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

TARSO LUCONI ROSENHAIM

**OBSERVAÇÕES DA MISSÃO GRACE APLICADAS
AO MONITORAMENTO DO ARMAZENAMENTO
D'ÁGUA NA REGIÃO HIDROGRÁFICA ATLÂNTICO
NORDESTE ORIENTAL**

Recife

2017

TARSO LUCONI ROSENHAIM

**OBSERVAÇÕES DA MISSÃO GRACE APLICADAS AO
MONITORAMENTO DO ARMAZENAMENTO D'ÁGUA NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA ATLÂNTICO NORDESTE ORIENTAL**

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

Área de concentração: Geodésia Aplicada

Orientador: Profº. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves

Recife

2017

R813o	Rosenhaim, Tarso Luconi. Observações da missão Grace aplicadas ao monitoramento do armazenamento d'água na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental / Tarso Luconi Rosenhaim. - 2017. 72 folhas, il., gráfs., tabs. Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Mikosz Gonçalves. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2017. Inclui Referências e apêndices. 1. Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. 2. GRACE. 3. Gravimetria. 4. Geodésia ambiental. 5. Recursos hídricos. I. Gonçalves, Rodrigo Mikosz (Orientador). II. Título.
	UFPE
526.1 CDD (22. ed.)	BCTG/2017-184

TARSO LUCONI ROSENHAIM

**OBSERVAÇÕES DOS SATÉLITES GRACE APLICADAS AO
MONITORAMENTO DO ARMAZENAMENTO D'ÁGUA NA REGIÃO
HIDROGRÁFICA ATLÂNTICO NORDESTE ORIENTAL**

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

Área de concentração: Geodésia Aplicada

Aprovado em: 14 / 03 / 2017

BANCA EXAMINADORA

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

Profª. Dr. Techn. Andréa de Seixas (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Profº. Dr. Vagner Gonçalves Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Hohai (Nanjing, China)

Ao meu filho, Samuel, que mesmo ainda bebê
significou toda a minha inspiração para
continuar sempre em frente, não desistir, rir e
me esforçar.

Dedico

AGRADECIMENTOS

No decorrer do curso de Mestrado muitos foram os obstáculos, mas sempre existiram caminhos abertos, que precisavam ser percorridos. Contudo, nem sempre esses caminhos foram fáceis e a tendência em não os testar, por achar que não poderiam ser transpostos, turva a mente e a direciona o pensamento e as ações para evitar a direção sensata.

Nestes momentos é que o suporte, apoio e corrente positiva de pessoas que acreditam em nós foi essencial.

A pessoa mais imprescindível para eu galgar os obstáculos e seguir em frete foi minha esposa, Ana Lúcia, que com suas sábias palavras, as vezes severas, mas necessárias, impeliu-me a continuar, a acreditar, foi forte, aceitou minha condição, e transmitiu-me muita perseverança.

Aos meus pais, que do longínquo Rio Grande do Sul, apoiaram incontestavelmente minha intenção de fazer, cursar e ir até o fim como minhas ideias. Muito por que valorizam bastante o crescimento intelectual de uma pessoa e não deixaram de auxiliar da maneira que fosse.

Aos familiares de minha esposa, que do Ceará, deram todo o suporte a ela em minhas ausências durante sua gravidez e primeiro ano de nosso filho.

Aos meus irmãos que, assim como em meu TCC, também colocaram uma mãozinha aqui.

Ao meu orientador que apoiou, acreditou, ensinou, exigiu na medida certa e teve compreensão durante esse tempo.

Aos colegas de curso que de uma forma ou de outra sempre apoiaram nas disciplinas. E aos meus colegas de tênis, por que para exercitar a mente nos estudos foi essencial estar com o físico em dia.

“.... Eu sou como aquele boneco
Que apareceu no dia na fogueira
E controla seu próprio satélite

Andando por cima da terra
Conquistando o seu próprio espaço
É onde você pode estar agora ...”

(Chico Science, 1996)

RESUMO

A Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (RHANO), localiza-se no extremo nordeste brasileiro, desde o Piauí até Alagoas, tem cerca de 286 mil km² de área, onde vivem aproximadamente 24,1 milhões de pessoas, abrangendo boa parte do semiárido brasileiro. O GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*) é uma missão em conjunto entre as agências espaciais estadunidenses e alemã, que além de obter medidas precisas das variações temporais do campo de gravidade terrestre, podem ser utilizadas para verificar a redistribuição contínua de massa e sua variação temporal em todo o planeta. A presente dissertação teve como objetivo analisar as variações de armazenamento d'água, obtidas a partir dos dados GRACE na RHANO, para o período de abril de 2002 até dezembro de 2015, intervalo este considerando o início de operação da missão. Além disso, foram efetuadas as seguintes análises: (i) a correlação das observações temporais GRACE com os relatórios da Conjuntura dos Recursos Hídricos elaborados pela Agência Nacional de Águas (ANA), (ii) quantificação da diferença de disponibilidade hídrica em dois momentos de 2015 com relação a equivalentes sazonais de 2002 e (iii) comparação de observações obtidas pela solução chamada de *mascons* GRACE com informações *in situ* do comportamento temporal de reservatórios na RHANO. Como resultados encontrados na comparação entre os períodos de novembro de 2002 e dezembro de 2015, foi encontrado perda na disponibilidade hídrica na ordem de $\cong 19,25 \text{ km}^3$ ($19246,11 \text{ hm}^3$). Destacando a equiparidade entre as variações sazonais, semestrais e anuais de disponibilidade hídrica apontadas pela ANA com os dados processados e mensurados da missão GRACE. Outro resultado encontrado foi a detecção, na RHANO a partir de 2012, de um declínio nos principais reservatórios ($\cong 60\%$), o que foi confirmado com as observações obtidas pelos *mascons* na área de estudo. Desta forma, destaca-se a importância da missão GRACE e seus produtos para corroborar com estudos hidrológicos.

Palavras-chave: GRACE. Gravimetria. Geodésia ambiental. Recursos hídricos.

ABSTRACT

The Oriental Northeast Atlantic Hydrographic Region (RHANO), is located in the extreme northeast of Brazil, from Piauí to Alagoas, with around 286.000 km² of area, where approximately 24.1 million people live, covering much of the Brazilian semi-arid region. The GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) is a joint mission between American and German space agencies that in addition to obtain precise measurements of the temporal variations of Earth's gravity field can be used to check a continuous mass redistribution and it's temporal variation throughout the planet. The present master thesis aims to analyze the variations of water storage, obtained from GRACE data in RHANO from April 2002 until December 2015, range considering the start of operation of the mission. Moreover, the following analyses were performed: (i) correlation of temporal GRACE observations with the water resources situation reports prepared by the national water agency (ANA), (ii) quantifying the difference of water availability in two moments of 2015 in relation to seasonal equivalents of 2002 and (iii) comparison of observations obtained by solution called *mascons* GRACE with *in situ* information of temporal behavior from reservoirs in RHANO. As results of a comparison between November 2002 and December 2015, it was found in the availability of water loss in the order of $\cong 19.25 \text{ km}^3$ (19246.11 hm^3). Highlighting the equality between the seasonal variations, semiannual and annual water availability pointed by the ANA with the GRACE mission processed data and measured. Another result found was the discovery, in the RHANO from 2012, of a decline in the main reservoirs ($\cong 60\%$), which was confirmed with the observations obtained by *mascons* in the study area. Thus, stands out the importance of the GRACE mission and its products in support of hydrological studies.

Keywords: GRACE. Gravimetry. Environmental geodesy. Water resources.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arranjo de órbitas de satélites LEO, MEO e GEO (ELBERT, 1997)	22
Figura 2 – Apresentação artística dos satélites da missão GRACE (NASA/JPL, 2002a)	23
Figura 3 – Ilustração de inclinação da orbital (RIEBEEK; SIMMON, 2009)	24
Figura 4 – Tipos de excentricidade (ANTON et al., 2007)	24
Figura 5 – Demonstração da órbita global dos satélites GRACE (CSR, 2015)	25
Figura 6 – Ilustração de alguns instrumentos abordo dos satélites da missão GRACE (NASA, 2015)	26
Figura 7 – Esquema de publicação da dinâmica de elaboração dos Relatórios Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2015d)	31
Figura 8 – Regiões Hidrográficas brasileiras (CNRH, 2003)	32
Figura 9 – Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental e respectivas unidades hidrográficas (ANA, 2015c)	34
Figura 10 – Reservatórios na área de estudo	35
Figura 11 – Fluxograma de metodologia dos trabalhos do projeto	36
Figura 12 – Gráfico apresentando a média mensal de equivalente à altura d'água (cm) de 2002 a 2015 na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental	41
Figura 13 – Mapas de equivalente à altura d'água (cm) na RHANO	43
Figura 14 – Mapas de diferença de equivalente à altura d'água (cm) na RHANO ...	45
Figura 15 – Situação de reservatórios, em percentual (%) da capacidade total de armazenamento, na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental de 2002 a 2015 para os meses de abril, maio, novembro e dezembro	50
Figura 16 – Gráficos de dados <i>mascons</i> GRACE, de 2002 a 2016, de reservatórios pela solução do centro JPL.....	51
Figura 17 – Gráficos de dados <i>mascons</i> GRACE, de 2002 a 2016, de reservatórios pela solução do centro GSFC	52
Apêndice B – Gráficos anuais (2002-2015) de equivalente à altura d'água (cm) no Atlântico Nordeste Oriental	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Meses faltantes de dados da missão GRACE	29
Tabela 2 – Capacidade dos reservatórios da Figura 7	35
Apêndice A – Estatística regional (cm), dos dados da missão GRACE, na RHANO de 2002 a 2015	62

LISTA DE ABREVIATURAS

abr. abril

cm centímetro

dez. dezembro

Dr. Doutor

ed. Edição

e.g. Por exemplo

et al. e outro

hm³ hectômetro cúbico

in situ no lugar

Kg quilo

km quilômetro

km² quilômetro quadrado

km³ quilômetro cúbico

m³/s metros cúbicos por segundo

min minutos

mm milímetros

nº número

Profº. Professor

p. página

v. volume

LISTA DE SIGLAS

ANA Agência Nacional de Águas
CCAR *Colorado Center for Astrodynamics Research*
CHAMP *Challenging Mini Satellite Payload*
CNRH Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CPRM Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
CSR *Center for Space Research*
DGA Direção Geral dos Recursos Hídricos
DLR *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt*
EUA Estados Unidos da América
GALILEO Sistema de navegação global da União Européia
GEO *Geostationary Orbit*
GeoTIFF Georeferencing Tagged Image File Format
GFZ *GeoforschungsZentrum Potsdam*
GIS *Geographic Information System*
GLONASS *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*
GNSS *Global Navigation Satellite System*
GOCE *Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*
GPS *Global Positioning System*
GRACE *Gravity Recovery And Climate Experiment*
GRACE-FO *Gravity Recovery And Climate Experiment Follow-On*
GRGS *Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale*
GSFC *Goddard Space Flight Center*
INDE Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
JLP *Jet Propulsion Laboratory*
LASER *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LEO *Low Earth Orbit*
MEO *Medium Earth Orbit*
NASA *National Aeronautics and Space Administration*
RHANO Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental
SDS *Science Data System*
SGG (*satellite gravity gradiometry*)

SIG Sistemas de Informação Geográfica

SST-hl *Satellite-to-satellite high-low*

SST-II *Satellite-to-satellite low-low*

SST *Satellite-to-satellite tracking*

SNIRH Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

TWS *Total Water Storage*

WGS *World Geodetic System*

LISTA DE SÍMBOLOS

$\cong$ Aproximadamente

i Inclinação da órbita

e Excentricidade orbital

T Período orbital

N Grau

λ Comprimento de Onda

$^{\circ}$ Grau

S Tamanho de bloco

$\%$ Porcentagem

X Eixo horizontal

Y Eixo vertical

x Vezes, por

ΔV Diferença do volume equivalente à altura d'água dos extremos

TWS_e Perda ou ganho de equivalente à altura d'água médio dos *pixels* da área

A Área

$\pm$ Mais ou menos

N° Número

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	20
1.1.1	Objetivo Geral	20
1.1.2	Objetivos Específicos	20
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	21
2.1	MISSÃO GRACE	21
2.1.1	Categoria dos Satélites GRACE	21
2.1.2	Características dos Satélites GRACE	23
2.1.3	Princípio das Medições dos Satélites GRACE	25
2.1.4	Instrumentos dos Satélites GRACE	26
2.1.5	Produtos Originados da Missão GRACE	27
2.1.6	Aplicações dos Dados da Missão GRACE	29
2.1.7	Decaimento da Órbita/ Sucessor dos Satélites GRACE	30
2.2	RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL	30
2.2.1	Disponibilidade de Águas Superficiais	33
2.2.2	Disponibilidade de Águas Subterrâneas	33
3	ÁREA DE ESTUDO	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	SÉRIES TEMPORAIS	37
4.1.1	GRACE CSR	37
4.1.2	<i>Mascons</i> GRACE	39
4.1.3	Disponibilidade Hídrica Reportada nos Relatórios da ANA	39
4.1.4	Séries Temporais dos Reservatórios	39

4.2	CÁLCULO DOS EXTREMOS 2002 E 2015.....	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
5.1	SÉRIE TEMPORAL	41
5.2	GRÁFICOS ANUAIS.....	42
5.3	COMPARATIVO DOS EXTREMOS DA SÉRIE TEMPORAL ANALISADA (2002 e 2015)	43
5.4	DISPONIBILIDADE HÍDRICA DIVULGADOS PELA ANA	46
	- CONJUNTURA DE 2009.....	46
	- INFORME DE 2010	47
	- INFORME DE 2011	47
	- INFORME DE 2012	47
	- CONJUNTURA DE 2013.....	48
	- INFORME DE 2014	48
	- INFORME DE 2015	48
5.5	COMPARATIVO ENTRE OS DADOS GRACE MASCONS E DADOS DOS RESERVATÓRIOS	49
6	CONCLUSÕES	53
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
	APÊNDICE A – Estatística regional (cm), dos dados da missão GRACE, na RHANO de 2002 a 2015	62
	APÊNDICE B – Gráficos anuais (2002-2015) de equivalente à altura d’água (cm) na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental.....	66

1 INTRODUÇÃO

Entender o comportamento temporal a respeito dos recursos hídricos armazenados nas regiões hidrográficas brasileiras, bem como verificar tendências ao longo do tempo são importantes informações para a eficiência na gestão desse bem natural. Observações temporais utilizando satélites artificiais fazem parte de uma gama de informações investigativas úteis aos estudos hidrológicos. Diversos trabalhos evidenciam esse monitoramento e importância, aplicados a diversas localidades no planeta, tais como, por exemplo: Awange et al. (2013), Awange et al. (2014), Ahmed et al. (2014) e Ndehedehe et al. (2016) na África, Awange et al. (2011) e Chen et al. (2016) na Austrália, Molodtsova et al. (2015) nos EUA, Kaixuan et al. (2015) e Xiang et al. (2016) na Ásia, Bonfim & Molina (2009) na América do Sul.

Para o contexto de trabalhos aplicados ao Brasil podem ser citados como exemplo Getirana (2016), onde é apresentado uma aplicação dos dados da missão GRACE (*Gravity Recovery And Climate Experiment*), revelando quantitativamente o decréscimo de disponibilidade de recursos hídricos nas regiões sudeste e nordeste brasileiro, onde, respectivamente, a taxa de esgotamento de água foi na ordem de 56 e 49 km³ por ano durante o período de fevereiro de 2012 a janeiro de 2015.

Sun et al. (2016) utilizaram dados GRACE, de 2002 a 2015, para avaliar e quantificar a seca em curso na bacia hidrográfica do Rio São Francisco. Apontando que a mesma teve início em janeiro de 2012 e ápice em julho de 2015.

Outro exemplo pode ser encontrado em Xavier et al. (2013), que fazem um panorama sobre a possibilidade da utilização dos dados GRACE em modelagens hidrológicas para grandes bacias, com enfoque na região Amazônica, destacando a importância destas observações para a estimativa do comportamento sazonal e interanual do armazenamento total de água.

Almeida Filho (2009) investigou o processo das variações do campo gravitacional, obtidas através da missão espacial GRACE e seu relacionamento com a dinâmica das águas na região Amazônica, de 2002 a 2006, estimando as cotas onde não existam estações de monitoramento *in situ*, bem como avaliando a ordem de grandeza dos erros.

Salientando a importância da obtenção e processamento de informações sobre os recursos hídricos voltados ao planejamento estratégico, Gutiérrez et al. (2014),

assinalam que as secas ocorridas no nordeste e sul brasileiro nos últimos anos ocasionaram o surgimento de rodadas de discussões para melhorar a política de gestão a níveis federais e estaduais baseados em um estudo de caso para o Brasil feito pelo Banco Mundial, dando indicativos sobre medidas e abordagens para o problema da seca.

Montecino et al. (2016), demonstram outra aplicabilidade do GRACE na América do Sul com enfoque para águas subterrâneas na região norte do Chile. No referido estudo foi feito o monitoramento destas águas, utilizando soluções mensais da missão GRACE correlacionadas com observações de poços fornecidos pela Direção Geral dos Recursos Hídricos (DGA) do Ministério das Obras Públicas daquele país.

A missão GRACE que teve seus satélites lançados em março de 2002, é um projeto conjunto entre os centros aeroespaciais dos Estados Unidos (NASA) e da Alemanha (DLR). Esta missão mede as mudanças espaciais e temporais do campo gravimétrico da Terra em intervalos regulares (WAHR et al., 1998). Tais mudanças são resultado de redistribuição de massa em oceanos (WAHR et al., 2002), atmosfera (SWENSON; WARH, 2002), criosfera (VELICOGNA, 2009), parte sólida da Terra por processos como ajustamento isostático (BARLETTA et al., 2008) e hidrologia terrestre (RODELL; FAMIGLIETTI, 1999).

Os modelos geopotenciais da Terra, representados em termos dos coeficientes das funções harmônicas esféricas que podem ser considerados como soluções globais (WAHR et al., 1998), são processados por centros de pesquisa que disponibilizam várias informações e produtos, como exemplo, cita-se o equivalente à altura d'água (unidade em centímetros), compondo uma malha (*grid*), com resolução espacial de 1 grau por 1 grau e resolução nominal de aproximadamente 333 km, no equador. Outro tipo de produto obtido como uma solução mais regional que pode ser de 4 por 4 graus são os *mascons*, da sigla em inglês blocos de concentração de massa. As diferentes formas de processar os sinais obtidos pelo GRACE devem ser levadas em consideração conforme a localização da bacia, mais detalhes destas diferenças podem ser encontrados em Awange et al. (2011).

De acordo com Sakumura et al. (2014) existem três principais centros responsáveis pelo processamento, *Science Data System* (SDS), que disponibilizam mensalmente de forma gratuita as soluções obtidas pelo GRACE sendo eles: o CSR (*Center for Space Research*) localizado na Universidade do Texas, Austin, Estados

Unidos da América), o JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) em Pasadena, Estados Unidos da América) e o GFZ (*GeoForschungsZentrum*) em Potsdam, Alemanha). Além destes centros oficiais existem soluções não oficiais independentes.

A Região Hidrográfica Brasileira Atlântico Nordeste Oriental (RHANO) abrange cerca de 286 mil km² da Região geográfica do Nordeste Brasileiro. Indo do estado do Piauí a Alagoas (Foz da Bacia do Rio Parnaíba a do Rio São Francisco), onde se inserem capitais de grande porte, como Fortaleza (CE) e Recife (PE), e abrange boa parte do semiárido brasileiro. A população para esta região hidrográfica, foi estimada em 2010, com 24,1 milhões de pessoas (IBGE, 2010).

O semiárido naturalmente já apresenta características de altas temperaturas, baixas amplitudes térmicas, forte insolação e altas taxas de evapotranspiração, além de baixos índices pluviométricos (ANA, 2009), e associado a isso vem sofrendo uma crise hídrica desde 2012 devido à baixa nas precipitações, além da média histórica (ANA, 2015b), que acabam refletindo nos reservatórios de água.

Sendo assim, a hipótese principal desta pesquisa foi verificar o potencial do uso de informações obtidas de forma gratuita através da missão GRACE para o estudo de caso, considerando uma Região Hidrográfica no Brasil, a do Atlântico Nordeste Oriental. Através desta dissertação foi possível verificar o comportamento ao longo do tempo, bem como análises comparativas entre as observações obtidas de forma indireta por satélites e as informações obtidas em campo por estações meteorológicas e de monitoramento de reservatórios (açudes) na área de estudo. Trazendo como resultados as vantagens e desvantagens do uso dos dados dos satélites GRACE para este tipo de aplicação.

A seguir são apresentados os objetivos geral e específicos, seguidos da estrutura do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

- Analisar as variações de armazenamento d'água para o período 2002-2015, intervalo este desde o início de operação da missão GRACE até o ano do início deste estudo, na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (RHANO).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Correlacionar os dados oriundos da missão GRACE com os relatórios de Conjuntura dos Recursos Hídricos elaborados pela Agência Nacional de Águas (ANA).
- Quantificar a diferença de disponibilidade hídrica obtidas das observações GRACE, em dois momentos de 2015 com relação a equivalentes sazonais de 2002.
- Comparar dados *mascons* GRACE com informações temporais de volume acumulado de armazenamento de água em reservatórios na área de estudo.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 o embasamento teórico e a descrição dos principais assuntos abordados na dissertação são descritos. O capítulo 3 apresenta a área de estudo. Em materiais e métodos (capítulo 4), encontra-se um fluxograma com posterior descrição sobre os procedimentos empregados, bem como é discorrido sobre o método aplicado na utilização das observações da missão GRACE. No capítulo 5 são apresentados os resultados originados e respectivas análises, em seguida, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões. Por fim, o capítulo 7, refere-se a recomendações para trabalhos e pesquisas futuras.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Neste capítulo de embasamento teórico se optou por destacar informações que na maioria dos casos são obtidas na língua inglesa sobre a missão GRACE. Sendo assim, características gerais e introdutórias sobre categoria/características dos satélites, princípios de medição, instrumentos a bordo, produtos, aplicações e sucessor são apresentados na forma de itens. Para finalizar o capítulo é retratado os recursos hídricos com foco no Brasil.

2.1 MISSÃO GRACE

A missão por satélites artificiais GRACE é uma parceria entre as agências espaciais Estadunidenses, NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), e da Alemanha, DLR (*Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt*). Tem como um dos seus objetivos a obtenção de medidas precisas do campo gravimétrico terrestre a cada trinta dias (TAPLEY; REIGBER, 2001).

Medindo as assinaturas de gravidade variáveis no tempo, associadas com a redistribuição de massa nos componentes atmosfera da Terra, oceano e sólidos (WATKINS; BETTADPUR, 2000), a missão GRACE mostra, pela primeira vez, como a massa é redistribuída em todo o planeta e como varia temporalmente.

A missão GRACE é capaz de medir o campo de gravidade com um nível de precisão de pelo menos 100 vezes maior que qualquer medição existente, no domínio dos médios e longos comprimentos de ondas, e são esperadas melhorias contínuas no decorrer da missão. A medida que a missão prossegue e mais dados são adicionados, a resolução dos mapas do geoide terrestre é melhorado ainda mais (WARD, 2004).

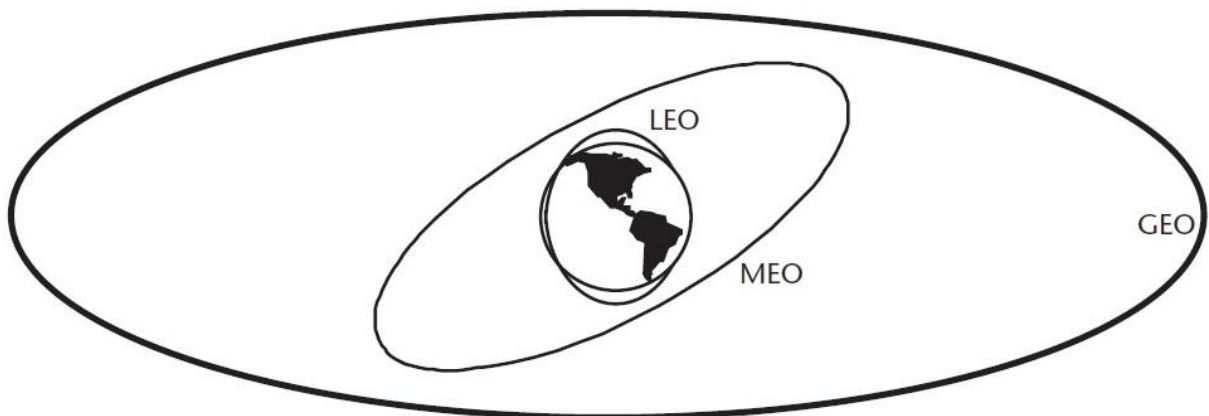
2.1.1 Categoria dos Satélites GRACE

O programa GRACE é uma missão de rastreamento satélite-a-satélite (SST, *satellite-to-satellite tracking*, da sigla em inglês) por micro-ondas (WATKINS; BETTADPUR, 2000).

Por rastreamentos satélite-a-satélite é possível medir a amplitude e a taxa de amplitude entre os satélites. O conceito SST é subdividido em configurações alto-baixo (*high-low*), SST-hl, e baixo-baixo (*low-low*), SST-ll. Outro conceito dentro de missões dedicadas ao campo gravimétrico terrestre é o de gradiômetro de gravidade do satélite, ou SGG (*satellite gravity gradiometry*), onde é medido a diferença de gravidade dentro do próprio satélite (RUMMEL et al., 2002), que possui como exemplo de aplicação a missão GOCE (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer*).

As três técnicas referem-se a satélites em órbita terrestre baixa, conhecidas como LEO (*Low Earth Orbit*), isto é, até 2000 km, quando caracterizados por sua altura de órbita. Satélites em órbita terrestre média são os que se encontram entre órbita de 5000 a 20000 km, de sigla em inglês MEO (*Medium Earth Orbit*) e satélites em órbita geoestacionária, ou GEO (*Geostationary Orbit*), localizam-se a 36000 km (SEEBER, 2003). A Figura 1 ilustra esses três tipos de órbita.

Figura 1: Arranjo de órbitas de satélites LEO, MEO e GEO



Fonte: Elbert (1997)

SST-hl significa que a nave espacial em LEO é rastreada por satélites em órbita alta como GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*, da sigla em Russo) ou GALILEO (sistemas de satélites de posicionamento global da União Europeia), em relação a uma rede de estações em solo (SEEBER, 2003). Modelo desta categoria de satélite é o CHAMP, *Challenging Mini Satellite Payload* (LIU, 2008).

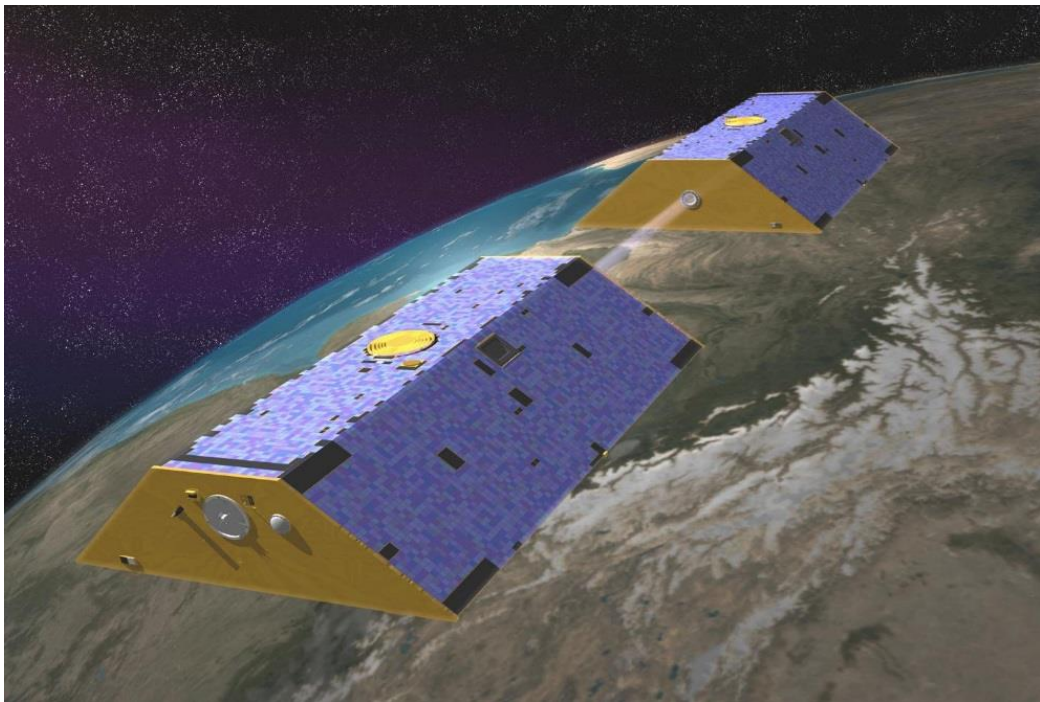
SST-ll denota que dois satélites em LEO, como os da missão GRACE, que estão localizados na mesma órbita, separados por algumas centenas de quilômetros,

e que a distância entre as naves espaciais é medida por elo (*link*) entre os satélites, com a maior acurácia possível (SEEBER, 2003).

2.1.2 Características dos Satélites GRACE

A missão GRACE consiste em dois satélites artificiais idênticos, de formato trapezoidal, na mesma órbita, a cerca de 220 km um do outro e $\cong 500$ km sobre a Terra (Figura 2). A massa de cada um dos satélites é de 487 kg e sua fonte de energia é solar. A primeira missão foi lançada em março de 2002 com vida útil prevista de 5 anos, entretanto foi estendida e ainda está ativa devido a boa condição de uso em que se encontram os satélites bem como do controle do decaimento de órbita deles.

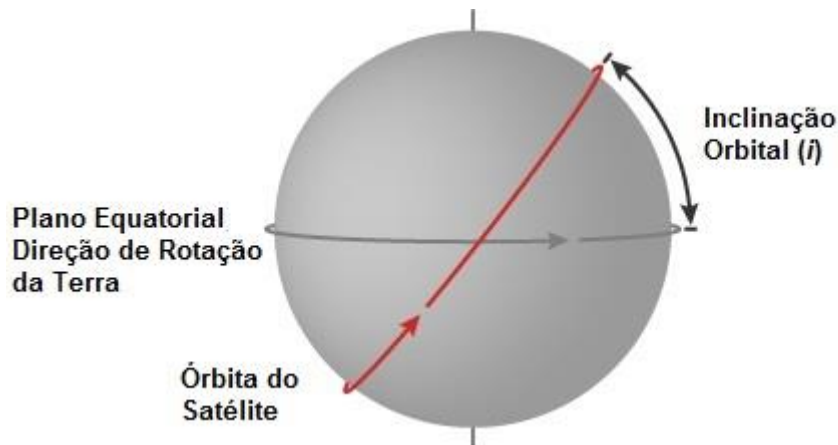
Figura 2: Apresentação artística dos satélites da missão GRACE



Fonte: NASA/JPL (2002a)

Apesar de pequenas variações nas especificações técnicas, que são monitoradas constantemente, em geral a inclinação da órbita (Figura 3) relativa ao plano equatorial (i) dos satélites é quase polar. A grande vantagem é que satélites em órbita polar fornecem cobertura para todo o globo terrestre, onde as órbitas dos satélites são consideradas fixas no espaço e a Terra rotaciona abaixo deles (SEEBER, 2003).

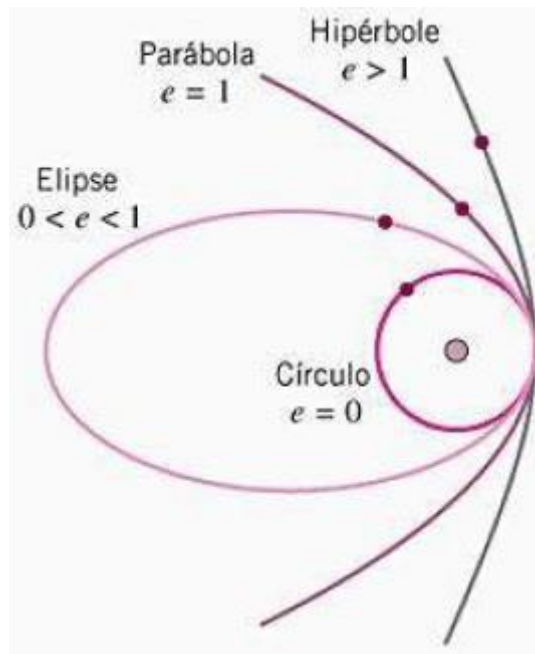
Figura 3: Ilustração de inclinação da orbital



Fonte: Riebeek; Simmon (2009)

A excentricidade de uma órbita (e) indica o desvio da órbita de um círculo perfeito (RIEBEEK; SIMMON, 2009). Quando tem como medida de raio igual em qualquer ponto da sua circunferência, isto é, circular, tem valor igual a zero (ANTON et al., 2007). Números maiores que zero indicam órbitas elípticas ($0 < e < 1$), parabólicas ($e = 1$) ou hiperbólicas ($e > 1$), como demonstra a Figura 4.

Figura 4: Tipos de excentricidade



Fonte: Anton et al. (2007)

Os satélites GRACE apresentam excentricidade elíptica, e possuem período orbital (T) de 91 minutos, ou seja, circunda a Terra quase 16 vezes por dia, registrando variações de minutos do campo gravitacional terrestre (WATKINS; BETTADPUR, 2000). A Figura 5 demonstra a órbita dos satélites em um específico dia.

Figura 5: Demonstração da órbita global dos satélites GRACE



Fonte: CSR (2015) em 08/10/2015

2.1.3 Princípio das Medições dos Satélites GRACE

O GRACE não utiliza para o monitoramento global o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres, preceito básico do Sensoriamento Remoto (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Em vez disso, a missão usa um sistema de variação de micro-ondas para medir com precisão as alterações na velocidade e distância entre as duas espaçonaves “gêmeas” (Figura 2). A intercomunicação entre os dois satélites é efetuada através de uma ligação na banda *K* no espectro das micro-ondas (TAPLEY et al., 2004), permitindo medir distâncias e variações de distâncias entre os dois satélites com uma precisão de poucos micrômetros (LIU, 2008).

Quando o primeiro satélite passa por uma região com gravidade ligeiramente mais forte, isto é, uma anomalia gravitacional, este o impele (empuxo) levemente mais para a frente do satélite que o segue. Causando assim, um aumento na distância entre os dois satélites. Então, o primeiro satélite, após passar a anomalia, retarda sua

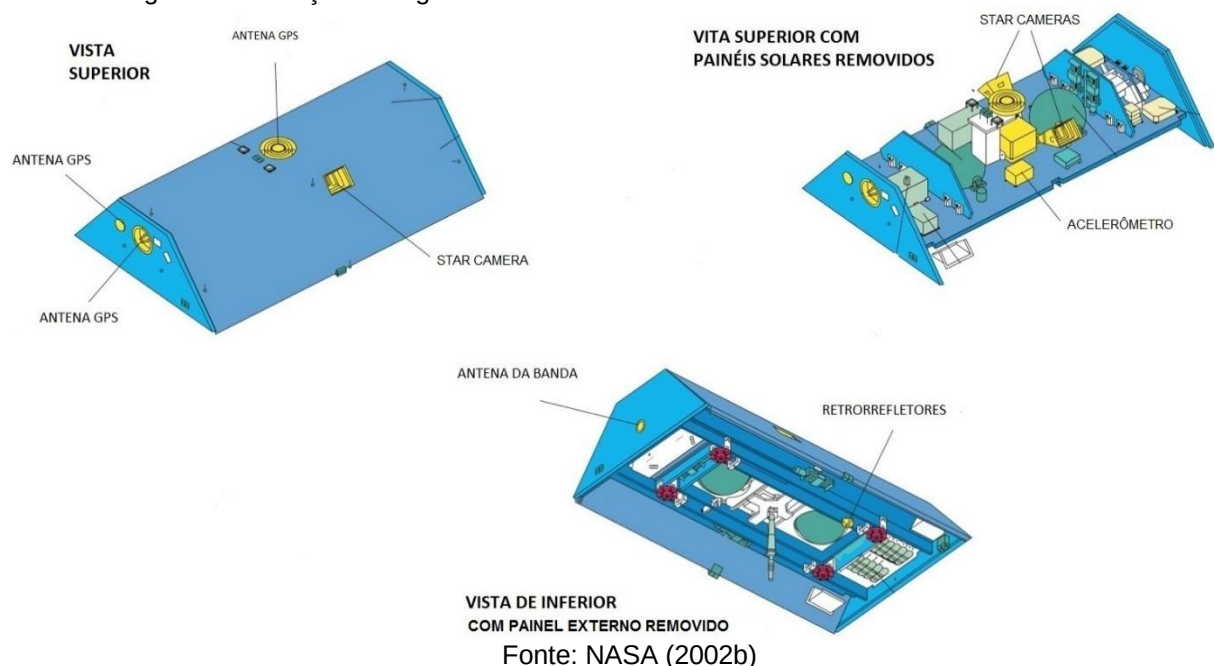
velocidade, enquanto que o outro acelera e reduz no mesmo ponto da alteração gravitacional (BONFIM; MOLINA, 2009).

Medindo a constante variação de distância entre os dois satélites e combinando com dados precisos de instrumentos de sistemas de satélites de posicionamento global (GNSS), são feitos os mapas detalhados das anomalias gravitacionais da Terra (SEEBER, 2003).

2.1.4 Instrumentos dos Satélites GRACE

Para remover o efeito de forças externas, não-gravitacionais (arrasto, pressão de radiação solar), os satélites usam sensíveis acelerômetros eletrostáticos. Receptores GPS são usados para estabelecer as posições precisas de cada satélite ao longo da linha de base entre os satélites. Para o controle de atitude (orientação de um objeto em relação a um referencial inercial ou outra entidade) os satélites usam magnetômetros e *Star Cameras* (ou *Star Tracker*, é um dispositivo de "referência celeste" que reconhece padrões estelares, tais como constelações). E retrorrefletores LASER são utilizados para comunicação com as bases de solo. Painéis solares que compõem o revestimento externo superior, fazem a função de captação de energia (NASA, 2002b). A Figura 6 mostra a distribuição destes instrumentos, citados acima, nos satélites.

Figura 6: Ilustração de alguns instrumentos abordo dos satélites da missão GRACE



2.1.5 Produtos Originados da Missão GRACE

Para se ter uma boa solução para o campo de gravidade, quanto a resolução espacial, é necessário a acumulação de dados de rastreamento dos satélites da missão por cerca de um mês. Sendo assim, os mapas do campo de gravidade terrestre formados a partir do GRACE são mensais (TAPLEY et al., 2004), mostrando variações no campo gravitacional não só de um local para outro, mas também temporalmente. Contudo soluções semanais, de 10 em 10 dias, de 2 em 2 semanas e outras também estão disponíveis.

As mudanças no campo de gravidade são causadas por redistribuição de massa dentro da Terra e em sua superfície e acima dela (WAHR et al., 1998). Em um perfil vertical onde a espessura da lâmina de água pode ter dimensões quilométricas as variações de massa mensais perto da superfície terrestre são pequenas, na ordem de centímetros. Então, os dados GRACE são apresentados como “equivalente à altura d’água” (*water equivalent thickness*), em unidades de comprimento (e.g., mm, cm), que refletem o armazenamento total de água, do inglês *Total Water Storage* (TWS).

Os produtos são apresentados na forma de malha (*grid*) e dentre suas aplicações podem ser utilizados para verificar o comportamento temporal das mudanças de massa em termos de superfície de equivalente à altura d’água (WAHR et al., 1998).

Os *grids* para continente (terras emersas e da criosfera) e oceano são apresentados separadamente. Onde sobre o oceano o TWS é interpretado como pressão de fundo do oceano e nos continentes é a soma de águas subterrâneas, umidade do solo, águas superficiais, neve e gelo (SWENSON et al., 2013), que junto com a água contida na biomassa são os principais componentes de armazenamento de água terrestre (RODELL; FAMIGLIETTI, 2001).

O campo de gravidade terrestre é usualmente expresso em termos de séries de harmônicos esféricos até um máximo grau N , o qual pode ser associado com um menor comprimento de onda resolvido λ , na superfície terrestre (SEEBER, 2003) de acordo com:

$$\lambda = \frac{360}{N} [^\circ] \quad (1)$$

Uma representação equivalente se refere a um determinado tamanho de bloco, S , em uma esfera em relação a valores médios representativos, tais como médias anomalias de ar livre (TORGE, 2001). O processamento dos dados dos satélites GRACE possui como saída coeficientes das funções harmônicas esféricas, ou coeficientes de Stokes, do campo de gravidade.

Outra solução para resolver as variações de gravidade em termos de harmônicos esféricos é a utilização como função de base radial de blocos de concentração de massa, ou “*mascons*” (*mass concentration blocks*). As soluções *mascons* fornecem resultados semelhantes aqueles das soluções globais por harmônicos esféricos, mas com a vantagem de não necessitarem de filtros adicionais, tais como suavização e retirada de listras (AWANGE et al., 2011).

Existem vários produtos processados dos dados da missão GRACE. Os três centros oficiais fornecem, por exemplo, o do chamado nível 2, que são resultados em forma de coeficientes das funções harmônicas esféricas (SWENSON et al., 2008). Os produtos em forma de *grid* são denominados de nível 3, possuem resolução espacial de 1x1 grau e apresentados no *Datum* WGS84 (SWENSON, 2012). A versão atual dos dados é de número 5.

Os dados *mascons* GRACE possuem dois processamentos JPL e GSFC (*Goddard Space Flight Center*), vinculados a NASA. O centro JPL disponibiliza soluções *mascons* de nível 1, versão 5 (WIESE et al., 2016), e o centro GSFC soluções *mascons* globais de versão 1 (LUTHCKE et al., 2013).

Existe apenas um campo gravitacional terrestre, contudo o que difere o processamento de um centro (CSR, JPL e GFZ) para o outro são as diferenças em estratégias de processamento e ajuste de parâmetros que resultam em soluções com variações regionais específicas e padrões de erro (SAKUMURA et al., 2014). Os mapas TWS invertidos (ou os valores de média regional), processados pelos centros, a partir das soluções por coeficientes estão sendo usados em muitas aplicações, no entanto, como apresentados em muitos casos não existem dados *in situ* confiáveis, tornando as incertezas para algumas aplicações desconhecidas (FERREIRA et al., 2016).

Em 2002 quando os satélites da missão GRACE começaram a fornecer observações sobre o campo gravimétrico terrestre os equipamentos ainda estavam passando por ajustes ocasionando meses sem dados e somando-se a isso existem

certos meses em que a órbita dos satélites possuem um padrão de quase repetição ou sobreposição de outra órbita já percorrida e isto causa erros nos coeficientes das funções harmônicas esféricas maiores.

Outra condição que ocasiona meses faltantes nas observações desde 2011 é o envelhecimento das baterias, que precisam ser reajustadas com mais frequência. A Tabela 1, a seguir, expõe os meses faltantes desde o primeiro mês de dados fornecidos, isto é abril de 2002.

Tabela 1: Meses faltantes de dados da missão GRACE

ANO	MESES FALTANTES
2002	junho, julho
2003	junho
2011	janeiro, junho
2012	maio, outubro
2013	março, agosto, setembro
2014	fevereiro, julho, dezembro
2015*	junho, outubro, novembro

* 2015 possui dois processamentos para abril

Nota-se que de julho de 2003 a dezembro de 2010 não houveram meses sem dados. Há uma pequena ressalva: maio de 2015 que efetivamente não teve dados, contudo abril do mesmo ano teve dois dias de processamento de dados (16 e 27), este último podendo ser utilizado como referência do mês subsequente.

2.1.6 Aplicações dos Dados da Missão GRACE

As estimativas do campo de gravidade da Terra utilizando o GRACE, são utilizadas para discriminar as variações temporais de alterações de massa na Terra, ocorridas devido a diferentes processos geofísicos. Exemplos incluem a discriminação dos efeitos decorrentes do aumento do nível do mar, armazenamento de água continental, alterações em mantos de gelo e outros fenômenos geofísicos (JPL, 1998).

As variações temporais do campo da gravidade terrestre obtidas a partir das observações dos satélites da missão GRACE fornecem informações que podem ser aplicadas em diversas áreas do conhecimento tais como: Oceanografia, Hidrologia e Geologia. Como exemplos citam-se: variações de massa nas calotas polares, monitoramento dos recursos hídricos, estudos das correntes oceânicas superficiais e de profundidade, mudanças no nível médio do mar, entre outros estudos de caso que são citados em Ward (2004).

2.1.7 Decaimento da Órbita/ Sucessor dos Satélites GRACE

A altitude dos satélites GRACE tende a decair ao longo do tempo (≈ 30 m/dia), pois, os veículos espaciais estão expostos a forças superficiais, em particular o arrasto de ar, causado pela resistência das partículas das altas camadas da atmosfera, entre outras causas (SEEBER, 2003). Os satélites são mantidos em suas órbitas, através de manobras programadas conforme uma altitude adequada (TAPLEY et al., 2004).

Além do decaimento da órbita o que pode decretar o fim da primeira missão GRACE existem outros fatores tais como: atividades solares, condições dos instrumentos e a vida útil das baterias. Está programado para que os satélites da primeira missão sejam substituídos através do projeto sucessor chamado de GRACE *Follow-On* (GRACE-FO), com agendamento para o seu lançamento em agosto de 2017 (FLECHTNER et al., 2014).

A órbita e o formato dos satélites desta nova geração serão similares aos atuais. Contudo, além do sistema de medidas utilizando micro-ondas, o GRACE-FO será a primeira missão contendo um interferômetro a LASER para mensurar as alterações de distâncias entre os satélites, buscando-se assim uma melhora considerável na precisão (SCHÜTZE, 2016).

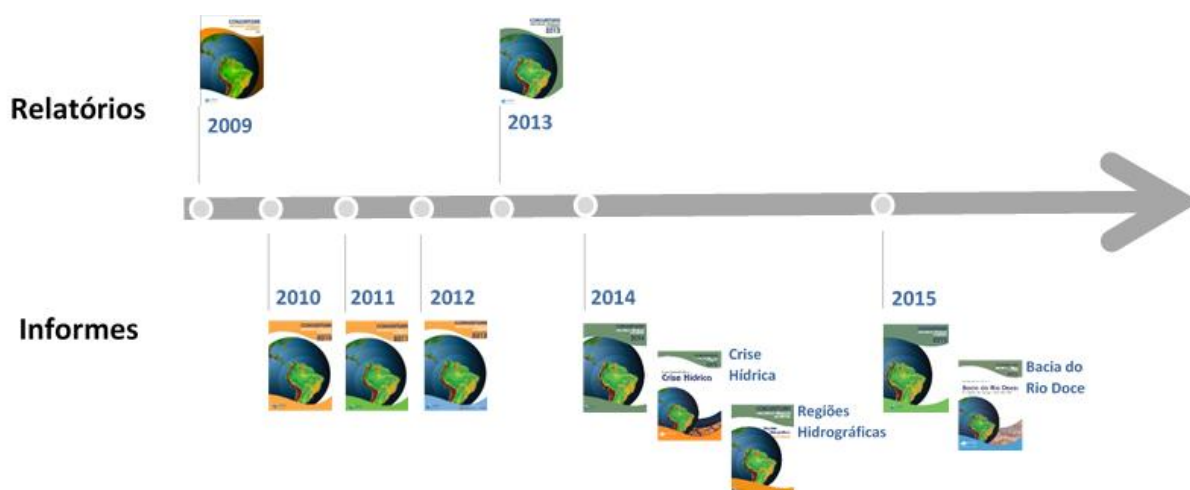
2.2 RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

Para cumprir com um dos objetivos específicos proposto na presente dissertação que diz respeito a comparação de observações temporais da missão GRACE com dados *in situ* sobre os recursos hídricos brasileiros, foi necessário um estudo referente a sua fonte, metodologia de aquisição destes dados.

No Brasil o órgão responsável por fornecer dados geoespaciais sobre os recursos hídricos, segundo o Plano de Ação para Implantação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais – INDE (CINDE, 2010), é do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) e da Agência Nacional de Águas (ANA). O CNRH tem por objetivo promover a integração do planejamento de recursos hídricos nos níveis nacional, regional e estadual e também entre os setores de usuários. A ANA é responsável pela implementação do Plano Nacional de Recursos Hídricos formulado pelo CNRH.

Em meio as competências da ANA estão: organizar, implantar e gerir o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), e neste está, dentre seus objetivos, atualizar permanentemente informações sobre disponibilidade e demanda dos recursos hídricos. Para isso são publicados os relatórios de Conjuntura dos Recursos Hídricos desde 2009, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7: Esquema de publicação da dinâmica de elaboração dos Relatórios Conjuntura dos Recursos Hídricos



Fonte: ANA (2015c)

Na conjuntura de 2009 (ANA, 2009), considerada como marco zero, foram apresentadas informações reunidas de outubro de 2006 a setembro de 2007 (ano hidrológico 2007) as mesmas são confrontadas com observações de valores médios de 1961 a 2007. Nos informes de 2010 (ANA, 2010), 2011 (ANA, 2011) e 2012 (ANA, 2012) são apresentadas informações dos anos anteriores as publicações de cada um, isto é, 2009, 2010 e 2011, respectivamente. O relatório da conjuntura de 2013 (ANA, 2013) apresenta os dados de 2012 e a relação com a média do triênio considerado de 2010 a 2012, fazendo assim, um balanço desses últimos 4 anos. O informe de 2014 (ANA, 2015a) apresenta os dados de 2013 e o de 2015 (ANA, 2015d) refere-se ao ano hidrológico de 2014.

Nos relatórios de conjuntura os dados são apresentados conforme a região hidrográfica Brasileira. A Região Hidrográfica Brasileira foi determinada como o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (CNRH, 2003). As 12 regiões hidrográficas brasileiras são: Amazônica, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná, Parnaíba, Atlântico Nordeste

Oriental, Atlântico Nordeste Ocidental, Atlântico Leste, Sudeste, Atlântico Sul, Uruguai e Paraguai (Figura 8).

Figura 8: Regiões Hidrográficas Brasileiras



Fonte: CNRH (2003)

O conceito de bacia hidrográfica diz respeito a uma área de captação natural da água de precipitação que faz convergir o escoamento para um único ponto de saída, quando exorreica. A bacia hidrográfica compõe-se de um conjunto de superfícies vertentes e de uma rede de drenagem formada por cursos de água, que confluem até resultar em um leito único no seu exutório (TUCCI, 1997).

Em meio as inúmeras informações apresentadas nos relatórios de conjuntura a selecionada como pertinente a essa dissertação diz respeito sobre a disponibilidade hídrica brasileira ano a ano. Os dados de disponibilidade de água são subdivididos entre águas superficiais e subterrâneas. Os subcapítulos, 2.2.1 e 2.2.2, a seguir, discorrem sobre como são agregados os dados de disponibilidade hídrica para cada uma dessas subdivisões.

2.2.1 Disponibilidade de Águas Superficiais

O cálculo de disponibilidade hídrica superficial é baseado nas séries de vazões naturais das principais bacias do Sistema Interligado Nacional e nos dados pluviométricos e fluviométricos do Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas (ANA, 2009).

A disponibilidade hídrica de águas superficiais em uma bacia é calculada como sendo a vazão regularizada pelo sistema de reservatórios a montante da seção de interesse, com 100% de garantia, somada à vazão incremental de estiagem (vazão com permanência de 95%, no trecho não regularizado). Em rios onde não existe regularização, a disponibilidade hídrica é considerada como igual à vazão de estiagem (ANA, 2009).

A vazão de estiagem (com permanência de 95%) é calculada a partir das séries de vazões naturais nas bacias Tocantins/Araguaia, São Francisco e Paraná e nas demais bacias em estações fluviométricas existentes (ANA, 2009).

2.2.2 Disponibilidade de Águas Subterrâneas

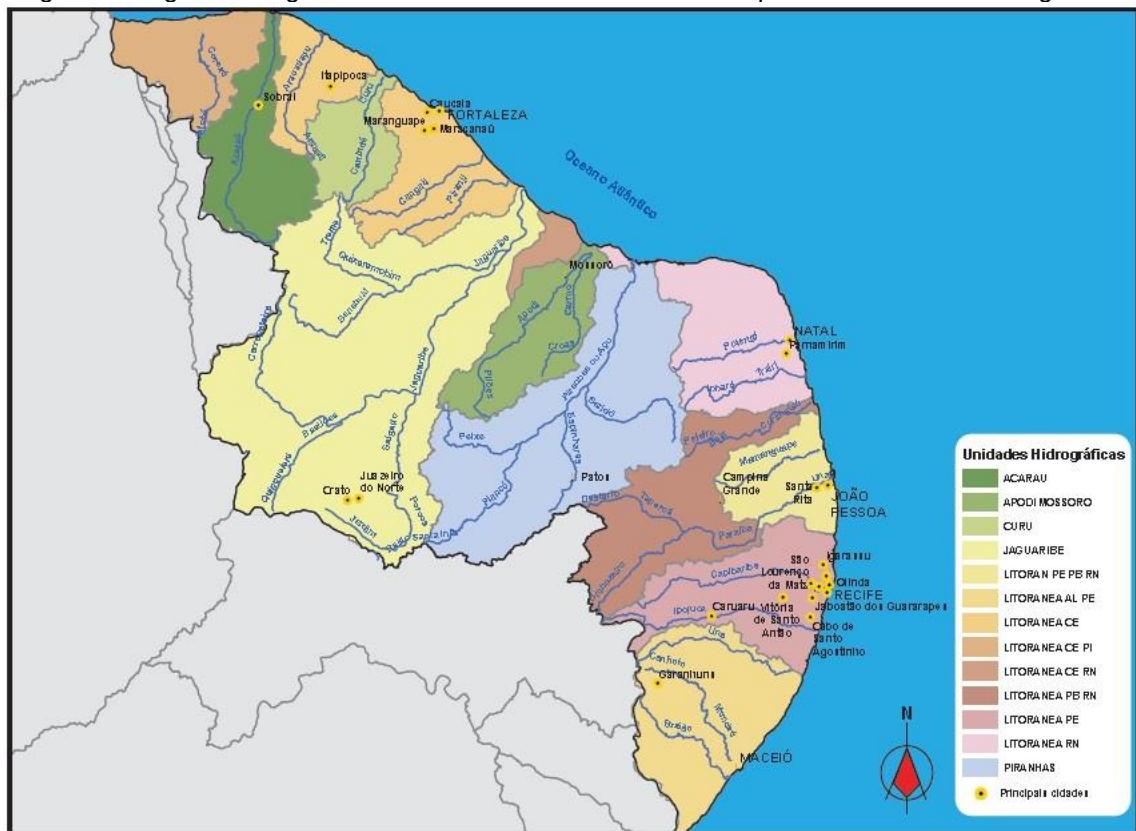
Para a estipulação, em termos globais, da disponibilidade de águas subterrâneas no país, usam-se os indicadores: vazão explotável, reserva renovável e o total de poços profundos existentes. Admite-se que a disponibilidade hídrica corresponde a 20% das reservas renováveis, desconsiderando a contribuição das reservas permanentes. Os principais aquíferos do país e suas potencialidades são estimados a partir do Mapa Geológico e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, além dos dados fluviométricos e pluviométricos acima mencionados (ANA, 2005).

Cabe destacar, que as disponibilidades hídricas superficial e subterrânea, para fins de análise, não podem ser somadas para fornecer um valor de disponibilidade total. Na verdade, a disponibilidade hídrica superficial inclui, no seu valor, a disponibilidade subterrânea, haja vista que esta representa uma parte do escoamento de base dos rios.

3 ÁREA DE ESTUDO

A Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, foco de estudo da presente dissertação, abrange uma pequena parte do litoral do estado do Piauí, quase a totalidade do Ceará, todo o Rio Grande do Norte e Paraíba, a porção litorânea de Pernambuco e parte de Alagoas (Figura 9). É limitada a sul pela região hidrográfica do São Francisco e a oeste pela do Parnaíba. O regime pluviométrico é caracterizado por um período com maiores precipitações, em geral o primeiro semestre do ano, e com pouca ou nenhuma precipitação, no segundo semestre (ANA, 2013).

Figura 9: Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental e respectivas unidades hidrográficas



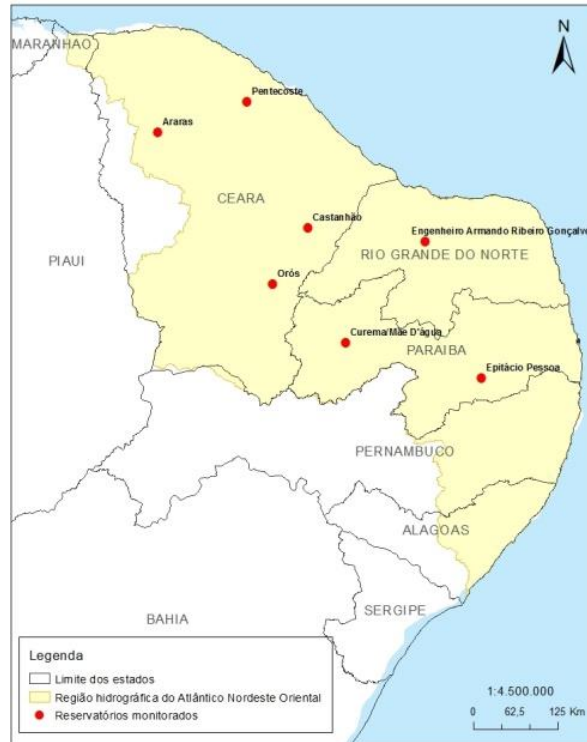
Fonte: ANA (2015c).

Como o regime de precipitações é bem peculiar entre as diferentes regiões geográficas brasileiras e estes regimes climáticos são constituintes importantes da disponibilidade hídrica em cada região, caso o levantamento de dados e os consequentes cálculos fossem feitos para todo o Brasil, o resultado iria expressar uma média nacional em vez de mostrar particularidades locais.

Na área de estudo localizam-se diversos reservatórios. A Figura 10 apresenta a localização de alguns existentes, entre eles: Araras, Pentecostes, Castanhão e Orós

no estado do Ceará, Barragem Armando Ribeiro Gonçalves no Rio Grande do Norte e Coremas/ Mãe D'Água e Eptácio Pessoa na Paraíba.

Figura 10: Reservatórios na área de estudo



A Tabela 2 apresenta a capacidade máxima de cada um dos açudes mostrados na Figura 10, sendo que o maior deles, o Castanhão no Ceará, tem capacidade máxima de 6.700 Hm³, cobre uma área de 323,4 Km² (ANA, 2012) e abastece a região metropolitana de Fortaleza (ANA, 2015c), com população estimada em $\cong$ 3,82 milhões de habitantes, sendo a 8ª maior do país (IBGE, 2014).

Tabela 2: Capacidade dos reservatórios da Figura 7

RESERVATÓRIO	UF	Hm ³
Araras	CE	859
Pentescostes	CE	360
Castanhão	CE	6.700
Orós	CE	1.940
Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves	RN	2.400
Coremas/ Mãe D'Água	PB	1.358
Eptácio Pessoa	PB	412

Fonte: ANA (2009)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Para uma coordenação dos trabalhos que foram executados objetivando atingir os propósitos expostos para esta investigação, dividiu-se em três etapas principais a organização da parte metodológica, sendo elas: estudo do tema, levantamento de dados e tratamentos dos dados, que são apresentados esquematicamente no fluxograma da Figura 11, que por sua vez mostra as subdivisões em cada uma das etapas. A seguir cada um destes itens serão explanados com mais detalhes.

Figura 11: Fluxograma de metodologia dos trabalhos do projeto



(i) Estudo do tema

Se refere a parte de levantamentos bibliográficos sobre o assunto de estudo (missão GRACE e recursos hídricos brasileiros, órgãos gestores destes no país), que foram previamente apresentados no capítulo 2, delimitação da área de estudo (capítulo 3), determinação do período de análise das séries temporais (2002 a 2015) e planejamento metodológico (levantamento e tratamento dos dados, apresentados neste capítulo 4).

(ii) Levantamento de dados

Compreendeu a obtenção das informações oriundas da missão GRACE e dos gestores de recursos hídricos brasileiros na área e período selecionados. Os dados adquiridos tiveram um direcionamento quanto a segmentação destes, ou seja, mês a mês e/ou ano a ano, isto para facilitar na seguinte etapa de tratamento dos dados.

(iii) Tratamento de dados

Nesta fase os dados coletados foram tratados e interpretados. Nesta etapa foi feito a comparação entre os resultados obtidos da missão GRACE com os disponibilizados pelos órgãos gestores dos recursos hídricos no país bem como as análises referentes a solução mascons GRACE comparando com observações dos reservatórios na região hidrográfica *in situ*. A avaliação da equiparidade qualitativa entre as diferentes fontes serviu como subsídios no processo de validação das diferentes metodologias.

4.1 SÉRIES TEMPORAIS

Neste subitem são apresentadas como foram organizadas as informações temporais. Entende-se como série temporal o conjunto de observações ordenadas no tempo, e para este estudo considerada de forma discreta, ou seja, obedecendo um espaçamento de forma contínua em relação ao tempo. Para apresentar as séries temporais, optou-se em dividi-las em 4 subitens, sendo eles: observações GRACE processadas pelo laboratório CSR, GRACE oriundas dos *mascons*, os relatórios anuais das conjunturas disponíveis pela ANA e as observações temporais obtidas para os reservatórios selecionados na área de estudo.

4.1.1 GRACE CSR

Os dados da missão GRACE (SWENSON, 2012, LANDERER; SWENSON, 2012, SWENSON; WARH, 2006) são disponibilizados gratuitamente via página própria (<<http://grace.jpl.nasa.gov/>>), vinculada ao JLP, centro tecnológico responsável pelo desenvolvimento e controle dos satélites não tripulados da NASA,

com suporte do programa MEaSURESs. Os produtos de dados utilizados foram de nível 3, versão 5, de formato digital GeoTIFF.

Dos dados disponibilizados pelos três centros de processamento (CSR, P JL, GFZ), na versão atual, optou-se por escolher e aplicar apenas um deles, no caso CSR.

Ferreira et al. (2016) avaliaram a qualidade de cada centro de processamento, estimando-se suas incertezas e obtiveram como resultados, para um período de análise que foi de agosto de 2002 a junho de 2014, indicando que em uma escala global, o CSR, GFZ, GRGS (outro centro de processamento), e JPL apresentaram incertezas de 9,4; 13,7; 14,8 e 13,2 mm, respectivamente.

Com o intuito de analisar a variação de equivalente à altura d'água, ou TWS, para Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental de 2002 a 2015 e calcular o equivalente à altura d'água mês a mês, utilizou-se todos os dados disponibilizados pela missão GRACE, isto é, 149 meses, descontados os meses faltantes (Tabela 1), que foram interpolados nos gráficos temporais.

Para quantificar os valores de equivalente à altura d'água para a região de estudo, fez-se necessário selecionar somente os *pixels* (ou células) dos *rasters*, que estão inseridos na área alvo de cada um dos meses de dados disponíveis. O arquivo com a delimitação (polígono) da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental foi obtido da biblioteca virtual da Agência Nacional de Águas. Deste, obteve-se o valor total de área sendo igual a 285.702,7 km², ou seja, superior a 110x103 km² que é a resolução nominal da missão para este caso.

O cálculo das estatísticas de equivalente à altura d'água mês a mês, de 2002 a 2015 foram feitas no *software* de SIG através de análise espacial por estatística zonal, ou regional, de cada um dos meses processados. A estatística zonal permite calcular valores de vários *pixels* de um *raster* com ajuda de uma camada poligonal. Fornecendo informações de soma, valor máximo, valor mínimo, valor médio, desvio padrão e contagem total dos *pixels* que estão dentro do polígono.

O somatório representa a soma do valor de armazenamento d'água de todos os *pixels* selecionados. O valor máximo e mínimo diz respeito ao *pixel* com maior e menor valor dentre os analisados. A média aritmética corresponde ao valor correspondente do somatório dos *pixels* dividido pela quantidade destes e o desvio padrão refere-se a medida de dispersão em torno da média.

Através das estatísticas como média, máximo e mínimo mês a mês dos *pixels* inseridos na RHANO foram feitos os gráficos da série temporal (capítulo 5).

4.1.2 Mascons GRACE

Os *mascons* GRACE também são disponibilizados gratuitamente, contudo via página da CCAR (*Colorado Center For Astrodynamics Research*), da Universidade do Colorado, EUA (<<http://ccar.colorado.edu/grace/>>).

Para usar a ferramenta de visualização do *mascons*, é necessário selecionar a localização clicando no mapa interativo na página principal (*site*) do CCAR e após isso inserir, no formulário de pesquisa ao lado do mapa, as coordenadas (latitude e longitude) em graus decimais, do local a ser analisado. A área é indicada no mapa e depois de selecioná-la em outra janela é representado o gráfico com a série temporal. Destaca-se que para a solução *mascons* existem duas opções de processamentos, a do centro JPL e do GSFC, para essa dissertação, neste caso, optou-se por apresentar o resultado das duas.

4.1.3 Disponibilidade Hídrica Reportada nos Relatórios da ANA

As informações a respeito da disponibilidade dos recursos hídricos do Brasil estimados de forma direta foram obtidas, através dos dados públicos, na página (*site*) da ANA na *internet* sobre as Conjunturas de Recursos Hídricos (<<http://conjuntura.ana.gov.br/>>) conforme indicado no item 2.2.

Foram feitas análises minuciosas dos relatórios, atentando para a RHANO, nos quesitos disponibilidade hídrica, precipitação e reservatórios.

Os dados dos anos hidrológicos reportados nas Conjunturas e Informes da Ana (2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015a, 2015b, 2015d) foram então comparados qualitativamente com os gráficos das séries temporais obtidas pelo GRACE.

4.1.4 Séries Temporais dos Reservatórios

Para complementar o estudo e análises sobre a RHANO foram adquiridas observações sobre a disponibilidade de água em alguns reservatórios da área de estudo que estão representados na Figura 10. Estas informações foram obtidas através do site da Agência Nacional de Águas (ANA). Das informações coletadas

sobre os reservatórios foram elaborados gráficos temporais, que indicam a variação do armazenamento d'água nos reservatórios representados em percentagem (%). Neste caso foi considerado o período entre 2002 a 2015 e os seguintes meses: abril, maio, novembro e dezembro.

4.2 CÁLCULO DOS EXTREMOS 2002 E 2015

Como a finalidade de quantificar a perda ou ganho de disponibilidade hídrica na região, utilizando o GRACE, fez-se um outro tipo de processamento. Este envolveu selecionar apenas 2 meses de 2015 e 2 meses de 2002, que fossem equivalentes, compondo os anos extremos das informações trabalhadas.

A diferenciação da disponibilidade hídrica do mesmo mês (ou próximos), mas de anos diferentes foi feita de duas formas: uma que utilizou a ferramenta de álgebra de mapas (uso de expressões matemáticas, contendo operadores e funções com dados *raster*), onde se fez a subtração da imagem matricial (*raster*) de uma época (abril e dezembro de 2015) pela da outra (maio e novembro de 2002) e o segundo tipo que quantificou matematicamente a variação de volume de abril e dezembro de 2015 com relação a maio e novembro de 2002.

A segunda forma de processamento, apresentada anteriormente, teve como primeira etapa o cálculo das estatísticas de equivalente à altura d'água de maio e novembro de 2002 e de abril e dezembro de 2015 e da diferença dos meses dos anos extremos (2015 menos 2002 dos meses escolhidos), para se ter a informação de perda ou ganho de volume médio por *pixel*, feito através da estatística zonal e os resultados são apresentados no subcapítulo 5.3. A mudança no volume equivalente à altura d'água dos extremos, V_{B-A} ou ΔV , é a perda ou ganho de equivalente à altura d'água médio dos *pixels* da área entre os extremos, $TWSe$, multiplicado pela área, A , de acordo com:

$$\Delta V = (TWSe)A \quad (2)$$

Por fim, as séries temporais dos reservatórios foram comparados com a dos *mascons*.

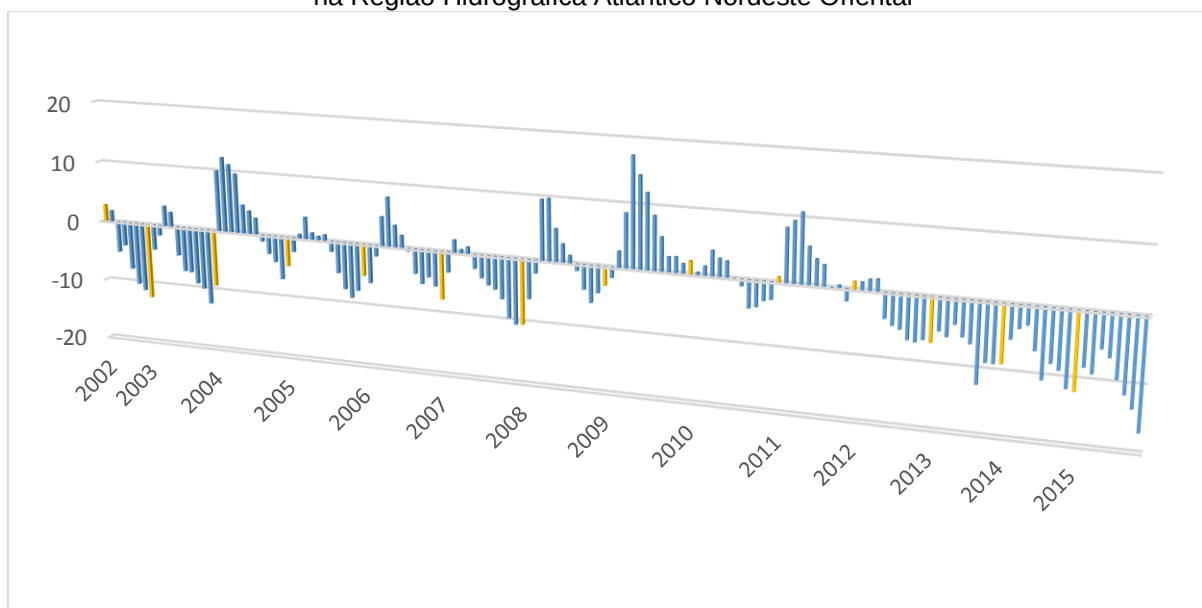
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A primeira parte do processamento GRACE para os 149 meses considerando o intervalo de 2002 a 2015 proveu estatísticas contendo os valores mínimos, máximos, média aritmética e desvio padrão de equivalente à altura d'água, referentes aos 27 *pixels* que se inserem na delimitação da área de estudo. O apêndice A agrega todos estes resultados e os subitens 5.1, 5.2 e 5.3, abordam as análises feitas. No subitem 5.4, são apresentadas as análises confrontando os elementos divulgados pela Agência Nacional de Águas com a série temporal GRACE CSR. No subitem 5.5 são apresentados os resultados e análises das séries temporais contendo o comportamento do volume de água dos reservatórios que se localizam na área de estudo (Figura 10), bem como a série temporal GRACE *mascons*, abrangendo a área dos reservatórios.

5.1 SÉRIE TEMPORAL

O gráfico da Figura 12 apresenta todos os meses da série temporal (2002-2015) agregados, considerando a média de TWS dos *pixels* da RHANO.

Figura 12: Gráfico apresentando a média mensal de equivalente à altura d'água (cm) de 2002 a 2015 na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental



Em amarelo estão indicados o início das observações mensais para cada ano.

Fonte: GRACE CSR

Nota-se no gráfico da Figura 12, que foi feito com base nos dados da tabela do Apêndice A, que o equivalente à altura d'água apresenta uma certa regularidade entre os anos de 2002 a 2008, conforme suas variações sazonais. Observa-se um leve acréscimo de 2009 a 2011 e um declínio acentuado a partir de 2012 até 2015.

5.2 GRÁFICOS ANUAIS

Dos elementos estatísticos apresentados no apêndice A, fez-se gráficos anuais, no *software Excel*, da série temporal considerando as informações dos valores mínimos, máximos e médios de equivalente à altura d'água e que podem ser observados no Apêndice B, que agrega todos os gráficos. Onde no eixo *X* estão representadas as variações temporais mês a mês, conforme o ano indicado acima no gráfico e no eixo *Y* a variação de espessura d'água em centímetros.

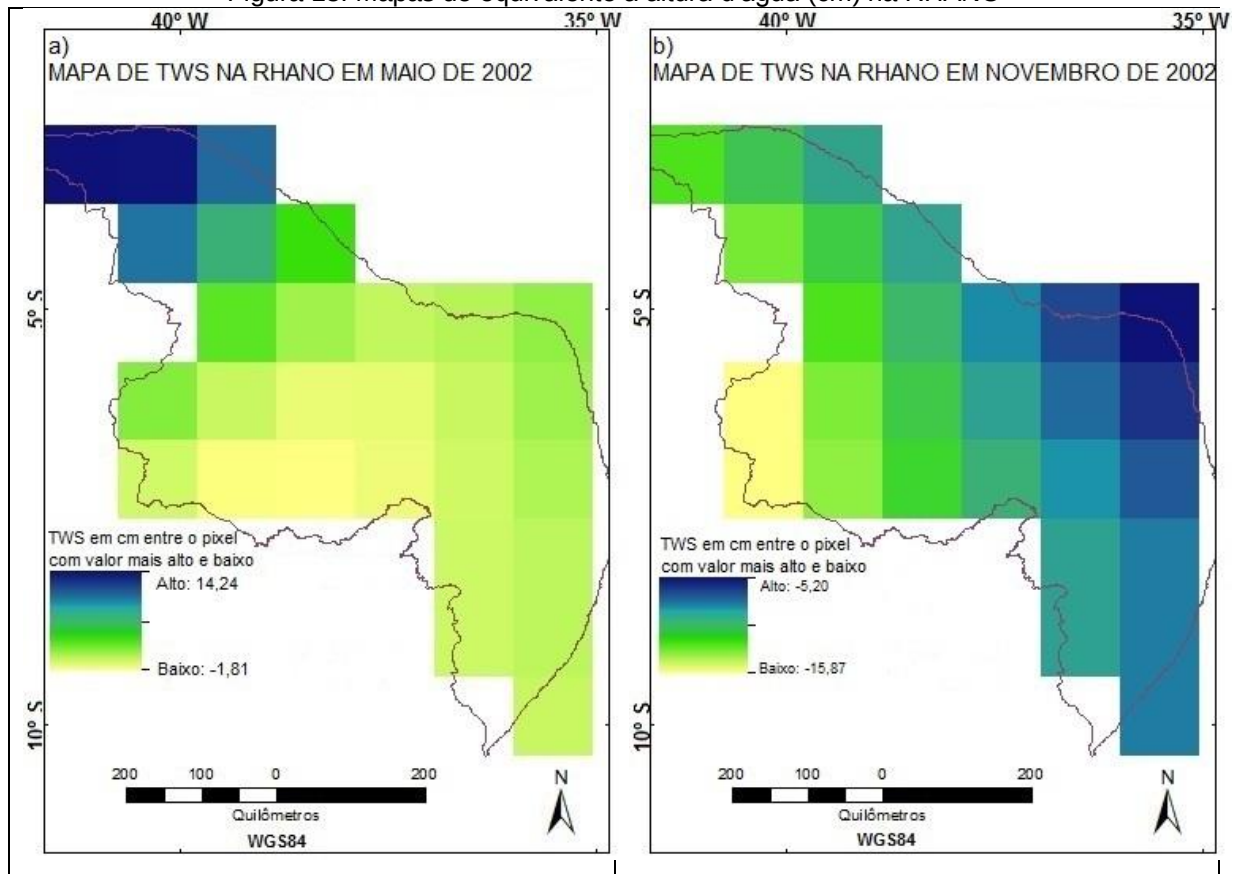
Nestes gráficos mês a mês subsequentes durante cada ano a variação de equivalente à altura d'água exibem a modificação mensal anual na disponibilidade dos recursos hídricos da região, que refletem a alternância sazonal anual dos períodos de maiores e menores precipitações. Ou seja, indicam que o primeiro semestre anual na região é o período com maior disponibilidade hídrica, consequência do maior volume de precipitações com ápice nos meses de maio a junho, com sutis deslocamentos para os meses antecedentes ou posteriores nos 14 anos analisados. Seguindo a mesma linha de análise o segundo semestre apresenta-se com baixas quantitativas na disponibilidade hídrica, por causa do pouco ou inexistente volume de precipitações, tendo seu ponto mais baixo em torno de outubro de cada ano. Esta constatação veio a ser coerente com o expresso no Relatório da Conjuntura de Recursos Hídricos de 2013 (ANA, 2013) referentes aos regimes de precipitação sazonais na RHANO.

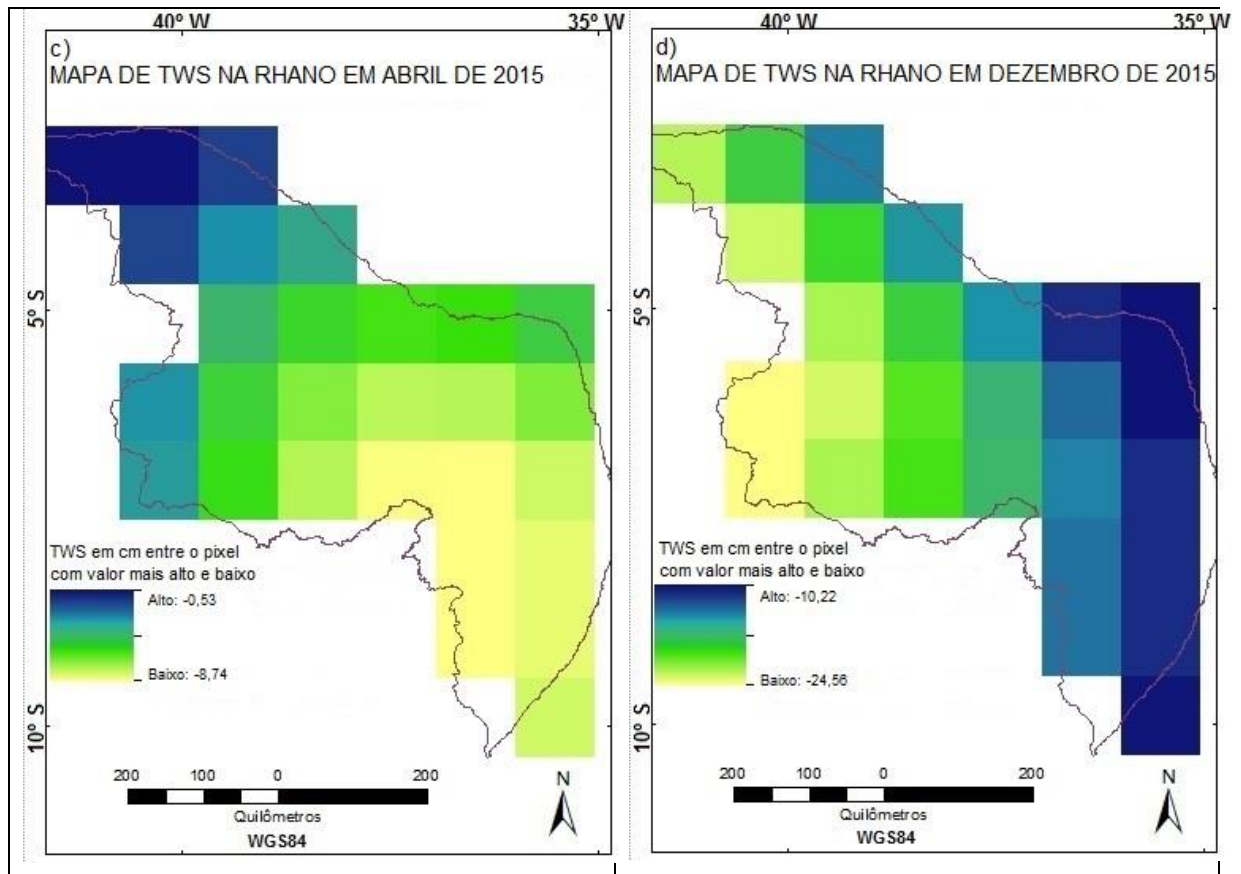
Além da informação retirada dos gráficos, exposta no parágrafo anterior, a concepção deles facilitou a execução da comparação como os Relatórios de Conjuntura da ANA (subcapítulo 5.4).

5.3 COMPARATIVO DOS EXTREMOS DA SÉRIE TEMPORAL ANALISADA (2002 e 2015)

Identificados os meses sazonais com maiores curvas de inflexões, máxima e mínima, de equivalente à altura d'água, das Figuras 12 e do Apêndice B, no caso, finais de primeiro e segundo semestres do ano, fez-se um novo processamento para quantificar o equivalente à altura d'água nestes momentos temporais. A Figura 13 apresenta os mapas da situação de equivalente à altura d'água (cm), na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental no final do primeiro e segundo semestres de 2002 e 2015.

Figura 13: Mapas de equivalente à altura d'água (cm) na RHANO





Ao observar durante o mesmo ano a variação de equivalente à altura d'água é possível destacar a variação sazonal anual. Considerando períodos de maiores e menores precipitações (comparações “a” com “b” para 2002 e “c” com “d” para 2015 na Figura 13).

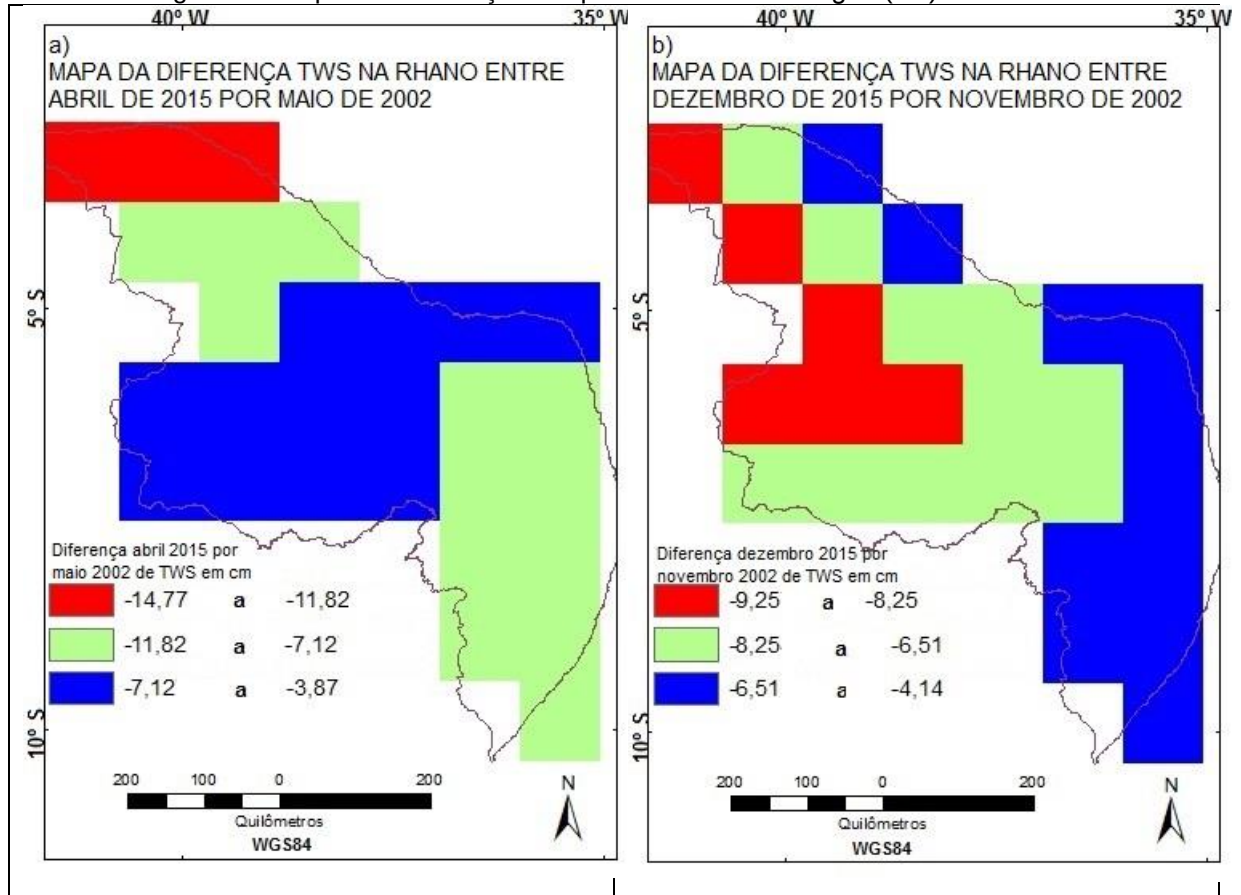
No entanto, na comparação entre o mesmo mês, ou próximos, mas de anos diferentes (“a” com “c” e “b” com “d” na Figura 13), nota-se a diferença que reflete em uma mudança no comportamento hídrico entre os extremos analisados (2002 com relação a 2015).

Fez-se, então, outro experimento para uma melhor visualização e quantificação do que foi explanado anteriormente. A Figura 14 apresenta os resultados da subtração da imagem matricial de equivalente à altura d'água de abril de 2015 por maio de 2002 e de dezembro de 2015 por maio de 2002.

As comparações temporais apresentadas na Figura 14 mostraram que a porção noroeste da Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental está com as maiores diferenças em equivalente à altura d'água, o que reflete uma grande variabilidade entre a quantidade de precipitação sazonal na região ao longo do intervalo de 14 anos, 2002-2015, e tem como consequência uma diferenciação na quantidade de reserva

de água disponível. A porção sul apresentou pouco variabilidade e a central com nível intermediário, contudo todas apresentaram redução entre 2002 e 2015 no que concerne a disponibilidade hídrica.

Figura 14: Mapas de diferença de equivalente à altura d'água (cm) na RHANO



a) abril de 2015 por maio de 2002 e b) dezembro de 2015 por novembro de 2002. O vermelho, verde e azul mostram, respectivamente, onde houve maiores, intermediárias e menores diferenças entre 2015 e 2002

A partir do cálculo estatístico, obteve-se a média de perda de equivalente à altura d'água por *pixel*, resultando em uma diferença entre os anos extremos considerados de -8,3 cm para maio e -6,7 cm para novembro. O sinal negativo indica perda de volume de água, haja vista que foi subtraído os dados de 2015 menos 2002.

Sendo assim, a variação hídrica entre maio de 2002 com relação a abril de 2015, de acordo com a fórmula (2), teve como resultado uma perda no volume de água na região na ordem de $\pm 23,71 \text{ km}^3$ ($23710,40 \text{ hm}^3$) e na comparação de novembro de 2002 com dezembro de 2015 a perda na disponibilidade hídrica foi de $\pm 19,25 \text{ km}^3$ ($19246,11 \text{ hm}^3$). Para se ter uma ideia comparativa o maior açude do Brasil, o Castanhão no estado do Ceará, possui uma capacidade 6700 hm^3 (ANA, 2009) e abastece a região da Grande Fortaleza (ANA, 2015c). Ou seja, os valores encontrados indicam uma perda considerável de volume de água na região.

5.4 DISPONIBILIDADE HÍDRICA DIVULGADOS PELA ANA

As informações apresentadas pela ANA nos Relatórios de Conjunturas dos Recursos Hídricos e seus informes foram confrontadas qualitativamente com os dados da missão GRACE. As análises na RHANO foram baseadas de acordo com o ano hidrológico no que diz respeito a precipitação e a situação dos reservatórios com o equivalente temporal apresentados nos gráficos dos subcapítulos 5.1 e 5.2. Destaca-se que nos relatórios da ANA a água superficial é separada da água subterrânea e essas duas não podem ser somadas para se ter um valor geral da disponibilidade hídrica.

No que se refere a disponibilidade hídrica superficial, descrita no subcapítulo 2.2.1, todos os relatórios da ANA expõem um mesmo valor global para o Atlântico Nordeste Oriental, como sendo de 91 m³/s (ANA, 2009). Isto por que é adotado que há pouca alteração anual dos valores de disponibilidade hídrica nas regiões hidrográficas brasileiras (ANA, 2010).

Quanto as águas subterrâneas os relatórios são uniformes em afirmar que para o semiárido brasileiro, o qual se insere a Região Hidrográfica em estudo, a disponibilidade é baixa, devida a ocorrência majoritária das rochas cristalinas em detrimento das sedimentares, isto é, pouca ocorrência de substrato rochoso ideal para a composição de aquíferos.

O regime de precipitações de uma região influi diretamente no volume dos reservatórios e o cenário de 2007 a 2014 (capítulo 2.2) descrito nas conjunturas e informes são expostos a seguir:

- CONJUNTURA DE 2009

Na primeira Conjuntura dos Recursos Hídricos (ANA, 2009), na parte de conclusões, onde é comentado sobre eventos críticos, cita-se que durante o ano hidrológico de 2007 (outubro de 2006 a setembro de 2007), 788 municípios brasileiros tiveram decretada situação de emergência devido à ocorrência de eventos críticos referentes à estiagem e seca, correspondendo a 14% do total de municípios do país. A maioria desses municípios estão localizados na região Nordeste (semiárido nordestino), representando 88% do total, abrangendo as regiões hidrográficas do

Parnaíba, São Francisco, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Leste e parte do Tocantins-Araguaia.

Outro ponto salientado no documento que reafirma a condição de ano hidrológico com déficit de disponibilidade hídrica se refere aos reservatórios da região apresentando uma diminuição equivalente em todos analisados. A Paraíba teve a maior variação negativa (13%), seguida pelo Rio Grande do Norte (11%). O estado do Ceará, que possui a maior capacidade de armazenamento no Nordeste, apresentou os menores valores percentuais do reservatório equivalente tanto no início (63%) quanto no final (54%) do ano hidrológico (ANA, 2009).

- INFORME DE 2010

Este informe refere-se ao ano hidrológico de 2008-2009 (outubro de 2008 a setembro de 2009). Nele são apresentados os problemas de estiagem na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, porém em menor quantidade que o relatório precedente. Ceará e Pernambuco são citados como Unidades da Federação com maior número de municípios em situação de emergência devido a problemas de seca/estiagem (ANA, 2010). No caso dos reservatórios monitorados no Nordeste foi observado um leve acréscimo ($< 5\%$) no volume armazenado.

- INFORME DE 2011

Este informe refere-se ao ano hidrológico de 2009-2010 (outubro de 2009 a setembro de 2010) e é apresentado que com relação à análise dos desvios anuais e semestrais de precipitações, estes revelaram a ocorrência de desvios abaixo da média histórica na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental (ANA, 2011). Contudo, apesar de não pertencer ao ano hidrológico supracitado o informe revela informações sobre o último trimestre do ano de 2010, onde os desvios positivos foram registrados na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental. O volume de armazenado dos reservatórios apresentaram um decréscimo para o ano hidrológico 2009-2010.

- INFORME DE 2012

Continuando com o objetivo de atualizar anualmente os dados expostos na conjuntura de 2009 e os informes subsequentes, 2010 e 2011, o de 2012 contou com informações até dezembro de 2011.

Em 2011, de janeiro a dezembro, foi observado um acréscimo de 9,3% no volume inicial armazenado nos reservatórios (ANA, 2012). Esse aumento, deve-se,

em parte, ao significativo acréscimo do volume acumulado de grandes reservatórios localizados nos estados do Ceará (Castanhão, Orós, Banabuiú) e do Rio Grande do Norte (Eng. Armando Ribeiro Gonçalves), que somados representam 44,5% do volume armazenado no final de 2011 na Região Nordeste (esta estatística inclui reservatórios dos estados da Bahia e Piauí, que pertencem a outras regiões hidrográficas). Reflexo este do regime de precipitações superiores às médias históricas na região.

- CONJUNTURA DE 2013

Mais abrangente que os informes precedentes, a conjuntura 2013 revisa as informações dos relatórios anteriores, oferecendo o panorama dos recursos hídricos no Brasil de 2009 até dezembro de 2012.

Como algumas informações pertinentes já foram apresentadas pelos informes anteriores, o que concerne mostrar aqui, é o referente ao ano de 2012. Sendo assim, no que se refere a precipitação, na região hidrográfica da área de estudo, no referido ano, esta foi abaixo da média histórica (ANA, 2013). Em 2012, de janeiro a 1º de dezembro, foi observado um decréscimo de 20,31% no volume inicial armazenado no reservatório equivalente (capacidade de armazenamento igual ou superior a 10 hm³) da região Nordeste.

- INFORME DE 2014

Este informe apresenta informações disponível até dezembro de 2013. Continuando o panorama que vem desde 2012 para o ano de 2013 as estações de monitoramento, que servem de base para os cálculos de disponibilidade hídrica superficial, localizadas no semiárido nordestino apresentaram vazões médias bem abaixo da vazão média de longo período. Este fato se relaciona com as anomalias negativas de precipitação observadas na região, especialmente, durante o primeiro semestre (entre fevereiro e maio), que é justamente o período esperado de chuvas em boa parte da região (ANA, 2015a). Em 2013, de janeiro a 1º de dezembro, foi observado um decréscimo de 11,9% no volume inicial armazenado no reservatório equivalente da região Nordeste.

- INFORME DE 2015

Com informações disponíveis até dezembro de 2014 este apresenta uma análise da ocorrência de secas e estiagens por região hidrográfica mostrando que a

região Atlântico Nordeste Oriental, apresentou os maiores percentuais de municípios que decretaram situação de emergência ou estado de calamidade pública em 2014.

Comparando-se estas informações publicadas ano a ano, que foram agregadas acima, com o gráfico da Figura 12, sobre a disponibilidade hídrica calculada através do GRACE para a Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental, nota-se que todas, sem exceção, têm compatibilidade com as inflexões de quedas e subidas bruscas ou suaves apresentadas.

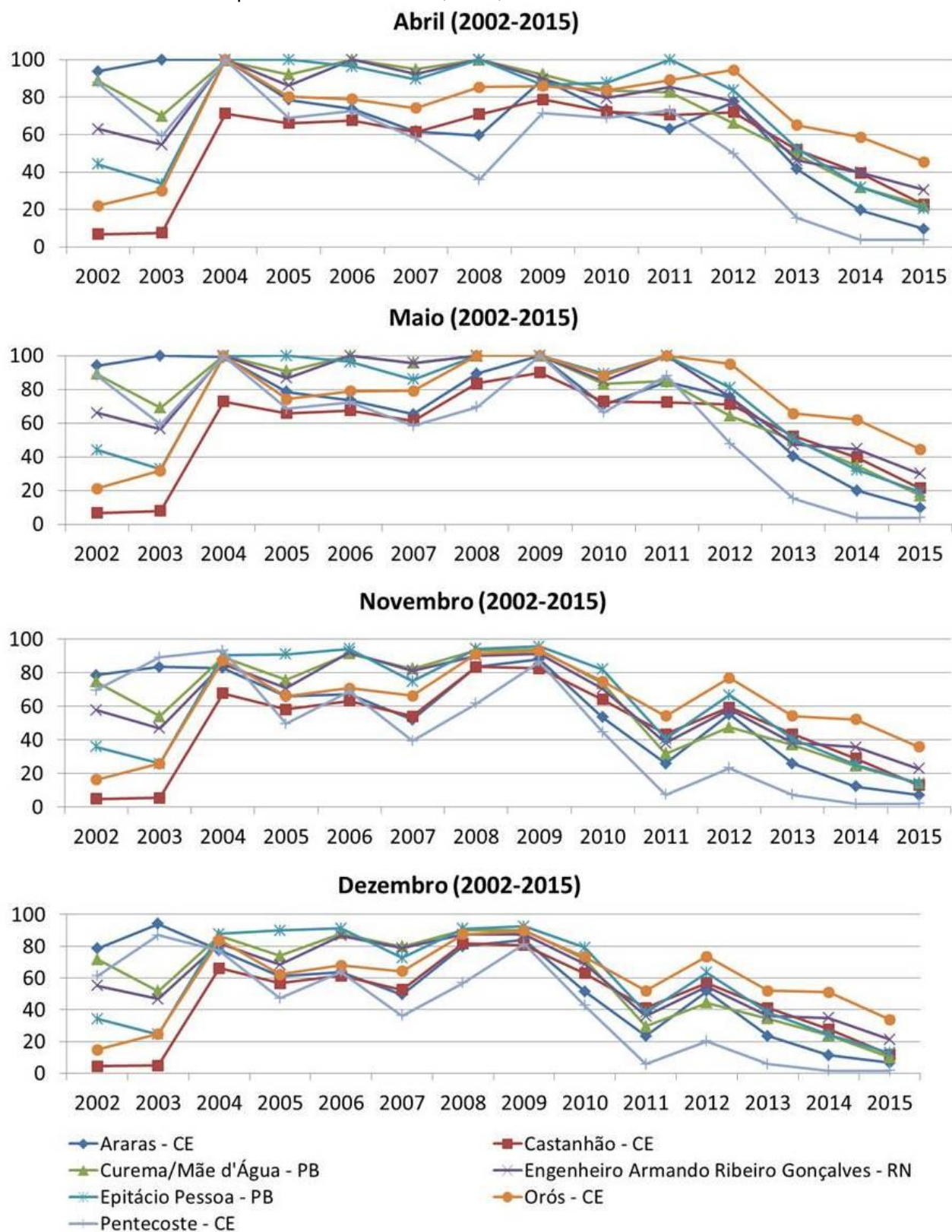
5.5 COMPARATIVO ENTRE OS DADOS GRACE MASCONS E DADOS DOS RESERVATÓRIOS

A Figura 15 apresenta os gráficos de situação dos reservatórios apontados na Figura 10 para os meses de abril, maio, novembro e dezembro de 2002 a 2015.

O que se percebe nos gráficos da Figura 15 é uma recuperação acentuada nos níveis de alguns reservatórios (Castanhão, Orós, Epitácio Pessoa) e razoável nos demais de 2002 a 2004. Seguidos por um período de níveis satisfatórios (acima de 60% da capacidade para os meses de maior pluviosidade e acima de 40% para os de menores) de 2004 a 2012 e uma queda acentuada em todos desde 2012 a 2015 que gira em torno de $\cong 60\%$ em média para todos os reservatórios considerados.

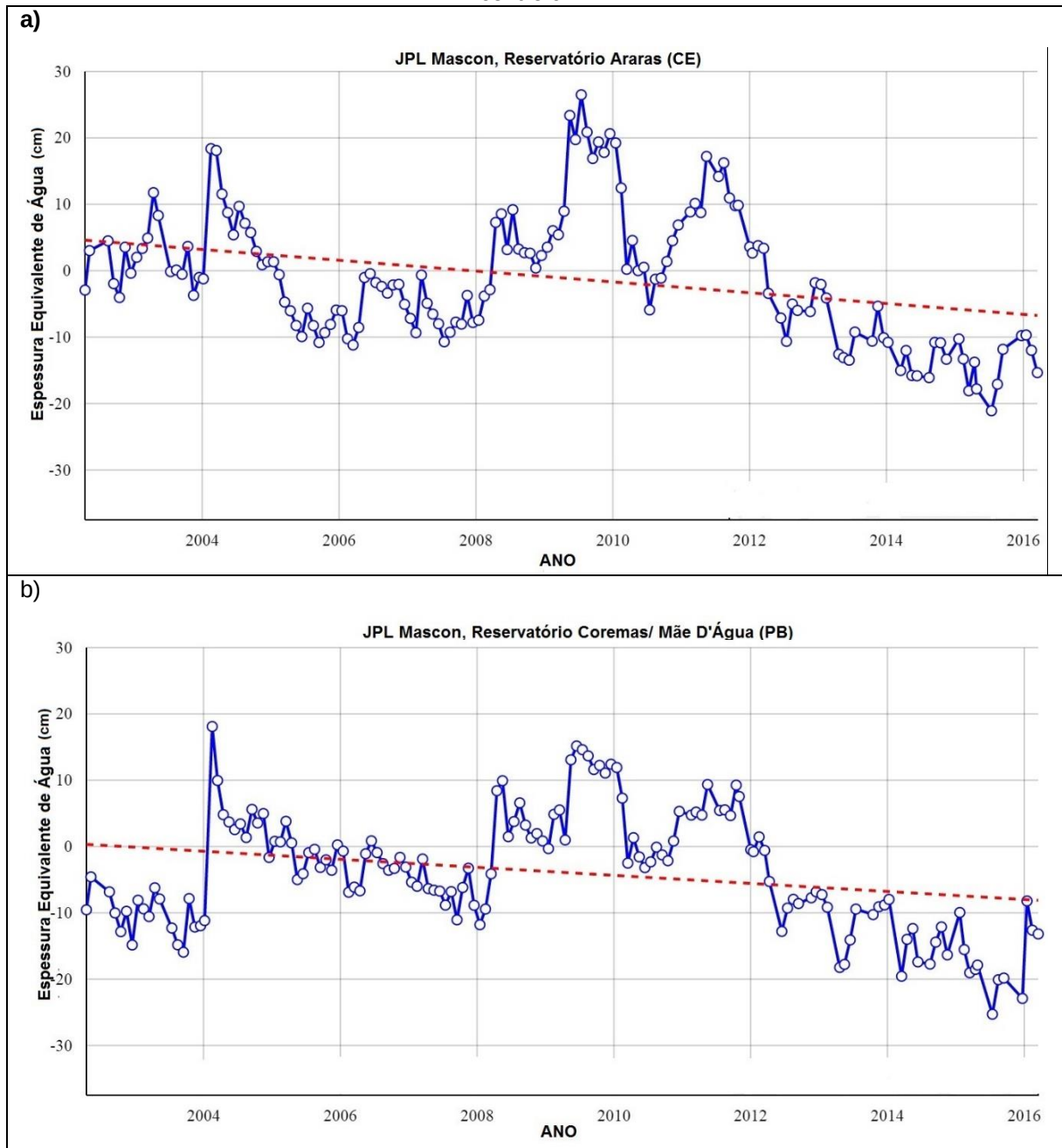
A Figura 16 apresenta os dados *mascons* GRACE que abrangem a região dos reservatórios Castanhão (CE), de nome oficial Açude Público Padre Cícero, e Coremas/ Mãe D'Água (PB), também conhecido Açude Estevam Marinho, de 2002 a 2015 oriundas do centro de processamento JPL.

Figura 15: Situação de reservatórios, em percentual (%) da capacidade total de armazenamento, na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental de 2002 a 2015 para os meses de abril, maio, novembro e dezembro



Fonte: Página da ANA na rede mundial de computadores

Figura 16: Gráficos de dados *mascons* GRACE, de 2002 a 2016, de reservatórios pela solução do centro JPL



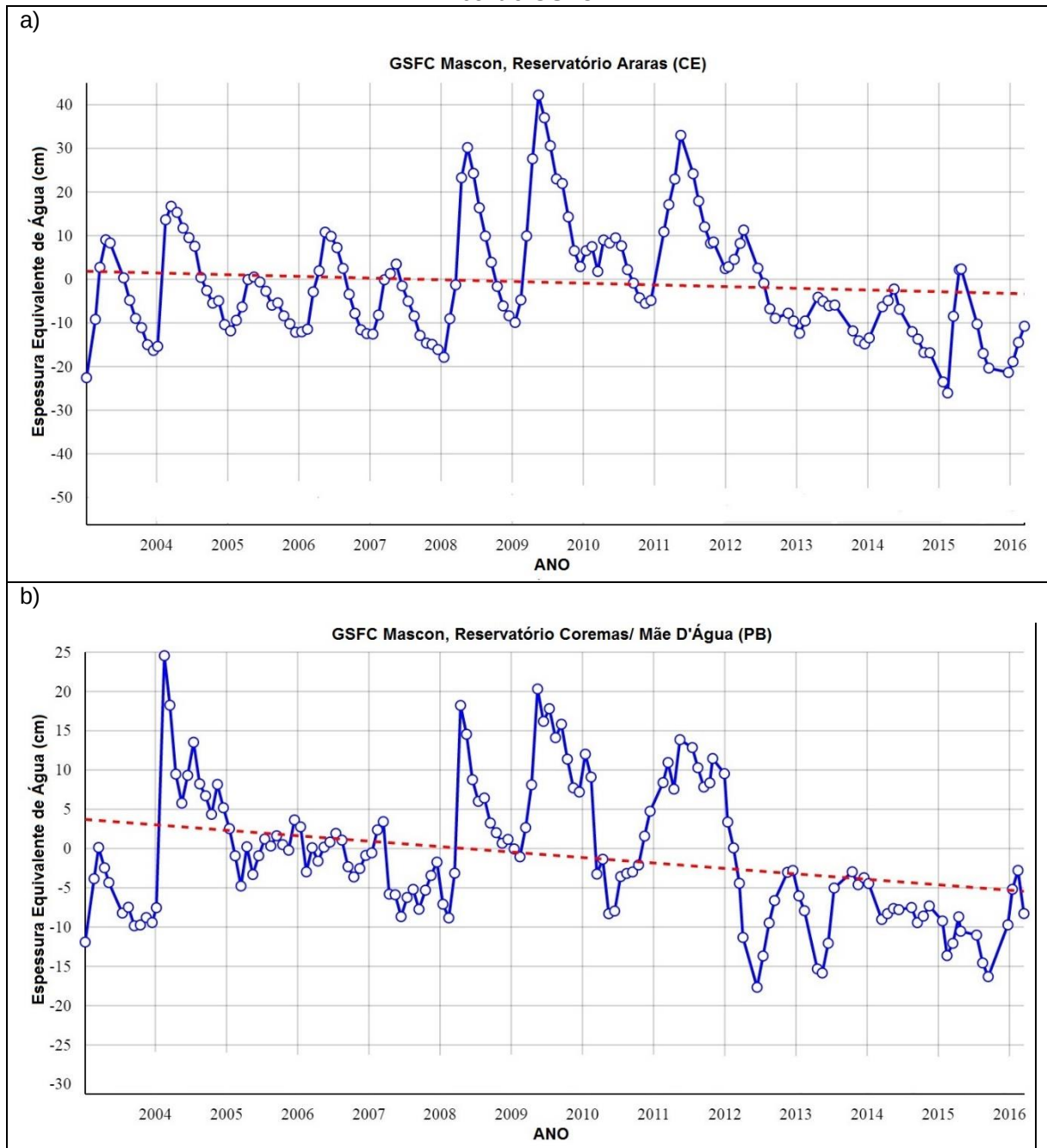
a) Reservatório Araras (CE), b) Reservatório Coremas/ Mãe D'Água (PB)

Fonte: <<http://ccar.colorado.edu/grace>>

Já a Figura 17, também, apresenta os dados *mascons* GRACE que abrange os reservatórios Castanhão (CE) e Coremas/ Mãe D'Água (PB) de 2002 a 2015, no entanto da solução processada pelo centro GSFC.

Comparando um mesmo reservatório pelas diferentes soluções *mascons* GRACE (JPL ou GSFC), isto é, gráficos “a” das figuras 16 e 17 e os gráficos “b” destas, nota-se que a tendência de distribuição das curvas é semelhante.

Figura 17: Gráficos de dados *mascons* GRACE, de 2002 a 2016, de reservatórios pela solução do centro GSFC



a) Reservatório Araras (CE), b) Reservatório Coremas/ Mãe D'Água (PB)

Fonte: <<http://ccar.colorado.edu/grace>>

Confrontando os gráficos das Figura 16 e 17 com os respectivos reservatórios nos gráficos da Figura 15, também, percebe-se uma equivalência no comportamento das séries apresentadas, indicando um declínio a partir de 2012 em todos os gráficos analisados. A reta pontilhada nos gráficos representa a regressão linear, ou seja, a melhor reta que se ajusta ao conjunto de observações temporais pelo Método dos Mínimos Quadrados. E esta apresenta um indicativo de declínio temporal no equivalente à altura d'água ao longo do tempo em todos os gráficos analisados.

6 CONCLUSÕES

A técnica empregada, de análise dos dados da missão GRACE, mostrou ser uma alternativa para a avaliação qualitativa e quantitativa da disponibilidade de recursos hídricos na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental entre o início da primeira década do corrente século e a metade da segunda, onde foi possível analisar as variações de armazenamento d'água para o período de abril de 2002 a dezembro de 2015.

Na presente dissertação foram coletados dados globais da missão GRACE do supracitado período e selecionados somente os que estão inseridos na RHANO. Destes foram extraídos dados estatísticos de equivalente à altura d'água. Das informações estatísticas foi elaborado um gráfico de toda a série temporal, mostrando estatísticas da média de TWS, e, também, foram separadas séries temporais anuais retratando os valores de mínimo, médio e máximo de TWS da RHANO.

A partir das séries temporais apresentadas foi possível identificar os momentos sazonais de maior e menor disponibilidade hídrica na RHANO, no caso finais de primeiro e segundo semestre anuais respectivamente, informação esta que coincidiu com o reportado pela ANA (2013). A série temporal elaborada e os gráficos anuais dos dados processados da missão GRACE foram comparadas qualitativamente aos relatórios de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil, divulgados pela ANA desde 2009, que são referentes desde o ano hidrológico de 2007. Estes mostraram equivalência qualitativa com os relatórios das Conjunturas dos Recursos Hídricos compilados e divulgados pela ANA.

Tomando-se os extremos da série temporal analisada (2002 e 2015) fez-se um cálculo objetivando quantificar a diferença de disponibilidade hídrica nos finais de primeiro e segundo semestre destes anos. Resultado esse que apontou uma perda na ordem de $\pm 23,71 \text{ km}^3$ para o final do primeiro semestre anual e $\pm 19,25 \text{ km}^3$ para o final do segundo semestre na RHANO.

Outro tipo de informações oriundas da missão GRACE, os *mascons*, foram, também, obtidos, contudo não de toda a região hidrográfica, mas de dois pontos específicos (*pixels*) que coincidiam geograficamente com a localização de reservatórios na RHANO. Uma série temporal de monitoramento de nível de alguns reservatórios inseridos na RHANO foi elaborada. Os dados *mascons* adquiridos foram comparados a dois reservatórios que possuíam coordenadas inseridas dentro dos

respectivos *pixels* mascons. Esta mostrou similaridade na tendência de disponibilidade hídrica. Os reservatórios, situados na área da região hidrográfica, apresentaram redução em seus níveis na ordem de $\cong 60\%$ em média de 2012 a 2015. Fato também percebido nos mascons GRACE respectivos aos reservatórios.

As informações provenientes dos satélites da missão GRACE vêm a auxiliar na gestão dos recursos hídricos do Brasil e sua potencialidade e divulgação para estudos hidrográficos devem ser mais exploradas.

Destaca-se que a principal vantagem do uso do GRACE é sua disponibilidade de informações para a sociedade de forma gratuita. Já como desvantagens, têm-se que a série temporal ainda é pequena para estudos hidrológicos, pois sua operação, iniciou-se a partir de 2002, e que a sua resolução espacial pode não ser compatível quando se pretende estudar uma pequena bacia hidrográfica ou mesmo um reservatório específico.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ainda existem muitas questões a serem estudadas, devido a sua complexidade, pelos vários centros que processam os dados, oficiais e independentes, muitas análises podem ser feitas, comparações e testes dos dados para verificar a eficácia da informação e confirmar seu uso. Uma dica de trabalhos futuros é uma comparação mais ampla para testar os demais produtos da missão GRACE e o comportamento do sinal para a mesma área de estudo, bem como examinar melhor suas peculiaridades como pode ser visto em Ferreira et al. (2016).

A estiagem prolongada que ocorre desde 2012 na RHANO apontada pelos níveis dos reservatórios, nos relatórios da ANA e verificadas também nos dados GRACE processados, pode ser associada com o evento climático global do *El Niño* e esta pode ser uma nova abordagem para se trabalhar com as séries temporais oriundas da missão GRACE. Contudo o ideal para estudos climáticos são séries mais longas (maiores que 30 anos).

A técnica utilizada neste estudo, de análise temporal da missão GRACE, pode ser empregada com diferentes abordagens, por exemplo, fazendo-se comparações ano a ano subsequentes da disponibilidade hídrica, mudando-se a área alvo para outras regiões hidrográficas e/ou agregando uma área maior que comporte várias regiões hidrográficas adjacentes, mas com regime de precipitações semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil**. Brasília: ANA, 2005.

ALMEIDA FILHO, F.G.V. **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: aplicação na bacia Amazônica**. São Paulo, 2009. 147 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2009**. Brasília: ANA, 2009. 204 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2010**. Brasília: ANA, 2010. 76 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2011**. Brasília: ANA, 2011. 112 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2012**. Ed. Especial. Brasília: ANA, 2012. 115 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013**. Brasília: ANA, 2013. 432 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2014**. Brasília: ANA, 2015a. 103 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2014 – Encarte Especial Sobre a Crise Hídrica**. Brasília: ANA, 2015b. 30 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: Regiões Hidrográficas Brasileiras – Edição Especial**. Brasília: ANA, 2015c. 163 p.

_____. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2015**. Brasília: ANA, 2015d. 88 p.

AHMED, M.; SULTAN, M; WHAR, J.; YAN, E. The use of GRACE data to monitor natural and anthropogenic induced variations in water availability across Africa. 2014. **Earth-Science Reviews**. v. 136, p. 289-300.

ANTON, H; BIVENS, I; DAVIS, S. **Cálculo**: v. 2. 2007. Porto Alegre. Editora Bookman. 8ª Ed., 672 p.

AWANGE, J.L.; FLEMING, K.M.; KUHN, M.; FEATHERSTONE, W.E.; HECK, B.; ANJASMARA, I. On the suitability of the 4°x4° GRACE mascons solutions for remote sensing Australian hydrology. **Remote Sensing of Environment**. 2011. v. 115 (3): p. 864-875.

AWANGE, J.L.; FOROOTAN, E.; KUSCHE, J.; KIEMA, J.B.K.; OMONDI, P.A.; HECK, B.; FLEMING, K.; OHANYA, S.O.; GONÇALVES, R.M. Understanding the decline of water storage across the Ramser-Lake Naivasha using satellite-based methods. **Advances in Water Resources**. 2013. v. 60, p. 7-23.

AWANGE, J.L.; GEBREMICHAEL, M.; FOROOTAN, E.; WAKBULCHO, G.; ANYAH, R.; FERREIRA, V.G.; ALEMAYEHU, T. Characterization of Ethiopian mega hydrogeological regimes using GRACE, TRMM and GLDAS datasets. **Advances in Water Resources**. 2014. v. 74, p. 64-78.

BARLETTA, V.; SABADINI, R.; BORDONI, A. Isolating the PGR signal in the GRACE data: impact on mass balance estimates in Antarctica and Greenland. **Geophysical Journal International**. 2008. v. 172 (1), p. 18-30.

BONFIM, E.P.; MOLINA, E.C. Análise da Variação dos Elementos do Campo de Gravidade na Região do Aquífero Guarani a Partir dos Dados GRACE. **Revista Brasileira de Geofísica**. 2009. v. 27 (1), p. 17-34.

CHEN, J.L.; WILSON, C.R.; TAPLEY, B.D.; SCANLON, B.; GUNTNER, A. Long-term groundwater storage change in Victoria, Australia from satellite gravity and in situ observations. **Global and Planetary Change**. 2016. v. 139, p. 56-65.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS – CNRH (Brasil). **Resolução nº. 32**, de 15 de outubro de 2003. Divisão Hidrográfica Nacional. Diário Oficial da União 17 dez. 2003.

CSR. **Globe Orbit Grace in 2015.10.08**. University of Texas at Austin/ Center for Space Research (CSR). 2015. Disponível em: <<http://www.csr.utexas.edu/grace/ground/>>. Acesso em: 08 out. 2015.

ELBERT, B.R. **The Satellite Communication Applications Handbook**. 1997. Mariland, USA. 2ª ed. 552 p.

FERREIRA, V.; MONTECINO, H.D.C.; YAKUBU, C.L.; HECK, B. Uncertainties of the Gravity Recovery and Climate Experiment time-variable gravity-field solutions based on three-cornered hat method. 2016. **J. Appl. Remote Sens.** v. 10. 21 p.

FLECHTNER, F.; MORTON, P.; WATKINS, M., WEBB, F. Status of the GRACE Follow-On Mission. 2014. **International Association of Geodesy Symposia.** v. 141. 346 p.

GETIRANA, A.C.V. Extreme water deficit in Brazil detected from space. **Journal of Hydrometeorology.** 2016. v. 17, p. 591-599. Disponível em: <http://journals.ametsoc.org>.

GUTIÉRREZ, A.P.A.; ENGLE, N.L.; NYS, E.D.; MOLEJÓN, C.; MARTINS, E.S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes.** 2014. v. 3: p. 95-106.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico 2010.** Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br>.

_____. **Estimativas da População Dos Municípios Brasileiros Com Data de Referência em 1º de Julho de 2014.** Rio de Janeiro. 2014. 18 p.

JPL. **Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE):** Science & Mission Requirements Document. 1998. Release 327 (200).

LUTHCKE, S.B.; SABAKA, T.J.; LOOMIS, B.D.; ARENDT, A.A.; MCCARTHY, J.J.; CAMP, J. Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution. **Journal of Glaciology.** 2013. V. 59, Nº 216, p. 613-631.

KAIXUANA, K; HUIA, L.; PENG, P.; ZHENGBOA, Z. Low-frequency variability of terrestrial water budget in China using GRACE satellite measurements from 2003 to 2010. **Geodesy and Geodynami.** 2015. v. 6 (nº.6): p. 444-452.

LANDERER, F.W.; SWENSON, S.C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. **Water Resources Research.** 2012. v. 48, 11 p.

LIU, X. **Global gravity field recovery from satellite-to-satellite tracking data with the acceleration approach.** 2008. Delft, Holland. 226 p.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. D. **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Universidade de Brasília, Brasília, 2012. 266 p.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, ORÇAMENTO E GESTÃO – Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) – Comitê de Planejamento da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (CINDE). **Plano de Ação para Implantação da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE)**. Brasília. Versão homologada em Janeiro/2010.

MOLODTSOVA, T.; MOLODTSOV, S.; KIRILENKO, A.; ZHANG, X.; VANLOOY, J. Evaluating flood potential with GRACE in the United States. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, Discussion. 2015. v. 3: p. 6977-6996.

MONTECINO, H.C.; STAUB, G.; FERREIRA, V.G.; PARRA, L.B. Monitoring Groundwater Storage in Northern Chile Based on Satellite Observations and Data Simulation. **Boletim de Ciências Geodésicas**. 2016. v. 22 (nº1): p. 1-15.

NASA/JPL. **Artist's concept of the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)**. 2002a. Disponível em: <<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog>>. Acesso em: 08 out. 2015.

NASA/JPL. **GRACE Launch Press Kit**. 2002b. Disponível em: <http://www.jpl.nasa.gov/news/press_kits>. Acesso em: 08 out. 2015.

NDEHEDEBE, C.; AWANGE, J.; AGUTU, N.; KUHN, M.; HECK, B. Understanding changes in terrestrial water storage over West Africa between 2002 and 2014. **Advances in Water Resources**. 2016. v. 88: p. 211-230.

RIEBEEK, H.; SIMMON, R. **Catalog of Earth Satellite Orbits**. 2009. NASA Earth Observatory. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog>>. Acesso em: 05 fev. 2017.

RODELL, M.; FAMIGLIETTI, J., Detectability of variations in continental water storage from satellite observations of the time dependent gravity field. **Water Resources Research**. 1999. v. 35 (9), p. 2705-2723.

RODELL M.; FAMIGLIETTI, J. An Analysis of Terrestrial Water Storage Variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE). 2001. **Water Resources Research**. v. 37, Nº 5, p. 1327-1339.

RUMMEL, R.; BALMINO, G.; JOHANNESSEN, J.; VISSER, P.; WOODWORTH, P. Dedicated gravity field missions – principles and aims. **Journal of Geodynamics**. 2002. v. 33, p. 3-20.

SAKUMURA, C.; BETTADPUR, S.; BRUINSMA, S. Ensemble prediction and intercomparison analysis of GRACE time-variable gravity field models. **Geophysical Research Letters**. 2014. v. 41, Issue 5: p. 1389-1397.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy**: foundations, methods, and applications. 2003. Berlin. 2^o ed. 589 p.

SUN, T.; FERREIRA, V.G.; HE, X.; ANDAM-AKORFUL, S.A. Water Availability of São Francisco River Basin Based on a Space-Borne Geodetic Sensor. 2016. **Water**. v. 8 20 p.

SCHÜTZE, D. Measuring Earth: Current status of the GRACE Follow-On Laser Ranging Interferometer. 2016. **Journal of Physics**: Conference Series. v. 716.

SWENSON, S.C.; WAHR, J. Estimated effects of the vertical structure of atmospheric mass on the time-variable geoid. **Journal of Geophysical Research**. 2002. v. 107 (B9). 11 p.

SWENSON, S.C.; WAHR, J. Post-processing removal of correlated errors in GRACE data. **Geophys. Res. Lett.** 2006. v. 33. 4 p.

SWENSON, S.C.; CHAMBERS, D.; WAHR, J. Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. **J. Geophys. Res.** 2008. v. 113. 12 p.

SWENSON, S.C. **GRACE monthly land water mass grids NETCDF RELEASE 5.0**. Ver. 5.0. PO.DAAC, CA, USA. 2012. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/>>. Acesso em: 21 mar. 2016.

SWENSON, S.; NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH STAFF. **GRACE**: Gravity Recovery and Climate Experiment: Surface mass, total water storage, and derived variables. 2013. The Climate Data Guide. Disponível em <<https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data>>. Acesso em: 05 fev. 2017.

TAPLEY, B. D.; M.; REIGBER, C. **The GRACE Mission: Status and Future Plans**. Earth and Space Science News: American Geophysical Union, v. 82 (47), 2001.

TAPLEY, B. D.; BETTADPUR, S.; WATKINS, M.; REIGBER, C. The Gravity Recovery and Climate Experiment: Mission overview and early results. **Geophys. Res. Lett.** 2004. v. 31. 6 p.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997.

TORGE, W. **Geodesy**. 2001. Walter de Gruyter, Berlin-NewYork, 3ª ed.

VELICOGNA, I. Increasing rates of ice mass loss from the Greenland and Antarctic ice sheets revealed by GRACE. **Geophysical Research Letters**. 2009. v. 36.

WARD, A. **GRACE Sheet**. 2004. NASA Earth Observatory. Disponível em: <<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/GRACE>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

WAHR, J.; MOLENARR, M.; BRUAN, F. Time variability of the Earth's gravity field: Hydrological and oceanic effects and their possible detection using GRACE. **J. Geophys. Res.** 1998. v. 103 (B12). 30 p.

WAHR, J.; JAYNE, S.; BRUAN, F. A method of inferring changes in deep ocean currents from satellite measurements of time-variable gravity. **Journal of Geophysical Research**. 2002. v. 107 (C12). 17 p.

WATKINS, M.; BETTADPUR, S. **The GRACE Mission**: Challenges of Using Micron-Level Satellite-to-Satellite Ranging to Measure the Earth's Gravity Field. 2000. Proceedings of the International Symposium on Space Dynamics, Biarritz, France, 26-30 June 2000, Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Delegation a la Communication (publ.).

WIESE, D. N.; LANDERER, F. W.; WATKINS, M. M. Quantifying and reducing leakage errors in the JPL RL05M GRACE mascon solution. **Water Resources Research**. 2016. v. 52. p. 7490-7502.

XAVIER, L.N. R; FILHO, O.C.R.; CAZENAVE, A.; A. ARAUJO, A.A.M. Reflexões Sobre Modelagem Hidrológica com Suporte de Dados da Missão Espacial GRACE na Bacia Amazônica. **XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. 2013.

XIANG. L.; WANG, H.; STEFFEN, H.; WU, P.; JIA, L.; JIANG, L.; SHEN, Q. Groundwater storage changes in the Tibetan Plateau and adjacent areas revealed from GRACE satellite gravity data. **Earth and Planetary Science Letters**. 2016. v. 449, p. 228-230.

APÊNDICE A – Estatística regional (cm), dos dados da missão GRACE, na RHANO
de 2002 a 2015

ANO	MÊS	MÍNIMO	MÁXIMO	INTERVALO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	SOMATÓRIO
2002	abr	-1,15	7,60	8,75	2,75	2,82	74,26
2002	mai	-1,82	14,24	16,06	1,82	4,27	49,17
2002	ago	-8,22	-2,86	5,36	-5,08	1,62	-137,29
2002	set	-9,10	-0,13	8,97	-3,91	2,51	-105,44
2002	out	-13,29	-3,47	9,82	-7,78	2,84	-210,01
2002	nov	-15,88	-5,20	10,67	-10,28	2,70	-277,53
2002	dez	-17,11	-5,54	11,57	-11,25	3,60	-303,79
2003	jan	-17,37	-7,18	10,18	-12,38	2,72	-334,19
2003	fev	-5,51	-3,06	2,45	-4,15	0,83	-112,09
2003	mar	-6,36	3,12	9,48	-1,64	3,12	-44,28
2003	abr	-4,40	11,79	16,19	3,37	5,02	90,88
2003	mai	-2,74	12,69	15,43	2,43	4,54	65,57
2003	jul	-7,84	-0,46	7,39	-4,76	1,81	-128,65
2003	ago	-12,82	-3,43	9,39	-7,28	2,57	-196,54
2003	set	-14,69	-2,63	12,06	-7,39	3,13	-199,46
2003	out	-16,35	-3,18	13,16	-9,17	3,26	-247,46
2003	nov	-15,58	-4,51	11,07	-9,94	2,94	-268,28
2003	dez	-17,37	-7,18	10,18	-12,38	2,72	-334,19
2004	jan	-13,18	-4,52	8,66	-9,23	2,20	-249,14
2004	fev	5,38	14,11	8,73	10,00	2,49	269,87
2004	mar	5,69	18,16	12,47	12,25	3,72	330,87
2004	abr	5,21	17,05	11,84	11,15	3,66	301,15
2004	mai	6,39	14,03	7,64	9,70	2,23	261,89
2004	jun	2,80	6,70	3,90	4,69	1,22	126,66
2004	jul	2,17	4,38	2,21	3,80	0,49	102,71
2004	ago	0,34	3,95	3,62	2,70	0,87	72,93
2004	set	-6,56	1,58	8,14	-1,05	1,85	-28,40
2004	out	-7,40	0,65	8,05	-3,02	2,54	-81,65
2004	nov	-10,48	-0,66	9,82	-4,28	2,78	-115,62
2004	dez	-12,21	-3,04	9,17	-7,00	2,71	-189,03
2005	jan	-9,95	-1,72	8,23	-4,76	1,85	-128,55
2005	fev	-5,40	-0,85	4,56	-2,31	1,13	-62,36
2005	mar	-1,12	5,55	6,67	0,68	1,66	18,48
2005	abr	0,43	8,70	8,27	3,58	2,25	96,54
2005	mai	-1,91	5,73	7,64	1,13	2,01	30,52
2005	jun	-0,97	2,24	3,21	0,67	0,69	17,97
2005	jul	-0,69	2,87	3,56	0,99	1,01	26,70
2005	ago	-5,48	1,78	7,25	-1,70	2,42	-45,99
2005	set	-9,83	-0,59	9,24	-5,09	2,97	-137,30
2005	out	-14,24	-3,11	11,13	-7,61	3,17	-205,57
2005	nov	-15,51	-3,47	12,04	-8,95	3,57	-241,71
2005	dez	-11,76	-4,41	7,35	-7,68	2,27	-207,44

ANO	MÊS	MÍNIMO	MÁXIMO	INTERVALO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	SOMATÓRIO
2006	jan	-8,64	-3,25	5,38	-5,13	1,39	-138,56
2006	fev	-8,33	-3,27	5,06	-6,20	1,13	-167,43
2006	mar	-3,78	3,17	6,95	-1,75	1,74	-47,36
2006	abr	0,14	11,82	11,68	4,76	3,32	128,40
2006	mai	2,83	14,93	12,10	7,99	3,90	215,78
2006	jun	0,79	8,27	7,47	3,56	2,21	96,03
2006	jul	0,64	3,63	2,99	2,03	0,74	54,82
2006	ago	-2,03	1,46	3,49	-0,49	1,10	-13,35
2006	set	-7,29	-1,15	6,15	-4,00	2,09	-107,90
2006	out	-9,13	-2,27	6,86	-5,51	1,98	-148,76
2006	nov	-9,32	-1,03	8,29	-4,35	2,35	-117,45
2006	dez	-10,26	-3,10	7,16	-5,72	1,88	-154,45
2007	jan	-13,72	-4,71	9,02	-7,72	2,36	-208,46
2007	fev	-6,47	1,87	8,34	-3,25	1,97	-87,71
2007	mar	-0,80	6,43	7,22	2,07	1,83	55,90
2007	abr	-1,68	5,71	7,40	0,59	2,02	15,84
2007	mai	-1,28	6,50	7,78	1,13	1,83	30,60
2007	jun	-3,45	1,30	4,74	-2,27	1,01	-61,32
2007	jul	-6,12	-0,26	5,86	-3,67	1,80	-99,19
2007	ago	-8,49	-1,31	7,18	-4,71	2,08	-127,20
2007	set	-11,47	-0,86	10,61	-5,28	3,02	-142,62
2007	out	-13,06	-1,87	11,19	-6,70	3,40	-180,85
2007	nov	-15,81	-3,96	11,85	-9,67	3,41	-261,11
2007	dez	-15,51	-6,25	9,26	-10,57	2,96	-285,38
2008	jan	-13,50	-7,21	6,28	-10,47	1,90	-282,81
2008	fev	-7,27	-3,99	3,28	-6,26	0,93	-169,09
2008	mar	-3,74	1,61	5,34	-2,09	1,31	-56,53
2008	abr	3,53	16,87	13,33	9,65	3,92	260,52
2008	mai	4,26	16,82	12,56	9,85	3,94	266,00
2008	jun	0,91	10,87	9,96	5,27	2,64	142,33
2008	jul	1,04	6,29	5,25	2,97	1,49	80,25
2008	ago	-1,74	2,83	4,57	1,26	1,06	34,11
2008	set	-4,11	0,77	4,88	-1,06	1,22	-28,71
2008	out	-7,69	-0,92	6,77	-3,89	2,17	-105,15
2008	nov	-9,94	-2,59	7,34	-5,89	2,29	-158,90
2008	dez	-7,44	-1,25	6,19	-4,25	1,95	-114,67
2009	jan	-5,23	-1,17	4,05	-2,98	1,18	-80,49
2009	fev	-2,24	-0,62	1,62	-1,65	0,43	-44,46
2009	mar	-0,71	7,21	7,92	2,63	2,54	71,00
2009	abr	3,04	14,95	11,91	8,61	3,83	232,45
2009	mai	9,31	27,32	18,01	17,46	5,65	471,52
2009	jun	7,53	24,53	16,99	14,56	5,14	393,17
2009	jul	8,36	19,64	11,28	11,97	3,22	323,22
2009	ago	6,23	13,33	7,10	8,57	1,99	231,36
2009	set	3,16	8,49	5,33	5,39	1,35	145,53
2009	out	-1,12	4,37	5,49	2,44	1,30	65,85
2009	nov	-1,74	4,47	6,20	2,54	1,57	68,61
2009	dez	-0,48	3,61	4,09	1,60	1,18	43,09

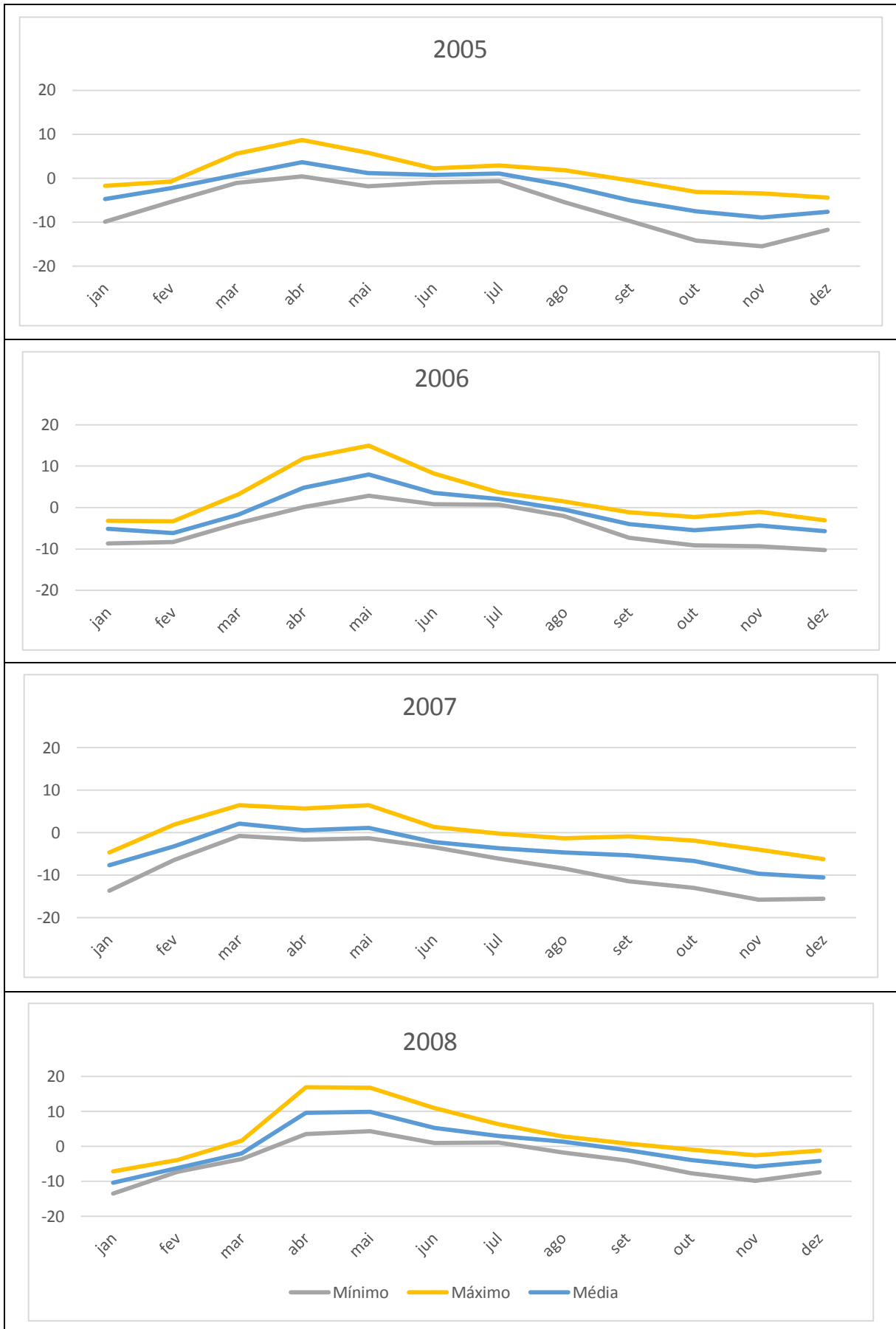
ANO	MÊS	MÍNIMO	MÁXIMO	INTERVALO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	SOMATÓRIO
2010	jan	-0,03	4,77	4,80	2,13	1,48	57,51
2010	fev	-2,08	5,05	7,13	0,44	2,04	11,93
2010	mar	-2,11	5,47	7,58	1,49	2,38	40,36
2010	abr	-1,14	9,59	10,72	4,00	3,35	108,02
2010	mai	-0,61	10,20	10,81	2,90	2,84	78,32
2010	jun	-0,38	8,08	8,46	2,58	2,25	69,77
2010	jul	-1,47	2,52	3,99	-0,24	0,91	-6,42
2010	ago	-3,53	0,90	4,43	-1,05	1,26	-28,32
2010	set	-8,76	-1,54	7,22	-4,34	2,01	-117,05
2010	out	-8,47	-0,70	7,78	-4,05	1,95	-109,37
2010	nov	-6,57	0,33	6,89	-3,00	1,94	-80,92
2010	dez	-7,06	-0,81	6,24	-2,73	1,59	-73,72
2011	fev	-3,22	7,01	10,23	0,90	2,89	24,34
2011	mar	2,28	13,94	11,65	8,41	3,65	227,14
2011	abr	2,07	18,43	16,36	9,52	4,79	257,13
2011	mai	4,08	21,00	16,93	10,87	4,96	293,61
2011	jul	3,23	11,86	8,63	5,86	1,97	158,30
2011	ago	0,90	9,49	8,59	4,10	2,09	110,80
2011	set	-0,79	6,16	6,95	3,33	1,74	89,87
2011	out	-3,75	1,73	5,48	-0,11	1,28	-2,98
2011	nov	-2,44	2,02	4,46	0,45	1,05	12,26
2011	dez	-2,92	-0,56	2,36	-1,85	0,60	-49,87
2012	jan	-0,84	3,60	4,44	1,25	1,48	33,67
2012	fev	-0,84	3,60	4,44	1,25	1,48	33,67
2012	mar	-1,33	6,14	7,47	1,78	2,18	48,02
2012	abr	-1,72	8,19	9,91	1,89	2,94	50,91
2012	jun	-6,25	1,24	7,49	-3,92	2,18	-105,93
2012	jul	-7,38	-2,10	5,28	-4,85	1,33	-131,03
2012	ago	-10,65	-1,50	9,16	-5,33	2,36	-143,81
2012	set	-11,44	-3,64	7,80	-6,76	1,99	-182,46
2012	nov	-11,56	-2,36	9,20	-6,98	2,53	-188,56
2012	dez	-10,32	-2,27	8,05	-6,53	2,20	-176,20
2013	jan	-9,37	-3,03	6,35	-6,82	1,62	-184,09
2013	fev	-6,56	-2,51	4,04	-5,00	1,15	-135,00
2013	abr	-9,21	1,02	10,23	-5,75	3,08	-155,12
2013	mai	-6,55	3,22	9,77	-3,79	2,75	-102,40
2013	jun	-7,35	0,47	7,82	-5,53	1,99	-149,21
2013	jul	-8,41	-2,90	5,51	-6,45	1,34	-174,05
2013	out	-16,36	-9,40	6,96	-12,38	2,03	-334,13
2013	nov	-14,21	-4,05	10,16	-8,97	2,55	-242,20
2013	dez	-12,73	-4,90	7,82	-9,04	1,96	-244,07

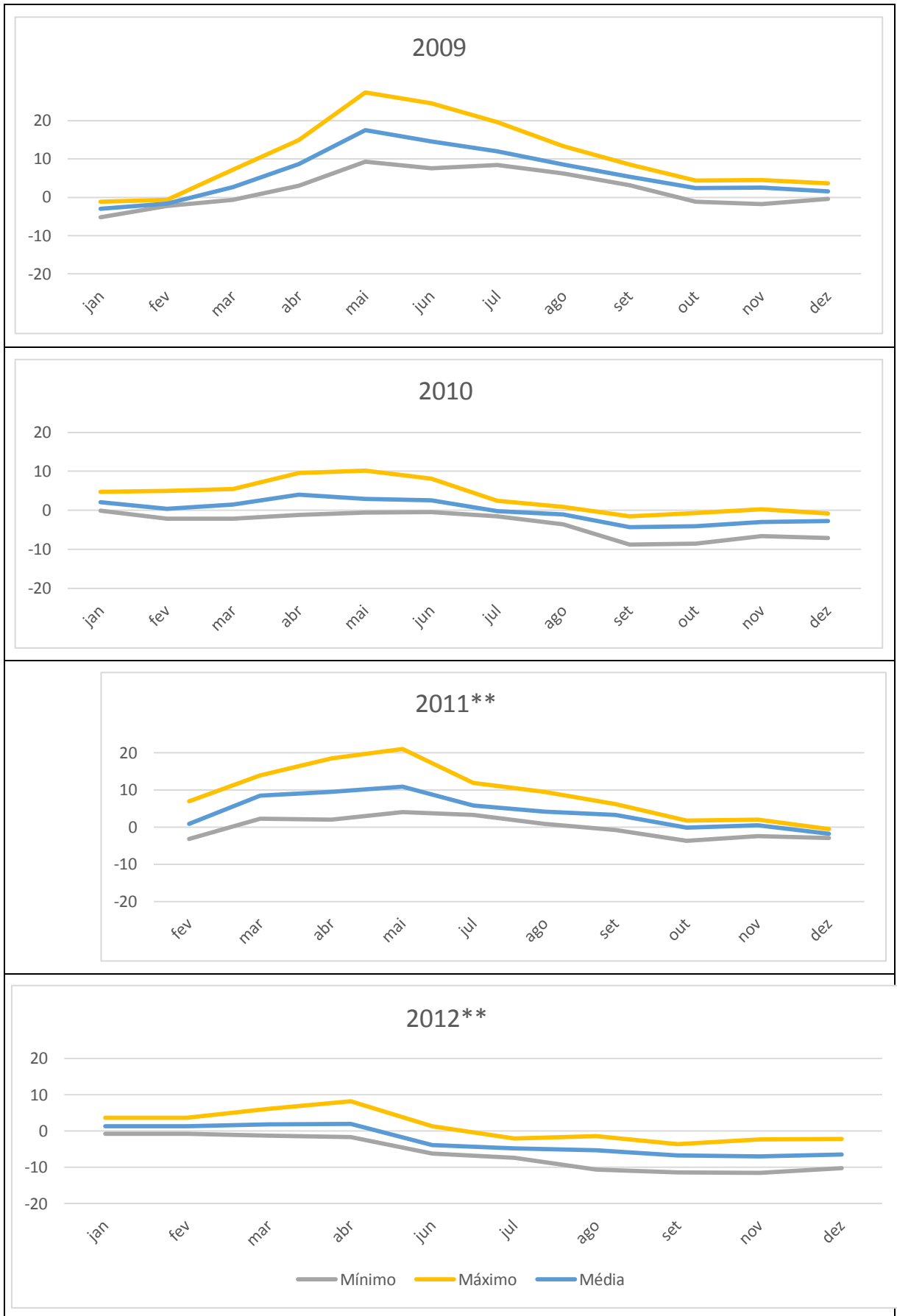
ANO	MÊS	MÍNIMO	MÁXIMO	INTERVALO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	SOMATÓRIO
2014	jan	-15,29	-6,36	8,93	-8,94	2,10	-241,36
2014	mar	-8,87	-0,16	8,71	-5,20	2,66	-140,32
2014	abr	-7,45	3,58	11,03	-3,53	3,02	-95,26
2014	mai	-5,90	4,21	10,12	-2,89	2,61	-78,15
2014	jun	-8,30	0,10	8,39	-6,52	2,05	-176,04
2014	ago	-13,67	-7,06	6,61	-10,73	1,83	-289,60
2014	set	-13,30	-3,95	9,35	-8,16	2,57	-220,36
2014	out	-14,67	-3,78	10,89	-9,05	3,06	-244,35
2014	nov	-17,17	-5,52	11,66	-11,63	3,16	-314,09
2015	jan	-16,01	-6,29	9,72	-11,92	2,57	-321,77
2015	fev	-10,23	-4,74	5,49	-8,22	1,43	-221,92
2015	mar	-10,93	-6,09	4,84	-9,06	1,39	-244,70
2015	abr	-7,74	0,52	8,26	-5,32	2,15	-143,54
2015	abr	-9,29	-0,29	9,00	-6,48	2,45	-174,90
2015	jul	-12,49	-6,77	5,72	-9,57	1,91	-258,43
2015	ago	-17,31	-7,57	9,73	-11,66	3,07	-314,90
2015	set	-20,90	-7,00	13,90	-13,62	3,91	-367,69
2015	dez	-23,54	-10,63	12,91	-17,02	3,39	-459,42

Em cm equivalente à altura d'água

APÊNDICE B – Gráficos anuais (2002-2015) de equivalente à altura d'água (cm) na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental









** Dados de meses faltantes ficaram interpolados, ligados com um traço linear, nos gráficos