 2020. v. 11, n. 1, p. 1375. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/s41467-020-15100-7>>.

CHEN, X.; JIANG, J.; LI, Hui. Drought and flood monitoring of the Liao River Basin in Northeast China using extended GRACE data. **Remote Sensing**, 2018. v. 10, n. 8.

DAM, T. VAN; WAHR, J.; LAVALLÉE, D. A comparison of annual vertical crustal displacements from GPS and Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) over Europe. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 4 mar. 2007. v. 112, n. 3.

DAVIS, J. L.; WERNICKE, B. P.; TAMISIEA, M. E. On seasonal signals in geodetic time series. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1 jan. 2012. v. 117, n. 1.

DILL, R.; DOBSLAW, H. Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, set. 2013. v. 118, n. 9, p. 5008–5017.

FERREIRA, V. G. *et al.* Characterization of the hydro-geological regime of Yangtze River basin using remotely-sensed and modeled products. **Science of the Total Environment**, 20 maio. 2020. v. 718.

FERREIRA, Vagner G. *et al.* Prospects for imaging terrestrial water storage in south america using daily gps observations. **Remote Sensing**, 2019. v. 11, n. 6, p. 1–27.

_____; ASIAH, Z. An Investigation on the Closure of the Water Budget Methods Over Volta Basin Using Multi-Satellite Data. [S.l.]: [s.n.], 2015, p. 171–178.

FU, Y.; FREYMUELLER, J. T. Seasonal and long-term vertical deformation in the Nepal Himalaya constrained by GPS and GRACE measurements. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, mar. 2012. v. 117, n. B3. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2011JB008925>>.

GERUO, A.; WAHR, John; ZHONG, S. Computations of the viscoelastic response of a 3-D compressible earth to surface loading: An application to glacial isostatic adjustment in Antarctica and Canada. **Geophysical Journal International**, 2013. v. 192, n. 2, p. 557–572.

GONÇALVES, R. D.; ENGELBRECHT, B. Z.; CHANG, H. K. Evolução da contribuição do Sistema Aquifero Urucuia para o Rio São Francisco, Brasil. **Águas Subterrâneas**, 22 dez. 2017. v. 32, n. 1, p. 1–10.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 24 maio. 2012. v. 84, n. 2, p. 297–312. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652012000200006&lng=en&tlng=en>.

JIANG, D. *et al.* The review of GRACE data applications in terrestrial hydrology monitoring. **Advances in Meteorology**, 2014. v. 2014.

JIANG, Z. *et al.* Characterizing Spatiotemporal Patterns of Terrestrial Water Storage Variations Using GNSS Vertical Data in Sichuan, China. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 7 dez. 2021. v. 126, n. 12.

KIERULF, H. P. *et al.* A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia. **Journal of Geodynamics**, 2021. v. 146, n. April, p. 101845. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101845>>.

KREEMER, C.; BLEWITT, G. Robust estimation of spatially varying common-mode components in GPS time-series. **Journal of Geodesy**, 1 jan. 2021. v. 95, n. 1.

LANDERER, F. W. *et al.* Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. **Geophysical Research Letters**, 28 jun. 2020. v. 47, n. 12. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020GL088306>>.

LANGBEIN, J. High-rate real-time GPS network at Parkfield: Utility for detecting fault slip and seismic displacements. **Geophysical Research Letters**, 2004. v. 31, n. 15, p. L15S20. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003GL019408>>.

LAROCHELLE, S. *et al.* Identification and Extraction of Seasonal Geodetic Signals Due to Surface Load Variations. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 1 dez. 2018. v. 123, n. 12, p. 11,031-11,047.

LI, W. *et al.* Extracting common mode errors of regional gnss position time series in the presence of missing data by variational bayesian principal component analysis. **Sensors (Switzerland)**, 2 abr. 2020a. v. 20, n. 8.

_____ *et al.* Extracting common mode errors of regional gnss position time series in the presence of missing data by variational bayesian principal component analysis. **Sensors (Switzerland)**, 2 abr. 2020b. v. 20, n. 8.

_____ *et al.* A New Spatial Filtering Algorithm for Noisy and Missing GNSS Position Time Series Using Weighted Expectation Maximization Principal Component Analysis: A Case Study for Regional GNSS Network in Xinjiang Province. **Remote Sensing**, 1 mar. 2022. v. 14, n. 5.

LIU, H.; LI, L. Missing Data Imputation in GNSS Monitoring Time Series Using Temporal and Spatial Hankel Matrix Factorization. **Remote Sensing**, 20 mar. 2022. v. 14, n. 6, p. 1500.

LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. **Astrophysics and Space Science**, fev. 1976. v. 39, n. 2, p. 447–462. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00648343>>.

LUTHCKE, S. B. *et al.* Gravimetry measurements from space. **Remote Sensing of the Cryosphere**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014, p. 231–247.

MORRIS, DONALD A.; JOHNSON, A. I. **Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60**. [S.l.]: [s.n.], 1967. Disponível em: <<https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp1839D>>.

MUTTI, P. R. *et al.* Assessment of Gridded CRU TS Data for Long-Term Climatic Water Balance Monitoring over the São Francisco Watershed, Brazil. **Atmosphere**, 7 nov. 2020. v. 11, n. 11, p. 1207.

OVERACKER, J. *et al.* Vertical Land Motion of the High Plains Aquifer Region of the United States: Effect of Aquifer Confinement Style, Climate Variability, and Anthropogenic Activity. **Water Resources Research**, 2022. v. 58, n. 6.

PAN, Y. *et al.* Contemporary Mountain-Building of the Tianshan and its Relevance to Geodynamics Constrained by Integrating GPS and GRACE Measurements. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 21 nov. 2019. v. 124, n. 11, p. 12171–12188. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019JB017566>>.

PAREDES-TREJO, F. *et al.* Drought assessment in the são francisco river basin using satellite-based and ground-based indices. **Remote Sensing**, 1 out. 2021. v. 13, n. 19.

PELTIER, W. R.; ARGUS, D. F.; DRUMMOND, R. Space geodesy constrains ice age terminal deglaciation: The global ICE-6G-C (VM5a) model. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 2015. v. 120, n. 1, p. 450–487.

PFEFFER, J. *et al.* Decoding the origins of vertical land motions observed today at coasts. **Geophysical Journal International**, 1 jul. 2017. v. 210, n. 1, p. 148–165. Disponível em: <<https://academic.oup.com/gji/article/210/1/148/3739342>>.

RAZEGHI, M. *et al.* A Joint Analysis of GPS Displacement and GRACE Geopotential Data for Simultaneous Estimation of Geocenter Motion and Gravitational Field. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 22 nov. 2019. v. 124, n. 11, p. 12241–12263.

SANTAMARÍA-GÓMEZ, A. *et al.* Correlated errors in GPS position time series: Implications for velocity estimates. **Journal of Geophysical Research**, 20 jan. 2011. v. 116, n. B1, p. B01405. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2010JB007701>>.

SERPELLONI, E. *et al.* Vertical GPS ground motion rates in the Euro-Mediterranean region: New evidence of velocity gradients at different spatial scales along the Nubia-Eurasia plate boundary. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, nov. 2013. v. 118, n. 11, p. 6003–6024. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/2013JB010102>>.

SILVEIRA, C. Da S. *et al.* Mudanças climáticas na bacia do rio São Francisco: Uma análise para precipitação e temperatura. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2016. v. 21, n. 2, p. 416–428.

SNEEUW, N. *et al.* Estimating Runoff Using Hydro-Geodetic Approaches. **Surveys in Geophysics**, 2014. v. 35, n. 6, p. 1333–1359.

SPRINGER, A. *et al.* Evidence of daily hydrological loading in GPS time series over Europe. **Journal of Geodesy**, 17 out. 2019. v. 93, n. 10, p. 2145–2153.

SUN, T. *et al.* Water availability of são francisco river basin based on a space-borne geodetic sensor. **Water (Switzerland)**, 2016. v. 8, n. 5.

TAPLEY, B. D. *et al.* The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. **Geophysical Research Letters**, 16 maio. 2004. v. 31, n. 9, p. n/a-n/a. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2004GL019920>>.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.

TINÔCO, I. C. M. *et al.* Characterization of Rainfall Patterns in the Semiarid Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, 20 ago. 2018. v. 41, n. 2, p. 397–409.

WU, S. *et al.* Analysis of deterministic and stochastic models of GPS stations in the crustal movement observation network of China. **Advances in Space Research**, 15 jul. 2019. v. 64, n. 2, p. 335–351.

ZAJDEL, R.; SOŚNICA, K.; BURY, G. Geocenter coordinates derived from multi-GNSS: a look into the role of solar radiation pressure modeling. **GPS Solutions**,

2021. v. 25, n. 1, p. 1–15. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s10291-020-01037-3>>.

ZHANG, D.; LIU, X.; BAI, P. Assessment of hydrological drought and its recovery time for eight tributaries of the Yangtze River (China) based on downscaled GRACE data. **Journal of Hydrology**, jan. 2019. v. 568, p. 592–603.