



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

FÁBIO VINÍCIUS MARLEY SANTOS LIMA

**OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES APLICADAS PARA  
CARACTERIZAÇÃO DE SECAS E MONITORAMENTO DE MASSA  
HIDROLÓGICA**

Recife

2021

FÁBIO VINÍCIUS MARLEY SANTOS LIMA

**OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES APLICADAS PARA  
CARACTERIZAÇÃO DE SECAS E MONITORAMENTO DE MASSA  
HIDROLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial 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. Rodrigo Mikosz Gonçalves.

Coorientador: Prof. Dr. Henry Diverth Montecino Castro.

Recife

2021

Catálogo na fonte:  
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago CRB-4 / 1267

- L732o Lima, Fábio Vinícius Marley Santos.  
Observações geodésicas multi-sensores aplicadas para caracterização de secas e monitoramento de massa hidrológica / Fábio Vinícius Marley Santos Lima. – 2021.  
86 f. : il., figs., tabs., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves.  
Coorientador: Prof. Dr. Henry Diverth Montecino Castro.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife, 2021.  
Inclui referências.
1. Ciências geodésicas. 2. Índice de seca. 3. Sensores geodésicos. 4. Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). 5. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). 6. Total Water Storage (TWS). I. Gonçalves, Rodrigo Mikosz (Orientador). II. Castro, Henry Diverth Montecino. III. Título.

UFPE

526.1 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-336

FÁBIO VINÍCIUS MARLEY SANTOS LIMA

**OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES APLICADAS PARA  
CARACTERIZAÇÃO DE SECAS E MONITORAMENTO DE MASSA  
HIDROLÓGICA**

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

Aprovada em: 31 / 08 / 2021.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Vagner Gonçalves Ferreira (Examinador Externo)  
Hohai University

---

Prof. Dr. Pedro Rodrigues Mutti (Examinador Externo)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho a minha vó maternal, Maria Angélica (*in memoriam*), saudades eternas.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, onde mesmo com meus erros, fracassos e dificuldades ele me deu forças para continuar, me apoiou e me guiou nesse caminho acadêmico, minha eterna gratidão, sem Ele eu não seria nada.

Aos meus pais, Verônica Santos e Fábio Lima, que, apesar das adversidades, sempre me incentivaram em meus sonhos. Amo vocês.

Ao meu irmão, Filipe Lima, que sempre me mostra que a vida pode ser mais leve apesar de tantas dificuldades. Te amo.

Ao meu amor, Diego Oliveira que me acompanhou neste sonho acadêmico, me dando apoio, conselhos e confiança para concluir meu mestrado. Te amo.

Aos meus queridos amigos, meus irmãos além de sangue, que mesmo distante o amor e carinho jamais se cessaram, meu eterno carinho, obrigado por serem tão importantes em minha vida, Dandhara Roberta, Melayne Rocha, Priscila Pascoal Tainã Martins e Túlio Martins.

As melhores pessoas que a vida acadêmica me apresentou, Camila Ribeiro e Tácito Richarles, obrigado por tudo que vivemos e ainda viveremos.

Obrigado UFPE por me permitir conhecer pessoas maravilhosas na graduação e na pós-graduação, que levarei para a vida toda André Victor, Antônio Junior, Carlos Fabricio Emylle Lira, Laisa Barreto, Rayssa Pedrosa e Vanessa Moraes. Em especial para Raquel Arcoverde, amiga, você se fez tão importante nessa jornada durante o mestrado, obrigada pelos dias no laboratório, pelos artigos conquistados, por cada momento que vivemos juntos desde o TCC na graduação, minha eterna gratidão.

Às minhas queridas amigas, Aline Barros, Ana Rita Silva, Angélica Nogueira, Camila Sales, Eliane Costa, Kammila Tavares, Nazidy Santana, Rosicleide Xavier. Obrigado por todo o carinho e amizade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Rodrigo Mikosz, que me deu a oportunidade de crescer nessa trajetória acadêmica, por todo seu conhecimento passado, paciência, incentivo e todas as suas orientações. Muito obrigado!

Ao meu coorientador Prof. Dr. Henry D. Montecino Castro, por aceitar participar desta pesquisa e contribuir imensamente para o enriquecimento deste trabalho, obrigado por todos conhecimentos e orientações passados. Muito obrigado!

À minha banca, por concordarem em avaliar e contribuir de forma significativa este trabalho, minha gratidão ao Prof. Dr. Vagner Ferreira e Prof. Dr. Pedro Mutti.

Obrigado a CAPES pela concessão da bolsa ao longo do mestrado.

## RESUMO

A dissertação é estruturada em dois capítulos dentro de uma linha de base comum associada a determinados objetivos específicos. Cada capítulo é no formato de artigo abordando a utilização de sensores geodésicos aplicados no monitoramento de extremos climáticos como a seca e a perda de massa hidrológica. Tendo como área de estudo a Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental (NEAHR) no Brasil, localizada no extremo nordeste brasileiro, com cerca de 24 milhões de habitantes desde o Piauí até Alagoas, onde ocupa 3,4% do território nacional, uma área de aproximadamente 287 mil km<sup>2</sup>, abrangendo boa parte do Semiárido brasileiro caracterizada por apresentar períodos de estiagens prolongadas e temperaturas elevadas durante todo o ano. O Capítulo 1 apresenta o comportamento da variabilidade de massa hidrológica no NEAHR a partir de combinações de dados temporais da missão *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) a partir do armazenamento total de água na superfície terrestre (TWS), imagens de sensoriamento remoto do *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) a bordo do satélite TERRA a partir do *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), volume de água nos 346 reservatórios existentes na região, dados de precipitação a partir de pluviômetros para cálculo do índice de seca *Standardized Precipitation Index* - SPI. Os resultados confirmam a coesão entre as variações do TWS com o volume de água e NDVI, obtendo uma forte correlação de 0,78 e 0,77 respectivamente. As escalas do Índice de Precipitação Padronizado (12, 24 e 36 meses) mostraram uma correlação moderada e forte com o TWS de 0,57, 0,73 e 0,72 respectivamente e identificaram a última seca severa regional de 2012 a 2017. O capítulo 2 utiliza diversos índices de seca a partir de observações temporais de diversas fontes como o (GRACE) e o seu sucessor *GRACE Follow – On*, dados de precipitação do *Climatic Research Unit* (CRU) e coordenadas de estações de monitoramento contínuo do *Global Positioning System* (GPS) para calcular tais índices como o *Combined Climatic Deviation Index* (CCDI), *Drought Severity Index* (DSI), *Vertical Crustal Deformation Index* (DI<sub>VCD</sub>) e o SPI em múltiplas escalas (03, 06, 12, 24 e 36 meses) afim de melhor entender e caracterizar os diversos tipos de seca que a região se encontra suscetível de ocorrer. Os resultados encontrados mostram fortes correlações ( $r = 0.76$  e  $0.66$  entre o CCDI e o SPI-03/06. O DSI se correlacionou fortemente com os SPI-24/36 obtendo ( $r = 0.69$  e  $0.76$ ). O DI<sub>VCD</sub> apresentou algumas limitações, porém se mostrou promissor para detectar as frequências de secas hidrológicas, variando suas correlações ( $r = 0.22$  até  $0.62$  de fraca á fortes com o SPI-24. Destaca-se que todos os índices aqui aplicados tiveram a sensibilidade de identificar a última

seca severa de 2012 a 2018 bem como a continuidade deste extremo que vem agravando a situação de vulnerabilidade à seca na região para os anos de 2019 e 2020.

Palavras-chave: índice de seca; sensores geodésicos; Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); Total Water Storage (TWS).

## ABSTRACT

The dissertation is structured in two chapters within a common baseline associated with certain specific objectives. Each chapter is a published (or to be published) article addressing the use of geodetic sensors applied in monitoring climate extremes such as drought and loss of hydrological mass in the Northeastern Atlantic Hydrographic Region (NEAHR) in Brazil, located in the extreme northeast Brazilian, with about 24 million inhabitants from Piauí to Alagoas, where it occupies 3.4% of the national territory, an area of approximately 287,000 km<sup>2</sup>, covering a good part of the Brazilian Semiarid region characterized by periods of prolonged drought and high temperatures during all year. Chapter 1 presents the behavior of hydrological mass variability in the NEAHR from combinations of temporal data from the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) mission from total earth surface water storage (TWS), remote sensing images from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard the TERRA satellite from the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), water volume in the 346 reservoirs in the region, precipitation data from rain gauges to calculate the drought index Standardized Precipitation Index - SPI. The results confirm the cohesion between TWS variations with water volume and NDVI, obtaining a strong correlation of 0.78 and 0.77 respectively. The Standardized Rainfall Index scales (12, 24 and 36 months) showed a moderate and strong correlation with the TWS of 0.57, 0.73 and 0.72 respectively and identified the last severe regional drought from 2012 to 2017. chapter 2 uses several drought indices from temporal observations from various sources such as (GRACE) and its successor GRACE Follow - On, precipitation data from the Climatic Research Unit (CRU) and coordinates from global positioning continue monitoring stations System (GPS) to calculate such indices as the Combined Climatic Deviation Index (CCDI), Drought Severity Index (DSI), Vertical Crustal Deformation Index (DIVCD) and the SPI on multiple scales (03, 06, 12, 24 and 36 months) in order to better understand and characterize the various types of drought that the region is likely to occur. The results found show strong correlations ( $r$ ) = 0.76 and 0.66 between the CCDI and the SPI-03/06. The DSI was strongly correlated with the SPI-24/36 obtaining ( $r$ ) = 0.69 and 0.76. The DIVCD had some limitations, but showed promise for detecting the frequencies of hydrological droughts, varying its correlations ( $r$ ) = 0.22 to 0.62 from weak to strong with SPI-24. It is noteworthy that all the indices applied here had the sensitivity to identify the last severe drought from 2012 to 2018, as well as the continuity of this extreme, which has been aggravating the situation of vulnerability to drought in the region for the years 2019 and 2020.

Keywords: drought index; geodetic sensor; Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE); Normalized Difference Vegetation Index (NDVI); Total Water Storage (TWS).

## LISTA DE FIGURAS

### ARTIGO 1 - ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL MASS LOSSES IN THE NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC REGION, BRAZIL

|            |                                                                                                                                                                             |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 - | (a) Location of the Hydrographic study case Region in Brazil, (b) rainfall stations over the study area.....                                                                | 22 |
| Figure 2 - | Summary of the methodology.....                                                                                                                                             | 25 |
| Figure 3 - | Linear trend for both volume (hm <sup>3</sup> ) and TWS (cm).....                                                                                                           | 30 |
| Figure 4 - | Line trend for both TWS (cm) and NDVI.....                                                                                                                                  | 31 |
| Figure 5 - | (a) Temporal correlation between TWS (cm) and SPI - 12, (b) temporal correlation between TWS (cm) and SPI - 24, (c) temporal correlation between TWS (cm) and SPI - 36..... | 32 |
| Figure 6 - | Months classified as dry in the years 2003-2018 from SPI-12.....                                                                                                            | 34 |
| Figure 7 - | Figures (a), (b) and (c) are EOF1, EOF2, and EOF3 of TWS. Figures (d), (e) and (f) are the main components PC1, PC2 and PC3 of TWS.....                                     | 35 |
| Figure 8 - | a) TWS annual amplitude map, b) TWS annual phase change map.....                                                                                                            | 36 |

### ARTIGO 2 - OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES PARA COMPREENSÃO DE SECAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO ATLÂNTICO NORDESTE - NAEHR, BRASIL

|            |                                                                                                                                                                     |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - | (a) Localização da Região Hidrográfica no Brasil, (b) expansão da Região Hidrográfica no Nordeste.....                                                              | 51 |
| Figura 2 - | Resumo da metodologia.....                                                                                                                                          | 53 |
| Figura 3 - | Série temporal mensal do índice de seca baseado em TWS-GRACE para NEARH: a) CCDI, (b) DSI-GRACE.....                                                                | 59 |
| Figura 4 - | Análise temporal multiescala SPI: (a) SPI-12, (b) SPI-24, (c) SPI-36, (d) SPI-03, (e) SPI-66.....                                                                   | 60 |
| Figura 5 - | Caracterização dos períodos secos por cada índice de seca.....                                                                                                      | 62 |
| Figura 6 - | Distribuição temporal das estações DIVCD e spi-24: (a) estação PBJP, (b) estação PBCG, (c) estação CESB, (d) estação RNMO, (e) estação CEUU e (f) estação CEFT..... | 64 |

|            |                                                                                                                                                                                 |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 7 - | As figuras (a) e (b) são EOFs de CCDI, (c) e (d) são os principais componentes PCs de CCDI, (e) e (f) são EOFs de DSI, (g) e (h) são os principais componentes PC's da DSI..... | 67 |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|

## LISTA DE TABELAS

### **ARTIGO 1 - ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL MASS LOSSES IN THE NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC REGION, BRAZIL**

|           |                                                                            |    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Table 1 - | Summary data.....                                                          | 23 |
| Table 2 - | Number of reservoirs in each state of the NAEHR and its participation..... | 24 |
| Table 3 - | Temporal MODIS images.....                                                 | 26 |
| Table 4 - | Standardized Precipitation Index Rating.....                               | 28 |

### **ARTIGO 2 - OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES PARA COMPREENSÃO DE SECAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO ATLÂNTICO NORDESTE - NAEHR, BRASIL**

|            |                                                                                            |    |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - | Linha de tempo das observações GPS.....                                                    | 52 |
| Tabela 2 - | Categorias de seca e seus limites correspondentes para os diversos índices<br>de seca..... | 55 |
| Tabela 3 - | Frequência de eventos de seca para cada índice.....                                        | 62 |
| Tabela 4 - | Correlação estatística entre as multiescala SPI e DIVCD.....                               | 63 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                   |                                                            |
|-------------------|------------------------------------------------------------|
| ANA               | Agência Nacional de Águas                                  |
| APAC              | Agência Pernambucana de Águas e Clima                      |
| AVHRR             | Advanced Very High Resolution Radiometer                   |
| CCAR              | Colorado Center For Astrodynamics Research                 |
| CCDI              | Combined Climatic Deviation Index                          |
| CRU               | Climatic Research Unit                                     |
| CSR               | Center for Space Research                                  |
| CV                | Coeficiente de Variação                                    |
| D0                | Abnormally Drought                                         |
| D1                | Moderate Drought                                           |
| D2                | Severe Drought                                             |
| D3                | Extreme Drought                                            |
| D4                | Exceptional Drought                                        |
| DI <sub>VCD</sub> | Vertical Crustal Deformation Index                         |
| DSI               | Drought Severity Index                                     |
| EOF               | Empirical Orthogonal Functions                             |
| GFZ               | Global Geophysical Fluids Center                           |
| GNSS              | Global Navigation Satellite System                         |
| GPS               | Global Positioning System                                  |
| GRACE             | Gravity Recovery and Climate Experiment                    |
| GRACE-FO          | Gravity Recovery e Climate Experiment Follow-On            |
| GSFC              | Goddard Space Flight Center                                |
| HR                | Hydrographic Regions                                       |
| IBGE              | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística            |
| IERS              | International Earth Rotation and Reference Systems Service |
| INMET             | Instituto Nacional de Meteorologia                         |
| ITCZ              | Intertropical Convergence Zone                             |
| JPL               | Jet Propulsion Laboratory                                  |
| Mascon            | Mass Concentration                                         |
| MJO               | Madden-Julian Oscillation                                  |
| MNDWI             | Modified Normalized Difference Water Index                 |

|        |                                                    |
|--------|----------------------------------------------------|
| MODIS  | Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer      |
| NASA   | National Aeronautics and Space Administration      |
| NDMC   | United States National Drought Mitigation Center   |
| NDVI   | Normalized Difference Vegetation Index             |
| NEAHR  | Northeast Atlantic Eastern Hydrographic Region     |
| NGL    | Nevada Geodetic Laboratory                         |
| PCA    | Principal Component Analysis                       |
| RHANO  | Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental |
| SPI    | Standardized Precipitation Index                   |
| SST    | Sea Surface Temperature                            |
| SUDENE | Northeast Development Superintendence              |
| TWS    | Total Water Storage                                |

## SUMÁRIO

|   |                                                                                                                                                    |    |
|---|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO.....                                                                                                                                    | 16 |
| 2 | ARTIGO 1 - ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL MASS LOSSES IN<br>THE NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC<br>REGION, BRAZIL .....                        | 18 |
| 3 | ARTIGO 2 - OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES<br>PARA COMPREENSÃO DE SECAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA<br>DO ATLÂNTICO NORDESTE - NAEHR, BRASIL..... | 47 |
| 4 | CONCLUSÕES E OBSERVAÇÕES.....                                                                                                                      | 75 |
|   | REFERÊNCIAS .....                                                                                                                                  | 76 |

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil sendo um país com dimensões continentais devido a sua extensa amplitude em latitude (5°N a 34°S) possui variações climáticas, ao longo do seu território desde o semiárido quente cobrindo o nordeste do país até o subtropical úmido ao sul (Ndehedehe et al., 2020), destaca-se que o fenômeno seca é passível de ser encontrado em todas regiões do país. Tal fenômeno ocasiona grandes impactos nos sistemas naturais e humanos (Schwalm et al., 2017). De acordo com Wilhite e Glantz (1985) a seca é um extremo climático originado pelo déficit de precipitação, que resulta na baixa disponibilidade hídrica, mas ao passar do tempo, essa definição se tornou algo mais complexo e indefinido formalmente (Wilhite et al., 2007).

Atualmente, as observações temporais por satélites artificiais fazem parte de uma gama de ferramentas investigatórias que assumem um papel nas estimativas de fenômenos meteorológicos e ambientais, servindo de suporte para monitoramento e estudo das mudanças climáticas e possibilitando a tomada de decisão para preservação ambiental (Moreira, 2003). O conceito da Geodesia Ambiental vem se espalhando pelo mundo, onde tratasse da utilização das observações de missões da geodesia celeste, tais como a missão GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), que foi iniciada em 2002 com o lançamento dos seus satélites gêmeos, tal missão é capaz de mensurar as mudanças espaciais e temporais do campo gravimétrico da Terra em intervalos regulares (Wahr et al., 1998), tendo como seu sucesso o GRACE-FO lançado em maio de 2018. Ramillien et al. (2008) concluíram que a gravimetria por satélite GRACE oferece técnicas alternativas para medir mudanças no armazenamento total de água em inglês *Total Water Storage* (TWS).

Sensoriamento Remoto é uma ferramenta de obtenção de dados da superfície terrestre, que constitui uma técnica importante para o acompanhamento sistemático ambiental. Essa ferramenta assume um papel na estimativa dos diversos fenômenos meteorológicos e ambientais, servindo de suporte para monitoramento e estudo das mudanças climáticas e possibilitando a tomada de decisão para preservação ambiental (Moreira, 2003). Os índices espectrais são uma das técnicas mais comuns usadas para analisar dados de sensoriamento remoto (Huete, A.R., Liu, H.Q., et al., 1997). Os índices espectrais concentram-se em enfatizar as características da vegetação, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) tem sido utilizado com sucesso para o monitoramento de mudanças na vegetação em escala regional, continental e global (Bannari et al., 1995; Huete et al., 2002; Junges e Fontana, 2009).

As missões envolvendo o GNSS (*Global Navigation Satellite System*) como o GPS (*Global Positioning System*) identificam secas ligada diretamente com a deformação da crosta

terrestre, estudos como de Chew e Small,(2014) e Ferreira et al., (2018) argumentam que tal deformação respondem a secas associadas, cujo o GPS registra a partir das coordenadas monitoradas o deslocamento crustal vertical (VCD) devido a carga hidrológica e mudanças do TWS.

O desenvolvimento deste trabalho de dissertação foi realizado seguindo o formato de artigo previamente aprovado pelo programa, cujo *template* é disponibilizado pela biblioteca da UFPE; sendo assim foi apresentado uma introdução geral sobre os temas abordados nos dois capítulos que sucedem este tópico, e por fim uma conclusão geral.

O Capítulo 1 se refere ao comportamento de variação de massa hidrológica cujo título do artigo é “*Assessment of Hydrological Mass Losses in the Northeast Atlantic Eastern Hydrographic Region, Brazil.*” e tem como objetivo (i) identificar o padrão espaço-temporal das mudanças de armazenamento total de água e suas possíveis tendência para os próximos anos utilizando as soluções GRACE Mascons; (ii) analisar o volume dos reservatórios temporais; (iii) extrair e analisar o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do MODIS; (iv) detectar os eventos de seca extrema usando o SPI em diferentes escalas de tempo e; (v) realizar a correlação estatística entre: a) TWS e volume do reservatório, e b) TWS e NDVI. Este capítulo já foi publicado no periódico do Boletim de Ciências geodésicas.

O Capítulo 2 utilizada diversos índices de seca e suas sensibilidades para caracterizar eventos de seca cujo o titulo do artigo é “*Observações Geodésicas Multi-Sensores Para Compreensão De Secas Na Região Hidrográfica Do Atlântico Nordeste - RHANO, Brasil.*” E tem como objetivo (i) calcular os índices CCDI, DSI-GRACE,  $DI_{VCD}$  e o SPI (Standard Precipitation Index) nas escalas de 3, 6, 12, 24 e 36 meses; (ii) identificar os eventos de seca de todos índices abordados no objetivo (i); (iii) verificar a sensibilidade dos índices CCDI, DSI-GRACE, WSDI,  $DI_{VCD}$  para a região de estudo; (iv) analisar frequências dos índices de seca baseados nos dados GRACE, bem como a correlação estatística entre os índices como forma de avaliação dos índices com as diversas escalas do SPI; (v) analisar os padrões espaciais dos índices CCDI e DSI-GRACE a partir do início do último evento de seca observado na região de estudo em 2012 até o final da série histórica de cada índice. Este manuscrito será submetido para um periódico internacional.

## 2 ARTIGO 1 - ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL MASS LOSSES IN THE NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC REGION, BRAZIL

Article published in the Geodetic Science Bulletin (BRAZILIAN QUALIS B1; JCR: 0.154)

LIMA, F. V. M. S.; GONÇALVES, R. M.; MONTECINO, H. D.; VILA NOVA, R. A. Assessment of hydrological mass losses in the Northeast Atlantic Eastern Hydrographic Region, Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas** v. 26, p. 1-20, 2020. Doi: 10.1590/s1982-21702020000300013

### ABSTRACT:

Freshwater monitoring globally is fundamental to support decision-making. However, long-term hydrological data for some regions are lacking due to limited of observational networks. Remote sensing products come to aggregate the in situ observations and overcome obstacles about data availability. This study assesses the hydrological mass losses in the Northeast Atlantic Eastern Hydrographic Region (NAEHR) in Brazil through temporal data sources. GRACE RL06 Mascon solutions, reservoirs volume, vegetation index and rainfall stations are used. The results confirm the cohesion between the TWS variations with water volume and NDVI, obtaining a strong correlation of 0.78 and 0.77 respectively. The Standardized Precipitation Index scales (12, 24 and 36 months) showed a moderate and strong correlation with the TWS of 0.57, 0.73 and 0.72 respectively and identified the last regional severe drought from 2012 to 2017. The NEAHR is located almost entirely in the Brazilian semiarid region, comprises about 24 million inhabitants, it is high vulnerable to drought, thus justifying the importance of monitoring its water resources availability.

Keywords: Drought; GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index); SPI (Standardized Precipitation Index); TWS (Total Water Storage).

## 1 INTRODUCTION

It The hydrological drought events have been frequently occurring during the last decade. It has been possible to observe water demand influences among human consumption, agricultural irrigation and ecological systems stability (Bai and Liu, 2018; Jassey et al., 2018; Gentirana, 2016; Van Loon, 2015). Although, drought could be often attribute to a natural phenomenon, some studies indicated human-induced impacts (Cook et al., 2009; Van Dijk et al., 2013). In recent decades, droughts increased frequency and intensity all over the planet and climate changes could be correlated to it (Ndehedehe and Ferreira, 2020a; Zhou et al., 2011). The precipitation scarcity contributes to the drought phenomenon, consequently the low evapotranspiration and low soil moisture (Mpelasoka et al., 2018; Feng et al., 2019; Yao et al., 2020). In Northeast of Brazil, this phenomenon occurs mainly in the semi-arid region due to uneven precipitation in space and time (Cunha et al., 2015; Brito et al., 2017; Ndehedehe and Ferreira, 2020b). Brazil has an extensive water reserve, on average 12% of the total existing in the world, surpassing even some continents, such as Oceania, which holds 6%, Europe with 7%, and Africa with 9% (UNESCO, 2009). However, in some Brazilian Hydrographic Regions (HR), drinking water reserves are extremely low, such as the Northeast Atlantic Eastern HR (NAEHR), selected as study case and which has 0.2% reserve, the lowest water availability compared to other existing HR in the country (ANA, 2013). The NAEHR is located in the extreme northeast of Brazil, which runs from Piauí to Alagoas states, has around  $286 \times 10^3 \text{ km}^2$  and 87% of this area is located in the Brazilian semiarid region.

The drought is normally classified into four categories, namely as meteorological, hydrological, agricultural and socioeconomic (Wilhite and Glantz, 1985). The main drought causes are due to: a) rainfall deficiency in particularly the distribution and intensity, b) storage and c) demand and the existing water use (Zarch et al., 2015). Therefore, to mitigate climate change impacts, it is necessary to have a better understanding about the drought intensity (duration and spatial extent), the seasonal atmospheric variability and the drought severity trends, among other issues (Shabbar and Skinner, 2004).

There are several indexes for the drought identification and classification, among them, the Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee et al., 1993). This index makes use of statistical temporal rainfall data analysis and has been widely applied to rainfall assessment, monitoring and prediction (Spinoni et al., 2014) e.g., in regions such as Africa (Cheo et al.,

2013; Dutra et al., 2013), China (Feng et al., 2013), India (Dhakar et al., 2013) and United States (Ford and Labosier, 2014). This versatility allows SPI to provide insights for the agricultural production, water resources and groundwater management (Mishra and Singh, 2010).

Another parameter related to drought detection is the availability of the Total Water Storage (TWS) which is the virtual sum of all water stored above and below the Earth's surface including water in lakes, rivers, human-made reservoirs, wetlands, soil, and groundwater reservoirs (Cazenave and Chen, 2010). Awange et al. (2014) applied the inter-annual and seasonal TWS variability over Ethiopia. Ahmed et al. (2014) used the Gravity Recovery and Climate Change (GRACE) data to monitor natural and man-made induced variations in water availability across Africa. Ndehedehe et al. (2016) presented a study case in West Africa during the period 2002 to 2014 using the GRACE's monthly TWS. In Australia, Chen et al. (2016) studied long-term groundwater storage changes in Victoria, using GRACE and *in situ* observations. Molodtsova et al. (2016) assessed the GRACE potential for flooding mitigation in the United States of America. In China, Jiang et al. (2017) studied seasonal drought combining crustal deformations from GPS data and TWS. In Asia, Xiang et al. (2016) studied the TWS changes for the Tibetan plateau and adjacent areas. Sinha et al. (2017) used the GRACE observations to characterize the drought in India between April 2002 and January 2015. In Brazil, Sun et al. (2016) used GRACE data, from 2002 to 2015, to assess the ongoing drought in the São Francisco River watershed. Montecino et al. (2016) demonstrated another GRACE applicability for South America with groundwater focus considering the northern region of Chile. Rosenhaim et al. (2018) studied the behavior of TWS in the Northeast Atlantic Eastern Hydrographic Region using GRACE, TRMM and *in situ* observations for the period 2002 to 2015, thus identifying a loss of approximately 23.710hm<sup>3</sup> between the extreme years studied.

The use of remote sensing can complement hydrographic studies such as the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on board of the Aqua and Terra satellites. In this case, the drought quantification, take advantage of spectral indices and water balance simulations (Cunha et al., 2015). The MODIS products used for terrestrial applications, aimed to monitoring the planet's vegetation cover, able to identifying changes, either resulting from climate or weather changes (Justice et al., 2002). Deus and Gloaguen (2013) combined MODIS data and the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) to identify the water changes over Lake Manyara, Tanzania. Son et al. (2012) used MODIS to monitor agricultural drought in the Lower Mekong Basin in Southeast Asia that covers Thailand, Laos, Cambodia and Vietnam. Gu et al. (2007) used the MODIS sensor to assess drought by physical indexes in

the central United States of America. Likewise, Andam-Akorful et al. (2017) used the vegetation index retrieved from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) to assess the human influence on the water resources of West Africa. In Brazil, Anderson et al. (2010) used the MODIS sensor products to study the Amazon forest crowns drought, whereas Morton and DeFries (2005) used MODIS to assess the annual Amazon deforestation.

The hydrological changes reported previously provide methodological support for patterns detection and trends analyses around the world. Thus, a new contribution for NAEHR, as study case combining *in situ* and remotely sensed products are used to understand the water mass variability, which the objectives to: (i) identify the spatio-temporal pattern of the total water storage changes and its possible trend for the next years using GRACE Mascons solutions; (ii) analyze the temporal reservoirs volume; (iii) extract and analyze the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) from MODIS; (iv) detect the extreme drought events using SPI at different time scales and; (v) perform the statistical correlation between: a) TWS and reservoir volume, and b) TWS and NDVI.

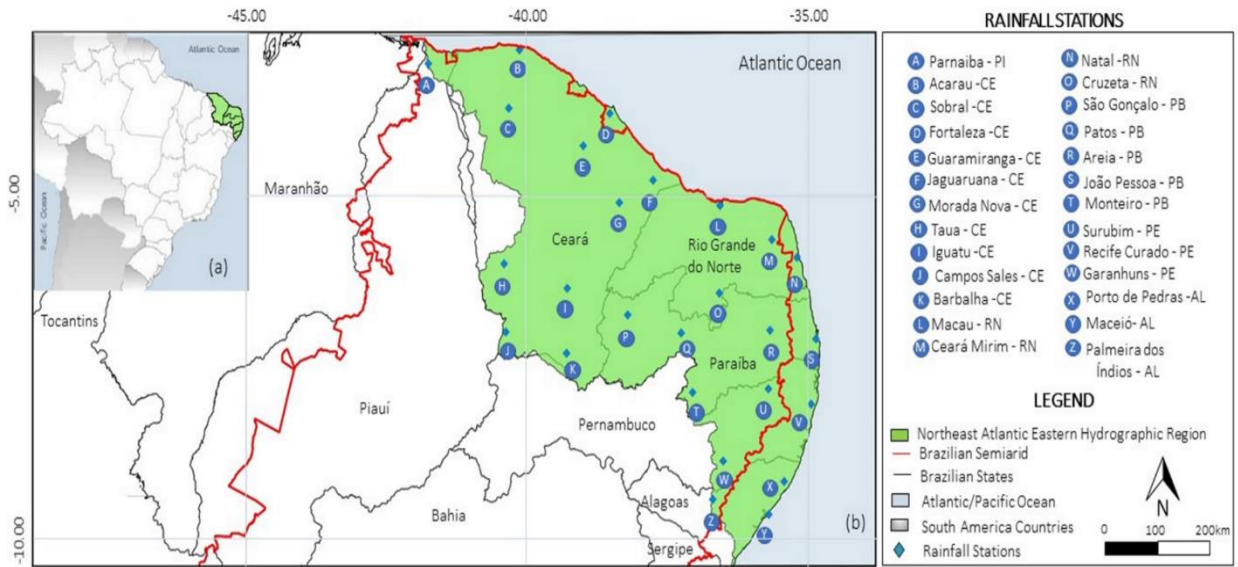
## **2 DATA AND METHODS**

### **2.1 NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC REGION (NAEHR)**

The (NAEHR) (see Fig. 1.1b) is one of the 12 hydrographic regions in Brazil (see Fig. 1.1a) that occupies 3.4% of the national territory with an area of approximately 286,800 km<sup>2</sup>, covering six states: Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco and Alagoas (ANA, 2015). Its location (almost all) belongs to the Brazilian Semi-Arid Region, which the lowest water availability in Brazil, with prolonged droughts periods and high temperatures throughout the year. In addition, it has a great economic and social importance for the region, covering about 740 municipalities and five state capitals (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco and Alagoas). The region has its greatest water demand considering urban supply and irrigation (ANA, 2018).

In addition, it comprises 24 million inhabitants, thus representing about 12% of the country's population (ANA, 2015).

Figure 1: (a) Location of the Hydrographic study case Region in Brazil, (b) rainfall stations over the study area



Source: The authors (2020).

The study area includes fragments of the Atlantic forest, Caatinga, Cerrado, and coastal biomes. The Caatinga have been devastated over the decades by livestock that invaded the hinterlands and the forest zone deforested by the sugarcane culture implantation. Even today, plant extraction, mainly for the exploitation of timber potential, represents one of the activities affecting the environment (ANA, 2015).

According to the Water Resources Conjuncture in Brazil (ANA, 2015), the annual NAEHR rainfall average is 1.052 mm, below the national average, 1.761 mm. The water surface availability, considering the flow regularized by the region's reservoirs is 91.5 m<sup>3</sup>/s, which corresponds to 0.1% of the country's surface availability (91.071 m<sup>3</sup>/s). The average flow of the Hydrographic Region (HR) is 774 m<sup>3</sup>/s, corresponding to 0.43% of the national average flow (179.516 m<sup>3</sup>/s).

The HR has low groundwater storage capacity, due to the low aquifers recharge and rainfall (Hu et al., 2017). In this region the crystalline rocks consist more than 90%. Thus, there is a certain groundwater predominance with high salt content. Normally the sedimentary regions, with better water quality are in the coastal areas (Cirilo, 2008).

## 2.2 DATASET

All data (multispectral images from the MODIS sensor, GRACE RL06 Mascon solutions, total reservoir volume and precipitation) applied to study the hydrological mass changes at NAEHR were obtained free of charge. The sections 1.2.2.1 to 1.2.2.4 showed all dataset baselines and Table 1 summarized it.

Table 1: Summary data.

| Description          | Source  | Period Studied | Resolution |          | Data access                                                                                                                                                                                                                       |
|----------------------|---------|----------------|------------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                      |         |                | Spatial    | Temporal |                                                                                                                                                                                                                                   |
| Mascons              | GRACE   | 2002 – 2017    | 1.0°       | Monthly  | <a href="http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html">http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html</a>                                                                                                               |
| Reservoirs           | ANA     | 2002 – 2017    | -          | Daily    | <a href="https://www.ana.gov.br/sar0/">https://www.ana.gov.br/sar0/</a>                                                                                                                                                           |
| Multispectral Images | MODIS   | 2002 – 2017    | 1km        | Monthly  | <a href="https://search.earthdata.nasa.gov">https://search.earthdata.nasa.gov</a>                                                                                                                                                 |
| Precipitation        | INMET   | 1989 – 2019    | -          | Daily    | <a href="http://www.inmet.gov.br/portal">http://www.inmet.gov.br/portal</a>                                                                                                                                                       |
|                      | SUDENE  | 1989 – 2019    | -          | Daily    | <a href="http://www.sudene.gov.br/area-de-atuacao/regiao-nordeste-estatisticas/rede-hidroclimatologica-do-nordeste">http://www.sudene.gov.br/area-de-atuacao/regiao-nordeste-estatisticas/rede-hidroclimatologica-do-nordeste</a> |
|                      | SIGHPE  | 1989 – 2019    | -          | Daily    | <a href="http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/">http://www.apac.pe.gov.br/sighpe/</a>                                                                                                                                                 |
|                      | FUNCEME | 1989 – 2019    | -          | Daily    | <a href="http://www.funceme.br/">http://www.funceme.br/</a>                                                                                                                                                                       |

Source: The authors (2020).

### 2.2.1 Mascons GRACE

A set of 377 GRACE RL06 Mascon grids, from April 2002 to June 2017, from the Center for Space Research (CSR), University of Texas at Austin, were used, available on the website ([http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06\\_mascons.html](http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html)). The spatial resolution of CSR RL06 Mascons solutions is 1°x1° at the equator. The RL06 version smooth the coastlines accordingly, thus minimizing the leakage between land and ocean signals (Save et al., 2016).

### 2.2.2 Reservoir Volume

The reservoirs volumes are obtained by the Reservoir Monitoring System of the Brazilian National Water Agency (BWA) (<http://sar.ana.gov.br/Medicao>). There are 346 reservoirs existing in the study area distributed among six states (Alagoas, Ceará, Rio Grande

do Norte, Paraíba, Pernambuco and Piauí). Table 2 shows the states distribution, capacity and participation of each state. The data selected consists the daily volumes of the total reservoirs from April 2002 to June 2017.

Table 2: Number of reservoirs in each state of the NAEHR and its participation.

| States              | Number of Reservoir | Capacity Total (hm <sup>3</sup> ) | Participation (%) |
|---------------------|---------------------|-----------------------------------|-------------------|
| Pernambuco          | 36                  | 1149.32                           | 4.23              |
| Alagoas             | 2                   | 3.74                              | 0.01              |
| Paraíba             | 123                 | 3934.88                           | 14.47             |
| Ceará               | 131                 | 17655.74                          | 64.93             |
| Rio Grande do Norte | 54                  | 4445.02                           | 16.35             |

Source: ANA, 2018.

### 2.2.3 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

The MODIS sensor board on the TERRA satellite monitors changes on the land surface among others applications (<https://search.earthdata.nasa.gov>). The product MOD13 selected provides consistent information on vegetation conditions, with a temporal resolution of 16 days and spatial resolution of 1000 m. To cover the NAEHR are necessary three scenes at the end of the mosaicking process. It was select 78 scenes described in section 1.2.3.3.

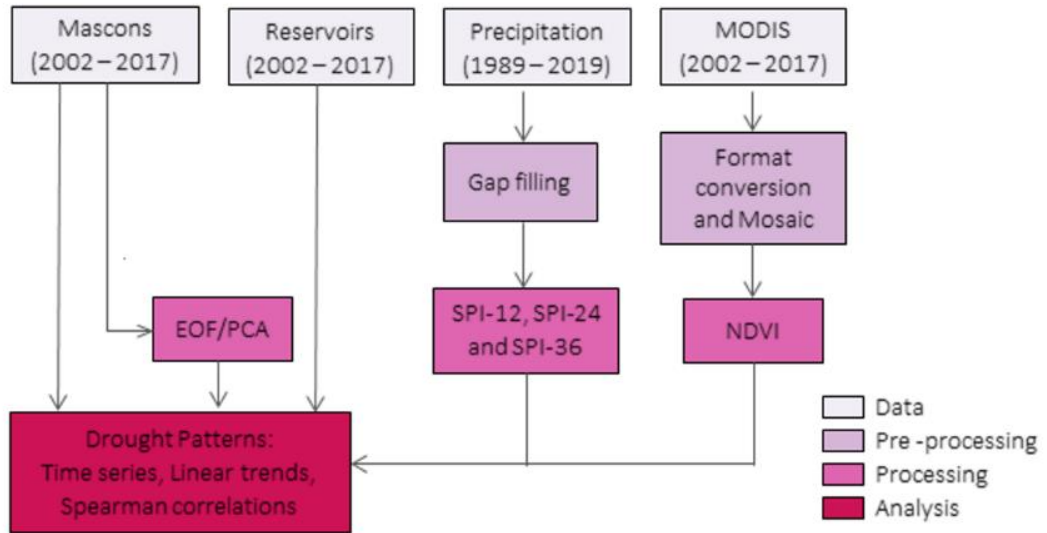
### 2.2.4 Rainfall

The monthly-accumulated precipitation data refer to a 30 years study period from August 1989 to July 2019 according to the 26 rainfall stations provided by the Brazilian National Meteorological Institute (INMET) - shown in Figure 1b.

## 2.3 Method

This section discusses the methods and processes used in the research divided into four stages: a) data; b) pre-processing; c) processing and d) analysis, as shown in Figure 2.

Figure 2: Summary of the methodology.



Source: The authors (2020).

### 2.3.1 Spatio-temporal patterns

In order to find the dominant spatio-temporal patterns, the Empirical Orthogonal Functions (EOF) method or also known as PCA (Principal Component Analysis) was applied. The EOFs have been used successfully in the analysis and modeling of temporal variations in mass distribution obtained by the GRACE satellites (Crossley et al., 2004; Li et al., 2016; Peng et al., 2017, among others). This method of statistical decomposition seeks to reduce the size of a data set by finding some linear orthogonal combinations of the original variables with the greatest variance and preserving the main variation of the original variables. In summary, EOF analysis allows to represent the TWS time series as:

(1.1)

Where TWS is the original time series as a function of time ( $t$ ) and space ( $\phi, \lambda$ ) of the main factors responsible for the temporal variations of TWS while the Principal Components (PC) shows how the amplitudes of each EOF vary with time.

The GRACE Mascons time series (monthly and annual averages), from April 2002 to June 2017, are also used to extract the linear trend by the ordinary least squares (OLS) method (Gemael, 1994). Thus, it was possible to reach the objective (i) described in the introduction.

### 2.3.2 Reservoirs volume analysis

The Brazilian national water agency defines the reservoirs operating rules in Brazil and present monthly monitoring bulletins. The daily values sum for the 346 reservoirs, obtained the useful monthly volume time series, also the annual averages and monthly maximum and minimum. The dispersion graphs were prepared together with the linear regression in *Excel* software to obtain its analytical equation and trend line, regarding the objective (ii).

### 2.3.3 Normalized Difference Vegetation Index – NDVI

The MODIS images have high temporal resolution, being georeferenced and corrected with atmospheric effects, contributing to a better understanding of global systems (Wolfe et al., 2002; Justice et al., 2002). The images in the HDF format, in the pre-processing stage are converted to GEOtif format using the MODIS Reprojection Tool software. The date choice is according to the months matching with the highest and lowest value of TWS from mascons GRACE, for each year of the time series, resulting in the months selected on Table 3.

Table 3: Temporal MODIS images.

| Year | Month      | Year | Month      | Year | Month      | Year | Month      |
|------|------------|------|------------|------|------------|------|------------|
| 2002 | May<br>Dec | 2006 | Feb<br>May | 2010 | May<br>Dec | 2014 | Jan<br>May |
| 2003 | Jan<br>May | 2007 | Feb<br>May | 2011 | May<br>Dec | 2015 | Jan<br>Apr |
| 2004 | Jan<br>Mar | 2008 | Jan<br>May | 2012 | Mar<br>Nov | 2016 | Feb<br>Mar |
| 2005 | Jul<br>Nov | 2009 | Jan<br>May | 2013 | Jan<br>Apr | 2017 | Mar<br>Jun |

Source: The authors (2020).

With the pre-processed images inserted in the software QGIS, it was possible to select the study area and process the NDVI. This index used to represent the vegetation cover in response to the region's water variation. The NDVI range between -1 and +1 using bands of red and near infrared (NIR) based on the extent of reflectance surface (Carlson and Ripley, 1997). With the calculated index, the average of the NDVI values for each month is used to attend the objective (iii).

### 2.3.4 Standardized Precipitation Index – SPI

It was selected 26 rainfall in-situ stations (Fig. 1b) from INMET for a 30-year study period from 1989 to 2019. However, it was missing data in the time series from 1989 to 1993. To overcome this problem, the data fusion with the nearest station from other sources were used. The others rainfall stations sources are from: a) the hydro climatological network of the Northeast Development Superintendence (SUDENE); b) Geo information System Hydro meteorological of Pernambuco SIGHPE managed by Pernambuco Water and Climate Agency (APAC); c) the Cearense Foundation of Meteorology and Water Resources (FUNCEME); and d) The Secretariat of the State of Environment and Water Resources of Alagoas (SEMARH).

With the re-structured dataset, it was possible to apply the standardized precipitation index - SPI, which consists of adjusting the gamma probability density function to a given frequency distribution of the total precipitation for a season (more details in Zarch et al., 2015). The SPI was evaluated according to 3- time scales, 12, 24 and 36 months with the idea to verify the behavior of shorter droughts, such as meteorological ones that are identified in smaller SPI time scales, to more lasting droughts such as hydrological ones in larger SPI time scales, important guidelines for water resource management (Bonaccorso et al., 2003). Awange et al. (2016) reported that short-timescale droughts are related to agricultural drought and river discharge in headwater areas, medium-timescale droughts reflect the reservoir storages levels and rivers, and relate to groundwater storage are the long-timescale droughts. There are no general recommendations on which scale is appropriate, it is always depending on the user experience and applications involved (Cheval, 2015).

The SPI Generator (<https://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI.aspx>) software developed by the United States National Drought Mitigation Center (NDMC) was used to process the temporal series. The positive SPI values indicate precipitation above the median and negative values indicate precipitation below the median according to Table 4, thus meeting objective (iv).

Table 4: Standardized Precipitation Index Rating

| SPI          | Classification | SPI            | Classification  |
|--------------|----------------|----------------|-----------------|
| $\geq 2.00$  | Rain Extreme   | - 0.50 a -0.99 | Drought light   |
| 1.99 a 1.50  | Rain Severe    | -1.00 a -1.49  | Drought Median  |
| 1.49 a 1.00  | Rain Median    | -1.50 a -1.99  | Drought Severe  |
| 0.99 a 0.50  | Rain Light     | $\leq -2.00$   | Drought Extreme |
| 0.49 a -0.49 | Normal         |                |                 |

Source: Mckee et al. (1993).

### 2.3.5 Spearman rank correlation

The Coefficient of Variation (CV) is calculated to identify homogeneity and heterogeneity of the variables (Snedecor and Cochran, 1980) (annual averages of the mascons GRACE, total volume of the reservoirs and average pixels of the NDVI), where values greater than 30% of CV were identified indicating that the variables are not parametric, so it is recommended to perform the Spearman rank correlation (Siegel, 1975). According to Schober et al. (2018), the Spearman rank correlation ( $\rho$ ) does not require normally distributed data and can be used, analogous to Pearson coefficient varying from -1 to +1. The sign indicates the direction of the relationship between the variables, the negative coefficient indicates that the correlation is inverse, as one of the analyzed parameters increases the other decreases. The correlation is tested at a significance level of 1% bilateral analysis, thus indicating whether the variables have a statistically significant difference. It is adopted, as a null hypothesis assuming that the statistical result of the correlation was obtained by coincidence due to the probabilistic fluctuations of the events, and their alternative hypothesis considers a real similarity of the correlation. This stage allows extracting information to meet the objective (v).

## 3 RESULTS AND DISCUSSIONS

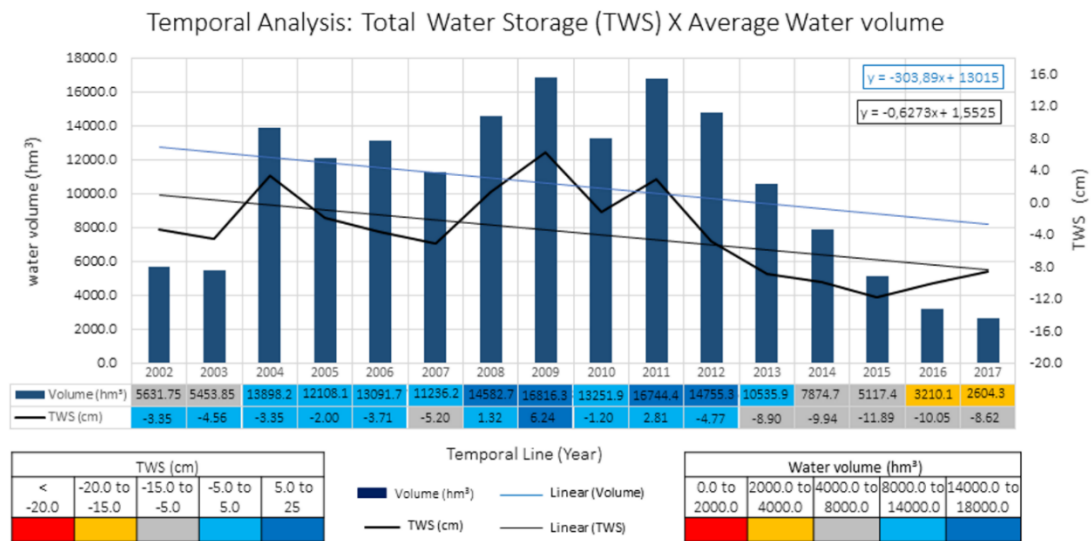
All correlation analyzes discussed in this section obtained a p-value = 0.00, that is, less than 1%, thus accepting the alternative hypothesis that states that there is a real similarity in the correlation between the variables studied.

### 3.1 TOTAL WATER STORAGE (GRACE) AND ANNUAL AVERAGE VALUE OF THE RESERVOIRS

Figure 3 shows the annual averages of the TWS in red and the annual average value of the useful volume of the reservoirs in blue, as well as the linear regression (trend lines) and equations for both samples. According to the results obtained for the regression equations, the slope coefficients are negative, indicating a successive decline from 2011 to 2017, despite being different sample sets, both have similar behavior over time. The TWS and the reservoirs volume follows the same trend. The data were subjected to Spearman ( $\sigma$ ) where it was possible to evaluate the behavior between these two non-parametric and independent variables, whose result was ( $\rho$ ) = 0.78.

According to Figure 3 it is possible to verify large peaks detected for the years 2004, 2009 and 2011 that may be correlated to various atmospheric phenomena. For example, 2004 was considered a very rainy year in the first months, according to Alves et al. (2006) in January 2004, the northeast trade winds became more intense than the southeast trade winds, driving the Intertropical Convergence Zone (ITCZ). In 2009 it was considered the rainiest year of the decade, with the highest rain concentration in April and May, which corroborates with Alves et al. (2009) the ITCZ convection was reinforced by the favorable pulse of the Madden-Julian Oscillation (MJO) over the northern of the Northeast Region between late April and early May. In 2011, the La Niña phenomenon event had a configuration called Modoki, named by the second variability mode of the Sea Surface Temperature (SST) Tropical Pacific more details in Martins and Vasconcelos Junior (2017). The year 2010 was classified as a dry year, only in 2011 did the northeastern Brazilian region showed rainfalls above normal (Marengo et al., 2018). From the year 2012, the values are decreasing more and more, and continues to decline until the end of 2015, with small improvements in the years 2016 and 2017. Brito et al. (2017) affirm that the drought started in mid-2011 and intensified in 2012 continuing until 2017.

This event is associated with another major drought in the Northeast, highlighting the year 2012 as the beginning. The linear regression indicates a decline tendency over the years, resulting in the lack of water for the region as well as the volume loss in the reservoirs. Considering the same study case Rosenhaim et al. (2018) identified the variation in NAEHR's water availability in the first and second semesters of the years 2002 and 2015, where the variation in the first semester was 23.71km<sup>3</sup> and for the second half was 19.25 km<sup>3</sup>, representing a considerable loss in the estimated volume of water for this region.

Figure 3: Linear trend for both volume (hm<sup>3</sup>) and TWS (cm).

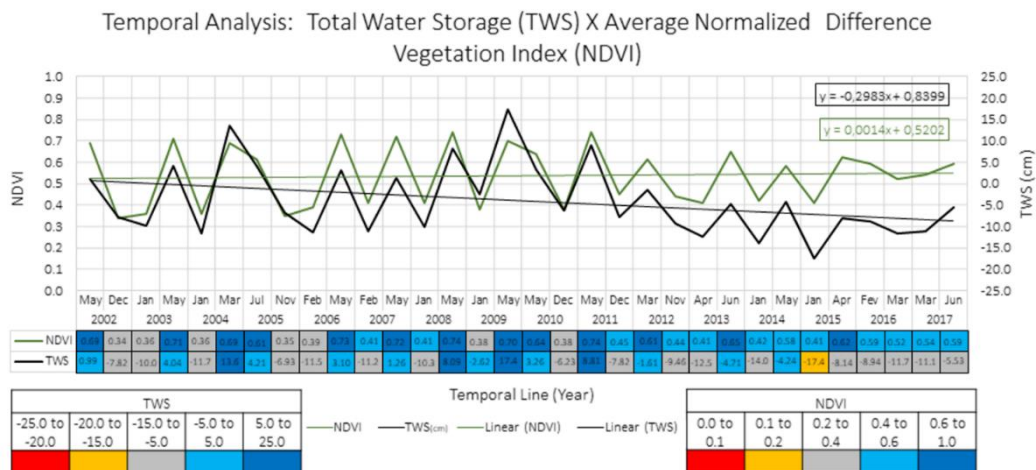
Source: The authors (2020).

### 3.2 NDVI AVERAGE VALUE (MODIS) AND TWS (GRACE)

Figure 4 shows the comparison between TWS and NDVI following the linear regression of the samples that resulted in the linear trend. The NDVI average vary between 0.34 to 0.74, in one hand, values closer to 1.0 indicate a large amount of vegetation and active photosynthesis. On the other hand, the values closer to 0.0 indicate little or no chlorophyll activity. The variation in vegetation activity has been associated with climate change (Sun et al., 2015), where vegetation connects with soil, atmosphere and water, serving as one of the climate change indicators (Cramer et al., 2001). According to 26 rainfall stations data observed in this research, the annual average rainfall is 2297.70 mm, where the first annual semester has precipitation values above the average and the second semester with precipitation values below the annual, thus characterizing two distinct seasons over the years. The NDVI response corroborates with the region's rainfall, however within the time series there are anomalous rainy and drought months that may interfere with the correlation between NDVI and TWS. The NDVI values corroborate with the rainfall regime and the TWS variations in the region, the highest NDVI values occurred between March and June, where the rainiest months of each year are considered. Figure 4 in one hand shows 2002, 2003, 2006 to 2011 the results for NDVI ranging between 0.69 and 0.74 and positive variations of TWS between +0.99 and + 17.4cm. On the other hand, months like January and February that are part of the first half of the year, presented low values for NDVI, as in 2003, 2004, 2006, 2008 and 2009, due to the fact that NDVI does not have an

immediate response to like precipitation. The periods of low rainfall as November and December reflected low NDVI values for the months of January and February. It is possible to observe that from 2012 until 2017 the negative values of the TWS are recurrent, where the NDVI average values were between 0.4 and 0.6. Thus, being able to perceive a progressive NDVI decline from low peak values between 2014 and 2017. With this decay it is highlighted a waring alert of environmental impacts such as surface erosion (Singh et al., 2004; Asis and Omasa, 2007; Karaburu, 2010) and desertification (Piao et al., 2006; Feng et al., 2015; Tomasella et al., 2018). One of the reasons for the decline in these values (Figure 4) is the lack of rainfall, since water is a fundamental element for the vegetation health, whose terrestrial ecosystem hydrological control is exercised by the soil water balance (Rodriguez-Iturbe et al., 2007). According to Omute et al. (2012), the NDVI is able to describe the variability of water levels in response to weather patterns. The combination of TWS, precipitation and NDVI are very sensitive to vegetation drought in semiarid areas (Zhao et al., 2017). Considering the Spearman ( $\rho$ ) was possible to evaluate the behavior between these two non-parametric and independent variables, whose result was ( $\rho$ ) = 0.77. Corroborating with the results (i) Geruo et al. (2015), indicating that NDVI is influenced by TWS, and by water control associated with vegetation growth and (ii) Ma et al. (2012) emphasizing the vegetation growth reduction related to drought-induced water stress.

Figure 4: Line trend for both TWS (cm) and NDVI.

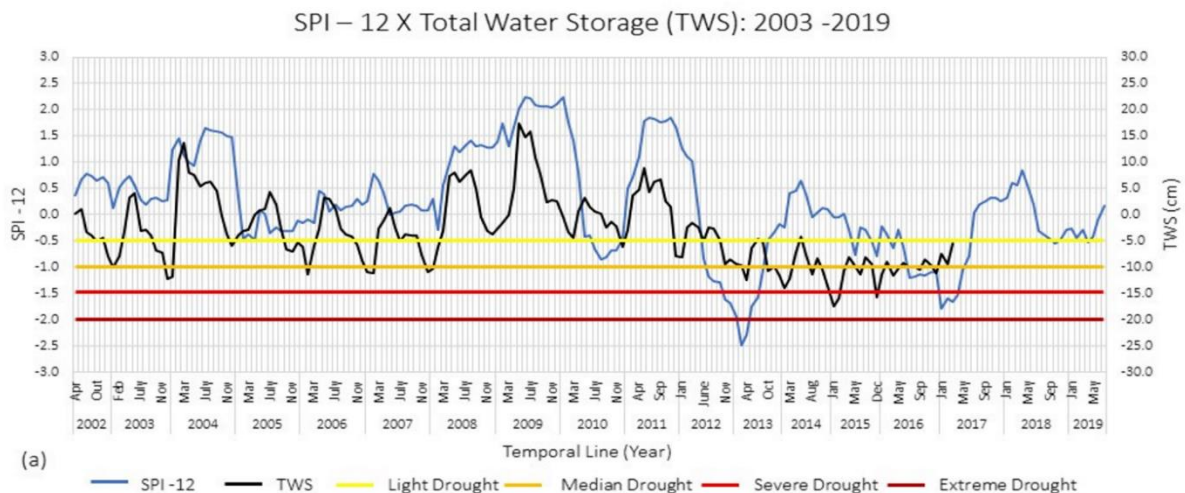


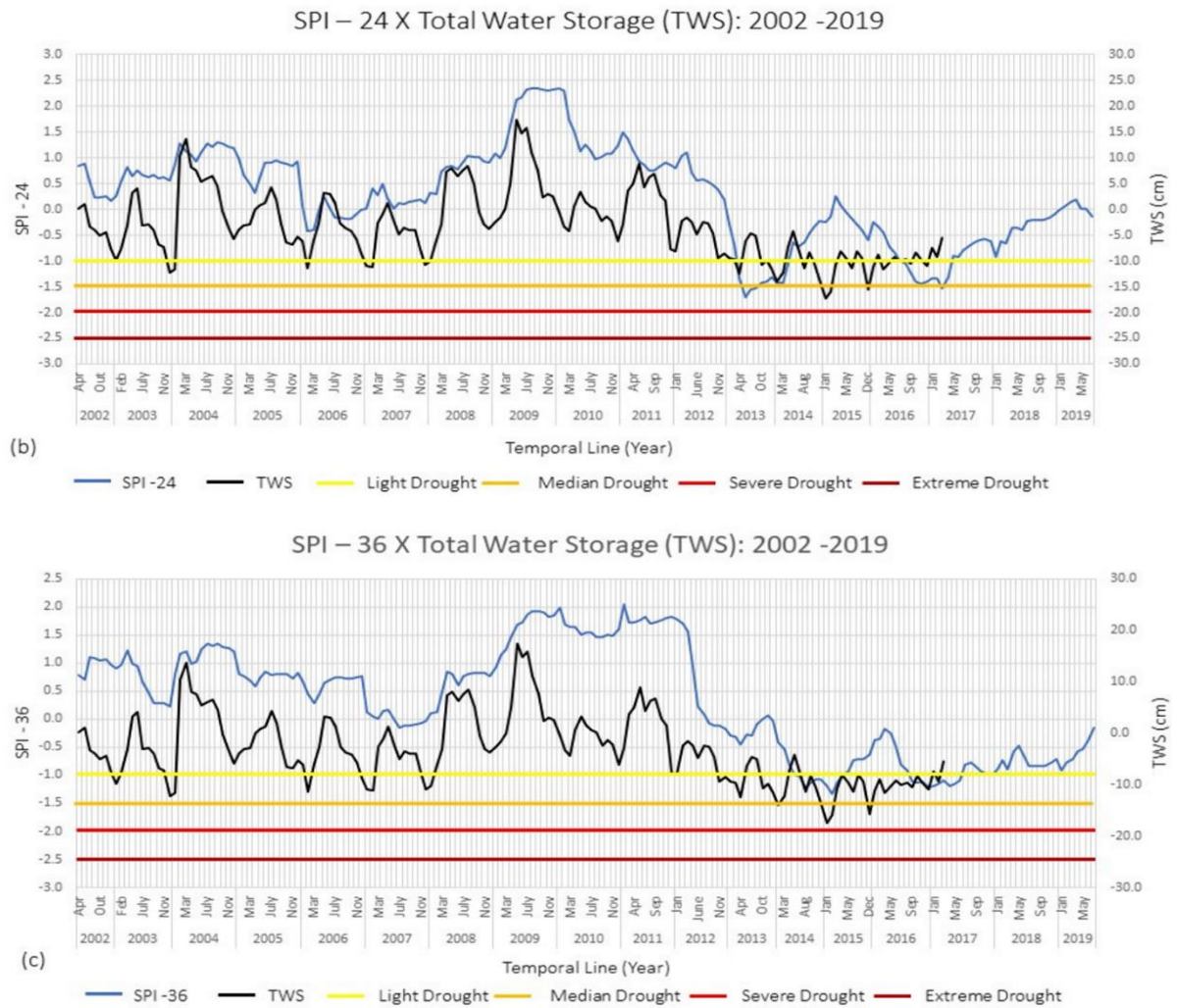
Source: The authors (2020).

### 3.3 DROUGHT CHARACTERIZATION USING STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX

Figure 5 shows the three temporal variations of the SPI: Figure 5 (a) refers to the 12 months SPI, which is directly associated with the water lack in flow water reserves and groundwater levels, which correspond to long time scales. Awangue et al. (2016) showed a 12-month drought probability ranging from 19% to 24% in the region under study, with a 6% to 10% extreme droughts probability of occurrence. The calculated SPI-12 identified a weak drought for the year 2010 corroborating with Marengo et al. (2018) that defined the year 2010 as a dry year for the northeast region. The beginning of the 2012 drought was associated with the La Niña phenomenon (Rodrigues and McPhaden, 2014), according to Marengo et al. (2018), the La Niña phenomenon only interfered in 2015-2016 aggravating the drought situation, where it is possible to identify such behaviors in Figure 5 (a). The TWS and SPI-12 had the same behavior throughout 2002-2017 however, diverging in some points as the first half of 2007, 2010 and 2012. This is probably to the fact that SPI used at least 30 years precipitation time series and the TWS monthly variation of the available data. At the first semester of 2007, 2010 and 2012 low levels of precipitation were recorded whose SPI-12 classified them as dry months, however the positive precipitation variations occurred in April and May thus caused a positive TWS variation in June of those years. The Spearman correlation ( $\rho$ ) helped to evaluate the behavior between the parametric and independent variables SPI-12 and TWS, whose result was moderate with ( $\rho$ ) = 0.57.

Figure 5: (a) Temporal correlation between TWS (cm) and SPI - 12, (b) temporal correlation between TWS (cm) and SPI - 24, (c) temporal correlation between TWS (cm) and SPI - 36





Source: The authors (2020).

Figure 5 (b) refers to the SPI-24, being used to obtain the spatial distribution of drought and hydrological humidity (Bordi et al., 2009). Awange et al., (2016) showed the probability of drought for 24-month ranging from 16% to 22% in the study region, with a 7% to 12% probability of extreme droughts occurrence. The calculated SPI-24 was unable to identify the 2010 dry year, which according to Marengo et al. (2018) preceded the 2012-2017 drought, nor did it even identify the beginning of the 2012 drought, presenting negative values only in 2013.

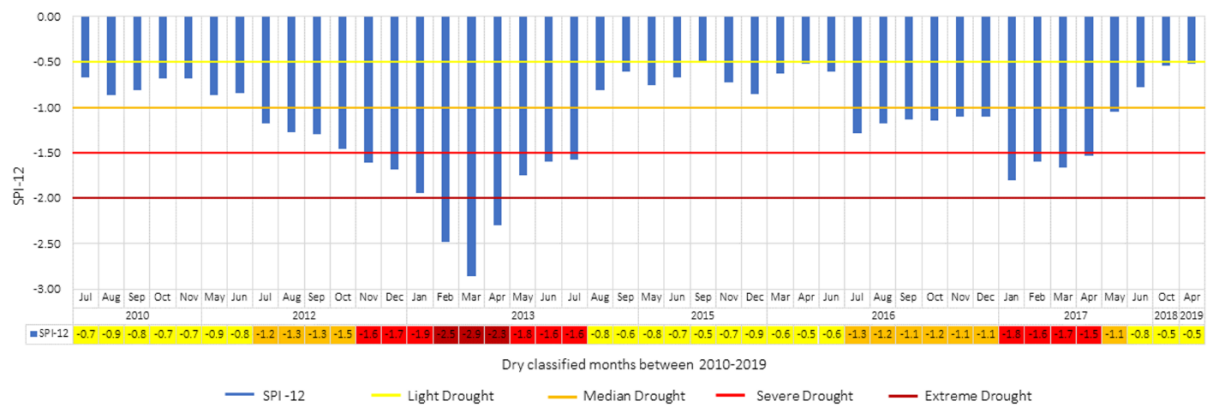
TWS and SPI-24 had a similar behavior between 2002 and 2017 differing only in the first half of 2013. SPI-24 identified the 2012-2017 drought only in 2013. Thus, the abrupt drop from 2012 to 2013 is one of the reasons for this divergence. The Spearman correlation ( $\rho$ ) for spi-24 and TWS resulted in ( $\rho$ ) = 0.73.

Figure 5 (c) refers to SPI-36, since it is also a long-term scale, SPI-36 is associated with hydrological drought studies, which according to Abatan et al. (2017) are associated with persistent droughts. The index values on this 36-month time scale are higher, and at no point in the time series did the index identify severe drought. The Spearman correlation ( $\rho$ ) = 0.72 represented a strong correlation between SPI-36 and TWS.

The three scales studied in this research are long-term, applied for hydrological droughts studies. The SPI makes the precipitation comparison of the consecutive months for each scale using the time series. For all cases the SPI-12-24-36 showed a moderate and strong correlation with TWS. The scales of 24 and 36 months do not describe the drought over 2002-2019 in detail. The 6-year long drought that occurred between the years 2012 to 2017, was identified in all SPI scales used in the methodology, this was due to the duration of the drought event that exceeded 36 months, such scales are represented by Figure 5 (a), (b) and (c).

Figure 6 shows the months classified as dry and its respective intensities from 2002 to 2019. As can be seen in Figure 5 (a), only in 2010 signs of drought are detected. From November 2012 to July 2013 were the longest duration of severe and extreme drought within the period of the last drought in the northeast of Brazil (2012-2017).

Figure 6: Months classified as dry in the years 2003-2018 from SPI-12.



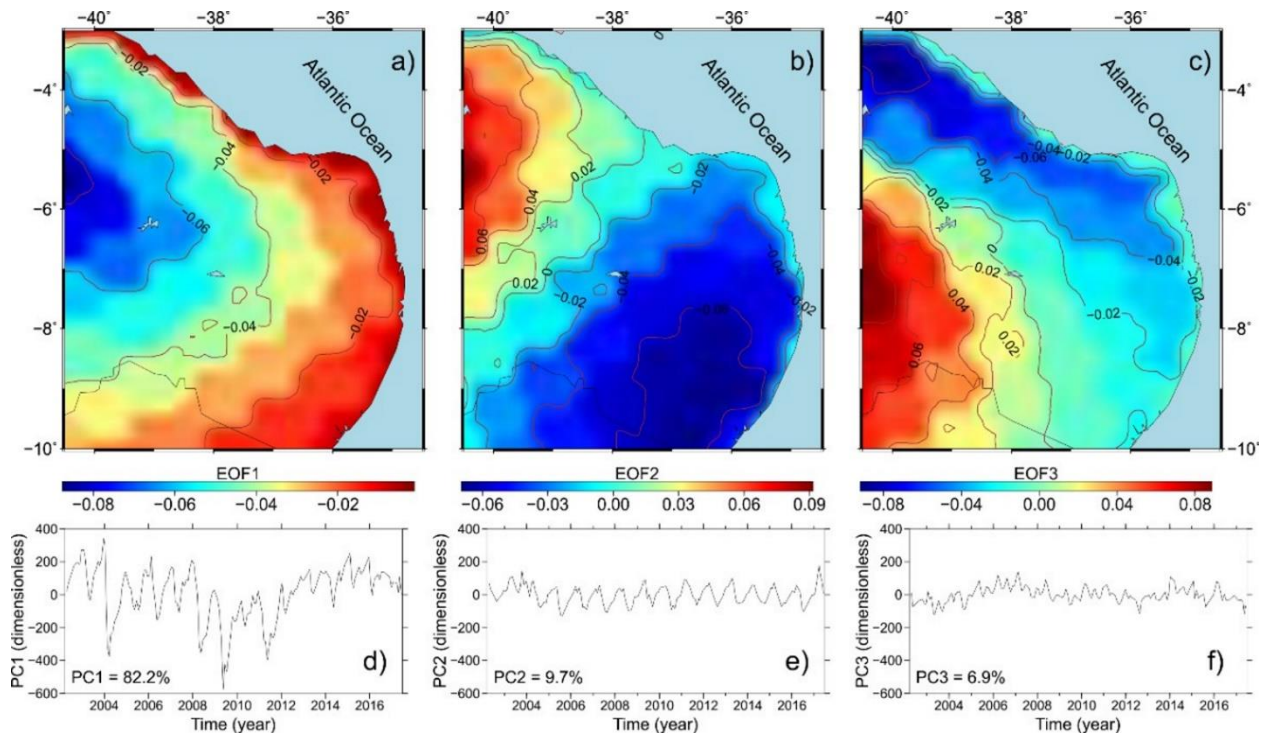
Source: The authors (2020).

### 3.4 TWS SPACE-TIME ANALYSIS

The EOF analysis identified that the first three modes are capable of recovering 98.8% of the TWS variance in the study region, more specifically PC1, PC2 and PC3 represent 82.2,

9.7, and 6.9% respectively. The rest of the PCs (<1.2%) were considered as noise, and then disregarded in this analysis.

Figure 7: Figures a), b) and c) are EOF1, EOF2, and EOF3 of TWS. Figures d), e) and f) are the main components PC1 (82,2%), PC2 (9,7%) and PC3(6,9%) of TWS.



Source: The authors (2020).

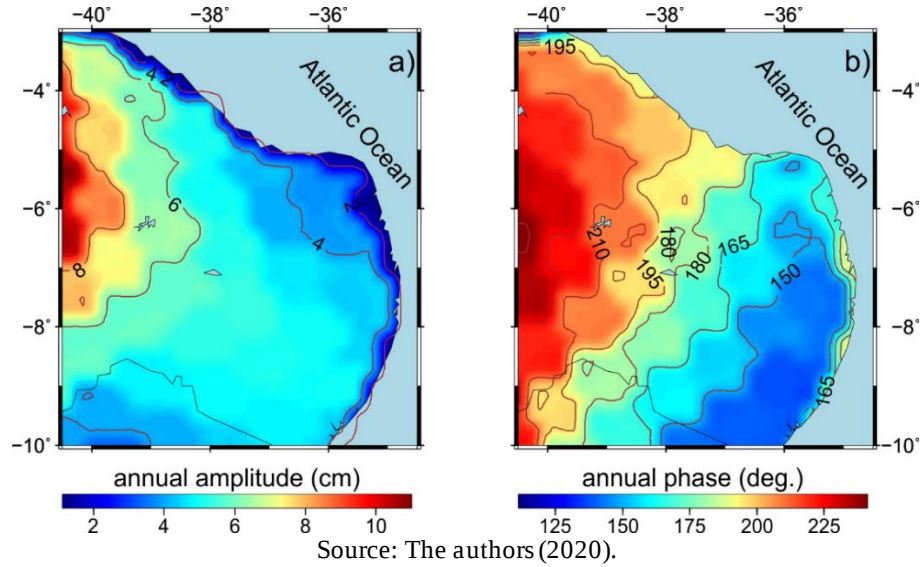
The PC1 represents the temporal variation of the annual, inter and intra-annual signals. The Lomb-Scargle periodogram of PC1 revealed that the predominant frequencies are approximately 1 cycle per year (cpy), 0.4 cpy and 2.2 cpy. EOF1 (see. Fig. 1.7a) presents the spatial distribution of the temporal patterns found in PC1. Furthermore, the annual cycle and the other cycles observed in PC1 showed greater variability in the western region, this variation increases progressively from the coast to the interior of the South American continent. These variations can be explained due to the significant annual phase (see. Fig. 1.8b) differences (up to 132 days) found in some parts of the study region, as well as the other intra and inter annual frequency signals. The EOF1 patterns resulted close to those found in the annual amplitude map (see. Fig. 1.8a) considering that places with the largest annual amplitude showed the highest EOF variations (in magnitude) and the ones with the least amplitude varied less.

The amplitude and phase of annual cycle were estimated based on the following functional model:

(1.2)

where  $a_0$  is the constant term,  $a_1$  is the linear velocity,  $t$  is the time,  $\omega_1 = \frac{2\pi}{\tau_1}$ ,  $\tau_1 = 1$  year, and  $S_k$  and  $C_k$  are the coefficients for computing the amplitude of seasonal signals ( $R_1 = \sqrt{S_1^2 + C_1^2}$ ). The parameters of the functional model were estimated by least squares adjustment.

Figure 8: a) TWS annual amplitude map, b) TWS annual phase change map.



The anomalies found in 2004, 2008, 2009 and 2011 refer to high variations in water mass in the region due to high rainfall in January 2004 and a large drop in rainfall from February to May 2004. The same behavior for low rainfall in January 2008 and high precipitation in March 2008. In 2009, high rainfall occurs in April and decreases dramatically from June to October, in April 2011 showed the greatest rainfall of the year and falls steadily from May to September, keeping low values until January 2012.

EOF2 (see Fig. 1.7b) is associated with PC2 (see Fig. 1.7e), which represents the annual variability 1 cpy and semiannual 2 cpy of the TWS, this indicated in the periodogram. The spatial distribution of this variability indicates a gain in the north-west region, and a decrease in the south-east region of the study case. The EOF3 represents the spatial variation of the temporal variations associated with the annual cycle and the intra-annual variation of 2.27 cpy observed in the PC3 periodogram (see Figs. 1.7e and 1.7f). The largest variations are concentrated in the central/southern-western region, and the smallest are concentrated in the northern-western of the study region.

## 4 CONCLUSION

This study was carried out based on the MODIS sensor images (NDVI), rainfall data, useful reservoir volumes and Mascons GRACE observations, all combined to assess the hydrological mass behavior in the NAEHR, Brazil. Through the correlations and seasonal peaks identification of water availability, it was possible to demonstrate an alternative for the qualitative and quantitative assessment of water resources. The main results found indicate:

- i. The Spearman's linear correlation ( $\rho$ ) between the independent variables TWS with annual average value of the reservoirs (Figure 3) and the NDVI average (Figure 4), were 0.78 and 0.77 respectively, showing a strong correlation between them. This highlighted a direct correlation among TWS, reservoirs volume and NDVI, presenting outstanding parameters for water management in this region.
- ii. The year 2009 obtained the largest reservoirs volume of water, with 16816.28hm<sup>3</sup> and TWS = 10.24cm. The month of May presented the highest contribution for this variability, showing a volume of 18,331.59hm<sup>3</sup> and TWS = 23.01 cm. The EOF's analysis enabled a better understanding of the spatial distribution and temporal changes of TWS in the study region and the respective frequencies associated with these variations.
- iii. In general, the NDVI corroborates with the variations presented by TWS. Both variables showed the same behaviour throughout 2002-2017. The positive variations in TWS reflected on NDVI values close to 1.0, as occurred specifically in the first half of each year, thus indicating a dense vegetation cover that normally needs a greater hydric demand. On the other hand, NDVI also response to the dry period identified in the study, e.g., the results between 2012-2017 dropped in maximum values varying between 0.4 and 0.6.
- iv. The values obtained for each SPI time scale were able to identify the last drought period between the years 2012 and 2017, this index responded cohesively to the Mascons linear regression, which indicated the declining tendency considering the following years. The Obtaining Spearman

correlation ( $\rho$ ) showed of 0.57, 0.73 and 0.72 for the 12-month, 24-month and 36-month sales, respectively. Although the SPI-36 had the strongest correlation, the SPI-12 detailed better the drought temporal distribution.

- v. The GRACE mission satellites come to assist also regional management of water resources in Brazil and its potential and dissemination for new study cases. The main advantage is the applicability for the inaccessible places where is not possible to collect *in situ* information. As disadvantages, the time series is still considered small for hydrological studies, since its operation started in 2002, which can be mitigated with the combination of other products as proposed in this work. Another limitation is the spatial resolution, which is not adequate when studying a small hydrographic basin or even a specific reservoir. The GRACE mission has its successor, Gravity Recovery and Climate Experiment Follow-On (GRACE-FO), operating since May 22, 2018.
- vi.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The first author would like to thank his master's scholarship supported by CAPES, the second author acknowledges the support of the project 310452/2018-0/PQ/CNPq and the last author acknowledges the project 58-2018/FADE/UFPE/Prefecture of Caruaru.

## REFERENCES

- Abatan, A. A., Gutowski, W. J., Ammann, C. M., Kaatz, L., Brown, B. G., Buja, L., Bullock, R., Fowler, T., Gilleland, E., Gotway, J. H. 2017. Multiyear droughts and pluvials over the upper Colorado River basin and associated circulations. *Journal Hydrometeorology*, v. 18, p. 799–818.
- Agência Nacional de Águas (Brasil). 2013. Report: Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA.
- Agência Nacional De Águas (Brasil). 2015. Report: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras – Edição Especial. Brasília: ANA.
- Agência Nacional De Águas (Brasil). 2018. Report: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Informe anual. Brasília: ANA.

Ahmed, M., Sultan, M., Wahr, J., Yan, E. 2014. The use of GRACE data to monitor natural and anthropogenic induced variations in water availability across Africa. *Earth-Science Reviews*, v. 136, p. 289–300.

Alves, J. M. B., Ferreira, F. F., Campos, J. N. B., Filho, F. de A. de S., Souza, E. B. de, Duran, B. J., Servain, J., Studart, T. M. C. 2006. Mecanismos atmosfericos associados a ocorrencia de precipitacao intensa sobre o nordeste do Brasil durante Janeiro 2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 21, p. 56–76.

Alves, L. M., Coelho, C. A. S., Melo, A. B. C., Pesqueiro, J. F. 2009. Report: Condições climáticas observadas no brasil em 2009. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC.

Andam-Akorful, S. A., Ferreira, V. G., Ndehedehe, C. E., Quaye-Ballard, J. A. 2017. An investigation into the freshwater variability in West Africa during 1979-2010. *International Journal Climatology*, v. 37, p. 333–349

Anderson, L. O., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Ladle, R., Arai, E., Barbier, N., Phillips, O. 2010. Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. *New Phytologist*, v. 187, p. 733–750.

Asis, A. M. de, Omasa, K. 2007. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 62, p. 309–324.

Awange, J. L., Gebremichael, M., Forootan, E., Wakabulcho, G., Anyah, R., Ferreira, V. G., Alemayehu, T. 2014. Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets. *Advances in Water Resources*, v. 74, p. 64–78.

Awange, J. L., Mpelasoka, F., Goncalves, R. M. 2016. When every drop counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 period. *Science Of The Total Environment*, v. 566, p. 1472-1488.

Bai, P., Liu, X. 2018. Intercomparison and evaluation of three global high-resolution evapotranspiration products across China. *Journal of Hydrology*, v. 566, p. 743–755.

Bonaccorso, B. Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A. 2003. Spatial Variability of

- Drought: An Analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, v. 17, p. 273-296.
- Bordi, I., Fraedrich, K., Sutera, A. 2009. Observed drought and TWS ness trends in Europe: an update. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 6, p. 3891–3915.
- Brito, S. S. B., Cunha, A. P. M. A., Cunningham, C. C., Alvalá, R. C., Marengo, J. A., Carvalho, M. A. 2017. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, v. 38, p. 517-529.
- Carlson, T. N., Ripley, D. A. 1997. On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, v. 62(3), p. 241–252.
- Cazenave, A., Chen, J., 2010. Time-variable gravity from space and present-day mass redistribution in the Earth system. *Earth and Planetary Science Letters*, 298, p. 263–274.
- Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Scanlon, B., Güntner, A. 2016. Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations. *Global and Planetary Change*, v. 139, p. 56–65.
- Cheo, A. E., Voigt, H. J., Mbua, R. L. 2013. Vulnerability of water resources in northern Cameroon in the context of climate change. *Environmental Earth Sciences*, v. 70, p. 1211–1217.
- Cheval, S. 2015. The Standardized Precipitation Index – an overview. *Romanian Journal of Meteorology*, v. 12, p. 17-64.
- Cirilo, J. A. 2008. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. *Estudos Avançados*, v. 22, p.61-82.
- Cook, B. I., Miller, R. L., Seager, R. 2009. Amplification of the north american “Dust Bowl” drought through human-induced land degradation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 106, p. 4997–5001.
- Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Amigo, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C. 2001. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO<sub>2</sub> and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, v. 7, p. 357–37.

- Crossley, D., Hinderer, J., Boy., 2004. Regional gravity variations in Europe from superconducting gravimeters. *Journal of Geodynamics*, v. 38, P. 325-342.
- Cunha, A. P. M., Alvalá, R. C., Nobre, C. A., Carvalho, M. A. 2015. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 214–215, p. 494–505.
- Deus, D., Gloaguen, R. 2013. Remote sensing analysis of lake dynamics in semi-arid regions: Implication for water resource management. Lake Manyara, East African Rift, Northern Tanzania. *Water (Switzerland)*, v. 5, p. 698–727.
- Dhakar, R., Sehgal, V. K., Pradhan, S. 2013. Study on inter-seasonal and intra-seasonal relationships of meteorological and agricultural drought indices in the Rajasthan State of India. *Journal of Arid Environments*, v. 97, p. 108–119.
- Dutra, E., Di Giuseppe, F., TWSterhall, F., Pappenberger, F. 2013. Seasonal forecasts of droughts in African basins using the Standardized Precipitation Index. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, p. 2359–2373.
- Feng, J., Yan, D., Li, C. 2013. Evolutionary trends of drought under climate change in the Heihe River basin, Northwest China. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, v. 11, p. 1025–1031.
- Feng, P., Liu, D. L., Wang, B., Waters, C., Zhang, M., Yu, Q. 2019. Projected changes in drought across the wheat belt of southeastern Australia using a downscaled climate ensemble. *International Journal of Climatology*, v. 39, p. 1041-1053.
- Feng, Q., Ma, H., Jiang, X., Wang, X., Cao, S. 2015. What Has Caused Desertification in China? *Scientific Reports*, v. 5, p. 1–8.
- Ford, T., Labosier, C. F. 2014. Spatial patterns of drought persistence in the Southeastern United States. *International Journal of Climatology*, v. 34, p. 2229–2240.
- Gemael, C. 1994. Introducao ao ajustamento de observacoes: aplicacoes geodesicas. Curitiba: Editora UFPR.
- Geruo, A, Velicogna, I, Kimball, J. S, Kim, Y. 2015. Impact of changes in GRACE derived terrestrial water storage on vegetation growth in Eurasia. *Environmental Research Letters*, v.

10, p. 124024.

Getirana, A., 2016. Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. *Journal of Hydrometeorology*, v. 17, p. 591–599.

Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B. 2007. A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, v. 34, p. 1–6.

Hu, K., Awange, J. L., Khandu, E., Forootan, E., Goncalves, R. M., Fleming, K. 2017. Hydrogeological characterisation of groundwater over Brazil using remotely sensed and model products. *Science Of The Total Environment*, v. 599-600, p. 372-386.

Jassey, V. E. J., Reczuga, M. K., Zielińska, M., Słowińska, S., Robroek, B. J. M., Mariotte, P., Seppey, C. V. W., Lara, E., Barabach, J., Słowiński, M., Bragazza, L., Chojnicki, B. H., Lamentowicz, M., Mitchell, E. A. D., Buttler, A. 2018. Tipping point in plant–fungal interactions under severe drought causes abrupt rise in peatland ecosystem respiration. *Global Change Biology*, v. 24, p. 972–986.

Jiang, W., Yuan, P., Chen, H., Cai, J., Li, Z., Chao N., Sneeuw, N. 2017. Annual variations of monsoon and drought detected by GPS: A case study in Yunnan, China. *Scientific Reports*, v. 7, p. 5874.

Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N., Roy, D. P., Morisette, J. T. 2002. An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 3–15.

Karaburun, A. 2010. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. *Ozean Journal of Applied Sciences*, v. 3, p. 77–85.

Li, J., Wang, S., Zhou, F. 2016. Time Series Analysis of Long-term Terrestrial Water Storage over Canada from GRACE Satellites Using Principal Component Analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 42, p. 161-170.

Ma, Z., Peng, C., Zhu, Q., Chen, H., Yu, G., Li, W., Zhou, X., Wang, W., Zhang, W. 2012. Regional drought-induced reduction in the biomass carbon sink of Canada's boreal forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 109, p.

2423–2427.

Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. S., Cunha, A. P., Brito, S., Moraes, O. L. L. 2018. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid northeast Brazil region. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, v. 90, p. 1973–1985.

Martins, E. S. P. R., Vasconcelos Junior, F. C. 2017. O clima da Região Nordeste entre 2009 e 2017: monitoramento e previsão. *Parcerias Estratégicas*, v. 22, p. 63-80.

Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*.

Mishra, A. K., Singh, V. P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, v. 391, p. 202–216.

Mpelasoka, F., Awange, J. L., Goncalves, R. M. 2018. Accounting for dynamics of mean precipitation in drought projections: A case study of Brazil for the 2050 and 2070 periods. *Science of the Total Environment*, v. 622, p. 1519-1531.

Molodtsova, T., Molodtsov, S., Kirilenko, A., Zhang, X., Vanlooy, J. 2016. Evaluating flood potential with GRACE in the United States. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 16, p. 1011–1018.

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.

Morton, D. C., DeFries, R. S. 2005. Rapid assessment of annual deforestation in the Brazilian Amazon using MODIS data. *Earth Interactions*, v. 9, p. 1 – 22.

Ndehedehe, C. E., Ferreira, V.G. 2020a. Identifying the footprints of global climate modes in time-variable gravity hydrological signals. *Climate Change*, v. 159, p. 481 – 502.

\_\_\_\_\_. 2020b. Assessing land water storage dynamics over South America. *Journal Hydrology*, v. 580, p. 124339.

Ndehedehe, C. E., Awange, J., Agutu, N., Kuhn, M., Heck, B. 2016. Understanding changes in terrestrial water storage over West Africa between 2002 and 2014. *Advances in Water*

*Resources*, v. 88, p. 211–230.

Omute, P., Corner, R., Awange, J. L. 2012. The use of NDVI and its Derivatives for Monitoring Lake Victoria's Water Level and Drought Conditions. *Water Resources Management*, v. 26, p. 1591–1613.

Peng, Y., Jun, X., Chesheng, Z., Yunfeng, Q., Yueling, W. 2017. Monitoring the spatio-temporal changes of terrestrial water storage using GRACE data in the Tarim River basin between 2002 and 2015. *Science of the Total Environment*, v.595, p. 218-228.

Piao, S., Mohammat, A., Fang, J., Cai, Q., Feng, J. 2006. NDVI-based increase in growth of temperate grasslands and its responses to climate changes in China. *Global Environmental Change*, v. 16, p. 340–348.

Rodrigues, R. R., McPhaden W. J. 2014. Why did the 2011-2012 La niña cause a severe drought in the Brazilian Northeast. *Geophysical Research Letters*. v. 41, p. 1012-1018.

Rodriguez-Iturbe, I., D'odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L., Tamea, S. 2007. Challenges in humid land ecohydrology: Interactions of water table and unsaturated zone with climate, soil, and vegetation. *Water Resources Research*, v. 43, p. 1–5.

Rosenhaim, T. L., Gonçalves, R. M., Lima, J. P., Gama, N. A. 2018. Comportamento do armazenamento de água entre os anos de 2002 a 2015 para a região hidrográfica brasileira do atlântico nordeste oriental considerando observações grace, TRMM e in situ. *Geociencias*, v. 37, p. 823–834.

Save, H., Bettadpur, S., Tapley, B. D. 2016. High resolution CSR GRACE RL05 mascons. *Journal of Geophysical: Solid Earth*, v. 121, p. 7547-7569.

Schober, P., Boer, C., Schwarte, L. A. 2018. Correlation Coefficients. *Anesthesia and Analgesia*, v. 126, p. 1763–1768.

Shabbar, A., Skinner, W. 2004. Summer drought patterns in Canada and the relationship to global sea surface temperatures. *Journal of Climate*, v. 17, p. 2866–2880.

Siegel, S. 1975. Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil.

- Snedecor, G.W. and Cochran, W.G. 1980. *Statistical Methods*. 7th Edition, Iowa State University Press, Ames.
- Singh, D., Herlin, I., Berroir, J. P., Silva, E. F., Meirelles, M. S. 2004. An approach to correlate NDVI with soil colour for erosion process using NOAA/AVHRR data. *Advances in Space Research*, v. 33, p. 328–332.
- Sinha, D., Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., Thomas, R. C. 2017. Characterizing drought in India using GRACE observations of terrestrial water storage deficit. *Journal of Hydrometeorology*, v. 18, p. 381–396.
- Son, N. T., Chen, C. F., Chen, C. R., Chang, L. Y., Minh, V. Q. 2012. Monitoring agricultural drought in the lower mekong basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 18, p. 417–427.
- Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., Vogt, J. 2014. World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, v. 34, p. 2792–2804.
- Sun, T., Ferreira, V. G., He, X., Andam-Akorful, S. A. 2016. Water availability of são francisco river basin based on a space-borne geodetic sensor. *Water (Switzerland)*, v. 8, p. 213.
- Sun, W., Canção, X., Mu, X., Gao, P., Wang, F., Zhao, G. 2015. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 209–210, p. 87–99.
- Tomasella, J., Vieira, R. M. S. P., Barbosa, A. A., Rodriguez, D. A., Santana, M. de O., Sestini, M. F. 2018. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 73, p. 197–206.
- UNESCO. 2009. *The United Nations World Water Development Report 3*. Paris.
- Van Dijk, A. I. J. M., Beck, H. E., Crosbie, R. S., Jeu, R. A. M. de, Liu, Y. Y., Podger, G. M., Timbal, B., Viney, N. R. 2013. The Millennium Drought in southeast Australia (2001-2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society. *Water Resources Research*, v. 49, p. 1040–1057.
- Van Loon, A.F. 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*,

v. 2 p. 359–392.

Wilhite, D. A., Glantz, M. H. 1985. Water International Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions Understanding: the Drought Phenomenon : The Role of Definitions. *Water International*, v. 10, p. 111–120.

Wolfe, R. E., Nishihama, M., Fleig, A. J., Kuyper, J. A., Roy, D. P., Storey, J. C., Patt, F. S. 2002. Achieving sub-pixel geolocation accuracy in support of MODIS land science. *Remote Sensing of Environment*, v. 83, p. 31–49.

Xiang, L., Wang, H., Steffen, H., Wu, P., Jia, L., Jiang, L., Shen, Q. 2016. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 449, p. 228–239.

Yao, N., Li, L., Feng, P., Feng, H., Liu, D.L., Liu, Y., Jiang, K., Hu, X., Li, Y. 2020. Projections of drought characteristics in China based on a standardized precipitation and evapotranspiration index and multiple GCMs. *Science of the Total Environment*, v. 704, p. 1-18.

Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., Sharma, A. 2015. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of Hydrology*, v. 526, p. 183–195.

Zhao, M., Geruo, A., Velicogna, I., Kimball, J. S. 2017. A global gridded dataset of GRACE drought severity index for 2002-14: Comparison with PDSI and SPEI and a case study of the Australia millennium drought. *Journal of Hydrometeorology*, v. 18, p. 2117–2129.

Zhou, G., Wei, X., Wu, Y., Liu, S., Huang, Y., Yan, J., Zhang, D., Zhang, Q., Liu, J., Meng, Z., Wang, C., Chu, G., Liu, S., Tang, X., Liu, X. 2011. Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China. *Global Change Biology*, v. 17, p. 3736–37461.

### 3 ARTIGO 2 - OBSERVAÇÕES GEODÉSICAS MULTI-SENSORES PARA COMPREENSÃO DE SECAS NA REGIÃO HIDROGRÁFICA DO ATLÂNTICO NORDESTE - NAEHR, BRASIL

Este estudo está sendo organizado como um artigo completo a ser submetido em um periódico internacional

#### **Abstract:**

O Atlântico Nordeste Oriental (NEARH) é considerada uma região hidrográfica com a menor disponibilidade de água no Brasil e desempenha um papel fundamental na vida de 24.1 milhões de habitantes distribuídos em 874 municípios que convivem com uma alta vulnerabilidade a períodos de seca. A partir de dados temporais multi-sensores como o *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), *Global Positioning System* (GPS) e dados de precipitação do *Climatic Research Unit* (CRU) foram utilizadas neste estudo para detecção de períodos de seca. Entre os índices testados estão o *Combined Climatic Deviation Index* (CCDI), o *Drought Severity Index* (DSI) e o *Vertical Crustal Deformation Index* ( $DI_{VCD}$ ). A validação de aderência dos índices utilizou como padrão o *Standard Precipitation Index* (SPI). Os resultados encontrados mostram fortes correlações ( $r = 0.76$  e  $0.66$  entre o CCDI e o SPI-03/06. O DSI se correlacionou fortemente com os SPI-24/36 obtendo ( $r = 0.69$  e  $0.76$ ). O  $DI_{VCD}$  apresentou algumas limitações, porém se mostrou promissor para detectar as frequências de secas hidrológicas, variando suas correlações ( $r = 0.22$  até  $0.62$  de fraca a fortes com o SPI-24. Destaca-se que todos os índices identificaram a última seca severa de 2012 a 2018 bem como a continuidade deste extremo climático em 2019 e 2020.

**Palavras-chaves:** Índices de Seca; Sensores Geodésicos; *Global Positioning System* (GPS); GRACE (*Gravity Recovery and Climate Experiment*); TWS (*Total Water Storage*), Vertical Crustal Deformation Index.

## 1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno recorrente com grandes impactos nos sistemas naturais e humanos (Schwalm et al. 2017), se trata de um processo com impactos nas esferas políticas, socioeconômicas (Linke et al. 2018), agrícola (Feng et al. 2019), e ambiental (Loon et al. 2016). De acordo com Wilhite and Glantz (1985) a seca é um extremo climático originado pelo déficit de precipitação, que resulta na baixa disponibilidade hídrica, mas com o passar do tempo essa definição se tornou algo mais complexo e indefinido formalmente (Wilhite et al., 2007). A seca é caracterizada como um dos eventos climáticos mais destrutivos que afetam milhões de pessoas em todo globo (Naumann et al., 2018) ao longo dos anos, casos como nos EUA (C. Zhao et al. 2020), Europa (Cammalleri et al. 2020), China (Yao et al. 2020), Índia (Bisht 2019), Austrália (King et al. 2020), Brasil (Marengo et al. 2020) entre outros países. De acordo com Banco de Dados de Emergência e Desastres (EM-DATE) foram registrados mais de 700 registros referentes a seca no mundo entre 1900-2020.

O Brasil sendo um país com dimensões continentais devido a sua extensa amplitude em latitude (5°N a 34°S) possui variações climáticas, ao longo do todo seu território desde o semiárido quente cobrindo o nordeste do país até o subtropical úmido ao sul (C. E. Ndehedehe and Ferreira 2020). A região Nordeste Brasileira está devidamente inserida no perímetro do semiárido, mais precisamente 53% de sua área, apresentando assim chuvas abaixo da média e de forma desigual tanto espacialmente quanto temporalmente, seu relevo possui muitos planaltos e depressões em seu interior e planícies em seu litoral (Morales and Assine 2015), possui uma vasta vegetação contendo diferentes biomas como o cerrado, Caatinga, Manguezais, Mata dos Cocais e Mata Atlântica (Albuquerque et al., 2005). Entre as 5 regiões hidrográficas contidas na região do Nordeste, a região hidrográfica (HR) do Atlântico Nordeste Oriental (NAEHR) é a com menor disponibilidade hídrica entre as demais regiões hidrográficas do país (ANA 2013). Sua área de aproximadamente  $286 \times 10^3 \text{ km}^2$ , onde 87% de sua extensão territorial está inserida no semiárido brasileiro, sendo notoriamente seca e correlacionada fortemente com o El Niño (Nobre et al. 2016).

A missão *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE) e seu sucessor GRACE – FO (Felix et al. 2020) trouxeram uma abordagem alternativa para o monitoramento de variações de massa na Terra. Estudos como (Awange et al. 2014; Boergens et al. 2020; Chen et al. 2009; Houborg et al. 2012; Lima et al. 2020; Yang et al. 2017; entre outros) utilizaram as observações do armazenamento total de água na superfície terrestre (TWS) das missões GRACE

de forma complementar para compreender e descrever o comportamento hídrico de uma determinada região. Com o uso do direto do TWS-GRACE como principal variável para identificar variabilidade hídrica, novos índices vem sendo desenvolvidos, entre eles: (i) Índice de Desvio Climatológico Combinado (CCDI) proposto por Sinha et al., (2019) utilizando uma combinação entre observações de precipitação e TWS-GRACE; (ii) o Índice de Severidade de Seca (DSI-GRACE) proposto por Zhao et al., (2017) o (iii) Índice de Déficit de Armazenamento de Água (WSDI) proposto por Thomas et al., (2014) e aprimorado por Sinha et al., (2017) fazem o uso exclusivamente do TWS-GRACE para classificar o fenômeno de seca; (iv) o índice de Déficit de Armazenamento Total (TSDI) adaptado por Yirdaw et al., (2008) fez uso do TWS-GRACE e outros componentes hidrológicos. Os mesmos vêm se tornando uma alternativa para estudos referentes a seca para diversos locais no globo terrestre, como (Yang et al. 2020) aplicando o CCDI e DSI-GRACE na região central da Ásia entre os anos de 2002-2017, (Kumar et al., 2021), aplicando o CCDI e DSI-GRACE para identificar eventos extremos nas principais bacias do sul da Índia, e (Yu et al. 2019) utilizando o WSDI para avaliação das secas na Mongólia entre 2002-2017.

Outra alternativa para identificar a seca está associada com o índice de deslocamento crustal vertical ( $DI_{VCD}$ ) devido a carga hidrológica relacionada ao TWS para cada estação *Global Navigation Satellite System* (GNSS) (Chew and Small 2014; Ferreira et al. 2018). A perda de massa de água associada a seca induz uma variação vertical, onde o deslocamento crustal vertical (VCD) é estimado para cada estação GNSS expressado assim uma anomalia de deslocamento radial. Ferreira et al., (2018) apresentam a caracterização da seca na América do Sul a partir do  $DI_{VCD}$ , onde foram utilizadas 36 estações GPS no período de 2009-2016 para analisar bacias importantes como as do Amazônia, Paraná e São Francisco.

Diferentes índices de seca são aplicados em diversas partes da Terra, existe, portanto, a necessidade de entender como cada índice se comporta em uma determinada região, fornecendo assim subsídios para identificar os padrões de sensibilidade dos índices. Outros autores (Cunha et al. 2019; Getirana 2016; C. Ndehedehe et al. 2016; Reis et al. 2020; Sun et al. 2016) abordam de forma global/continental o Brasil, não detalhando as características para casos regionais devido à grande extensão das regiões hidrográficas do país. Destaca-se esta contribuição como pioneira ao apresentar as métricas da seca a partir de índices baseados nos dados da missão GRACE e  $DI_{VCD}$  para a Região Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, cujo os objetivos são: (i) calcular os índices CCDI, DSI-GRACE,  $DI_{VCD}$  e o SPI (*Standard Precipitation Index*) nas escalas de 3, 6, 12, 24 e 36 meses; (ii) identificar os eventos de seca de todos índices

abordados no objetivo (i); (iii) verificar a sensibilidade dos índices CCDI, DSI-GRACE, WSDI,  $DI_{VCD}$  para a região de estudo; (iv) analisar frequências dos índices de seca baseados nos dados GRACE, bem como a correlação estatística entre os índices como forma de avaliação dos índices com as diversas escalas do SPI; (v) analisar os padrões espaciais dos índices CCDI e DSI-GRACE a partir do início do último evento de seca observado na região de estudo em 2012 até o final da série histórica de cada índice.

## 2 DADOS E MÉTODOS

### 2.1 REGIÃO HIDROGRÁFICA DO ATLÂNTICO NORDESTE ORIENTAL - RHANO

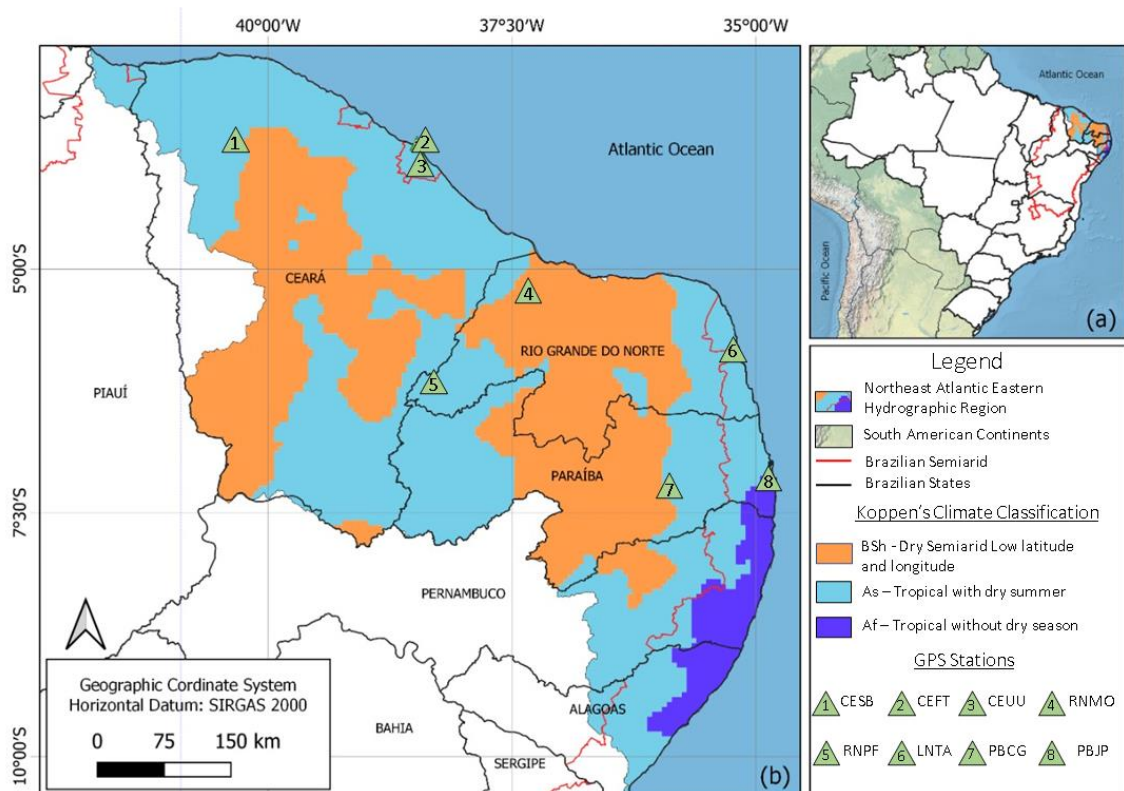
A região hidrográfica (ver Fig. 2.1b) se encontra na faixa de latitude que varia de 3°S a 10°S ocupando cerca de 3.4% do território brasileiro, sendo a região hidrográfica com menor disponibilidade hídrica do país (ANA 2013). De acordo o censo de 2010 (IBGE 2010) a população total é de aproximadamente 24.1 milhões de habitantes distribuídos em 874 municípios, onde diversos desses municípios decretaram estado de emergência por motivos de seca (Cunha et al. 2019). De acordo a classificação climática de Köppen-Geiger do Brasil (Stape et al. 2014) a RH possui clima predominantemente Tropical (As) e Semiárido (BSh).

As baixas precipitações, altas temperaturas, e altas taxas de evapotranspiração, vem contribuindo para apresentar baixa disponibilidade hídrica de corpos d'água. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) a região possui um regime pluviométrico com média anual de 1.052mm, com as maiores precipitações nos meses de fevereiro a junho, possui temperaturas mais elevados nos meses de setembro a janeiro em torno de 26°C á 28°C. A infraestrutura hídrica é munida de 346 reservatórios com capacidade total de 27.188,66 hm<sup>3</sup>, observaram que em 2017 o volume existente de água nos reservatórios estava em torno de 2.604,3 hm<sup>3</sup>, ou seja, 9.6% de volume útil (Lima et al. 2020).

Ao todo, 6 estados fazem parte desta região hidrográfica, sendo eles: Alagoas (4.7%), Ceará (45.8%), Paraíba (19.7%), Pernambuco (10.3%), Piauí (1.0%) e Rio Grande do Norte (18.5%). Possuindo como vegetação o bioma Caatinga e Mata Atlântica. A Caatinga se estende em todo sertão nordestino com (86.47%) da RH, é o bioma mais seco do Brasil e de ocorrência exclusivamente no país, o bioma é caracterizado pela reduzida disponibilidade hídrica, baixa capacidade de armazenamento muito limitado dos rios que são predominantemente intermitentes além de possuir solos rasos. Com alguns fragmentos ao norte do Piauí (0.13%) o bioma Mata Atlântica localizado principalmente do litoral do Rio Grande do Norte até o litoral

de Alagoas com (13.4%), é um bioma que ocupa toda costa atlântica continental do Brasil, é caracterizada por chuvas intensas influenciadas pela proximidade do oceano, o bioma é reconhecido como o mais degradado possuindo apenas 12% de sua origem.

Figura 1: (a) Localização da Região Hidrográfica no Brasil, (b) expansão da Região Hidrográfica no Nordeste.



Fonte: Autores (2021).

## 2.2 DADOS

Todos os dados (GRACE, precipitação e GPS) aplicados para os cálculos dos índices de seca e análise climática espacial da NAEHR foram obtidos gratuitamente. Os itens 2.2.2.1 a 2.2.3 apresentam a descrição dos materiais utilizados, fonte, link de acesso e as resoluções espaciais e temporais.

### 2.2.1 Mascons GRACE

Foram utilizadas as soluções mensais do GRACE baseadas na metodologia *mass concentration* (mascon) processadas pelo Center for Space Research (CSR) da Universidade do Texas, representados em uma grade longitude-latitude de (0.25° x 0.25°). Ao todo foram utilizadas soluções mensais quadriculas mensais de abril de 2002 a junho de 2020 da Release

06 version 2 (RL06M v.02), não houve preenchimento de falha dos meses faltantes ao longo da série GRACE e GRACE-FO.

Os dados estão disponíveis no site [http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06\\_mascons.html](http://www2.csr.utexas.edu/grace/RL06_mascons.html) da Universidade do Texas em Austin. A versão RL06 suaviza os litorais, minimizando assim o vazamento (leakage) entre os sinais terrestres e oceânicos. Mais detalhes sobre o processamento de dados para a solução mascons podem ser encontradas em Save et al., 2016 e Save et al., 2020.

## 2.2.2 Precipitação

Neste estudo foi utilizado a versão mais atual do conjunto de dados global de precipitação mensal derivado da Climatic Research Unit (CRU TS v. 4.05) (<https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>) at the University of East Anglia (Norwich, Reino Unido) durante o período de janeiro de 1985 a dezembro de 2019 em grades de alta resolução ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) que preenchem toda área de estudo (Harris et al. 2020).

## 2.2.3 GPS

Foram utilizados os dados disponíveis do Laboratório Geodésico de Nevada (NGL) ([http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap\\_MAG.html](http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap_MAG.html)) (Blewitt et al., 2015). Foram selecionadas as estações com maiores anos de observações, estações com períodos de observações muito curtas foram excluídas. Onde 8 estações distribuídas pela área de estudo atendiam esse critério. Cada estação está representada na Figura 1(b). As soluções são diárias ligadas ao referencial geodésico IGS08 (Rebischung et al 2016). O período de observação variou de estação para estação conforme descrito na tabela 1. A série temporal compreende o período entre os anos de 2008 a 2020.

Tabela 1: Linha de tempo das observações GPS.

| Station      | PBJP   | PBCG   | LNTA   | RNPF   | RNMO   | CEEU   | CEFT   | CESB   |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Start Series | Apr-13 | Apr-08 | Feb-11 | May-14 | Jan-09 | Apr-08 | Mar-10 | Oct-13 |
| End Series   | Aug-20 | Aug-20 | Jul-20 | Jul-20 | Aug-20 | Aug-20 | Aug-20 | Aug-20 |

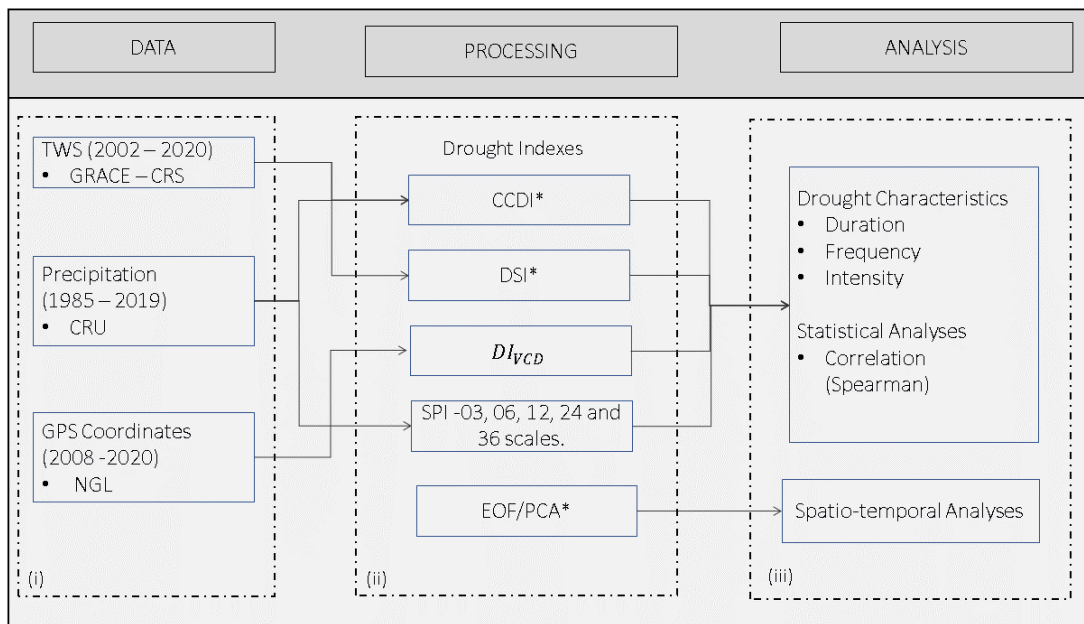
Fonte: Autores (2021).

O modo de processamento de dados usado pelo NGL é o posicionamento por ponto preciso (PPP) com resolução de ambiguidades. Para o processamento de dados GPS, o NGL usa os produtos GPS *fiducial-free orbit* fornecidos pelo *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) da NASA (Bertiger et al., 2010) onde aplica-se os modelos de acordo com as convenções do *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS) (Gérard e Luzum, 2010). Além disso, as cargas atmosféricas (marés e não marés) e oceânicas (não marés) foram removidas usando os resultados fornecidos pelo Global Geophysical Fluids Center do GFZ (Dill and Dobsław 2013).

## 2.3 MÉTODO

Figure 2.2 represents a summary of the methods containing the following steps: (i) data (detailed in item 2.2.2), (ii) processing and calculation of the indexes (2.2.3.1 and 2.2.3.2), and (iii) the spatiotemporal analysis from the calculation of the EOF/PCA (2.3.3), as well as other analyzes of correlation, duration, frequency and intensity of droughts.

Figura 2: Resumo da metodologia.



Fonte: Autores (2021).

### 2.3.1 Cálculo dos índices de seca (baseado no GRACE) e o *Standardized Precipitation Index* – SPI

Nesse estudo são utilizados 2 índices para caracterização das condições reais da seca na NAEHR que utilizam do TWS – GRACE como variável de análise, sendo eles o CCDI e o DSI-GRACE, usando uma combinação do TWS e dados de precipitação.

O CCDI integra ocorrências de secas meteorológicas, hidrológicas e agrícolas, incorporando a precipitação e anomalias de TWS para avaliação da seca. Assim, o CCDI leva em conta as variações no armazenamento de água superficial e subterrâneo. Neste estudo, dados de precipitação em grade do CRU ( $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) e anomalias TWS RL06M\_v02 do CSR ( $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) são usados no cálculo do CCDI de 2002 a 2020 seguindo o procedimento proposto por (Sinha et al., 2019) nas equações de (2.1) até (2.5).

$$PA_{i,j} = P_{i,j} - P_\mu \quad (2.1)$$

$$PA_{i,j}^{res} = PA_{i,j} - PA_j^{clim} \quad (2.2)$$

$$TWS_{i,j}^{res} = TWS_{i,j} - TWS_j^{clim} \quad (2.3)$$

$$CD_{i,j} = TWS_{i,j}^{res} + PA_{i,j}^{res} \quad (2.4)$$

$$CCDI_{i,j} = \frac{CD_{i,j} - CD_\mu}{CD_\sigma} \quad (2.5)$$

Onde o subscrito 'i' varia de 1 a 18 anos ( $i = 2002, 2003..., 2019$ ); 'j' para 1 a 12 representando cada mês civil de um ano; ' $\mu$ ' para média e ' $\sigma$ ' para desvio padrão.  $PA_{i,j}$  é a anomalia da precipitação,  $P_{i,j}$  representa os desvios mensais da precipitação para cada ano e  $P_\mu$  representa a média das precipitações mensais ao longo dos 18 anos. Os subscritos '*clim*' e '*res*' representam climatologia e séries de tempo residuais, respectivamente.  $PA_j^{clim}$  é a média da anomalia de precipitação para cada mês 'j', ou seja, é a razão entre soma dos mesmos meses ao longo dos 18 anos de observações sobre o número de vezes que o mês aparece nos 18 anos, o mesmo acontece para o  $TWS_j^{clim}$  sendo a média da anomalia do TWS para cada mês 'j'.

O GRACE-DSI fornece a comparação das características da seca entre regiões e intervalos de tempo, sem considerar qualquer impacto de incertezas relacionadas aos modelos

de balanço hídrico do solo ou a influência de dados meteorológicos. Neste estudo, os dados de armazenamento de água terrestre GRACE CSR-RL06M\_v02 são usados para a avaliação do GRACE-DSI seguindo o procedimento desenvolvido por (M. Zhao et al. 2017).

$$GRACE - DSI_{i,j} = \frac{TWS_{i,j} - TWS_j^H}{\sigma(TWS_j)} \quad (2.6)$$

Onde  $i$  e  $j$  são o ano e o mês, respectivamente, o  $TWS_j^H$  e  $\sigma(TWS_j)$  são a média e o desvio padrão das anomalias TWS sem tendência para cada mês  $j$  respectivamente.

### 2.3.2 Standardized Precipitation Index – SPI

O índice comumente utilizado para secas é o *Standardized Precipitations Index* (SPI), cujo valor quantifica o desvio da precipitação média e permite comparar anos secos e úmidos ou anos com déficit ou excesso (Mckee et al. 1993) mais detalhes em (Achour et al. 2020). Nesta pesquisa o SPI foi avaliado em 5 escalas de tempo (3, 6, 12, 24 e 36 meses) com o intuito de verificar o comportamento da seca e suas classificações, como as meteorológicas, secas mais duradouras como as hidrológicas que podem ser indicadas em escalas de tempo de SPI maiores, com o objetivo de verificar qual a escala de tempo que melhor se correlaciona com os índices de seca baseados no TWS-GRACE e no  $DI_{VCD}$ .

A classificação e definição dos níveis de seca dos diferentes índices abordados são apresentados na Tabela 2 e uniformizados conforme os autores propõe (Sinha et al., 2019; M. Zhao et al. 2017; McKee et al., 1993).

Tabela 2: Categorias de seca e seus limites correspondentes para os diversos índices de seca.

| Category  | D0             | D1             | D2             | D3             | D4           |
|-----------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Condition | Abnormally     | Moderate       | Severe         | Extreme        | Exceptional  |
| CCDI      | -0.28 to -0.45 | -0.46 to -0.93 | -0.94 to -1.44 | -1.45 to -1.89 | $\leq -1.90$ |
| DSI-GRACE | -0.50 to -0.79 | -0.80 to -1.29 | -1.30 to -1.59 | -1.60 to -1.99 | $\leq -2.00$ |
| SPI       | -0.50 to -1.00 | -1.01 to -1.50 | -1.51 to -1.99 | $\leq -2.00$   | -            |

Fonte: Autores (2021).

### 2.3.2 Vertical Crustal Deformation Index $DI_{VCD}$

De acordo com Ferreira et al., (2018) o  $DI_{VCD}$  utiliza padronização da série dessazonalizada do VCD para estimar o déficit hídrico utilizando da série temporal da componente  $Up$  ou aqui equivalentes como deslocamento radial ( $\Delta r$ ), em cada estação GPS (ver. 2.1b), considerou-se:

$$D(t) = -\Delta r(t) \quad (2.7)$$

Onde  $(-\Delta r)$  indica a deflexão do solo ( $D$ ), cujo os valores positivos indicam subsidência (ou seja, excesso de massa de água) e valores negativos indicam elevação (ou seja, déficit de massa de água) em uma época  $t$ . Com as deflexões diárias calculadas pela equação (2.7) ao longo da série temporal abordada por cada estação foi retirado a média mensal para cada mês ( $D_i$ ) da série de deflexões, ou seja, uma deflexão mensal a partir da média das deflexões diárias. Onde  $i$  é referente a cada mês da série de deflexão do solo ( $D$ ).

A “normal climática” mensal  $C_j^{clim}$  é calculada pela equação (8), onde o  $C_j^{clim}$  quantifica os desvios de cada mês pela mediana da climatologia, de acordo com Ferreira et al., 2018, a mediana é escolhida devido ao fato de que ela não é afetada por outliers e é mais estável do que a média.

$$C_j^{clim} = median(D_i(j: 12 : n \times 12)) \quad (2.8)$$

Onde  $j$  é o mês do ano (de janeiro a dezembro),  $n$  é o número inteiro de anos (2008 – 2020). Com a serie normalizada, o índice de seca-VCD é calculado pelas equações (2.9) e (2.10). O significado da Eq. ( 2.10 ) é semelhante ao índice de seca de águas subterrâneas proposto por (U. S. B. Li and Rodell 2014) e recentemente usado por (Thomas et al. 2017).

$$D^*(i) = (D_i - C_j^{clim}) \quad (2.9)$$

$$DI_{VCD}(i) = \frac{D^*(i)}{\sigma(D^*)} \quad (2.10)$$

Onde  $D^*(i)$  representa a diferença entre a deflexão do mês  $i$  e climatologia do mês do ano (de janeiro a dezembro) e  $D^*$  é o desvio padrão da série de deflexão de  $D^*(i)$ .

### 2.3.3 Padrões Espaço-temporal

Para encontrar os padrões espaço-temporais dominantes, foi aplicado o método das Funções Ortogonais Empíricas (EOF) ou também conhecido como PCA (*Principal Component Analysis*). Se trata de uma técnica estatística multivariada usada para reduzir a dimensionalidade de grandes conjuntos de dados, a fim de revelar os padrões dominantes de variabilidade espaço-temporal. A vantagem da análise EOF é que ela acentua a semelhança e a dissimilaridade na demonstração dos dados que são difíceis de analisar. Os EOFs têm sido usados com sucesso na análise e modelagem de variações temporais na distribuição de massa obtidas pelos satélites GRACE (J. Li, Wang, and Zhou 2016; Yang et al. 2017; entre outros), padrões climáticos de precipitação (Esteban-Parra, et al., 1998; Gu and Adler 2013; Sharma and Hamal 2020; entre outros). O objetivo principal dos EOFs é fragmentar um campo de tempo espaço contínuo  $X(t, s)$ , onde 't' e 's' indicam tempo e localização espacial respectivamente e podem ser representados como:

$$X(t, s) = \sum_{k=1}^M c_k(t) \times u_k(s) \quad (2.11)$$

Onde  $M$  é o número de modos presentes,  $X(t, s)$  representa a série temporal original como uma função de tempo ( $t$ ) e espaço ( $s$ );  $u_k(s)$  mostram os modos espaciais dos principais fatores responsáveis pelas variações temporais, e  $c_k(t)$  é o principal componente que representa as variações da amplitude de cada EOF com o tempo.

Em essência, a análise EOF visa criar um novo conjunto de variáveis que apreende a maior parte da variância observada dos dados por uma combinação linear das variáveis originais. Em sua formulação mais simples, a análise EOF é o cálculo o autovetor e o autovalor de uma covariância ou matriz de correlação calculada a partir de um grupo de dados da série temporal original, onde os autovetores são o coeficiente de transformação ortogonal e os autovalores são as variações dos componentes principais. Os autovetores são frequentemente chamados de modos ou carregamentos, na prática, a maior parte da variação dos dados é normalmente explicada pelos primeiros modos (os dois primeiros são considerados neste estudo). A análise EOF visa detectar um número relativamente pequeno de variáveis independentes que emanam quase o máximo possível de informações originais, sem a redundância, no conjunto de dados (Sinha et al., 2019).

### 2.3.4 Correlação estatística de Spearman

De acordo com Schober and Schwarte (2018), a correlação de posto de Spearman ( $\rho$ ) é uma correlação linear que não requer dados normalmente distribuídos e pode ser usada, análoga ao coeficiente de Pearson onde ( $1 > \rho > 0.70$ ;  $-1 < \rho < -0.70$ ) é uma forte correlação, ( $0.69 > \rho > 0.40$ ;  $-0.69 < \rho < -0.40$ ) uma moderada correlação, ( $0.39 > \rho > 0.10$ ;  $-0.39 < \rho < 0.10$ ) uma baixa correlação e ( $\rho$ ) próximos de 0.00 possuem correlação nula, o sinal indica a direção da relação entre as variáveis, o coeficiente negativo indica que a correlação é inversa, à medida que um dos parâmetros analisados aumenta o outro diminui. A correlação é testada em um nível de significância de 5% da análise bilateral, indicando se as variáveis apresentam diferença estatisticamente significativa, é adotada, como hipótese nula, assumindo que o resultado estatístico da correlação foi obtido por coincidência devido às flutuações probabilísticas dos eventos, e sua hipótese alternativa considera uma similaridade real da correlação.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todas as análises de correlação discutidas nesta seção obtiveram um valor de p-valor  $< 0,05$ , ou seja, inferior a 5%, aceitando a hipótese alternativa de que existe uma semelhança real na correlação entre as variáveis estudadas. Os valores encontrados na seção 2.3.1 é referente ao comportamento médio para toda RH.

### 3.1 ÍNDICES DE SECA BASEADOS NO TWS-GRACE, E SPI

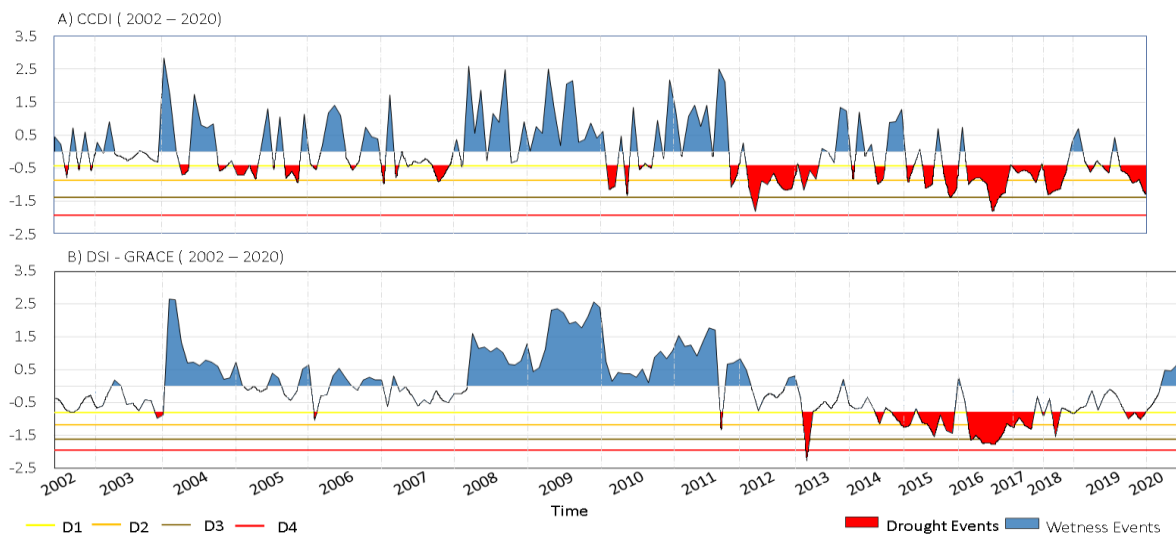
Os índices de seca baseados no TWS-GRACE associados a NEARH são apresentados na figura 3. Para cada índice a categoria de intensidade (ver Tabela 2) são representadas nas seguintes cores: Azul Claro (Abnormally Drought – D0), amarelo (Moderate Drought – D1), laranja (Severe Drought – D2), marrom (Extreme Drought – D3) e vermelho (Exceptional Drought – D4). As áreas em vermelhos foram associadas a períodos de seca independente de sua duração.

A Figura 3(a) é referente ao CCDI, onde foram encontrados períodos isolados de curta duração classificados como secas leves em determinados meses dos seguintes anos 2002, 2004, 2006, 2007 e 2010, porém, de acordo com Thomas et al., (2014) esses períodos não podem ser classificados como eventos de seca por não assumir valor dentro da faixa de classificação de seca por no mínimo 3 meses consecutivos, em 2010 o CCDI classificou os meses de fevereiro, março, maio como valores de seca moderada corroborando assim com Marengo et al., (2018)

afirmando que para o ano de 2010 um indicativo de um período seco estaria por vir. O CCDI identificou o início de um evento de seca no final do ano de 2011 que perdurou até o final de 2018 obtendo valores mais críticos em 2012 e 2016. Ao longo dos anos compreendidos de 2011 a 2019 foram observadas anomalias positivas no segundo semestre de 2013 e ao longo de 2014, provavelmente, ocasionados por grandes precipitações nesse intervalo de tempo (resultados positivos do índice). Por outro lado, em 2015-2016 o fenômeno El Niño ocorreu de forma forte intensificando o evento da seca (Marengo et al., 2018), onde uma condição climática de anomalia anticiclônica vinda do Sudeste pode ter vindo a interferir e intensificar a seca no nordeste do Brasil (Nobre et al., 2016). Por ser um índice que leva em consideração observações da precipitação, uma variável extremamente heterogênea, assim ocasionando essas altas variações na região ao longo dos anos.

A Figura 3(b) se refere ao DSI-GRACE, o índice apresentou eventos isolados de seca em dezembro de 2003 e 2006 e em abril de 2012, o índice começa a apresentar períodos de seca a partir de 2013 obtendo uma classificação de seca extrema em abril, as chuvas do segundo semestre de 2013 e no ano de 2014 também influenciaram no índice, porém mantendo os valores negativos nesse período chuvoso e assim voltando a ter períodos de seca até 2018. O índice apresentou valores negativos até março de 2020, alertando que a seca encontrada de 2012 a 2018 possa não ter totalmente finalizada, corroborando assim com Cunha et al., (2019) indicando que a seca acabou parcialmente em 2018. A partir do DSI é possível notar respostas hidrológicas a seca que sabiamente começou em 2012 (Calçado De Azevedo et al. 2018; Filho et al. 2020; Justino, Nádja, and Oliveira 2020; MEDEIROS et al. 2021), o índice capta o sinal de forma defasada da resposta hidrológica em relação a meteorológica.

Figura 3: Série temporal mensal do índice de seca baseado em TWS-GRACE para NEARH: a) CCDI, (b) DSI-GRACE

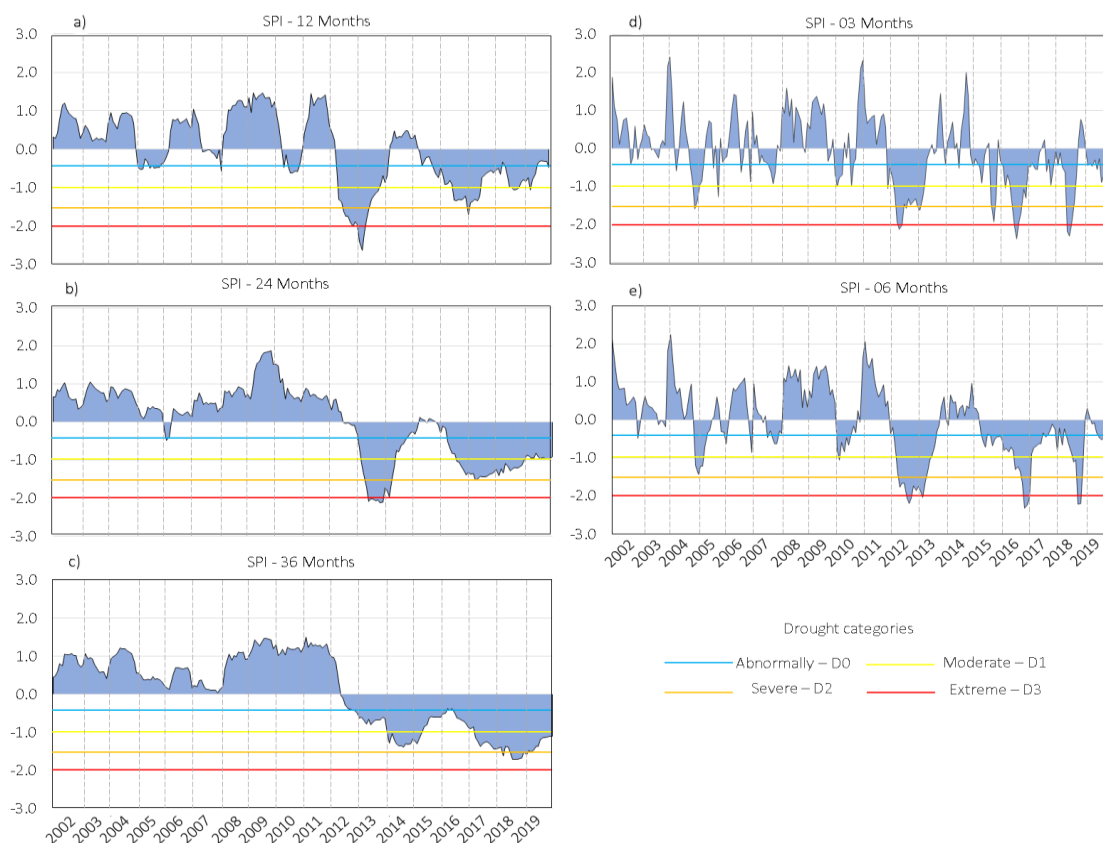


Fonte: Autores (2021).

É possível identificar os sinais da seca de 2012 a 2018 nos dois índices. Mais especificadamente no DSI, o índice apresenta menos variações ao longo de suas séries temporais com relação ao CCDI isso devido à ausência da variável de precipitação. De acordo com Rodrigues and McPhaden (2014) esse extremo climático de seca começou sob influência de um evento de La Niña que teve uma configuração com o resfriamento concentrado no Pacífico central, causando o gradiente oposto de SST (Sea Surface Temperature) no IHTAG (Interhemispheric Tropical Atlantic Gradient). Diversos estudos como (Filho et al. 2020; Junqueira et al. 2020; Marengo et al. 2020) vem abordando características e impactos causados por esse evento climático extremo em toda região nordeste, desde a ampliação da nova delimitação semiárida brasileira em 2017, reservatórios colapsados e com baixos volumes (Rosenhaim et al. 2018; Lima et al., 2020), impactos na agricultura e degradação da vegetação.

A Figura 4 apresenta o resultado das variações temporais do SPI onde: (a) apresenta a escala de 12 meses, (b) 24 meses, (c) 36 meses, (d) 03 meses e (e) 06 meses.

Figura 4: Análise temporal multiescala SPI: (a) SPI-12, (b) SPI-24, (c) SPI-36, (d) SPI-03, (e) SPI-66.



Fonte: Autores (2021).

O SPI-12 (ver Fig. 2.4a), SPI-24 (ver Fig. 2.4b), SPI-36 (ver Fig. 2.4c), são escalas de longo prazo, a pesar do SPI ser um índice meteorológico maiores escalas de tempo podem ser aplicadas para caracterizar e ser um indicativo de secas hidrológicas, associadas a secas persistentes (Abatan et al. 2017) para melhor caracterização de secas hidrológicas outros fatores devem ser levados em conta. Escalas de SPI-12, SPI-24 and SPI-36 foram aplicados por Lima et al., (2020) na NEARH, apesar da aquisição dos dados de precipitação serem diferentes, os resultados aqui encontrados corroboram com as análises de Lima et al., (2020).

O SPI-03 (ver Fig. 2.4d), SPI-06 (ver Fig. 2.4e), são escalas temporais pequenas, onde são observados altas intensidades de seca num pequeno intervalo de tempo, ou seja, podem estar relacionados a secas meteorológicas e agrícolas (Awange et al. 2016), estudos como (Dabanli, et al., 2017) indicam uma similaridade nessas escalas devido a uma resposta rápida de uma determinada variabilidade climática como nos anos de 2005, 2016 e 2018. Essas escalas apresentam elevadas variabilidades por consequência da alta variabilidade da variável precipitação, onde de fato de existem meses essencialmente secos ou úmidos gerando respostas sem sentido físico (Mutti, P. R. 2020)

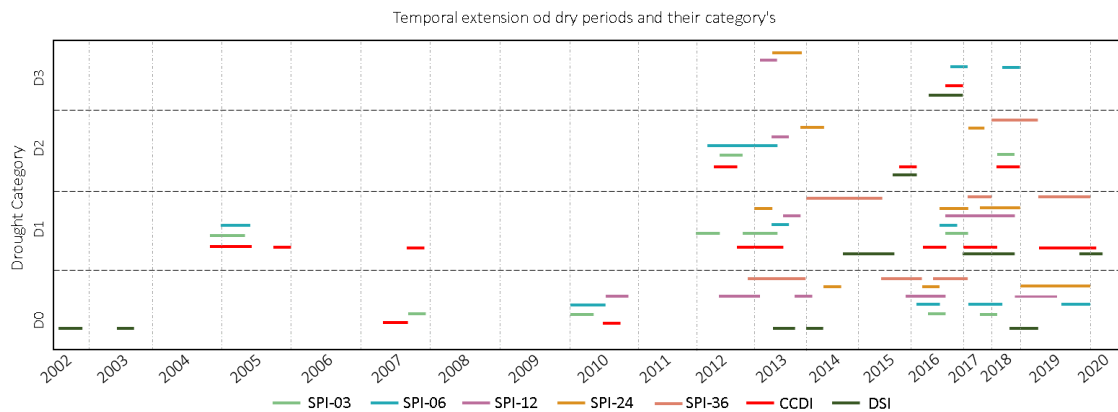
Os índices-GRACE tiveram boas e excelentes correlações com as escalas SPI, onde o CCDI obteve  $(\rho) = 0.73, 0.66, 0.55, 0.43$  e  $0.47$  com as escalas SPI-03/06/12/24/36 meses respectivamente, o DSI obteve  $(\rho) = 0.42, 0.52, 0.58, 0.69$  e  $0.76$  com as escalas SPI-03/06/12/24/36 meses respectivamente. Vale ressaltar que a experiência do usuário, as características da região de estudo e as aplicações envolvidas indicam qual melhor escala de tempo do SPI mais se adequam (Stagge et al. 2015; Wu et al. 2008).

Por ser um índice misto que leva em consideração a precipitação, o CCDI teve excelentes correlações em pequenas escalas do SPI, provavelmente o índice melhor se aplique na caracterização e identificação de secas meteorológicas agrícolas, por outro lado o DSI teve excelentes correlações em escalas maiores do SPI, possivelmente esses índices podem descrevem melhor eventos de secas hidrológicas.

A Figura 5 apresenta o resultado da caracterização da seca a partir de sua duração e intensidade para cada índice, foram considerados períodos secos aqueles com 3 meses consecutivos ou mais classificados como seco (Thomas et al., 2014), períodos intermitentes ao longo da série ou com menos de 3 meses sustentos foram considerados como anomalia temporária.

Na Figura 5 é possível identificar uma maior concentração e intensidade de períodos secos nos anos de 2012-2018. Os piores períodos de seca extrema (D3) foram caracterizados pelo SPI-12/24 em 2013 e o SPI-06, CCDI e DSI em 2016. O maior período de seca severa (D2) foi identificado pelo spi-06 no segundo semestre de 2012 e no primeiro semestre de 2013, grandes de períodos de seca moderada (D1) foram encontrados em 2014, 2016, 2017 e 2018 pelo SPI-12/36 e o CCDI. Pela classificação de classes aplicada nesse estudo, nenhum índice identificou períodos de seca excepcional. Cada índice apresentou diferentes intervalos e características de seca ao longo do período estudado. Sendo assim quando utilizados em conjunto, as características da região se tornam mais detalhadas onde ao fim os índices corroboram entre si.

Figura 5: Caracterização dos períodos secos por cada índice de seca.



Fonte: Autores (2021).

A Tabela 3 apresenta em resumo as frequências de cada categoria de seca referente a cada índice apresentado na Figura 5. Onde o SPI-12 apresentou maior frequência de secas anormais, o CCDI apresentou maior frequência de seca moderada, o SPI-06 obteve maior frequência de seca severa e seca extrema.

Tabela 3: Frequência de eventos de seca para cada índice.

| Drought\Index | CCDI   | DSI-GRACE | SPI-03 | SPI-06 | SPI-12 | SPI-24 | SPI-36 |
|---------------|--------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Abnormally    | 3.89%  | 10.22%    | 7.22%  | 11.67% | 15.56% | 10.00% | 12.78% |
| Moderate      | 22.78% | 11.83%    | 11.11% | 6.11%  | 8.33%  | 8.33%  | 14.44% |
| Severe        | 6.11%  | 2.15%     | 3.89%  | 6.67%  | 1.67%  | 3.89%  | 4.44%  |
| Extreme       | 1.67%  | 3.23%     | 0.00%  | 3.33%  | 1.67%  | 2.78%  | 0.00%  |

Source: Autores (2021).

### 3.2 DROUGHT INDEX BASED VARIATION OF CRUSTAL DEFORMATION – $DI_{VCD}$

As estações estão localizadas em duas províncias hidrogeológicas (PH), 5 delas estão na PH Costeira e 3 no Escudo Nordeste Oriental, ambas com baixo volume de águas subterrâneas devido à baixa recarga dos aquíferos e precipitação (Hu et al. 2017), alto teor de sal devido a consistência de 90% de rochas cristalinas (Cirilo 2008).

Os resultados do  $DI_{VCD}$  são apresentados na Figura 6, foram processadas 8 estações dentro da NEARH, são elas (PBPI, PBCG, LNTA, RNPF, RNMO, CEUU, CEFT e CESB) a partir das análises preliminares 2 estações foram descartadas (LNTA e RNPF). A estação LNTA possui uma série histórica com bastantes falhas, assim influenciando nas análises, a estação RNPF possui uma série histórica curta com relação as demais estações, assim sendo uma estação inadequada para observações de eventos de seca. Ao fim 6 estações foram aplicadas na pesquisa onde 2 estão no estado da Paraíba, 1 no Rio Grande do Norte e 3 no Ceará. Os SPI calculados

nesta correlação foram processados de forma pontual da quadrícula de precipitação do CRU referente a estação GPS em análise.

As estações PBJP e PBCG são localizadas na Paraíba, ambas estações apresentaram boas correlações estatísticas com os SPI-12, 24 e 36 (ver Tabela 4), em especial com o SPI-24 obtendo um  $(\rho) = 0.56$  e  $0.36$  respectivamente. As estações LNTA, RNPF e RNMO são localizadas no Rio Grande do Norte, entre as três estações apenas a estação RNMO apresentou boa correlação com o SPI-12, 24 e 36 (ver Tabela 4) em especial com o SPI-24 e 36 proporcionou um  $(\rho) = 0.43$  em ambas escalas SPI. As demais estações não apresentaram correlações significativas em nenhuma escala SPI. As estações CEUU, CEFT e CESB são localizadas no Ceara, as estações CEUU e CESB apresentaram boas correlações com o SPI-12, 24 e 36 (ver Tabela 4) em especial com o SPI-24 proporcionando um  $(\rho) = 0.37$  e  $0.62$  respectivamente. A estação CEFT apresentou fracas correlações com o SPI-24 e 36 obtendo um  $(\rho) = 0.16$  e  $0.20$  respectivamente.

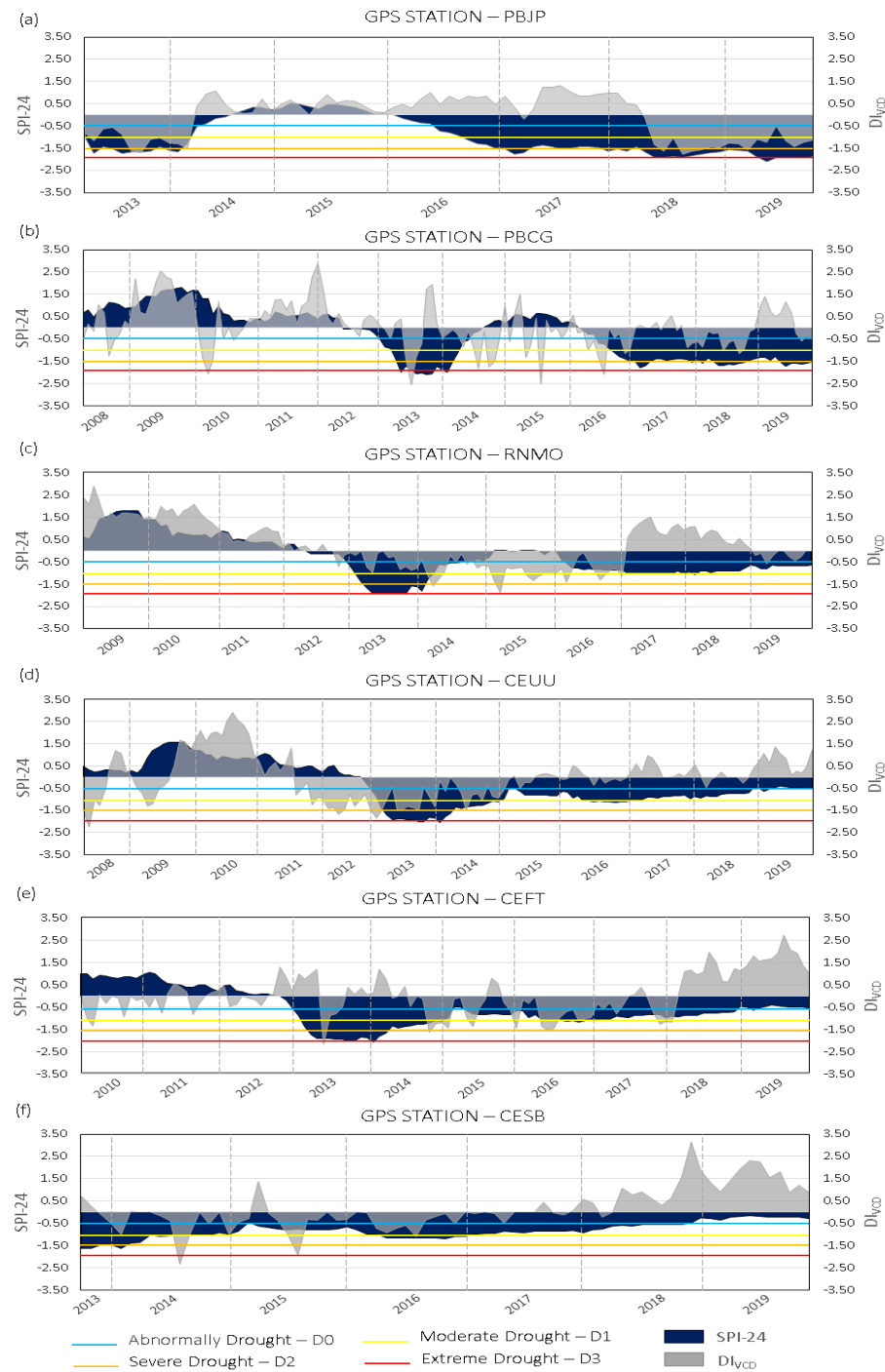
Tabela 4: Correlação estatística entre as multiescala SPI e DIVCD.

| Estação\SPI | PBJP  | PBCG | RNMO | CEUU | CEFT | CESB |
|-------------|-------|------|------|------|------|------|
| SPI-03      | -0.05 | 0.31 | 0.20 | 0.08 | 0.04 | 0.35 |
| SPI-06      | 0.11  | 0.35 | 0.23 | 0.19 | 0.06 | 0.46 |
| SPI-12      | 0.32  | 0.27 | 0.33 | 0.30 | 0.13 | 0.57 |
| SPI-24      | 0.56  | 0.36 | 0.43 | 0.37 | 0.16 | 0.62 |
| SPI-36      | 0.31  | 0.35 | 0.43 | 0.17 | 0.20 | 0.67 |

Fonte: Autores (2021).

O SPI-24 melhor se destacou entre as demais escalas, sendo assim a escala selecionada para analisar a distribuição temporal das estações DIVCD (ver Figura 6).

Figure 2.6: Distribuição temporal das estações DIVCD e spi-24: (a) estação PBJP, (b) estação PBCG, (c) estação CESB, (d) estação RNMO, (e) estação CEUU e (f) estação CEFT.



Fonte: Autores (2021).

A Figura 6(a) representa a distribuição temporal da estação PBJP e o SPI-24. Para o ano de 2013 as variáveis apresentaram a mesma tendência de comportamento com resultados negativos, onde a resposta se refere ao início da seca em 2012. Para 2014-2015 altas precipitações influenciaram o comportamento de resultados positivos em ambas as observações porém, em 2016-2017 o SPI-24 retorna valores negativos dando continuidade a seca 2012-2018

e o  $DI_{VCD}$  - PBJP diverge apresentando um atraso na resposta de declineo, valores negativos aparecendo a partir de 2018 até 2020.

A Figura 6(b) representa a distribuição temporal da estação PBCG e o SPI-24, ambas variáveis apresentam comportamentos parecidos ao longo da série. Divergências de forma abrupta como em abril de 2010, maio e outubro de 2013 foram influenciadas pela variação da precipitação nesse pequeno espaço de tempo, em 2015 o fenômeno de El Niño interferiu na precipitação e diretamente interferido no comportamento da crosta nessa estação.

A Figura 6(c) representa a distribuição temporal da estação RNMO e o SPI-24, apresentam uma convergência ao longo da série, obtendo uma boa correlação porém, divergindo em 2017-2018 possivelmente referente a recargas e descargas de volume de chuva sobre a crosta

A Figura 6(d) representa a distribuição temporal da estação CEUU e o SPI-24, apresentou uma boa correlação ( $\rho$ ) ao longo da série temporal, divergindo apenas em alguns meses de 2008 e 2009.

A Figura 6(e) representa a distribuição temporal da estação CEFT e o SPI-24 com uma baixa correlação ( $\rho$ ) nenhum valor significativo foi encontrado na correlação destas variáveis, alguns fatores externos podem ter interferido nas observações altimétricas da estação GPS, mesmo com baixa correlação foram encontrados valores negativos ao longo de 2014-2018 referente a última seca de 2012-2018 na região.

A Figura 6(f) representa a distribuição temporal da estação CESB e o SPI-24, as variáveis apresentam uma convergência ao longo da série, obtendo a melhor correlação ( $\rho$ ) entre as demais estações, é possível observar que o  $VCD_{DI}$  apresentou uma resposta mais rápida as chuvas de 2018 e 2019 do que o SPI-24, possivelmente pela mesma análise a figura 6(c).

O uso da variação da crosta a partir de estações GPS para caracterização e indicação de secas ainda é pouco estudado, por esse motivo não existe ainda um limiar de valores para a caracterização das secas. Os resultados apresentados nesse estudo indicam ser promissor o uso do  $DI_{VCD}$  para estudos de secas hidrológicas, onde existe a perda do volume hídrico dos reservatórios, redução de terras alagadas entre outras fontes de massa hídrica que diminuem a carga sobre a crosta terrestre. A seca hidrológica se apresenta após uma grande variabilidade climática durante um determinado tempo assim causando uma deficiência de água no solo que

está diretamente relacionado a variação da crosta terrestre, a Figura 6 nos trás a percepção que o  $VCD_{DI}$  tem uma resposta tardia na detecção de início de eventos de seca, mas tem uma resposta mais hábil na recuperação desses eventos de seca. Uma dificuldade adicional é a baixa quantidade de estações de monitoramento GNSS na área de estudo aliado a baixa resolução temporal de dados.

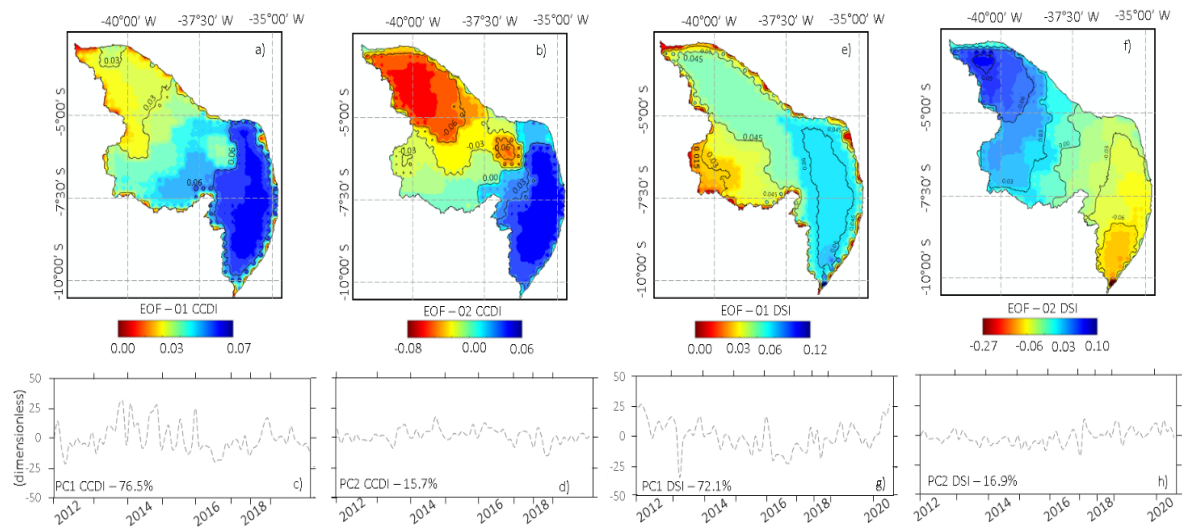
Vale resaltar que a variação da crosta vai além do carregamento da massa hídrica superficial, volumes de aquíferos (Sarkar et al. 2020) e eventos sísmicos (Castellanos et al. 2020) vão interferir nas observações altimétricas da crosta, exigindo assim um refinamento nas observações, no caso do nordeste Brasileiro não se tem muitos casos de movimentos tectônicos além de ter baixa capacidade em águas subterrâneas devido a formação geológica ser baseada praticamente de rochas cristalinas (Awange et al., 2016).

### 3.3 ANALISE ESPAÇO TEMPORAL

O padrão espacial dos índices de seca como CCDI e DSI-GRACE na NEARH no período de janeiro de 2012 a junho de 2020 foram analisados a partir dos EOF's, a Figura 7 mostra os padrões espaciais associados aos dois modos predominantes de cada índice.

A análise EOF – CCDI (see Figure 2.7a and 2.7b) identificou que os dois primeiros modos explicam o 92.2% da variância do índice na região de estudo, mais especificadamente o PC1 e PC2 (see Figure 2.7c and 2.7d) representam o 76.5% e 15.7% respectivamente. Os restantes (7.8%) foram desconsiderados desta análise. Foram obtidas correlações moderadas entre o PC1-CCD e os SPI-03/06 com  $(\rho) = 0.62$  e  $0.49$  respectivamente. Também foi possível identificar o início da seca em 2012, uma elevada precipitação nos anos de 2014-2015 e uma retomada da seca em 2016, o EOF1 – CCDI associado ao PC1 ilustra a progressão dos padrões espaciais da variância do CCDI com o tempo entre 2012-2019. De acordo com Sinha et al., (2019) as áreas em azul indicam alta influência da seca e as áreas em amarelo indicam baixa influência da seca, podendo observar que as áreas de Alagoas, Pernambuco, leste da Paraíba e o norte do Rio Grande do Norte possuem alta propensão a seca. Em contraste o estado do Ceará apresenta tendências para condições úmidas. Em relação ao EOF2 – CCDI associado ao PC2, a distribuição desta variabilidade indicou um ganho na região sudeste e uma diminuição na região noroeste da região em estudo.

Figura 7: As figuras (a) e (b) são EOFs de CCDI, (c) e (d) são os principais componentes PCs de CCDI, (e) e (f) são EOFs de DSI, (g) e (h) são os principais componentes PC's da DSI.



Fonte; Autores (2021).

A análise EOF – DSI (ver Fig. 2.7e e 2.7f) identificou que os dois primeiros modos explicaram 89.0% da variância do índice na região de estudo, e o PC1 e PC2 (ver Fig. 2.7g e 2.7h) representam 72.1% e 16.9% respectivamente. Os restantes (11.0%) foram desconsiderados desta análise. O PC1-DSI obteve correlações fracas entre o PC1-DSI e os SPI-24/36 com ( $\rho$ ) = 0.20 e 0.22 respectivamente. As variações TWS-GRACE estão diretamente relacionadas as anomalias encontradas em 2013 devido a queda de precipitação encontrada ao fim de 2012, início da seca, acarretando uma anomalia negativa do TWS para o primeiro semestre de 2013 e a precipitação de 2014 provocaram uma anomalia positiva no segundo semestre de 2015. O EOF1-DSI associado ao PC1 apresentou a distribuição temporal do DSI-GRACE ao longo de 2012-2020 onde as regiões que com maiores variações são as mesmas encontradas pelo EOF1-CCDI, ou seja, ao longo de Alagoas, Pernambuco, leste da Paraíba e o norte do Rio Grande do Norte, sendo assim suscetíveis a seca. O PC2-DSI apresentou uma anomalia em 2017 devido a quebra da serie temporal devido a ausencia de observações TWS-GRACE. O EOF2-DSI associado ao PC2 apresentou as maiores variações encontradas na região noroeste da área de estudo, e menores variações em Pernambuco e Alagoas.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste estudo foram aplicados diversos índices de seca com finalidade de caracterizar a variação climática extrema referente a seca durante os anos de 2002 a2020, e assim analisar a

sensibilidade dos índices baseados no TWS-GRACE aplicados pela primeira vez na NEARH. A pesquisa ao todo utilizou 4 índices, as principais conclusões são:

I. Os índices abordados conseguiram caracterizar a grande seca de 2012-2018 na região principalmente pela perspectiva hidrológica, além de reforçar a ideia que esse período de seca ainda não está totalmente finalizado, foram encontrados eventos de seca nos anos de 2019 e 2020 pelos índices aqui aplicados. O CCDI apresentou maior frequência de seca moderada ao longo da série, o SPI-36 identificou 26 meses de período de seca severa obtendo 14.44% de frequência com maior duração entre janeiro de 2014 até maio de 2015, e mais 8 meses classificados como período de seca extrema obtendo 4.44% de frequência com maior duração entre julho de 2018 a março de 2019, o SPI-06 identificou 6 meses classificados como período de seca excepcional obtendo 3.33% de frequência com maior duração de 3 meses sendo os meses de outubro, novembro e dezembro de 2018.

II. Aplicados pela primeira vez na NEARH, os índices CCDI e DSI se apresentam índices com alta viabilidade de aplicação e caracterização da seca na região. Todos índices obtiveram ótimas correlações nas diversas escalas temporais do SPI, porém o CCDI apresentou excelentes correlações com pequenas escalas a destacar com o SPI-03 e 06 com  $(\rho) = 0.76$  e  $0.66$  respectivamente. Por outro lado, o DSI obteve excelentes correlações nas grandes escalas como o SPI-24 e 36 com  $(\rho) = 0.69$  e  $0.76$  respectivamente, demonstrando assim a importância de avaliar a sensibilidade de cada índice.

III. Apesar da baixa quantidade de estações GPS existente na NEARH, os resultados encontrados indicam que o  $DI_{VCD}$  tem potencial para o monitoramento de secas hidrológicas, entre as oito estações utilizadas, seis delas apresentaram correlações desde fraca a forte com spi-24 obtendo um  $(\rho) = 0.56, 0.36, 0.43, 0.37, 0.16$  e  $0.62$  com as estações PBJP, PBCG, RNMO, CEUU, CEFT e CESB respectivamente. Foi possível perceber a necessidade de uma série temporal completa e extensa para se obter melhores resultados do índice, além da necessidade de identificação de influências externas como, atividades tectônicas, identificação de aquíferos, entre outros que venham a interferir na análise desse índice.

IV. Foi observado que cada índice analisado isoladamente tem a capacidade de detalhar períodos secos ao longo da série histórica, porém a união das análises dos índices melhora na compreensão de como a seca se comporta e como pode ser caracterizada em diferentes

classificações, ou seja, a seca pode e será mais detalhada com aplicação de mais de um índice de seca.

V. Os padrões representados pelo EOFs explicam sucessivamente a maior parte da variabilidade observada dos índices CCDI e DSI. O primeiro modo de liderança de cada índice retrata a variabilidade espacial dos eventos de seca a partir do EOF1-CCDI na região sudeste (Alagoas, Pernambuco) com variações de 0.05 a 0.07 ligados a eventos de secas meteorológicas. O EOF1-DSI apresentam maior variabilidade na região noroeste no estado do Ceará com variações de 0.05 a 0.06, ligados a eventos de secas mais duradouras, ou seja, secas hidrológicas.

## REFERÊNCIAS

- Abatan, Abayomi A. et al. 2017. "Multiyear Droughts and Pluvials over the Upper Colorado River Basin and Associated Circulations." *Journal of Hydrometeorology* 18(3): 799–818.
- Achour, Kenza et al. 2020. "Spatio-Temporal Analysis and Forecasting of Drought in the Plains of Northwestern Algeria Using the Standardized Precipitation Index." *Journal of Earth System Science* 129(42): 1–22. <https://doi.org/10.1007/s12040-019-1306-3>.
- Albuquerque, U P, L H C Andrade, and J Caballero. 2005. "Structure and Floristics of Homegardens in Northeastern Brazil." 62: 491–506.
- Awange, J. L. et al. 2014. "Characterization of Ethiopian Mega Hydrogeological Regimes Using GRACE, TRMM and GLDAS Datasets." *Advances in Water Resources* 74: 64–78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.07.012>.
- . 2016. "Exploring Hydro-Meteorological Drought Patterns over the Greater Horn of Africa (1979-2014) Using Remote Sensing and Reanalysis Products." *Advances in Water Resources* 94: 45–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.04.005>.
- Awange, Joseph L, Freddie Mpelasoka, and Rodrigo M Goncalves. 2016. "Science of the Total Environment When Every Drop Counts: Analysis of Droughts in Brazil for the 1901-2013 Period." *Science of the Total Environment*, The 566–567: 1472–88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.031>.
- Bisht, Deepak Singh. 2019. "Drought Characterization over India under Projected Climate Scenario." (October 2018): 1889–1911.
- Blewitt, G. "GPS and space-based geodetic methods." (2015): 307-338.
- Boergens, Eva, G Andreas, Henryk Dobslaw, and Christoph Dahle. 2020. "Quantifying the Central European Droughts in 2018 and 2019 with GRACE-Follow-On." : 1–20.
- Calçado De Azevedo, Samara et al. 2018. "Remote Sensing Letters Analysis of the 2012-2016 Drought in the Northeast Brazil and Its Impacts on the Sobradinho Water Reservoir Drought in the Northeast Brazil and Its Impacts on the Sobradinho Water Reservoir." : 2012–16. <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=trsl20>.
- Cammalleri, Carmelo et al. 2020. "Diverging Hydrological Drought Traits over Europe with

Global Warming.” (March).

Castellanos, Jorge C et al. 2020. “Seismic Anisotropy Reveals Crustal Flow Driven by Mantle Vertical Loading in the Pacific NW.” (July): 1–10.

Chen, J L et al. 2009. “2005 Drought Event in the Amazon River Basin as Measured by GRACE and Estimated by Climate Models.” 114(March): 1–9.

Chew, Clara C, and Eric E Small. 2014. “Terrestrial Water Storage Response to the 2012 Drought Estimated from GPS Vertical Position Anomalies.” (2): 6145–51.

Cirilo, José Almir. 2008. “For the Semi-Arid Region.” *Estudos Avançados* 22(63): 61–82.

Cunha, A. P., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., ... & Ribeiro-Neto, G. (2019). Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642.

Dabanlı, Ismail, Ashok K. Mishra, and Zekai Sen. 2017. “Long-Term Spatio-Temporal Drought Variability in Turkey.” *Journal of Hydrology* 552: 779–92.

Dill, R, and H Dobslaw. 2013. “Numerical Simulations of Global-Scale High-Resolution Hydrological Crustal Deformations.” *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH* 118: 5008–17.

ESTEBAN-PARRA, M. J., F. S. Rodrigo, and Y. CASTRO-DIEZ. 1998. “SPATIAL AND TEMPORAL PATTERNS OF PRECIPITATION IN SPAIN FOR THE PERIOD 1880 – 1992.” *International Journal of Climatology* 18: 1557–74.

Felix, Landerer et al. 2020. “Extending the Global Mass Change Data Record : GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance.” : 0–3.

Feng, Puyu et al. 2019. “Projected Changes in Drought across the Wheat Belt of Southeastern Australia Using a Downscaled Climate Ensemble.” *International Journal of Climatology* 39(2): 1041–53.

Ferreira, V G et al. 2018. “Science of the Total Environment Space-Based Observations of Crustal Deflections for Drought Characterization in Brazil.” *Science of the Total Environment* 644: 256–73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>.

Filho, J. D. P., F. A Souza Filho, E. S. P. R. Martins, and Ticiana Studart. 2020. “Copula-Based Multivariate Frequency Analysis of The.” *water Article* 12: 1–22.

Getirana, Augusto. 2016. “Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space.” *Journal of Hydrometeorology* 17(2): 591–99.

Gu, Guojun, and Robert F Adler. 2013. “Interdecadal Variability / Long-Term Changes in Global Precipitation Patterns during the Past Three Decades : Global Warming and / or Pacific Decadal Variability ?” : 3009–22.

Harris, I, Timothy J Osborn, P Jones, and D Lister. 2020. “Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset.” *Scientific Data* 7(109): 1–18.

Houborg, Rasmus et al. 2012. “Drought Indicators Based on Model-Assimilated Gravity Recovery and Climate Experiment ( GRACE ) Terrestrial Water Storage Observations.” 48(August 2011).

- Hu, Kexiang et al. 2017. "Science of the Total Environment Hydrogeological Characterisation of Groundwater over Brazil Using Remotely Sensed and Model Products." *Science of the Total Environment* 599–600: 372–86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.188>.
- Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., & Ma, L. (2017). The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors. *Journal of Hydrology*, 547, 184-195.
- Junqueira, Rubens, Marcelo R Viola, Jhones S Amorim, and Carlos R De Mello. 2020. "Hydrological Response to Drought Occurrences in a Brazilian Savanna Basin."
- Justino, Glauciene, Ferreira Nádja, and Melo De Oliveira. 2020. "Spatiotemporal Variability of Vegetation Due to Drought Dynamics ( 2012 – 2017 ): A Case Study of the Upper Paraíba." *Natural Hazards* (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03940-x>.
- King, Andrew D et al. 2020. "The Role of Climate Variability in Australian Drought." 10(March): 2018–20.
- Kumar, K Satish, E Venkata Rathnam, and Venkataramana Sridhar. 2021. "Science of the Total Environment Tracking Seasonal and Monthly Drought with GRACE-Based Terrestrial Water Storage Assessments over Major River Basins in South India." *Science of the Total Environment* 763: 142994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142994>.
- Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., ... & Yuan, D. N. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL088306.
- Li, Junhua, Shusen Wang, and Fuqun Zhou. 2016. "Time Series Analysis of Long-Term Terrestrial Water Storage over Canada from GRACE Satellites Using Principal Component Analysis." *Canadian Journal of Remote Sensing* 42(3): 161–70.
- Li, U S Bailing, and Matthew Rodell. 2014. "Evaluation of a Model-Based Groundwater Drought Indicator in the Conterminous." <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.027>.
- Lima, F. V. M. S., R. M. Gonçalves, Henry C. Montecino, and R. A. Vila Nova. 2020. "ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL MASS LOSSES IN THE NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC REGION , BRAZIL." *Bulletin of Geodetic Sciences* 26(3): 1–20.
- Linke, Andrew M et al. 2018. "Drought , Local Institutional Contexts, and Support for Violence in Kenya." 62(7): 1544–78.
- Loon, Anne F Van et al. 2016. "UVicSPACE : Research & Learning Repository and Analysis Approaches Drought in a Human-Modified World : Reframing Drought Definitions , Understanding , and Analysis Approaches." : 3631–50.
- Marengo, Jose A et al. 2020. "Assessing Drought in the Drylands of Northeast Brazil under Regional Warming Exceeding 4 ° C." *Natural Hazards* (0123456789). <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>.
- MEDEIROS, FELIPE J. DE et al. 2021. "Hydrometeorological Conditions in the Semiarid and East Coast Regions of Northeast Brazil in the 2012-2017 Period." *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 93(1). [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0001-37652021000101213&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652021000101213&tlng=en) (August 3, 2021).

- Morales, Norberto, and Mario Luis Assine. 2015. "Piedmont Deposit." : 231–42.
- Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., et al. (2018). 2018. "Global Changes in Drought Conditions Under Different Levels of Warming." *Geophysical Research Letters* 45: 3285–96.
- Ndehedehe, Christopher et al. 2016. "Understanding Changes in Terrestrial Water Storage over West Africa between 2002 and 2014." *Advances in Water Resources* 88: 211–30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.12.009>.
- Ndehedehe, Christopher E., and Vagner G. Ferreira. 2020. "Assessing Land Water Storage Dynamics over South America." *Journal of Hydrology* 580(September 2019): 124339. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124339>.
- Nobre, Carlos A et al. 2016. "Some Characteristics and Impacts of the Drought and Water Crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015." (February): 252–62.
- Rebischung, P., B. Garayt, and Z. Altamimi. "IGS reference frame working group technical report 2016." *International GNSS service technical report* 2016 (2016): 171-178.
- Reis, Gabriela De Azevedo et al. 2020. "Development of a Drought Vulnerability Index Using MCDM and GIS : Study Case in São Paulo and Ceará , Brazil." *Natural Hazards* 104(2): 1781–99. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04247-7>.
- Rodrigues, R. R., and M. J. McPhaden. 2014. "Why Did the 2011–2012 La Niña Cause a Severe Drought in the Brazilian Northeast?" *Geophysical Prospecting* (April): 6413–19.
- Rosenhaim, Tarso Luconi, Rodrigo Mikosz Gonçalves, Josilene Pereira Lima, and Nicolas Alexandre Gama. 2018. "Comportamento Do Armazenamento de Água Entre Os Anos de 2002 a 2015 Para a Região Hidrográfica Brasileira Do Atlântico Nordeste Oriental Considerando Observações Grace, Trmm e in Situ." *Geociencias* 37(4): 823–34.
- Sarkar, Tandrita et al. 2020. "Groundwater for Sustainable Development Integrated Study of GRACE Data Derived Interannual Groundwater Storage Variability over Water Stressed Indian Regions." *Groundwater for Sustainable Development* 10(September 2019): 100376. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100376>.
- Save, H. (2020). CSR GRACE and GRACE-FO RL06 Mascon Solutions v02. 2020.
- Schwalm, Christopher R et al. 2017. "Letter." *Nature Publishing Group* 548(7666): 202–5. <http://dx.doi.org/10.1038/nature23021>.
- Sharma, Shankar, and Kalpana Hamal. 2020. "Dominant Pattern of Year-to-Year Variability of Summer Precipitation in Nepal during 1987 – 2015." *Theoretical and Applied Climatology* 142: 1071–84.
- Sinha, Debanjan, Tajdarul H. Syed, and John T. Reager. 2019. "Utilizing Combined Deviations of Precipitation and GRACE-Based Terrestrial Water Storage as a Metric for Drought Characterization: A Case Study over Major Indian River Basins." *Journal of Hydrology* 572(February): 294–307. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.053>.
- Stagge, James H et al. 2015. "Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)." *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol* 35: 4027–40.
- Stape, Luiz, Paulo Cesar Sentelhas, Clayton Alcarde Alvares, and Leonardo De Moraes Gonc. 2014. "Köppen's Climate Classification Map for Brazil." 22(6): 711–28.

- Sun, Tengke, Vagner G. Ferreira, Xiufeng He, and Samuel A. Andam-Akorful. 2016. "Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor." *Water (Switzerland)* 8(5).
- Thomas, Brian F et al. 2017. "GRACE Groundwater Drought Index: Evaluation of California Central Valley Groundwater Drought." <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.026>.
- Thomas, A. C., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2014). A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization. *Geophysical Research Letters*, 41(5), 1537-1545.
- Wilhite, Donald A, and Michael H Glantz. 1985. "Water International Understanding: The Drought Phenomenon: The Role of Definitions Understanding: The Drought Phenomenon : The Role of Definitions\*." *Water International* 10(3): 111–20. <http://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=rwin20>.
- Wilhite, Donald A, Mark D Svoboda, and Michael J Hayes. 2007. "Understanding the Complex Impacts of Drought : A Key to Enhancing Drought Mitigation and Preparedness \*." (15122): 763–74.
- Wu, H. et al. 2008. "The Impact of the Positive Indian Ocean Dipole on Zimbabwe Droughts Tropical Climate Is Understood to Be Dominated By." *International Journal of Climatology* 2029(March 2008): 2011–29.
- Yang, Peng et al. 2017. "Monitoring the Spatio-Temporal Changes of Terrestrial Water Storage Using GRACE Data in the Tarim River Basin between 2002 and 2015." *Science of the Total Environment* 595: 218–28.
- Yang, Peng, Yongyong Zhang, Jun Xia, and Shangxin Sun. 2020. "Identification of Drought Events in the Major Basins of Central Asia Based on a Combined Climatological Deviation Index from GRACE Measurements." *Atmospheric Research* 244(June): 105105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105105>.
- Yao, Ning et al. 2020. "Projections of Drought Characteristics in China Based on a Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index and Multiple GCMs." *Science of the Total Environment* 704: 1–18.
- Yirdaw, S. Z., K. R. Snelgrove, and C. O. Agboma. 2008. "GRACE Satellite Observations of Terrestrial Moisture Changes for Drought Characterization in the Canadian Prairie." *Journal of Hydrology* 356(1–2): 84–92.
- Yu, Wenjun, Yanzhong Li, Yanping Cao, and Tayler Schillerberg. 2019. "Drought Assessment Using GRACE Terrestrial Water Storage Deficit in Mongolia from 2002 to 2017." : 1–14.
- Zhao, Cha, François Brissette, Jie Chen, and Jean-luc Martel. 2020. "Frequency Change of Future Extreme Summer Meteorological and Hydrological Droughts over North America." *Journal of Hydrology* 584(June 2019): 124316. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124316>.
- Zhao, Meng, A. Geruo, Isabella Velicogna, and John S. Kimball. 2017. "A Global Gridded Dataset of GRACE Drought Severity Index for 2002-14: Comparison with PDSI and SPEI and a Case Study of the Australia Millennium Drought." *Journal of Hydrometeorology* 18(8): 2117–29.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação foi composta por dois artigos. A temática central dos dois artigos se complementam e corroboram entre si, pois abordam impactos causados por fatores climáticos e o desenvolvimento destes ao longo dos anos através de análises temporais e espaciais. Considerada a região hidrográfica com menor disponibilidade brasileira, o Atlântico Nordeste Oriental (NEARH) desempenha um papel fundamental na vida de 24.1 milhões de habitantes em 874 municípios, onde a maioria desses municípios decretaram estado de emergência por motivos de seca devidos a fatores climáticos e antrópicos.

O capítulo 1 identificou (i) que o ano de 2009 obteve o maior volume de reservatórios de água, com  $16816,28\text{hm}^3$  e  $\text{TWS} = 10,24\text{cm}$ . O mês de maio apresentou a maior contribuição para esta variabilidade, apresentando um volume de  $18.331,59\text{hm}^3$  e  $\text{TWS} = 23,01\text{ cm}$ , (ii) o NDVI também responde ao período de seca identificado no estudo, ou seja, os resultados entre 2012-2017 caíram em valores máximos variando entre 0,4 e 0,6. (iii) Os valores obtidos para cada escala de tempo do SPI permitiram identificar o último período de seca entre os anos de 2012 e 2017, índice esse que respondeu de forma coesa à regressão linear de Mascons, que indicou tendência de queda considerando os anos seguintes.

O capítulo 2 identificou (i) que os índices de seca abordados conseguiram caracterizar a grande seca de 2012-2018 na região principalmente pela perspectiva hidrológica, além de reforçar a ideia que esse período de seca ainda não está totalmente finalizado, foram encontrados eventos de seca nos anos de 2019 e 2020 pelos índices aqui aplicados. (ii) Apesar da baixa quantidade de estações GPS existente na NEARH, os resultados encontrados indicam que o  $\text{DI}_{\text{VCD}}$  tem potencial para o monitoramento de secas hidrológicas, entre as oito estações utilizadas, seis delas apresentaram correlações desde fraca a forte com  $\text{spi-24}$ . (iii) os índices CCDI e DSI se apresentam índices com alta viabilidade de aplicação e caracterização da seca na região. Todos índices obtiveram ótimas correlações nas diversas escalas temporais do SPI, porém o CCDI apresentou excelentes correlações com pequenas escalas a destacar com o SPI-03 e 06, por outro lado, o DSI obteve excelentes correlações nas grandes escalas como o SPI-24 e 36, demonstrando assim a importância de avaliar a sensibilidade de cada índice.

## REFERÊNCIAS

- Abatan, A. A., Gutowski, W. J., Ammann, C. M., Kaatz, L., Brown, B. G., Buja, L., Bullock, R., Fowler, T., Gilleland, E., Gotway, J. H. 2017. **Multiyear Droughts And Pluvials Over The Upper Colorado River Basin And Associated Circulations**. Journal Hydrometeorology, V. 18, P. 799–818.
- Achour, Kenza Et Al. 2020. **Spatio-Temporal Analysis And Forecasting Of Drought In The Plains Of Northwestern Algeria Using The Standardized Precipitation Index**. Journal Of Earth System Science 129(42): 1–22. <https://doi.org/10.1007/S12040-019-1306-3>.
- Agência Nacional De Águas (Brasil). 2013. Report: **Disponibilidade E Demandas De Recursos Hídricos No Brasil**. Brasília: ANA.
- Agência Nacional De Águas (Brasil). 2015. **Report: Conjuntura Dos Recursos Hídricos No Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras – Edição Especial**. Brasília: ANA.
- Agência Nacional De Águas (Brasil). 2018. Report: **Conjuntura Dos Recursos Hídricos No Brasil: Informe Anual**. Brasília: ANA.
- Ahmed, M., Sultan, M., Wahr, J., Yan, E. 2014. **The Use Of GRACE Data To Monitor Natural And Anthropogenic Induced Variations In Water Availability Across Africa**. Earth-Science Reviews, V. 136, P. 289–300.
- Albuquerque, U P, L H C Andrade, And J Caballero. 2005. **Structure And Floristics Of Homegardens In Northeastern Brazil**. 62: 491–506.
- Alves, J. M. B., Ferreira, F. F., Campos, J. N. B., Filho, F. De A. De S., Souza, E. B. De, Duran, B. J., Servain, J., Studart, T. M. C. 2006. **Mecanismos Atmosfericos Associados A Ocorrencia De Precipitacao Intensa Sobre O Nordeste Do Brasil Durante Janeiro 2004**. Revista Brasileira De Meteorologia, V. 21, P. 56–76.
- Alves, L. M., Coelho, C. A. S., Melo, A. B. C., Pesqueiro, J. F. 2009. Report: Condições Climáticas Observadas No Brasil Em 2009. Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais - INPE Centro De Previsão De Tempo E Estudos Climáticos - CPTEC.
- Andam-Akorful, S. A., Ferreira, V. G., Ndehedehe, C. E., Quaye-Ballard, J. A. 2017. **An Investigation Into The Freshwater Variability In West Africa During 1979-2010**. International Journal Climatology, V. 37, P. 333–349.
- Anderson, L. O., Malhi, Y., Aragão, L. E. O. C., Ladle, R., Arai, E., Barbier, N., Phillips, O. 2010. **Remote Sensing Detection Of Droughts In Amazonian Forest Canopies**. New Phytologist, V. 187, P. 733–750.
- Asis, A. M. De, Omasa, K. 2007. **Estimation Of Vegetation Parameter For Modeling Soil Erosion Using Linear Spectral Mixture Analysis Of Landsat ETM Data**. ISPRS Journal Of Photogrammetry And Remote Sensing, V. 62, P. 309–324.
- Awange, J. L., Gebremichael, M., Forootan, E., Wakabulcho, G., Anyah, R., Ferreira, V. G., Alemayehu, T. 2014. **Characterization Of Ethiopian Mega Hydrogeological Regimes**

**Using GRACE, TRMM And GLDAS Datasets.** *Advances In Water Resources*, V. 74, P. 64–78.

Awange, J. L., Mpelasoka, F., Goncalves, R. M. 2016. **When Every Drop Counts: Analysis Of Droughts In Brazil For The 1901-2013 Period.** *Science Of The Total Environment*, V. 566, P. 1472-1488.

———. 2016. **Exploring Hydro-Meteorological Drought Patterns Over The Greater Horn Of Africa (1979-2014) Using Remote Sensing And Reanalysis Products.** *Advances In Water Resources* 94: 45–59. [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Advwatres.2016.04.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.04.005).

Bai, P., Liu, X. 2018. **Intercomparison And Evaluation Of Three Global High-Resolution Evapotranspiration Products Across China.** *Journal Of Hydrology*, V. 566, P. 743–755.

Bisht, Deepak Singh. 2019. **Drought Characterization Over India Under Projected Climate Scenario.** (October 2018): 1889–1911.

Blewitt, G. **GPS and space-based geodetic methods.** (2015): 307-338.

Boergens, Eva, G Andreas, Henryk Dobslaw, And Christoph Dahle. 2020. **Quantifying The Central European Droughts In 2018 And 2019 With GRACE-Follow-On.** : 1–20.

Bonaccorso, B. Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., Sutera, A. 2003. **Spatial Variability Of Drought: An Analysis Of The SPI In Sicily.** *Water Resources Management*, V. 17, P. 273-296.

Bordi, I., Fraedrich, K., Sutera, A. 2009. **Observed Drought And TWS Ness Trends In Europe: An Update.** *Hydrology And Earth System Sciences Discussions*, V. 6, P. 3891–3915.

Brito, S. S. B., Cunha, A. P. M. A., Cunningham, C. C., Alvalá, R. C., Marengo, J. A., Carvalho, M. A. 2017. **Frequency, Duration And Severity Of Drought In The Semiarid Northeast Brazil Region.** *International Journal Of Climatology*, V. 38, P. 517-529.

Carlson, T. N., Ripley, D. A. 1997. **On The Relation Between NDVI, Fractional Vegetation Cover, And Leaf Area Index.** *Remote Sensing Of Environment*, V. 62(3), P. 241–252.

Calçado De Azevedo, Samara Et Al. 2018. **Remote Sensing Letters Analysis Of The 2012-2016 Drought In The Northeast Brazil And Its Impacts On The Sobradinho Water Reservoir Drought In The Northeast Brazil And Its Impacts On The Sobradinho.** *Water Reservoir.* : 2012–16.  
[https://Www.Tandfonline.Com/Action/Journalinformation?Journalcode=Trsl20](https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalcode=Trsl20).

Cammalleri, Carmelo Et Al. 2020. **Diverging Hydrological Drought Traits Over Europe With Global Warming.** (March).

Cazenave, A., Chen, J., 2010. **Time-Variable Gravity From Space And Present-Day Mass Redistribution In The Earth System.** *Earth And Planetary Science Letters*, 298, P. 263–274.

Castellanos, Jorge C Et Al. 2020. **Seismic Anisotropy Reveals Crustal Flow Driven By Mantle Vertical Loading In The Pacific NW.** (July): 1–10.

Chen, J L Et Al. 2009. **Drought Event In The Amazon River Basin As Measured By GRACE And Estimated By Climate Models.** 114(March): 1–9.

Chen, J. L., Wilson, C. R., Tapley, B. D., Scanlon, B., Güntner, A. 2016. **Long-Term Groundwater Storage Change In Victoria, Australia From Satellite Gravity And In Situ Observations.** Global And Planetary Change, V. 139, P. 56–65.

Cheo, A. E., Voigt, H. J., Mbua, R. L. 2013. **Vulnerability Of Water Resources In Northern Cameroon In The Context Of Climate Change.** Environmental Earth Sciences, V. 70, P. 1211–1217.

Cheval, S. 2015. **The Standardized Precipitation Index – An Overview.** Romanian Journal Of Meteorology, V. 12, P. 17-64.

Chew, Clara C, And Eric E Small. 2014. **Terrestrial Water Storage Response To The 2012 Drought Estimated From GPS Vertical Position Anomalies.** (2): 6145–51.

Cirilo, J. A. 2008. **Políticas Públicas De Recursos Hídricos Para O Semiárido.** Estudos Avançados, V. 22, P.61-82.

Cook, B. I., Miller, R. L., Seager, R. 2009. **Amplification Of The North American Dust Bowl Drought Through Human-Induced Land Degradation.** Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America, V. 106, P. 4997–5001.

Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Amigo, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C. 2001. **Global Response Of Terrestrial Ecosystem Structure And Function To CO<sub>2</sub> And Climate Change: Results From Six Dynamic Global Vegetation Models.** Global Change Biology, V. 7, P. 357–37.

Crossley, D., Hinderer, J., Boy., 2004. **Regional Gravity Variations In Europe From Superconducting Gravimeters.** Journal Of Geodynamics, V. 38, P. 325-342.

Cunha, A. P. M., Alvalá, R. C., Nobre, C. A., Carvalho, M. A. 2015. **Monitoring Vegetative Drought Dynamics In The Brazilian Semiarid Region.** Agricultural And Forest Meteorology, V. 214–215, P. 494–505.

Cunha, A. P., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., ... & Ribeiro-Neto, G. (2019). **Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019.** Atmosphere, 10(11), 642.

Dabanlı, Ismail, Ashok K. Mishra, And Zekai Sen. 2017. **Long-Term Spatio-Temporal Drought Variability In Turkey.** Journal Of Hydrology 552: 779–92.

Deus, D., Gloaguen, R. 2013. **Remote Sensing Analysis Of Lake Dynamics In Semi-Arid Regions: Implication For Water Resource Management. Lake Manyara, East African Rift, Northern Tanzania.** Water (Switzerland), V. 5, P. 698–727.

Dhakar, R., Sehgal, V. K., Pradhan, S. 2013. **Study On Inter-Seasonal And Intra-Seasonal Relationships Of Meteorological And Agricultural Drought Indices In The Rajasthan State Of India.** Journal Of Arid Environments, V. 97, P. 108–119.

- Dill, R, And H Dobslaw. 2013. **Numerical Simulations Of Global-Scale High-Resolution Hydrological Crustal Deformations.** JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH: SOLID EARTH 118: 5008–17.
- Dutra, E., Di Giuseppe, F., Twsterhall, F., Pappenberger, F. 2013. **Seasonal Forecasts Of Droughts In African Basins Using The Standardized Precipitation Index.** Hydrology And Earth System Sciences, V. 17, P. 2359–2373.
- ESTEBAN-PARRA, M. J., F. S. Rodrigo, And Y. CASTRO-DIEZ. 1998. **SPATIAL AND TEMPORAL PATTERNS OF PRECIPITATION IN SPAIN FOR THE PERIOD 1880 – 1992.** International Journal Of Climatology 18: 1557–74.
- Felix, Landerer Et Al. 2020. **Extending The Global Mass Change Data Record : GRACE Follow-On Instrument And Science Data Performance.** : 0–3.
- Feng, J., Yan, D., Li, C. 2013. **Evolutionary Trends Of Drought Under Climate Change In The Heihe River Basin, Northwest China.** Journal Of Food, Agriculture And Environment, V. 11, P. 1025–1031.
- Feng, P., Liu, D. L., Wang, B., Waters, C., Zhang, M., Yu, Q. 2019. **Projected Changes In Drought Across The Wheat Belt Of Southeastern Australia Using A Downscaled Climate Ensemble.** International Journal Of Climatology, V. 39, P. 1041-1053.
- Feng, Q., Ma, H., Jiang, X., Wang, X., Cao, S. 2015. **What Has Caused Desertification In China?** Scientific Reports, V. 5, P. 1–8.
- Ferreira, V G Et Al. 2018. **Space-Based Observations Of Crustal Deflections For Drought Characterization In Brazil.** Science Of The Total Environment 644: 256–73.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>.
- Filho, J. D. P., F. A Souza Filho, E. S. P. R. Martins, And Ticiana Studart. 2020. **Copula-Based Multivariate Frequency Analysis Of The.** Water Article 12: 1–22.
- Ford, T., Labosier, C. F. 2014. **Spatial Patterns Of Drought Persistence In The Southeastern United States.** International Journal Of Climatology, V. 34, P. 2229–2240.
- Gemael, C. 1994. **Introducao Ao Ajustamento De Observacoes: Aplicacoes Geodesicas.** Curitiba: Editora UFPR.
- Geruo, A, Velicogna, I, Kimball, J. S, Kim, Y. 2015. **Impact Of Changes In GRACE Derived Terrestrial Water Storage On Vegetation Growth In Eurasia.** Environmental Research Letters, V. 10, P. 124024.
- Getirana, A., 2016. **Extreme Water Deficit In Brazil Detected From Space.** Journal Hydrometeorology, V. 17, P. 591–599.
- Gu, Guojun, And Robert F Adler. 2013. **Interdecadal Variability / Long-Term Changes In Global Precipitation Patterns During The Past Three Decades : Global Warming And / Or Pacific Decadal Variability ?** : 3009–22.
- Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., Wardlow, B. 2007. **A Five-Year Analysis Of MODIS NDVI And NDWI For Grassland Drought Assessment Over The Central Great Plains Of**

**The United States.** Geophysical Research Letters, V. 34, P. 1–6.

Harris, I, Timothy J Osborn, P Jones, And D Lister. 2020. **Version 4 Of The CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset.** Scientific Data 7(109): 1–18.

Houborg, Rasmus Et Al. 2012. **Drought Indicators Based On Model-Assimilated Gravity Recovery And Climate Experiment ( GRACE ) Terrestrial Water Storage Observations.** 48(August 2011).

Hu, K., Awange, J. L., Khandu., Forootan, E., Goncalves, R. M., Fleming, K. 2017. **Hydrogeological Characterisation Of Groundwater Over Brazil Using Remotely Sensed And Model Products.** Science Of The Total Environment, V. 599-600, P. 372-386.

Huang, S., Li, P., Huang, Q., Leng, G., Hou, B., & Ma, L. (2017). **The propagation from meteorological to hydrological drought and its potential influence factors.** Journal of Hydrology, 547, 184-195.

Jassey, V. E. J., Reczuga, M. K., Zielińska, M., Słowińska, S., Robroek, B. J. M., Mariotte, P., Seppey, C. V. W., Lara, E., Barabach, J., Słowiński, M., Bragazza, L., Chojnicki, B. H., Lamentowicz, M., Mitchell, E. A. D., Buttler, A. 2018. **Tipping Point In Plant–Fungal Interactions Under Severe Drought Causes Abrupt Rise In Peatland Ecosystem Respiration.** Global Change Biology, V. 24, P. 972–986.

Jiang, W., Yuan, P., Chen, H., Cai, J., Li, Z., Chao N., Sneeuw, N. 2017. **Annual Variations Of Monsoon And Drought Detected By GPS: A Case Study In Yunnan, China.** Scientific Reports, V. 7, P. 5874.

Junqueira, Rubens, Marcelo R Viola, Jhones S Amorim, And Carlos R De Mello. 2020. **Hydrological Response To Drought Occurrences In A Brazilian Savanna Basin.**

Justino, Glauciene, Ferreira Nádja, And Melo De Oliveira. 2020. **Spatiotemporal Variability Of Vegetation Due To Drought Dynamics ( 2012 – 2017 ): A Case Study Of The Upper Paraíba.** Natural Hazards (0123456789). <https://doi.org/10.1007/S11069-020-03940-X>.

Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Vermote, E. F., Masuoka, E., Wolfe, R.E., Saleous, N., Roy, D. P., Morissette, J. T. 2002. **An Overview Of MODIS Land Data Processing And Product Status.** Remote Sensing Of Environment, V. 83, P. 3–15.

Karaburun, A. 2010. **Estimation Of C Factor For Soil Erosion Modeling Using NDVI In Buyukcekmece Watershed.** Ozean Journal Of Applied Sciences, V. 3, P. 77–85.

King, Andrew D Et Al. 2020. **The Role Of Climate Variability In Australian Drought.** 10(March): 2018–20.

Kumar, K Satish, E Venkata Rathnam, And Venkataramana Sridhar. 2021. **Science Of The Total Environment Tracking Seasonal And Monthly Drought With GRACE-Based Terrestrial Water Storage Assessments Over Major River Basins In South India.** Science Of The Total Environment 763: 142994. <https://doi.org/10.1016/J.Scitotenv.2020.142994>.

Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., &

- Yuan, D. N. (2020). **Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance**. *Geophysical Research Letters*, 47(12), e2020GL088306.
- Li, J., Wang, S., Zhou, F. 2016. **Time Series Analysis Of Long-Term Terrestrial Water Storage Over Canada From GRACE Satellites Using Principal Component Analysis**. *Canadian Journal Of Remoting Sensing*, V. 42, P. 161-170.
- Li, U S Bailing, And Matthew Rodell. 2014. **Evaluation Of A Model-Based Groundwater Drought Indicator In The Conterminous**. [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Jhydrol.2014.09.027](http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Jhydrol.2014.09.027).
- Lima, F. V. M. S., R. M. Gonçalves, Henry C. Montecino, And R. A. Vila Nova. 2020. **ASSESSMENT OF HYDROLOGICAL MASS LOSSES IN THE NORTHEAST ATLANTIC EASTERN HYDROGRAPHIC REGION, BRAZIL**. *Bulletin Of Geodetic Sciences* 26(3): 1–20.
- Linke, Andrew M Et Al. 2018. **Drought , Local Institutional Contexts , And Support For Violence In Kenya**. 62(7): 1544–78.
- Loon, Anne F Van Et Al. 2016. **Uvicspace : Research & Learning Repository And Analysis Approaches Drought In A Human-Modified World : Reframing Drought Definitions , Understanding , And Analysis Approaches**. : 3631–50.
- Ma, Z., Peng, C., Zhu, Q., Chen, H., Yu, G., Li, W., Zhou, X., Wang, W., Zhang, W. 2012. **Regional Drought-Induced Reduction In The Biomass Carbon Sink Of Canada's Boreal Forests**. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, V. 109, P. 2423–2427.
- Marengo, Jose A Et Al. 2020. **Assessing Drought In The Drylands Of Northeast Brazil Under Regional Warming Exceeding 4 ° C**. *Natural Hazards* (0123456789). [Https://Doi.Org/10.1007/S11069-020-04097-3](https://Doi.Org/10.1007/S11069-020-04097-3).
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. S., Cunha, A. P., Brito, S., Moraes, O. L. L. 2018. **Climatic Characteristics Of The 2010-2016 Drought In The Semiarid Northeast Brazil Region**. *Anais Da Academia Brasileira De Ciencias*, V. 90, P. 1973–1985.
- Martins, E. S. P. R., Vasconcelos Junior, F. C. 2017. **O Clima Da Região Nordeste Entre 2009 E 2017: Monitoramento E Previsão**. *Parcerias Estratégicas*, V. 22, P. 63-80.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. 1993. **The Relationship Of Drought Frequency And Duration To Time Scales**. *Eighth Conference On Applied Climatology*.
- MEDEIROS, FELIPE J. DE Et Al. 2021. **Hydrometeorological Conditions In The Semiarid And East Coast Regions Of Northeast Brazil In The 2012-2017 Period**. *Anais Da Academia Brasileira De Ciências* 93(1).
- Mishra, A. K., Singh, V. P. 2010. **A Review Of Drought Concepts**. *Journal Of Hydrology*, V. 391, P. 202–216.
- Mpelasoka, F., Awange, J. L., Goncalves, R. M. 2018. **Accounting For Dynamics Of Mean Precipitation In Drought Projections: A Case Study Of Brazil For The 2050 And 2070**

**Periods.** Science Of The Total Environment, V. 622, P. 1519-1531.

Molodtsova, T., Molodtsov, S., Kirilenko, A., Zhang, X., Vanlooy, J. 2016. **Evaluating Flood Potential With GRACE In The United States.** Natural Hazards And Earth System Sciences, V. 16, P. 1011–1018.

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.

Morton, D. C., Defries, R. S. 2005. **Rapid Assessment Of Annual Deforestation In The Brazilian Amazon Using MODIS Data.** Earth Interactions, V. 9, P. 1 – 22.

Naumann, G., Alfieri, L., Wyser, K., Mentaschi, L., Betts, R. A., Carrao, H., Et Al. (2018). 2018. **Global Changes In Drought Conditions Under Different Levels Of Warming.** Geophysical Research Letters 45: 3285–96.

Ndehedehe, C. E., Ferreira, V.G. 2020a. **Identifying The Footprints Of Global Climate Modes In Time-Variable Gravity Hydrological Signals.** Climate Change, V. 159, P. 481 – 502.

\_\_\_\_\_. 2020b. **Assessing Land Water Storage Dynamics Over South America.** Journal Hydrology, V. 580, P. 124339.

Ndehedehe, C. E., Awange, J., Agutu, N., Kuhn, M., Heck, B. 2016. **Understanding Changes In Terrestrial Water Storage Over West Africa Between 2002 And 2014.** Advances In Water Resources, V. 88, P. 211–230.

Nobre, Carlos A Et Al. 2016. **Some Characteristics And Impacts Of The Drought And Water Crisis In Southeastern Brazil During 2014 And 2015.** (February): 252–62.

Omute, P., Corner, R., Awange, J. L. 2012. **The Use Of NDVI And Its Derivatives For Monitoring Lake Victoria's Water Level And Drought Conditions.** Water Resources Management, V. 26, P. 1591–1613.

Peng, Y., Jun, X., Chesheng, Z., Yunfeng, Q., Yueling, W. 2017. **Monitoring The Spatio-Temporal Changes Of Terrestrial Water Storage Using GRACE Data In The Tarim River Basin Between 2002 And 2015.** Science Of The Total Environment, V.595, P. 218-228.

Piao, S., Mohammat, A., Fang, J., Cai, Q., Feng, J. 2006. **NDVI-Based Increase In Growth Of Temperate Grasslands And Its Responses To Climate Changes In China.** Global Environmental Change, V. 16, P. 340–348.

Rebischung, P., B. Garayt, and Z. Altamimi. **IGS reference frame working group technical report 2016. International GNSS service technical report** (2016): 171-178.

Rodrigues, R. R., Mcphaden W. J. 2014. **Why Did The 2011-2012 La Niña Cause A Severe Drought In The Brazilian Northeast.** Geophysical Research Letters. V. 41, P. 1012-1018.

Rodriguez-Iturbe, I., D'odorico, P., Laio, F., Ridolfi, L., Tamea, S. 2007. **Challenges In Humid Land Ecohydrology: Interactions Of Water Table And Unsaturated Zone With**

**Climate, Soil, And Vegetation.** Water Resources Research, V. 43, P. 1–5.

Rosenhaim, T. L., Gonçalves, R. M., Lima, J. P., Gama, N. A. 2018. **Comportamento Do Armazenamento De Água Entre Os Anos De 2002 A 2015 Para A Região Hidrográfica Brasileira Do Atlântico Nordeste Oriental Considerando Observações Grace, TRMM E In Situ.** Geociencias, V. 37, P. 823–834.

Sarkar, Tandrila Et Al. 2020. **Groundwater For Sustainable Development Integrated Study Of GRACE Data Derived Interannual Groundwater Storage Variability Over Water Stressed Indian Regions.** Groundwater For Sustainable Development 10(September 2019): 100376. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100376>.

Save, H., Bettadpur, S., Tapley, B. D. 2016. **High Resolution CSR GRACE RL05 Mascons.** Journal Of Geophysical: Solid Earth, V. 121, P. 7547-7569.

Save, H. (2020). **CSR GRACE and GRACE-FO RL06 Mascon Solutions v02.** 2020.

Schober, P., Boer, C., Schwarte, L. A. 2018. **Correlation Coefficients. Anesthesia And Analgesia,** V. 126, P. 1763–1768.

Schwalm, Christopher R Et Al. 2017. Letter. Nature Publishing Group 548(7666): 202–5. <http://dx.doi.org/10.1038/nature23021>.

Shabbar, A., Skinner, W. 2004. **Summer Drought Patterns In Canada And The Relationship To Global Sea Surface Temperatures.** Journal Of Climate, V. 17, P. 2866–2880.

Sharma, Shankar, And Kalpana Hamal. 2020. **Dominant Pattern Of Year-To-Year Variability Of Summer Precipitation In Nepal During 1987 – 2015.** Theoretical And Applied Climatology 142: 1071–84.

Siegel, S. 1975. **Estatística Não-Paramétrica Para As Ciências Do Comportamento.** São Paulo: Mcgraw-Hill Do Brasil.

Snedecor, G.W. And Cochran, W.G. 1980. **Statistical Methods.** 7th Edition, Iowa State University Press, Ames.

Singh, D., Herlin, I., Berroir, J. P., Silva, E. F., Meirelles, M. S. 2004. **An Approach To Correlate NDVI With Soil Colour For Erosion Process Using NOAA/AVHRR Data.** Advances In Space Research, V. 33, P. 328–332.

Sinha, Debanjan, Tajdarul H. Syed, And John T. Reager. 2019. **Utilizing Combined Deviations Of Precipitation And GRACE-Based Terrestrial Water Storage As A Metric For Drought Characterization: A Case Study Over Major Indian River Basins.** Journal Of Hydrology 572(February): 294–307. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.053>.

Sinha, D., Syed, T. H., Famiglietti, J. S., Reager, J. T., Thomas, R. C. 2017. **Characterizing Drought In India Using GRACE Observations Of Terrestrial Water Storage Deficit.** Journal Of Hydrometeorology, V. 18, P. 381–396.

Son, N. T., Chen, C. F., Chen, C. R., Chang, L. Y., Minh, V. Q. 2012. **Monitoring Agricultural Drought In The Lower Mekong Basin Using MODIS NDVI And Land**

**Surface Temperature Data.** International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation, V. 18, P. 417–427.

Spinoni, J., Naumann, G., Carrao, H., Barbosa, P., Vogt, J. 2014. **World Drought Frequency, Duration, And Severity For 1951-2010.** International Journal Of Climatology, V. 34, P. 2792–2804.

Stagge, James H Et Al. 2015. **Candidate Distributions For Climatological Drought Indices (SPI And SPEI).** INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol 35: 4027–40.

Stape, Luiz, Paulo Cesar Sentelhas, Clayton Alcarde Alvares, And Leonardo De Moraes Gonc. 2014. **Ko " Ppen ' S Climate Classification Map For Brazil.** 22(6): 711–28.

Sun, T., Ferreira, V. G., He, X., Andam-Akorful, S. A. 2016. **Water Availability Of São Francisco River Basin Based On A Space-Borne Geodetic Sensor.** Water (Switzerland), V. 8, P. 213.

Sun, W., Canção, X., Mu, X., Gao, P., Wang, F., Zhao, G. 2015. **Spatiotemporal Vegetation Cover Variations Associated With Climate Change And Ecological Restoration In The Loess Plateau.** Agricultural And Forest Meteorology, V. 209–210, P. 87–99.

Tomasella, J., Vieira, R. M. S. P., Barbosa, A. A., Rodriguez, D. A., Santana, M. De O., Sestini, M. F. 2018. **Desertification Trends In The Northeast Of Brazil Over The Period 2000–2016.** International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation, V. 73, P. 197–206.

Thomas, A. C., Reager, J. T., Famiglietti, J. S., & Rodell, M. (2014). **A GRACE-based water storage deficit approach for hydrological drought characterization.** Geophysical Research Letters, 41(5), 1537-1545.

Thomas, Brian F Et Al. 2017. **GRACE Groundwater Drought Index: Evaluation Of California Central Valley Groundwater Drought.**  
[Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Rse.2017.06.026](http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Rse.2017.06.026).

UNESCO. 2009. **The United Nations World Water Development Report 3.** Paris.

Van Dijk, A. I. J. M., Beck, H. E., Crosbie, R. S., Jeu, R. A. M. De, Liu, Y. Y., Podger, G. M., Timbal, B., Viney, N. R. 2013. **The Millennium Drought In Southeast Australia (2001-2009): Natural And Human Causes And Implications For Water Resources, Ecosystems, Economy, And Society.** Water Resources Research, V. 49, P. 1040–1057.

Van Loon, A. F. 2015. **Hydrological Drought Explained.** Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, V. 2 P. 359–392.

Wilhite, Donald A, Mark D Svoboda, And Michael J Hayes. 2007. **Understanding The Complex Impacts Of Drought : A Key To Enhancing Drought Mitigation And Preparedness \*.** (15122): 763–74.

Wilhite, D. A., Glantz, M. H. 1985. **Water International Understanding: The Drought Phenomenon: The Role Of Definitions Understanding: The Drought Phenomenon : The Role Of Definitions.** Water International, V. 10, P. 111–120.

- Wolfe, R. E., Nishihama, M., Fleig, A. J., Kuyper, J. A., Roy, D. P., Storey, J. C., Patt, F. S. 2002. **Achieving Sub-Pixel Geolocation Accuracy In Support Of MODIS Land Science.** Remote Sensing Of Environment, V. 83, P. 31–49.
- Wu, H. Et Al. 2008. **The Impact Of The Positive Indian Ocean Dipole On Zimbabwe Droughts Tropical Climate Is Understood To Be Dominated By.** International Journal Of Climatology 2019 (March 2008): 2011–29.
- Xiang, L., Wang, H., Steffen, H., Wu, P., Jia, L., Jiang, L., Shen, Q. 2016. **Groundwater Storage Changes In The Tibetan Plateau And Adjacent Areas Revealed From GRACE Satellite Gravity Data.** Earth And Planetary Science Letters, V. 449, P. 228–239.
- Yang, Peng Et Al. 2017. **Monitoring The Spatio-Temporal Changes Of Terrestrial Water Storage Using GRACE Data In The Tarim River Basin Between 2002 And 2015.** Science Of The Total Environment 595: 218–28.
- Yang, Peng, Yongyong Zhang, Jun Xia, And Shangxin Sun. 2020. **Identification Of Drought Events In The Major Basins Of Central Asia Based On A Combined Climatological Deviation Index From GRACE Measurements.** Atmospheric Research 244(June): 105105. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105105>.
- Yao, N., Li, L., Feng, P., Feng, H., Liu, D.L., Liu, Y., Jiang, K., Hu, X., Li, Y. 2020. **Projections Of Drought Characteristics In China Based On A Standardized Precipitation And Evapotranspiration Index And Multiple GCMs.** Science Of The Total Environment, V. 704, P. 1–18.
- Yirdaw, S. Z., K. R. Snelgrove, And C. O. Agboma. 2008. **GRACE Satellite Observations Of Terrestrial Moisture Changes For Drought Characterization In The Canadian Prairie.** Journal Of Hydrology 356(1–2): 84–92.
- Yu, Wenjun, Yanzhong Li, Yanping Cao, And Tayler Schillerberg. 2019. **Drought Assessment Using GRACE Terrestrial Water Storage Deficit In Mongolia From 2002 To 2017 : 1–14.**
- Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., Sharma, A. 2015. **Droughts In A Warming Climate: A Global Assessment Of Standardized Precipitation Index (SPI) And Reconnaissance Drought Index (RDI).** Journal Of Hydrology, V. 526, P. 183–195.
- Zhao, Cha, François Brissette, Jie Chen, And Jean-Luc Martel. 2020. **Frequency Change Of Future Extreme Summer Meteorological And Hydrological Droughts Over North America.** Journal Of Hydrology 584(June 2019): 124316. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124316>.
- Zhao, M., Geruo, A., Velicogna, I., Kimball, J. S. 2017. **A Global Gridded Dataset Of GRACE Drought Severity Index For 2002–14: Comparison With PDSI And SPEI And A Case Study Of The Australia Millennium Drought.** Journal Of Hydrometeorology, V. 18, P. 2117–2129.
- Zhou, G., Wei, X., Wu, Y., Liu, S., Huang, Y., Yan, J., Zhang, D., Zhang, Q., Liu, J., Meng, Z., Wang, C., Chu, G., Liu, S., Tang, X., Liu, X. 2011. **Quantifying The Hydrological Responses To Climate Change In An Intact Forested Small Watershed In Southern China.** Global Change Biology, V. 17, P. 3736–37461.