

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – CAMPUS MONTE CARMELO  
ENGENHARIA DE AGRIMENSURA E CARTOGRÁFICA**

**LEÔNIDAS RODRIGUES MENDONÇA**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE ÁGUA EM MINAS GERAIS POR MEIO DE  
INFORMAÇÕES GEOESPACIAIS (GNSS e GRACE)**

**MONTE CARMELO**

**2019**

**LEÔNIDAS RODRIGUES MENDONÇA**

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE ÁGUA EM MINAS GERAIS POR MEIO DE  
INFORMAÇÕES GEOESPACIAIS (GNSS e GRACE)**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção de aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2 do Curso de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel do Nascimento Guimarães

**MONTE CARMELO**

**2019**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por sempre guiar meus passos, por ter me concedido saúde e por nunca ter me deixado desistir nos momentos difíceis.

Aos meus pais, *in memoriam*, Donizete Mendonça e Maria Cândida Rodrigues Mendonça, que sempre foram as grandes motivações para eu vencer mais esta etapa de minha vida.

Agradeço à minha irmã Dayany, por estar sempre comigo e me apoiar e aconselhar nos momentos em que necessitei.

Aos meus amigos, em especial os moradores da república Xeque Mate, por estarem comigo nos momentos de descontração.

Ao professor Gabriel pela orientação, ensinamentos e sugestões durante as aulas, as pesquisas e na execução deste trabalho.

A todos os docentes, pela dedicação, as dicas importantes e todo o conhecimento transmitido ao longo da graduação.

Enfim, a todos que contribuíram de alguma forma no meu caminhar, possibilitando a conclusão desta etapa importante de minha vida.

“Se cheguei até aqui foi porque me apoiei no ombro de gigantes.”

Isaac Newton

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada uma metodologia para examinar a dinâmica da superfície física e o ciclo hidrológico em Minas Gerais por meio de séries temporais. O trabalho visa investigar a relação entre a sazonalidade do ciclo hidrológico das águas superficial e subterrânea, e movimentações verticais da crosta terrestre por via de informações geoespaciais e *in situ* em seis locais distintos no estado. O método de detecção de movimentos verticais e sazonalidades do ciclo hidrológico se deu por meio de comparações estatísticas, correlação de Pearson e reta de regressão linear, a partir da média móvel entre dados do equivalente à altura d'água do GRACE, dados das estações GNSS da RBMC e dados das estações fluviométricas da ANA. Por intermédio dos resultados do GRACE foi possível detectar a seca ocorrida em 2014 e uma amplitude da lâmina d'água bem definida entre 30 cm e -10 cm para a região de Viçosa, bem como um atraso na obtenção dos dados GRACE-EWH quando comparado com os dados *in situ*. Além disso, mediante análise dos dados GNSS constatou que a maior movimentação vertical da crosta foi em Rio Paranaíba, com amplitude de aproximadamente, 2,5 cm. Não obstante a isso, também verificou-se que o melhor desempenho dos resultados foi para a estação da região de Rio Paranaíba com  $r > 0,90$ . Isso, possivelmente é devido à hidrologia e características das região.

Palavras-chave: Hidro-Geodésia. Equivalente à altura d'água. GRACE, GNSS

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de água na Terra .....	11
Figura 2 - Objetos da Geodésia .....	13
Figura 3 - Ciclo Hidrológico do Planeta Terra .....	15
Figura 4 - Bacias hidrográficas estudadas por Castro Junior et al. (2018) .....	17
Figura 5 - Comparação entre os dados obtidos pelo GRACE (em azul) e de nível médio do rio Solimões (em vermelho) .....	18
Figura 6 - Série temporal da variação da altura d'água (superficial e subterrânea) obtida pelo GRACE (verde), da variação superficial obtida pela estação da ANA (azul) e da variação da altitude geométrica obtida pela estação GNSS SAGA (vermelho) .....	19
Figura 7 - Comparação entre os dados ANA e GRACE .....	19
Figura 8 - a) acelerômetro ACC; b) receptor GPS; c) duas câmeras estelares e a DPU .....	20
Figura 9 - Ilustração da relação entre a massa da Terra e variações sentidas pelo GRACE .....	21
Figura 10 - a) Lançamento do GRACE-FO e b) Construção de um dos satélites gêmeos .....	21
Figura 11 - Estação geodésica do Campus Alegrete (UNIPAMPA), pertencente à RBMC .....	27
Figura 12 - Estações geodésicas da RBMC, ativas (verdes), inoperantes (amarelas) e inativa (vermelhas) .....	28
Figura 13 - Interface do HidroWeb .....	30
Figura 14 - Estações Fluviométricas da ANA .....	31
Figura 15 - Estação Pluviométrica ANA, pluviômetro Ville de Paris .....	32
Figura 16 Localização da área de estudo e estações utilizadas .....	33
Figura 17 - Fluxograma abordando as etapas do trabalho .....	34
Figura 18 – Temporalidade das séries .....	35
Figura 19 - Análise temporal dos dados referentes à estação VICO .....	36
Figura 20 - Série temporal da estação MGMC .....	36
Figura 21 – <i>Buffer</i> das estações ANA .....	37
Figura 22 – Estações fluviométricas da ANA .....	38
Figura 23 - Aquisição dos dados ANA por meio do HidroWeb .....	38
Figura 24 - Formatos disponíveis para <i>download</i> dos dados .....	39

Figura 25 - Disposição dos dados na planilha eletrônica .....	40
Figura 26 - Série temporal da estação linimétrica ANA, código 56085000 .....	40
Figura 27 - Localização da estação fluviométrica Carrapato .....	41
Figura 28 – Localização da estação fluviométrica Seriquite .....	42
Figura 29 – Localização da estação fluviométrica Cambuí .....	43
Figura 30 – Localização da estação fluviométrica Ibiá .....	43
Figura 31 – Localização da estação fluviométrica Fazenda Letreiro .....	44
Figura 32 – Localização da estação fluviométrica Capitão Enéas .....	45
Figura 33 – Série temporal do GRACE-EWH para a região de Belo Horizonte/MG .....	46
Figura 34 - Correlação linear entre X e Y .....	47
Figura 35 – Histogramas da região de Belo Horizonte .....	50
Figura 36 – Histogramas da região de Viçosa .....	51
Figura 37 – Histogramas da região de Inconfidentes .....	52
Figura 38 – Histogramas da região de Rio Paranaíba .....	53
Figura 39 – Histogramas da região de Uberlândia .....	54
Figura 40 – Histogramas da região de Montes Claros .....	55
Figura 41 - Estação MGBH - 56640000 .....	57
Figura 42 - Estação VICO - 56085000 .....	58
Figura 43 - Erros encontrado nos dados ANA para estação fluviométrica 61360000 .....	59
Figura 44 - Estação MGIN - 61360000 .....	60
Figura 45 - Estação MGRP - 60265000 .....	61
Figura 46 - Estação MGUB - 60381000 .....	62
Figura 47 - Estação MGMC - 44630000 .....	63

## LISTA DE ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas  
CNES - *Centre National d'Études Spatiales*  
CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos  
DLR - *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt*  
DNAE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica  
EIGEN - *European Improved Gravity Model of the Earth by New Techniques*  
EWH - *Equivalent to Water Height*  
GFZ - *Geoforschungs Zentrum*  
GLONASS - *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema*  
GNSS - *Global Navigation Satellite System*  
GPS - *Global Positioning System*  
GRACE - *Gravity Recovery & Climate Experiment*  
GRGS - *Groupe de Recherche de Géodésie Spatiale*  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IGS - *International GNSS Service*  
IRNSS - *Indian Regional Navigation Satellite System*  
ITRS - *International Terrestrial Reference System*  
JPL - *Jet Propulsion Laboratory*  
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*  
NGL - *Nevada Geodetic Laboratory*  
PPP - Posicionamento por Ponto Preciso  
QZSS - *Quase-Zenith Satellite System*  
RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo  
RHN - Rede Hidrometeorológica Nacional  
SIRGAS - Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas  
TWS - *Total Water Storage*  
UTCSR - *University of Texas Center for Space Research*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>1.2 Objetivo .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Justificativa .....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
2.1 Hidro-Geodésia.....	13
2.2 Missão GRACE .....	20
2.2.1 Características dos satélites GRACE.....	22
2.2.2 GRACE <i>Follow-On</i> .....	22
2.2.3 Equivalente à altura d'água dos modelos GRACE.....	23
2.3 <i>Global Navigation Satellite System</i> (GNSS) .....	26
2.4 Agência Nacional de Águas (ANA) .....	29
2.4.1 Estações Fluviométricas .....	31
2.4.2 Estações Pluviométricas .....	31
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
3.1 Área de estudo .....	33
3.2 Aquisição dos dados GNSS .....	35
3.3 Aquisição dos dados ANA .....	37
3.4 Aquisição dos dados GRACE .....	45
3.5 Coeficiente de correlação e ajustamento da reta de regressão.....	47
3.6 Estatística descritiva e Análise de correlação.....	49
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>64</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A necessidade de acompanhamento dos processos dinâmicos da Terra, requer avanços em muitas áreas do conhecimento como na Ciências Geodésicas. Além disso, o aumento da demanda por monitoramentos ambientais, terrestres e remotos, precisos e de alta qualidade tem desencadeado novas tecnologias e subáreas de pesquisas como é o caso da Hidro-Geodésia (FERREIRA, 2018).

A Hidro-Geodésia tem contribuído de forma ímpar nos processos que tange ao conhecimento apurado e tecnológico para a mensuração dos processos geodinâmicos. Os avanços ocorrentes nas missões geodésicas comprova essa instância, haja vista a missão espacial *Gravity Recovery & Climate Experiment* (GRACE) que propôs obter dados referentes ao campo de gravidade e aos fenômenos físicos que ocorrem acima, sobre e abaixo da superfície da Terra tem se destacado no que concerne às observações do campo de gravidade para estes fins (CASTRO JÚNIOR et al., 2018).

O campo de gravidade terrestre proporciona um registro da distribuição de massa no interior da Terra. Sabe-se também que um dos contribuintes para as variações dessas massas, ou seja, a movimentação da crosta, é o ciclo hidrológico, pois, devido à sua sazonalidade o volume hídrico é constantemente alterado (XAVIER, 2012).

O EWH é um avaliador que quantifica o volume hídrico na superfície e no subsolo da Terra. Sua resolução temporal é de dez dias e o órgão responsável por analisar, manipular e fornecer estes dados é o *Centre National d'Études Spatiales e Groupe de Recherche de Geodésie Spatiale* (CNES/GRGS) (COSTA, 2011). Vale salientar que outros grupos como, *Astronomical Institute at the University of Bern (AIUB)*, *Center for Space Research (CSR)*, *German Research Center for Geosciences (GFZ)*, *Huazhong University of Science Technology (HUST)*, *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*, *Tongji University (TONGJI)*, *Technical University of Graz (TUGRAZ)*, também tem produzido modelos do campo de gravidade a partir dos dados do GRACE, concomitantemente dados do EWH.

Concomitantemente às informações advindas da missão GRACE para estudar o comportamento das águas, é possível agregar mais conhecimento por meio do estudo dos movimentos verticais da crosta através de medidas na superfície terrestre. Neste contexto, tem-se utilizado informações advindas de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e estações limimétricas (COSTA, 2011).

Uma maneira de detectar as variações de massas da Terra e o seu comportamento em virtude da mudança do ciclo da água em regiões específicas é por meio da análise e manipulação

adequada da componente altimétrica dos dados advindos das estações geodésicas da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS - RBMC, as quais possibilitam, por meio de processamento dos dados da rede, monitorar o deslocamento horizontal e vertical, da superfície física, caso ele ocorra ao longo do tempo, fazendo o uso de coordenadas tridimensionais. (CASTRO JÚNIOR et al., 2018). Neste contexto, as estações linimétricas da Agência Nacional de Águas (ANA) também possibilitam a verificação de mudanças de nível d'água fazendo uso das informações de valores das cotas observadas pelos técnicos da ANA em grandes bacias e rios brasileiros que relaciona diretamente com os movimentos verticais da superfície física (COSTA, 2011).

Posto isso, há a possibilidade de relacionar informações geoespaciais e *in situ* por meio de séries temporais para seis locais pré-estabelecidos no estado de Minas Gerais?

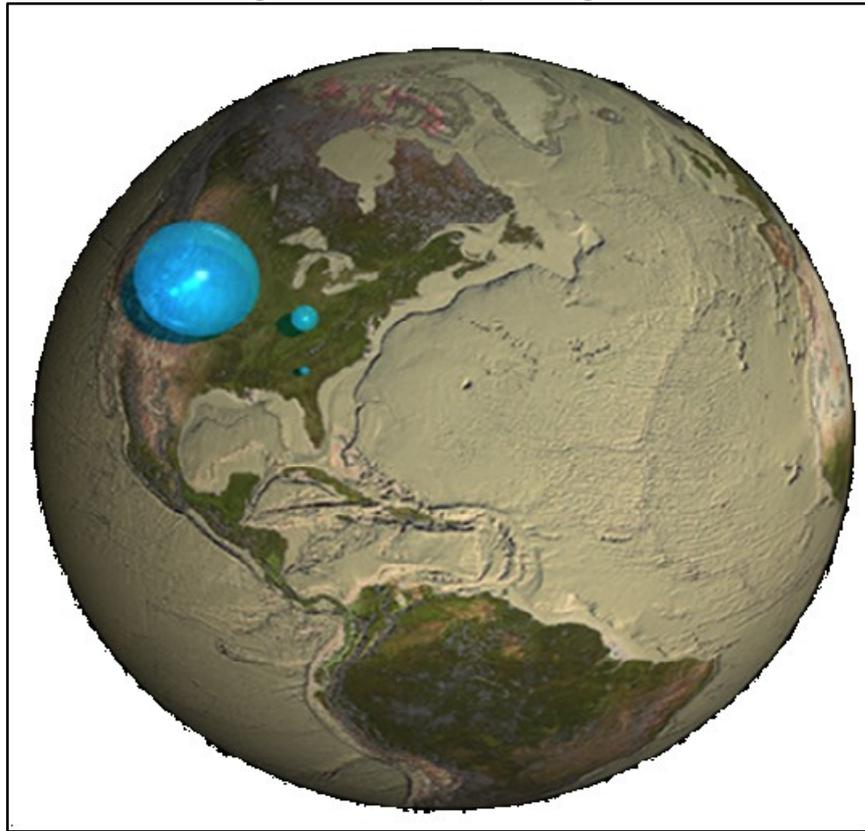
## 1.2 Objetivo

Verificar a relação entre a sazonalidade do ciclo hidrológico das águas superficiais e subterrâneas, e movimentações verticais da crosta terrestre em Minas Gerais por meio de dados GRACE, ANA e GNSS em seis locais do estado.

## 1.3 Justificativa

Devido a atual situação dos recursos hídricos e sua gestão, novos trabalhos que quantifiquem a distribuição e o volume de água no planeta são necessários. A Geodésia tem-se preocupado com o comportamento deste recurso natural bem como com sua distribuição. Sabe-se que 70% do planeta é coberto por água, mas deste total de água superficial, 97% é formado por águas salgadas. Dentre os 3% de água doce da Terra, 71% é de difícil obtenção, pois se encontra em estado sólido nas geleiras. O restante de água doce em estado líquido está distribuído da seguinte maneira; 18% em águas subterrâneas, 7% em rios e lagos e 4% em umidade do ar (PINTO, 2017). A Figura 1 apresenta a distribuição de água no planeta se a mesma estivesse sob a forma de uma gota. A gota de maior tamanho representa o volume total de água no planeta, salgada mais doce em todos os estados físicos, a segunda gota representa o total de água doce em estado sólido e a terceira o volume total de água doce em estado líquido e gasoso.

Figura 1 - Distribuição de água na Terra.



Fonte: [www.cekresi.win](http://www.cekresi.win), acesso em 25 de mar. 2019.

A preocupação com o meio ambiente e os efeitos da geodinâmica fez com que vários pesquisadores buscassem desenvolver estudos nessa linha de pesquisa. Isso posto, torna-se importante quantificar e verificar os recursos naturais bem como a influência de alguns deles, como a distribuição das águas, na geodinâmica terrestre.

O Brasil por ser um país de proporções continentais possui grandes reservas hidrológicas. Assim sendo, o conhecimento em escala geográfica local e regional constitui ferramentas primordiais na quantificação deste recurso natural. É, então, necessário prever como a água tem se comportado ao longo do tempo devido à sazonalidade de seu ciclo e qual a influência da mesma nos movimentos verticais da superfície da Terra.

Minas Gerais faz parte de quatro bacias hidrográficas, sendo elas: São Francisco, Atlântico Leste, Atlântico Sudeste e Paraná. Considerando as dimensões dessas bacias, existem dificuldades atreladas à obtenção de informações *in loco*. Com isso, torna-se importante estimar o comportamento dinâmico dos locais por meio de técnicas geodésicas.

Sabe-se que a variação da carga de massa d'água é a principal contribuinte para que haja movimentos verticais da crosta terrestre (XAVIER, 2012). Pensando nisso, com o lançamento das missões espaciais, como a dos satélites GRACE, as regiões de difícil acesso das bacias

mencionadas, neste caso, puderam ser monitoradas indiretamente, no que tange à quantificação de água, e bons resultados têm sido obtidos (para maiores detalhes veja ALMEIDA FILHO 2009 e COSTA 2011). Isso posto, a motivação deste trabalho se divide em duas vertentes, a primeira concerne à responsabilidade social à qual busca contribuir com pesquisas de gestão dos recursos hídricos, auxiliar as autoridades nas tomadas de decisões e mitigar riscos como enchentes ou secas, e a segunda, tange à inovação tecnológica que visa acompanhar os processos dinâmicos do planeta Terra e realizar testes quanto às relações entre tecnologias remotas e terrestres objetivando resultados rápidos e precisos.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Hidro-Geodésia

As mudanças físicas as quais o planeta Terra está sujeito é de interesse de vários estudiosos de diversas áreas do conhecimento. Dentro da Geociências uma de suas vertentes denomina-se Geodésia (CASTRO JÚNIOR, 2018). No passado a Ciências Geodésicas se subdividia em três grandes pilares, sendo: Geométrica, Espacial e Física. Porém, tal divisão não é mais plausível já que atualmente há uma interação entre as três. Assim sendo, pode-se dizer que a Geodésia é uma ciência que se preocupa com a forma e dimensão da Terra, seus parâmetros de rotação e com o campo de gravidade (Figura 2), (GUIMARÃES, 2010).

Figura 2 - Objetos da Geodésia.



Fonte: <https://www.iag-aig.org/geodesy>. Acessado em: 04 de dez. de 2019.

A Geodinâmica é um ramo da Geofísica que tem sido alvo de estudos entre geodestas. Isso ocorre devido à crescente necessidade de estimar o comportamento dinâmico ao qual o planeta está submetido como: o aumento do nível médio dos mares, derretimento das calotas polares, desastres naturais, tais como terremotos, furacões, tsunamis, inundações, secas, entre outros. (MONICO, 2018).

Para que decisões assertivas sejam tomadas é importante que haja o monitoramento destes processos dinâmicos. Um exemplo de monitoramento considerado o Estado da Arte na Geodésia, trata-se do acompanhamento da deflexão vertical da crosta terrestre relacionada à variação da carga hídrica (superficial e subterrânea) do planeta (CASTRO JÚNIOR et al., 2018). Pesquisas com este viés tem-se constituído através do

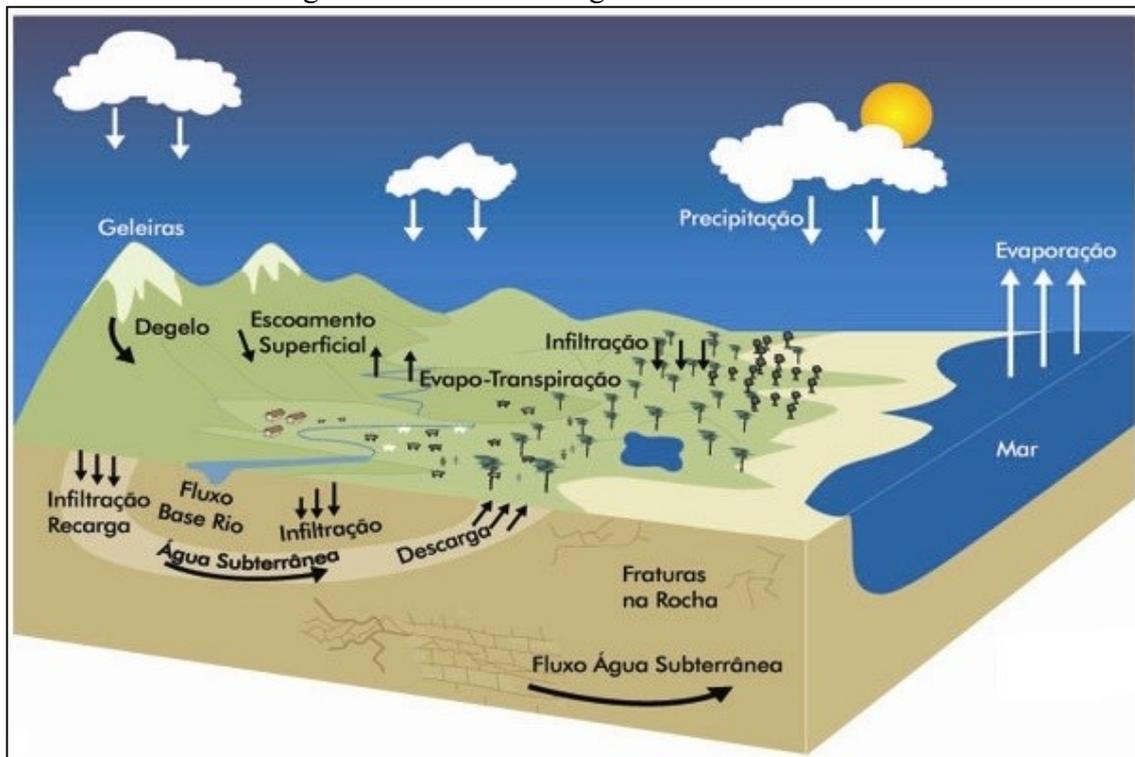
intercâmbio entre diferentes áreas e métodos de pesquisas. Esta nova vertente que concilia a Geodésia e a Hidrologia, vem buscando correlacionar estas ciências em aplicações ambientais que envolva a variação do ciclo hidrológico por meio de um desenvolvimento técnico-científico (FERREIRA, 2018).

A partir dos anos 2000 que emerge uma nova área de pesquisa na Geodésia. Este novo ramo denominado Hidro-Geodésia, assim como o próprio nome sugere trata-se de estudos ligados à Geodésia e a Hidrologia. A Hidro-Geodésia pode ser definida como área da Geodésia que através de mensurações obtidas por sensores geodésicos a bordo de satélites tem como objetivo quantificar a distribuição e o movimento da água no planeta, seja na atmosfera, na superfície terrestre ou no interior da Terra (FERREIRA, 2018).

No que concerne à Geodésia como já dito, essa ciência se ocupa com estudos voltados para as questões de distribuição de massas na Terra e também do seu campo de gravidade (BLITZKOW; MATOS, 2002). Além disso, objetiva dar suporte para diversas atividades entre elas trabalhos relacionados às engenharias como na implantação de canais portuários, dutos, hidrelétricas e atividades que envolvam o deslocamento de fluidos, como também práticas agrícolas (mapeamento e correções de solo fazendo o uso do GNSS), e desastres ambientais.

Do mesmo modo, a Hidrologia é uma ciência embasada em processos que envolve o meio físico natural, a qual analisa e prevê a sazonalidade do ciclo hidrológico do planeta Terra. Este ciclo se resume no movimento contínuo da água presente nos oceanos, continentes (superfície, solo e rocha) e na atmosfera. Essa dinâmica é alimentada pela força de gravidade e pela energia do sol, que provocam a evaporação das águas fazendo com que parte do seu volume mude constantemente de forma (líquida, sólida e gasosa) (Figura 3) (ANA; MMA, 2014). Alguns dos objetivos da Hidrologia são: dar suporte à estudos agrônômicos, hidroelétricos, preservação da água potável e trabalhos de engenharia como prevenção de enchentes numa determinada localização (FERREIRA, 2018). Desde o surgimento da era espacial tem-se utilizado de técnicas de posicionamento via GNSS para os estudos citados acima.

Figura 3 - Ciclo Hidrológico do Planeta Terra.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente – MMA (2019).

Com o advento da era espacial, a Geodésia passou por grande revolução, pois novas técnicas de observações e estudos de fenômenos surgem até então impossíveis de serem considerados (BLITZKOW; MATOS, 2002). Alicerçado às técnicas de posicionamento geodésico, hoje se tornou praticável estudos que envolvam a variação da carga de massa de água no planeta, investigações de sua influência em processos ligados ao meio ambiental e deflexão da crosta terrestre de forma acurada e precisa (COSTA, 2011).

Dentre os avanços ocorridos na Geodésia, destaca-se a implantação da rede de estações geodésicas ativas pertencentes à RBMC, que desde 2000 estão vinculadas à um sistema de referência denominado Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS). Sua concepção é realizada por meio de uma rede geodésica densificada por toda a América Latina e Caribe. Estes aparelhos rastreiam ininterruptamente sinais dos satélites do GRACE, onde mediante à uma formulação matemática são convertidos em coordenadas cartesianas (X, Y, Z). Isso ocorre ao longo do tempo referido à uma época, no caso do Brasil usa-se a época 2000,4 uma vez que a mesma corresponde ao período da campanha SIRGAS realizada em 2000 (i.e., em maio daquele ano) (IBGE, 2019).

Por intermédio das aplicações via GNSS (principalmente através das estações geodésicas ativas) se tornou viável estimar a variação da altitude numa escala milimétrica

quando há variação do volume de água. Isso porque, ao haver variação neste volume há também alterações na superfície terrestre no que concerne aos movimentos verticais. Isto, dado que ao alterar a carga de massa d'água o valor da força gravitacional também mudará fazendo com que haja uma possível movimentação vertical da crosta. Uma vez que este movimento influencia diretamente em projetos de engenharia e afeta não só a dinâmica do meio ambiente como também à sociedade, é de suma importância uma atenção especial para o assunto (CASTRO JÚNIOR et al., 2018).

Além de aplicações terrestres para medição da variação do volume de água conforme exposto acima (GNSS e estações linimétricas), há também técnicas advindas de missões espaciais como é o caso da missão espacial GRACE. Isso pelo motivo de que a partir dela é possível estimar o equivalente à altura d'água no planeta Terra ao converter os dados de gravidade observados pelos sensores a bordo dos satélites. Posto isso, unindo técnicas terrestres e satelitais, pesquisadores têm conseguido estimar o comportamento da crosta terrestre quando há variações sazonais do ciclo hidrológico (FERREIRA, 2018). No entanto, mais pesquisas devem ser realizadas almejando o aprimoramento e melhorias nos resultados finais, já que se trata da análise de recursos hídricos e suas implicações (COSTA, 2011).

Posto a pequena quantidade de água doce disponível e a dificuldade de obtenção de sua maior parte, nos últimos anos alguns estudos apresentaram propostas para o uso de dados GRACE com o objetivo de quantificar o volume da carga hídrica bem como a deflexão vertical da crosta terrestre (XAVIER, 2012). Nos próximos parágrafos serão elucidados alguns trabalhos referentes a esta temática.

Castro Júnior et al. (2018), propuseram uma reflexão no emprego de informações da missão GRACE para detectar oscilações altimétricas de pequena magnitude em quatro grandes bacias hidrográficas brasileiras, sendo elas a Amazônica, a do rio Tocantins, a do rio Paraná e a do rio São Francisco (Figura 4). Para tanto, utilizaram dados altimétricos das estações SIRGAS para validar esta proposta. Por meio da comparação entre variações de altitudes advindas do processamento dos dados GNSS e espessura equivalente de água.

Figura 4 - Bacias hidrográficas estudadas por Castro Junior et al. (2018).



Fonte: Castro Junior et al. (2018).

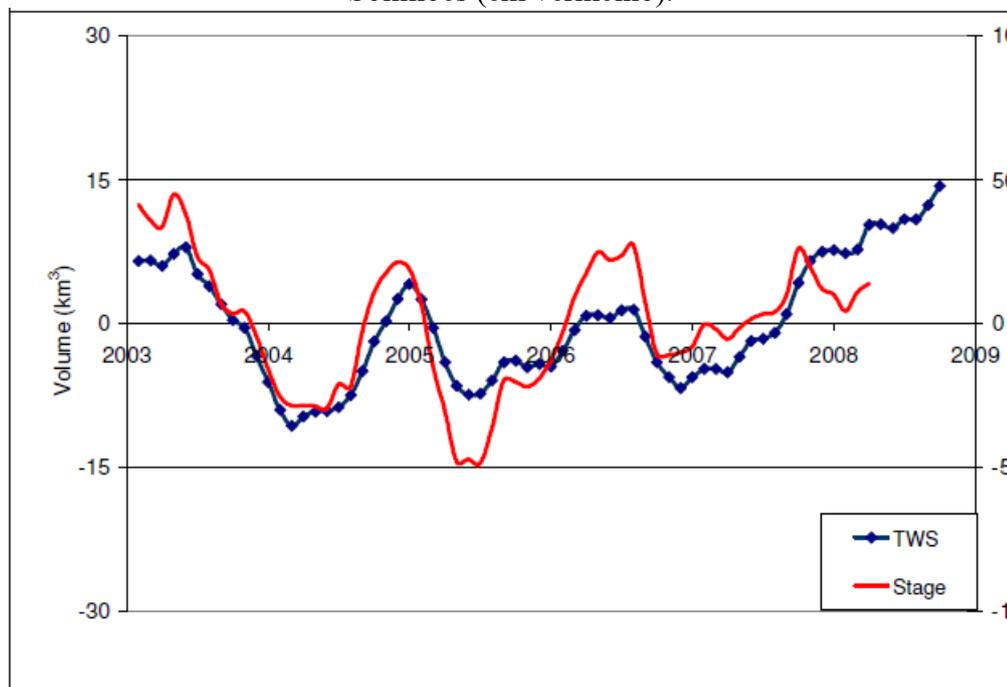
Pesquisas de âmbito internacional também estão sendo realizadas em estudos da Hidro-Geodésia. FERREIRA et al. (2018), utilizou dados relativos ao *Total Water Storage* (TWS), ou seja, o armazenamento total de água, calculado pelo GRACE para investigar as variações de água e sua resposta às secas nas bacias de Volta, Níger e Senegal na África Ocidental. A partir de tal proposta, desse modo os dados de TWS contribuíram para a gestão da água na África Ocidental.

No trabalho de GIACOMETTI et al. (2017), usaram dados de temporada de seca e cheia obtidos pelo GRACE para propor uma análise da influência da carga hídrica na acentuação do soerguimento da crosta terrestre. Para tanto, usou-se informações da estação geodésica pertencente à RBMC localizada em Inconfidentes/MG para monitorar o comportamento no rio

Mogi-Guaçu fazendo o uso do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). O resultado obtido aponta que mesmo a uma distância de aproximadamente 500 m e a uma diferença de nível de 35 m do rio, a carga de massa hídrica influencia diretamente na altitude.

XAVIER (2012), discute sobre uso de dados da missão GRACE em aplicações na Bacia Amazônica. Para tanto, comparou os dados entre GRACE, espessura equivalente de água e nível médio dos principais rios desta bacia. Além disso, realizou uma comparação entre os padrões de variação espaço-temporais dos dados de chuva e GRACE, nas principais sub-bacias da bacia amazônica (Solimões, Madeira, Negro, Tapajós e Xingu). Os resultados obtidos apontaram forte correlação entre as diferentes fontes de dados (Figura 5).

Figura 5 - Comparação entre os dados obtidos pelo GRACE (em azul) e de nível médio do rio Solimões (em vermelho).

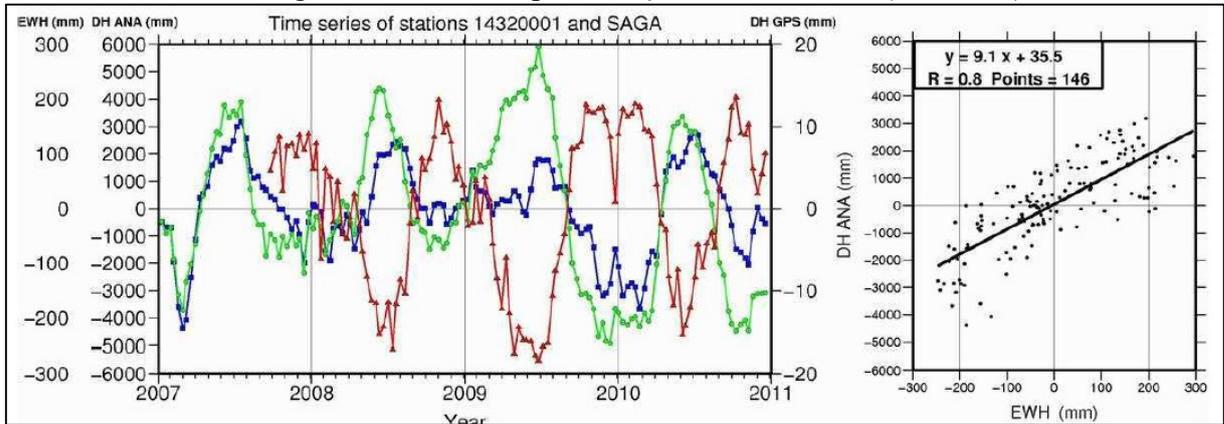


Fonte: XAVIER (2012).

Em outro estudo, COSTA (2011) fez o uso de dados GRACE para verificar a relação entre a carga d'água e as variações da crosta devido ao ciclo hidrológico. Fazendo o uso de modelos do equivalente à altura d'água e da deflexão vertical da crosta terrestre com dados *in situ*, advindos das estações linimétricas da ANA e das estações GNSS, respectivamente. Os resultados alcançados se mostraram válidos para algumas das regiões estudadas próximas à Manaus, Urucurituba, Porto Velho e Tabatinga. As demais regiões Marabá, Imperatriz, Palmas e Cuiabá, apontaram diferenças entre 10 e 50 dias entre o ciclo da água armazenada obtida pelo

GRACE e da água superficial obtida nas estações da ANA, indicando atraso dos modelos GRACE. A Figura 6 aponta uma das análises realizadas neste estudo.

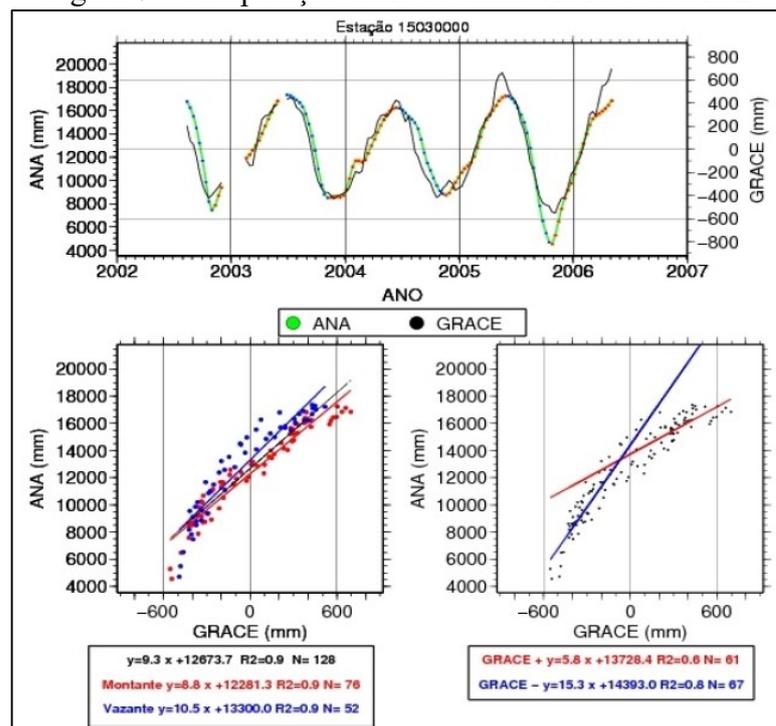
Figura 6 - Série temporal da variação da altura d'água (superficial e subterrânea) obtida pelo GRACE (verde), da variação superficial obtida pela estação da ANA (azul) e da variação da altitude geométrica obtida pela estação GNSS SAGA (vermelho).



Fonte: COSTA (2011).

ALMEIDA FILHO (2009), análise de correlação conseguiu postular, por meio da comparação de dados *in situ* do nível d'água advindos de estações limimétricas da ANA e dados da missão GRACE (Figura 7), que é possível detectar o comportamento da dinâmica das águas e estimar em grande escala processos de variações do campo gravitacional e cotas d'água em áreas inundáveis e não monitoradas pelo difícil acesso.

Figura 7 - Comparação entre os dados ANA e GRACE.



Fonte: ALMEIDA FILHO (2009).

## 2.2 Missão GRACE

A missão por satélites artificiais GRACE foi um novo salto dado pela comunidade científica na continuação das missões espaciais modernas. Ocorreu por meio de uma parceria entre as agências Estadunidenses, *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) da *University of Texas Center for Space Research* (UTCSR) e Alemã, *Deutsche Forschungsanstalt für Luft und Raumfahrt – Geoforschungs Zentrum* (DLR-GFZ). Um de seus principais objetivos concerne na aquisição de medidas precisas do campo gravitacional da Terra para prever a redistribuição de massa terrestre com uma resolução temporal de no mínimo 10 dias (ROSENHAIM, 2017).

Seu lançamento ocorreu em dia 17 de março de 2002 na Rússia, especificamente na base de lançamentos de Plesestk a cerca de 800 km ao norte de Moscou e ao sul de Arkhangelsk. A missão estimava a vida útil dos satélites em cinco anos, mas foi estendida por mais dez anos, e seu fim ocorreu no ano de 2017. Visando manter a missão ativa a NASA e DLR-GFZ, lançaram novos satélites agora denominados *GRACE Follow-On*, que foi a continuação da missão (NASA, 2019).

Foi a partir da missão GRACE que tornou-se possível aferir o campo de gravidade com uma qualidade 100 vezes mais precisa que qualquer outra ocorrida até aquele momento para médios e longos comprimentos de ondas dentro da Geodésia moderna (ROSENHAIM, 2017). A concepção técnica que permitiu tal façanha se baseia nas observações das variações gravitacionais no tempo por meio de perturbações orbitais que os satélites são submetidos. A mensuração destes abalos acontece graças aos sensores embarcados nas espaçonaves sendo eles; acelerômetros, receptores GPS, câmeras estelares e distanciômetros (Figura 8). Assim, estes impactos podem ser medidos em escala numérica com alta precisão (ALMEIDA FILHO, 2009).

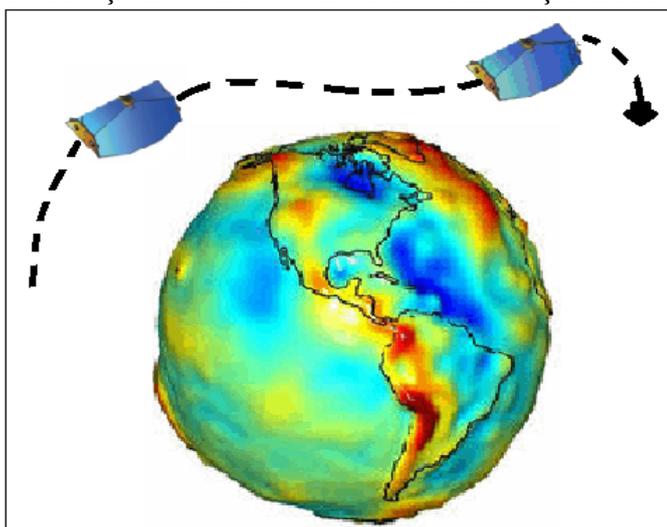
Figura 8 - a) acelerômetro ACC; b) receptor GPS; c) duas câmeras estelares e a DPU.



Fonte: ALMEIDA FILHO, 2009 *apud* GFZ-POTSDAM.

A modificação da carga hídrica seja ela superficial ou subterrânea, influencia diretamente na movimentação vertical da superfície física da Terra. Essa elasticidade se dá, em partes, pela sazonalidade do ciclo hidrológico devido à variação da massa d'água. Isso porque, estruturas. Essa dinâmica de comportamento pode ser analisada por meio de conversões das soluções do EIGEN advindas da missão GRACE (CASTRO JÚNIOR et al., 2018). A Figura 9 ilustra o comportamento dos satélites GRACE na obtenção das informações gravimétricas relativas à variação de massa na Terra.

Figura 9 - Ilustração da relação entre a massa da Terra e variações observadas pelo GRACE.



Fonte: Adaptado de FERREIRA (2018); SIMGEO.

Para que estudos possam ser realizados utilizando as informações supracitadas é preciso uma conversão dos dados gravimétricos obtidos pelo GRACE em dados de equivalente à altura d'água (CASTRO JÚNIOR et al., 2018). Feito isso, é possível correlacioná-los com as informações das outras fontes. Além disso, o GRACE possibilitou outras aplicações sendo elas; informações sobre a mudança do nível dos oceanos, validação de modelos hidrológicos de grandes bacias, variação sazonal do armazenamento de água, estudo do balanço hídrico, monitoramento e prevenção de secas (FERREIRA, 2018).

### 2.2.1 Características dos satélites GRACE

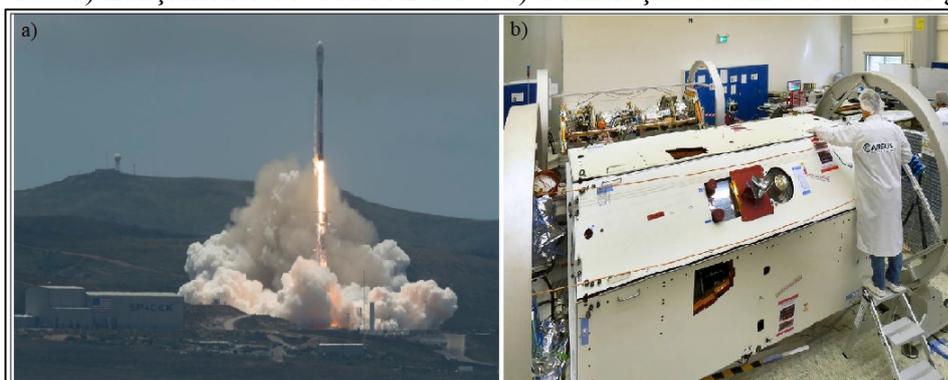
O programa GRACE, trata-se de uma missão interdisciplinar da ciência da Terra que obtém informações sobre o campo de gravidade terrestre em escala mensal (CAGIDO, 2017). A missão compõe-se de um par de satélites artificiais gêmeos de formato trapezoidal, distantes entre si em aproximadamente 220 km e monitorados por um sistema de micro-ondas através de um distanciômetro a bordo com precisão de até 1 micrômetro, (ROSENHAIM, 2017).

Cada um destes veículos espaciais possui dimensões aproximadas de 1,94 m de largura, 3,12 m de comprimento, 0,72 m de altura e massa de 487 kg. A energia que alimenta a bateria de níquel-hidrogênio depende de 4 painéis solares compostos de silício localizados na parte superior e lateral do satélite (CAGIDO, 2017). Sua trajetória é característica das missões espaciais modernas com um período orbital ( $T$ ) de 91 minutos, ou seja, circunda a Terra quase 16 vezes por dia, (ROSENHAIM, 2017). A inclinação das espaçonaves compreende uma órbita quase polar cujo ângulo é de  $89^\circ$  e distante da superfície terrestre em aproximadamente 500 km (ALMEIDA FILHO, 2009).

### 2.2.2 GRACE *Follow-On*

A missão espacial GRACE, que perdurou por 15 anos, teve suas atividades encerradas em 2017. No entanto, para dar prosseguimento à missão que visou a obtenção de dados sobre a redistribuição de massa na Terra, em 22 de maio de 2018 foram lançados da base aérea de Vandenberg, na Califórnia os novos satélites desta missão, agora intitulada como GRACE-FO (Figura 10) (NASA, 2019).

Figura 10 - a) Lançamento do GRACE-FO e b) Construção de um dos satélites gêmeos.



Fonte: NASA (2019). Acesso em 04 abr. 2019.

O programa GRACE-FO (*Follow-On*) também é uma parceria entre as agências Estadunidense (NASA) e Alemã (DLR-GFZ). Segundo a agência americana estes novos satélites estão obtendo dados iguais ou até mais precisos que seus antecessores. A concepção técnica da nova missão é constituída pelos mesmos equipamentos utilizados na missão anterior sendo eles: acelerômetros, receptores GPS, câmeras estelares e distanciômetros (NASA, 2019).

### 2.2.3 Equivalente à altura d'água dos modelos GRACE

O *Equivalent to water height* (EWH) é um estimador que quantifica a água armazenada na superfície e no subsolo da Terra com uma resolução espacial de 400 km o qual é estimado com uma resolução temporal de dez dias pelo *Centre National d'Études Spatiales e Groupe de Recherche de Geodésie Spatiale* (CNES/GRGS) (COSTA, 2011). Esta variável é obtida através da inversão das soluções globais da gravidade denominadas *European Improved Gravity Model of the Earth by New Techniques* (EIGEN). Como os resultados sobre as variações da massa d'água obtidas nas grades do GRGS se limitam a um intervalo de dez dias, os coeficientes de Stokes utilizados são calculados e convertidos em EWH à mesma taxa (COSTA, 2011).

Para se determinar o equivalente à altura d'água nos primeiros meses da missão GRACE três etapas foram necessárias: obtenção da carga de superfície por meio dos modelos do geopotencial, aproximação dos deslocamentos de massa d'água a partir de modelos climáticos globais, os quais determinam os erros na determinação da órbita e a decorrente imprecisão na obtenção dos coeficientes de Stokes, e aplicação de um filtro de expansão isotrópica. O segundo passo citado foi importante devido à falta de redundância nas passagens do satélite em torno da Terra, o que não se faz mais importante, pois há informações suficientes para determinar os deslocamentos de massa d'água (ALMEIDA FILHO, 2008).

No que tange ao primeiro passo supracitado, os modelos do geopotencial que são variáveis no tempo  $\delta G(t)$  são estimados através da diferença entre as soluções mensais  $G(t)$  obtidos a partir do GRACE na época  $t$  e o modelo  $G_0$  do campo estático (equação 1) (ALMEIDA FILHO, 2008).

$$\delta G(t) = G(t) - G_0 \quad (1)$$

Desse modo, o resultado desta diferença reflete apenas a mudança, em curto prazo, associada à distribuição de massa de superfície. Para poder descrever as soluções variáveis no tempo, admite-se  $\delta C_{nm}(t)$  e  $\delta S_{nm}(t)$  sendo as variações nos coeficientes de Stokes de grau e ordem  $n$  e  $m$  respectivamente, na época  $t$  (equação 2) (ALMEIDA FILHO, 2008).

$$\delta G(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n (\delta C_{nm}(t) \cos(m\lambda) + \delta S_{nm}(t) \sin(m\lambda)) P_{nm}(\cos\theta) \quad (2)$$

onde  $N$  é o mais alto grau da série truncada,  $\theta$  é a co-latidade,  $\lambda$  é a longitude e  $P_{nm}$  são as funções associadas de Legendre. Desconsiderando alguns fatores que causam variações de massa dentro da Terra devido às tectônicas como terremotos, pós-glacial e a convecção da crosta, pode-se supor que o  $\delta G(t)$  (equação 3) é meramente a soma de  $K$  contribuições dos fluídos superficiais e estas não estão se relacionando no espaço-tempo (ALMEIDA FILHO, 2008).

$$\delta G(t) = \sum_{k=1}^K \delta G_k(t) = A \delta G_k \quad (3)$$

onde  $A$  é a matriz formada por uma coluna de blocos de matrizes identidade que assegura a não correlação entre as diferentes contribuições dinâmicas. Os coeficientes  $\delta C_{nm}^h(t)$  e  $\delta S_{nm}^h(t)$  (equação 4) correspondentes à variação da anomalia de altura podem ser estimados a partir de uma dada densidade de massa da camada superficial  $\delta h(t)$ , usando o filtro linear (ALMEIDA FILHO, 2008).

$$\begin{cases} \delta C_{nm}(t) \\ \delta S_{nm}(t) \end{cases} = W_n^0 \begin{cases} \delta C_{nm}^h(t) \\ \delta S_{nm}^h(t) \end{cases} \quad (4)$$

$W_n^0$  é definido como uma função estacionária isotrópica que dá peso aos coeficientes das funções harmônicas (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$W_n^0 = \frac{4\pi GR\rho_w}{(2n+1)\gamma(\theta)} (1 + Z_n) \quad (5)$$

e

$$\gamma(\theta) = 9.7803 \frac{1+0.00193\cos^2\theta}{\sqrt{1-0.00669\cos^2\theta}} \quad (6)$$

onde  $\gamma(\theta)$  é a gravidade normal referida ao elipsoide de referência,  $z_n$  equivale aos números de Love de grau  $n$  para a resposta elástica da crosta,  $R \approx 6.378.137$  m é o raio médio da Terra e

$\rho_w \approx 1.000 \text{ kg.m}^{-3}$  é a densidade d'água (ALMEIDA FILHO, 2008).

Os geoides ditos sintéticos são obtidos por meio das anomalias artificiais geradas pelos modelos globais. Os coeficientes são expressos na equação 7 (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\begin{Bmatrix} \delta C_{nm}(t) \\ \delta S_{nm}(t) \end{Bmatrix} = \frac{1}{(2n+1)MR^n} \iiint_Q [\delta\rho(r', \theta', \lambda', t) r' n P_{nm}(\cos\theta) \begin{Bmatrix} \text{COS} \\ \text{SEN} \end{Bmatrix} (m\lambda')] dQ \quad (7)$$

onde  $M \approx 5,97602 \times 10^{24} \text{ kg}$  é a massa total da Terra e  $\delta\rho(r', \theta', \lambda', t)$  é a variação da densidade dentro do volume  $Q$  da mesma no ponto  $(r', \theta', \lambda', t)$ . As redistribuições de massa  $\delta\rho dQ$  dentro do volume  $Q$  produzem variações nos coeficientes  $\delta C_{nm}^h$  e  $\delta S_{nm}^h$ . Sabendo que a maior parte das variações de massa  $\delta\rho(r', \theta', \lambda')$  ocorrem na superfície  $R^2 \delta q dS$ , onde  $\delta q(r', \theta', \lambda', t)$  é a densidade da camada de superfície e  $S$  é a superfície da Terra, e considerando a deformação elástica da Terra sólida sob a carga variável via os Números de Love  $z_n$ , a expressão (7) pode ser reescrita por meio da equação 8, (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\begin{Bmatrix} \delta C_{nm}(t) \\ \delta S_{nm}(t) \end{Bmatrix} = \frac{(1+z_n)R^2}{(2n+1)M} \iint_S \delta q(\theta, \lambda, t) \begin{Bmatrix} \text{COS} \\ \text{SEN} \end{Bmatrix} (m\lambda) P_{nm}(\cos\theta) dS \quad (8)$$

A redistribuição de massa atmosférica é deduzida a partir dos dados de pressão atmosférica na superfície. A carga variável  $\delta q(\theta, \lambda, t)$  está relacionada com a anomalia de pressão  $\delta p(r, \theta, \lambda)$  por meio da equação 9 (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\delta q(\theta, \lambda, t) = \frac{\delta p(\theta, \lambda, t)}{\rho_w \gamma(\theta)} \quad (9)$$

Vale salientar que essa fórmula também pode ser usada para calcular a carga na superfície oceânica derivada da pressão no fundo dos mares estimada pelos modelos de circulação oceânica (ALMEIDA FILHO, 2008).

As massas continentais d'água consideradas incluem as águas do solo, as águas subterrâneas e a espessura da camada de neve. É por meio destas três contribuições advindas de modelos globais hidrológicos que pode-se expressar o equivalente à altura d'água  $\delta h(r, \theta, \lambda)$  e a carga de superfície correspondente é dada pela equação 10 (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\delta q(\theta, \lambda, t) = \rho_{w,s} \delta h(\theta, \lambda, t) \quad (10)$$

onde  $\rho_{w,s}$  pode ser a densidade d'água ou da neve.

Como a etapa seguinte já não se faz mais necessária devido à superabundância de observações, explica-se a terceira e última etapa para obtenção do EqW. As contribuições de grau  $n$  das variações na altura geoidal  $\Delta h_n^{geoid}$  podem ser traduzidas em variações do EqW através da relação dada pela equação 11 (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\Delta h_n^{água} = \frac{g}{4\pi GR\rho_w} \sum_{n=2}^{50} \frac{2n+1}{1+Z_n} \Delta h_n^{geoid} \quad (11)$$

onde  $\Delta h_n^{geoid}$  pode ser descrito através da equação (12) (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\Delta h_n^{geoid} = \Delta N(t) = \frac{\Delta T(t)}{\gamma} \quad (12)$$

onde, para o período  $t$ ,  $\Delta N(t)$  é a variação da altura geoidal e  $\Delta T(t)$  é a variação do potencial perturbador, dado pela equação 13 (ALMEIDA FILHO, 2008):

$$\Delta T(t) = GM \sum_{n=2}^{\infty} \frac{R^n}{r^{n+1}} \sum_{m=0}^n P_{nm}(\sin\theta) [\delta C_{nm}^*(t) \cos m\lambda + \delta S_{nm}^*(t) \sin m\lambda] \quad (13)$$

onde  $\delta C_{nm}^*(t)$  e  $\delta S_{nm}^*(t)$  são os coeficientes das funções harmônicas esféricas das variações no tempo do potencial perturbador. Maiores informações sobre a formulação utilizada podem ser vista em Almeida Filho, 2008 e Costa, 2011.

### 2.3 Global Navigation Satellite System (GNSS)

As tecnologias espaciais modernas como o sistema GNSS têm sido amplamente utilizadas quando se trata do mapeamento da superfície física da Terra e suas diversas finalidades. Os sistemas de navegação via satélite despertam o interesse de uma gama de estudiosos para os mais variados fins. Isso posto, é de suma importância que haja um conhecimento técnico amplo (ALVES, 2013).

Atualmente, os sistemas que compõe o GNSS são: o Americano *Global Positioning System* (GPS), o Russo *Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), o Europeu GALILEO, o Chinês BEIDOU/COMPASS, o Japonês *Quase-Zenith Satellite System* (QZSS) e o Indiano *Indian Regional Navigation Satellite System* (IRNSS). A determinação de

uma coordenada na superfície física ou próxima a ela é dada, basicamente, por meio do cálculo da distância entre a antena de um receptor e pelo menos 4 satélites. Desse modo, admitindo como conhecida as coordenadas dos satélites é possível estimar com precisão milimétrica a posição do receptor que se encontra sobre a superfície da Terra (MONICO, 2008).

No Brasil, em 1995, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) começou a implementar uma rede geodésica ativa de alta precisão, denominada de RBMC. Esta rede é formada por um conjunto de estações equipadas com receptores GNSS. Um exemplo pode ser visualizada na Figura 11 que, além de um receptor GNSS possui uma estação meteorológica. Além disso, cada estação contém conexão de internet e fornecimento constante de energia elétrica para operar continuamente (IBGE, 2019). A concepção geral desta técnica se divide em quatro etapas sendo uma delas a parte de campo (aquisição de dados) e as restantes estabelecidas em escritório (elaboração, ajustamento e análise estatística da qualidade dos dados (GUZZATO et al., 2018).

Figura 11 - Estação geodésica do *Campus Alegrete* (UNIPAMPA), pertencente à RBMC.



Fonte: <http://www.unipampa.edu.br>, acesso em 20 mar. 2019.

Em 2019, o IBGE conta com mais de 138 estações distribuídas pelo território brasileiro. O objetivo principal da rede é o fornecimento de informações de forma rápida e com alta precisão para seus usuários, cujo produto final se encontra na ordem de cinco milímetros. Um segundo papel importante que vale salientar é que a RBMC vem contribuindo por meio de suas observações para a densificação regional da rede IGS (*International GNSS Service*) (IBGE, 2019). Além disso, estas informações são úteis na aplicação de séries temporais via GNSS para análises históricas. A Figura 12 ilustra a distribuição da última atualização, 15 de novembro de 2019, das estações da RBMC no Brasil.

Figura 12 - Estações geodésicas da RBMC, operantes (verdes), estado de advertência (amarelas), inoperantes (vermelhas) e inativas (cinza).



Fonte: Adaptado IBGE (2019), acesso em 15 nov. 2019.

Conforme exposto também no capítulo 4.1, trabalhos como de ALMEIDA FILHO (2008) e FERREIRA (2018) procuraram demonstrar o uso dessas informações. EWH, cotas advindas da ANA e altitudes da RBMC, para analisar essa dinâmica num contexto de grandes bacias hidrográficas. Nestes estudos, os autores apontaram uma correlação negativa dos dados obtidos via GNSS com estações limimétricas da ANA e GRACE. Assim sendo, através dessa divergência de informações entre nível de água e variação de altitude é possível modelar coeficientes que prevê a movimentação da crosta ao longo do tempo por meio de séries temporais (PROL, 2016).

Uma série temporal é um conjunto de observações ordenadas no tempo, nem sempre igualmente espaçadas, que apresenta uma dependência serial, ou seja, dependência entre instantes de tempo. Tradicionalmente a análise de série temporal se dá por meio da sua decomposição nas componentes de tendência, ciclo e sazonalidade (DOS REIS, 2007).

A tendência de uma série aponta seu comportamento de longo prazo, isto é, se ela cresce, decresce ou permanece estável. Os ciclos são definidos pelas oscilações de subida ou de queda, de forma amena e repetida, ao longo da componente de tendência. E a sazonalidade numa série corresponde às variações de subida e queda que sempre ocorrem em um determinado período do ano, do mês, da semana ou do dia. O que difere as duas últimas é que a sazonalidade possui movimentos previsíveis que ocorre em intervalo de tempo regular, enquanto que os movimentos cíclicos tendem a ser irregulares (DOS REIS, 2007).

As séries temporais advindas do posicionamento GNSS se dão através de coordenadas rastreadas e armazenadas ao longo do tempo. Posto isso, muitas são as aplicações na Geodésia, Geodinâmica e Geofísica para este tipo de análise. Um exemplo é observar a influência sazonal do ciclo hidrológico na deflexão da crosta (ALMEIDA FILHO, 2008).

## **2.4 Agência Nacional de Águas (ANA)**

A Agência Nacional de Águas (ANA) é uma agência reguladora que tem por finalidade gerir os recursos hídricos do Brasil. Pertencente à união ela foi criada pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) sob a lei nº 9.984 de Dezembro de 2000 a partir do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAE). Incumbida por supervisionar, controlar e avaliar as ações e atividades decorrentes do cumprimento da legislação federal pertinente aos recursos hídricos e outras deliberações (ANA, 2019). Neste contexto, um dos seus objetivos, desde 2009 (tomado como o marco zero), diz respeito a liberação de relatórios que detenham de informações sobre como se encontra a disponibilidade e demanda destes recursos no país (ROSENHAIM, 2017).

O monitoramento das águas em âmbito nacional se constituiu, a princípio, a partir do ano de 1855 onde há o registro de dados da primeira estação pluviométrica, na base de dados da ANA, denominada Morro Velho, em Minas Gerais. Contudo, foi entre as primeiras décadas do século XX que o governo federal incorpora tal serviço como uma responsabilidade pública federal e novas instituições surgem para seu gerenciamento. Num primeiro momento essa rede de monitoramento era de responsabilidade de empresas do setor energético as quais passaram a responsabilidade para a ANA quando esta surgiu no ano 2000 (ANA, 2019).

A ANA é responsável por coordenar a Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). No último levantamento a agência contava com 4.641 estações de monitoramento contínuo espalhadas em todo o território nacional sendo que dessas, 1.874 são estações fluviométricas destinadas às medições de vazões e níveis d'água e 2.767 estações pluviométricas que monitoram principalmente as chuvas (ANA, 2019). Vale salientar que, segundo a agência os números de estações se referem ao inventário de estações da ANA em 03/04/2018, podendo se alterar com certa frequência, em função da incorporação de novas estações ou de sua extinção.

Pensando em seus usuários a agência desenvolveu um portal eletrônico intitulado por HidroWeb (Figura 13) e também um aplicativo para aparelhos móveis o HidroWeb *Mobile*, no qual todas as informações coletadas pela RHN são disponibilizadas em formato de tabela a partir da busca por uma determinada estação por meio de seu código, nome, ou localização (ANA, 2019). As informações que são disponíveis neste portal têm diversas finalidades, indo desde a gestão dos recursos hídricos, geração de energia, irrigação, drenagem, setor de desenvolvimento urbano até projetos de grandes barragens. Além disso, pode-se utilizar destas informações para análises de séries temporais.

Figura 13 - Interface do HidroWeb.

The screenshot displays the HidroWeb v2.0.0.1 interface. At the top, there is a navigation bar with the ANA logo and a menu with options: Apresentação, Baixar Inventário, Séries Históricas, Mapa, Downloads, and Fale Conosco. The main content area is titled 'Séries Históricas de Estações' and features a search form labeled 'Pesquisar Estação'. The form includes input fields for 'Código da Estação', 'Nome Estação', 'Responsável (Sigla)', and 'Operadora (Sigla)'. It also has dropdown menus for 'Bacia' and 'Estado', both currently set to 'Todos'. At the bottom of the form are two buttons: 'Consultar' and 'Limpar'.

Fonte: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>; Acesso em 27 mar. 2019.

Como já definido no capítulo 4.3, as séries temporais permitem analisar tendências cíclicas ou sazonais nas mais diversas áreas do conhecimento. Pensando nisso, a ANA disponibiliza informações de nível d'água coletadas *in situ* diariamente em seu portal HidroWeb deste 2000. Com isso, a partir desses dados é possível prever o comportamento do nível d'água

no tempo e suas aplicações diretas e indiretas como a deflexão da crosta e cálculo de vazão, respectivamente (COSTA, 2011). Para obter tais dados é necessário apenas preencher os campos de consulta, código da estação ou nome (ALMEIDA FILHO, 2008).

#### 2.4.1 Estações Fluviométricas

As estações fluviométricas da ANA têm por finalidade a medição de vazões, níveis d'água de um rio (ANA, 2019). A medição do nível d'água é obtido por meio de régua limnimétrica (Figura 14), constituídas de material metálico ou madeira com pelo menos uma de suas faces contendo uma escala graduada que serve de parâmetro na determinação da altura de água do rio em estudo (MELATI, 2014). Para determinar o nível d'água são realizados registros e medições diárias *in loco* pelos técnicos em hidrologia e engenheiro hidrólogos da ANA (ANA, 2019).

Figura 14 - Estações Fluviométricas da ANA.



Fonte: Inventário das estações fluviométricas, 2009. Acesso em 27 mar. 2019.

#### 2.4.2 Estações Pluviométricas

A compreensão de como se comporta as precipitações ao longo do tempo é de interesse de vários estudiosos. Isso porque, ao se tratar da gestão hídrica é de suma importância que haja um planejamento e entendimento do seu potencial, pois, a precipitação pluviométrica constitui elemento de grande influência sobre as condições ambientais e têm implicações diretas em

grandes projetos de engenharia como dimensionamento de vertedouros de barragens, de canais, galerias pluviais e outros (MARCUIZZO, 2015).

No Brasil, mais de 99% das precipitações se fazem sob forma de chuva. Isso posto, o método mais convencional utilizado para tal medição são os pluviômetros. Estes são aparelhos simples feitos de materiais metálicos no formato cilíndrico que possui ao longo do seu corpo um reservatório para armazenamento da água acumulada. Há vários modelos disponíveis no mercado. Entretanto, no Brasil, o modelo mais utilizado é o *Ville de Paris* (Figura 15), com área de 400 cm<sup>2</sup>, onde 40 ml corresponde à 1 ml de precipitação. Seu manuseio é simples e facilitado por uma torneira situada no fundo do aparelho (ANA, 2014).

As estações pluviométricas da ANA utilizam o modelo citado acima para o monitoramento das precipitações em quase todo o território brasileiro. A coleta das informações é em horários pré-fixados (07h), e para determinar o volume acumulado utiliza-se uma proveta com calibração específica para o modelo empregado. Além da utilização da proveta para recolher o precipitado que acumulou a agência faz o uso de uma peneira localizada entre a área de captação e de depósito afim de evitar a evaporação e entrada de sujeiras (ANA, 2014).

Figura 15 - Estação Pluviométrica ANA, pluviômetro *Ville de Paris*.



Fonte: Banco de imagens, ANA (2019). Acesso em 30 de mar. 2019.

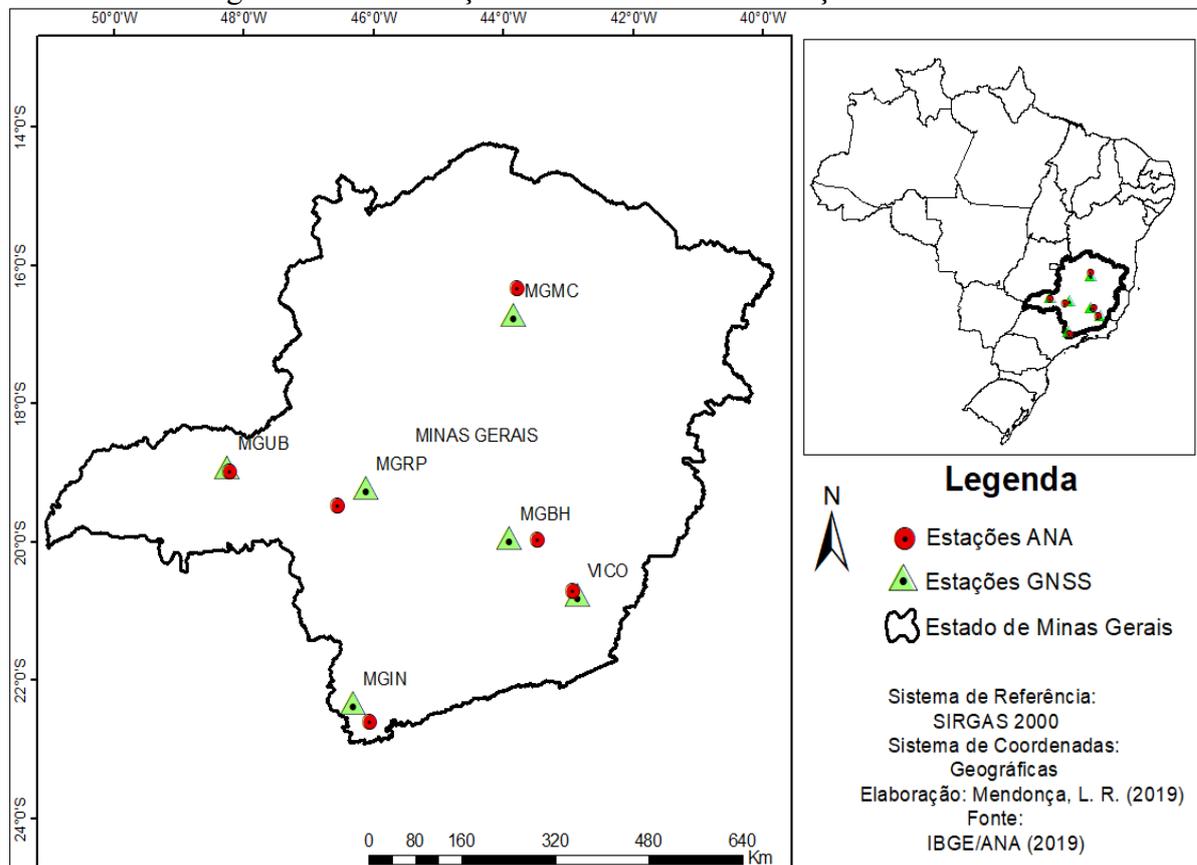
### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

Minas Gerais (Figura 16) está localizada na região Sudeste do país. O estado é o quarto maior no que tange a área territorial com 586.521,121 km<sup>2</sup>.

Vale destacar que Minas Gerais tem ficado também em segundo lugar na premiação da ANA que ocorre desde 2006 no que tange ao mérito de iniciativas que contribuam para a gestão e o uso sustentável dos recursos hídricos no Brasil (ANA, 2019).

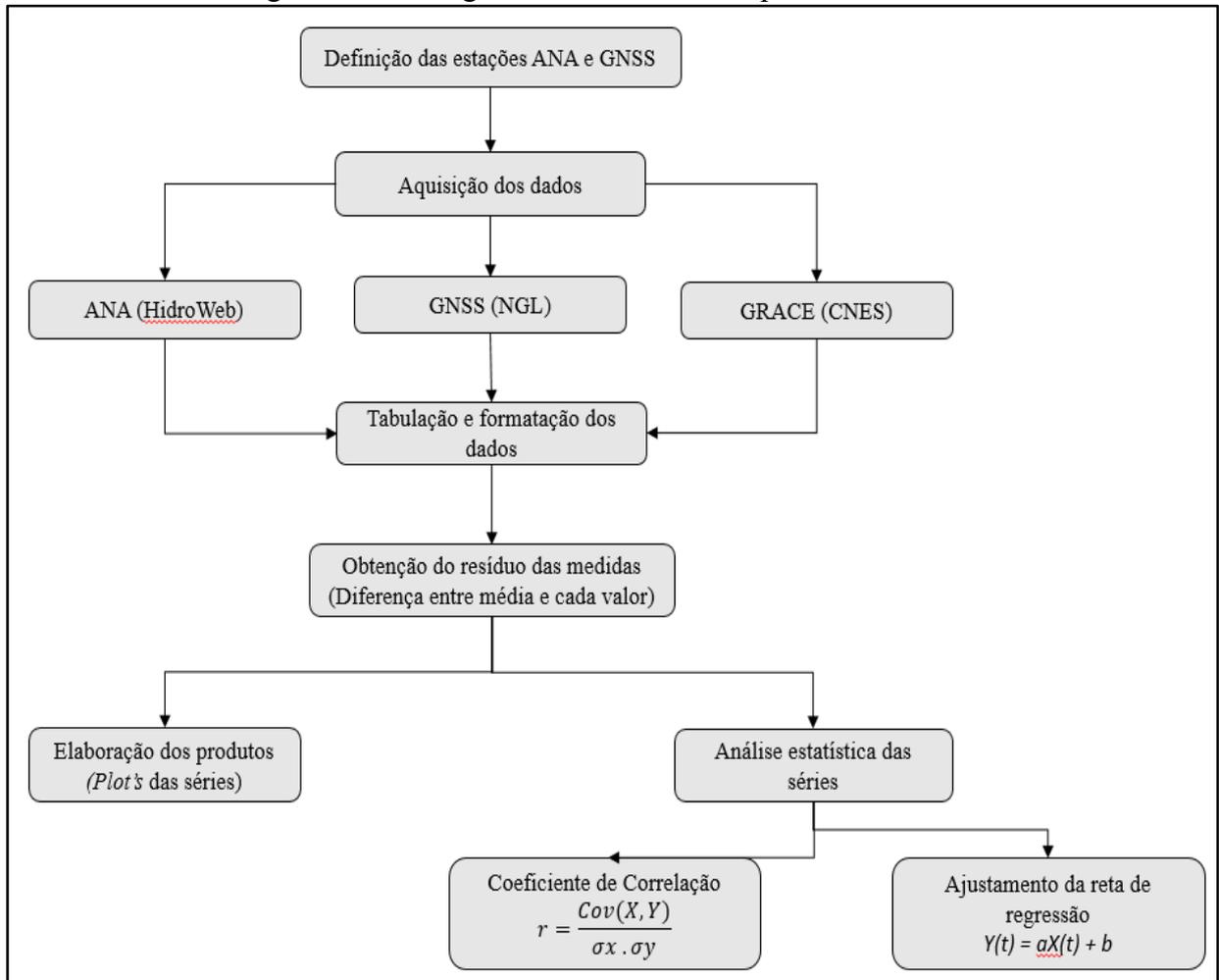
Figura 16 - Localização da área de estudo e estações utilizadas.



Elaboração: O Autor.

A abordagem metodológica desenvolvida encontra-se na Figura 17, onde propõe um cuidadoso planejamento das atividades que permeou as etapas do trabalho.

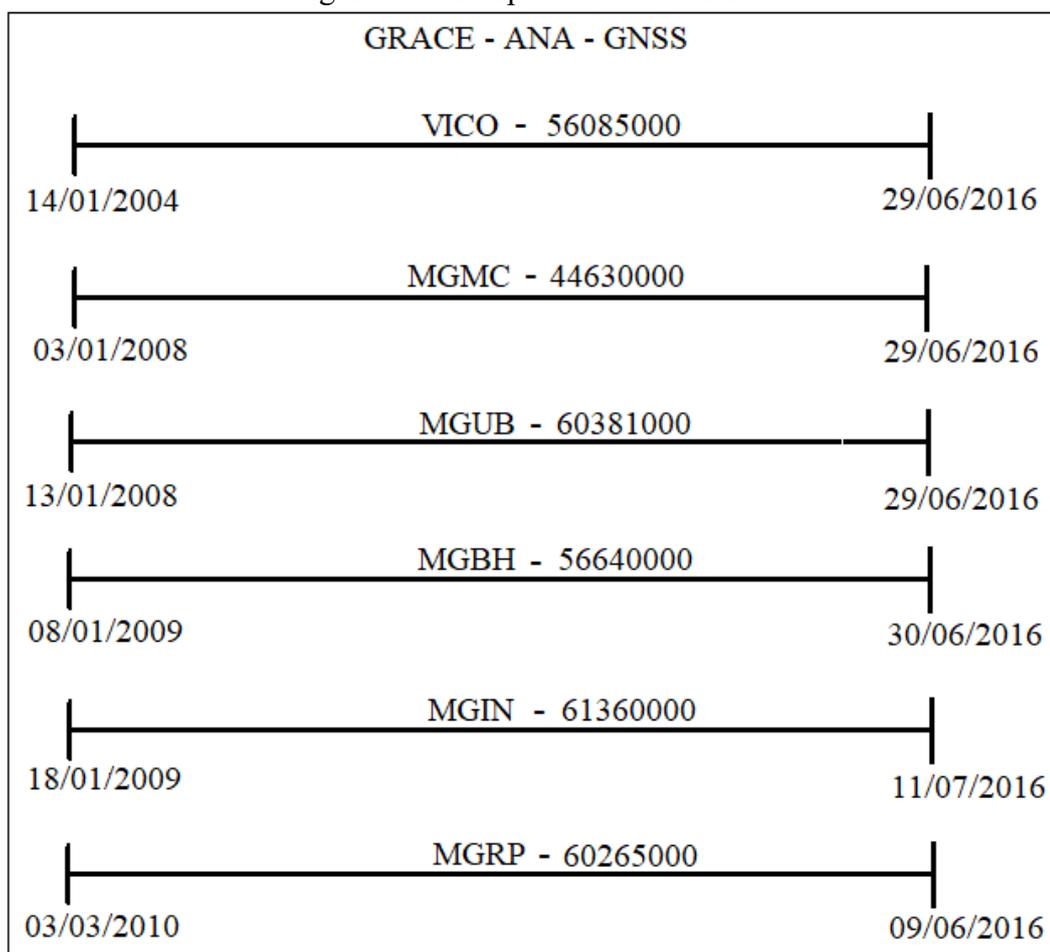
Figura 17 - Fluxograma abordando as etapas do trabalho.



Elaboração: O autor.

A Figura 18 ilustra a temporalidade das séries utilizadas neste trabalho. Para a definição do início das séries utilizou-se como parâmetro as dadas das fontes GNSS e ANA, pois, os dados do GRACE começam em 2002 e nenhuma das outras fontes tiveram início neste período. Posto isso, para a determinação do final de cada série utilizou-se como parâmetro os dados do GRACE. Isso porque, os dados do GRACE-EWH vão até meados de 2016 e os das demais fontes vão além desta data. Vale salientar que, por se tratar de uma análise comparativa entre três variáveis é importante que as datas de ambas tenham o mesmo início e fim.

Figura 18 – Temporalidade das séries.



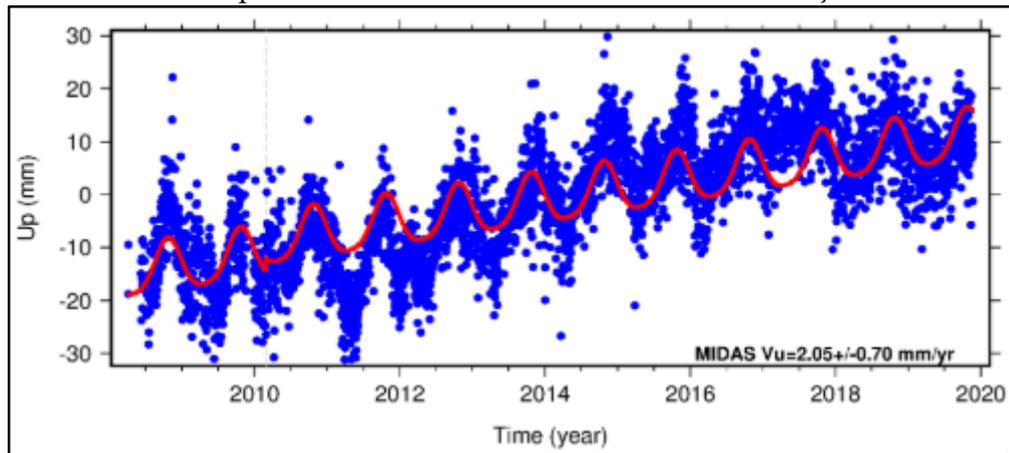
Fonte: O autor.

### 3.2 Aquisição dos dados GNSS

As coordenadas geodésicas via GNSS advém de arquivos brutos que posteriormente são convertidos para um formato universal denominado RINEX. A manipulação dos mesmos é realizada pelo *Nevada Geodetic Laboratory* (NGL). Vale salientar que o processamento das coordenadas das estações é por meio do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP). E a plataforma online do NGL é: <http://geodesy.unr.edu/magnet.php>.

O tipo de arquivo utilizado nesta pesquisa foi o IGS08 env (Norte, Este e a componente Vertical), pois é nele contém as informações de altitudes. Além dos dados processados o laboratório disponibiliza um gráfico no qual analisa o comportamento, ou seja, o deslocamento vertical de cada estação desde a data inicial do seu processamento até a data em que a mesma se encontre em funcionamento. Como exemplo tem-se a Figura 19.

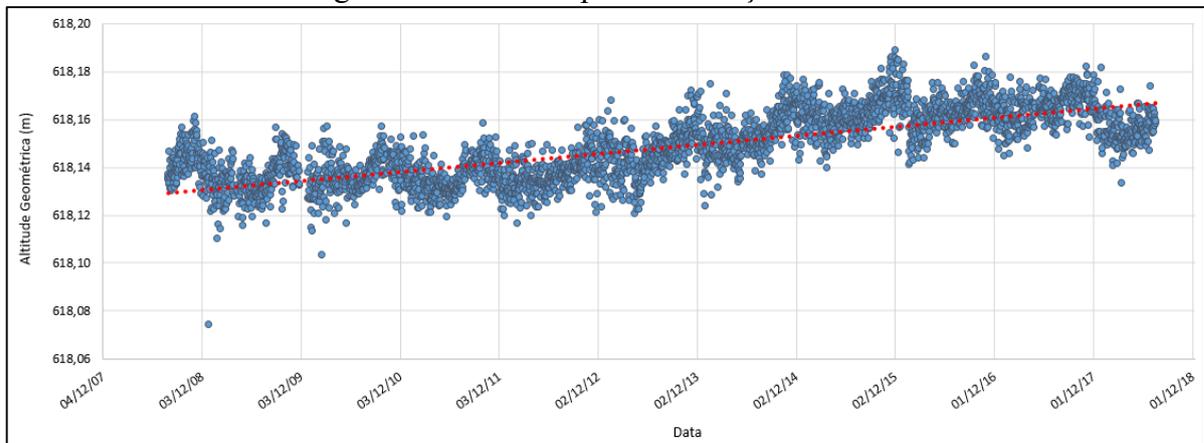
Figura 19 - Análise temporal dos dados altimétricos referentes à estação MGMC - CNES.



Fonte: Blewitt et al., (2018).

Por meio dos dados adquiridos realizou-se a manipulação e tabulação dos mesmos no *software* Excel onde foram deixadas apenas as informações contendo valores altimétricos. Posterior à isso, e com intuito de verificar a coerência da série temporal da estação MGMC foi gerada a Figura 20 para observar o comportamento da componente altimétrica.

Figura 20 - Série temporal da estação MGMC.



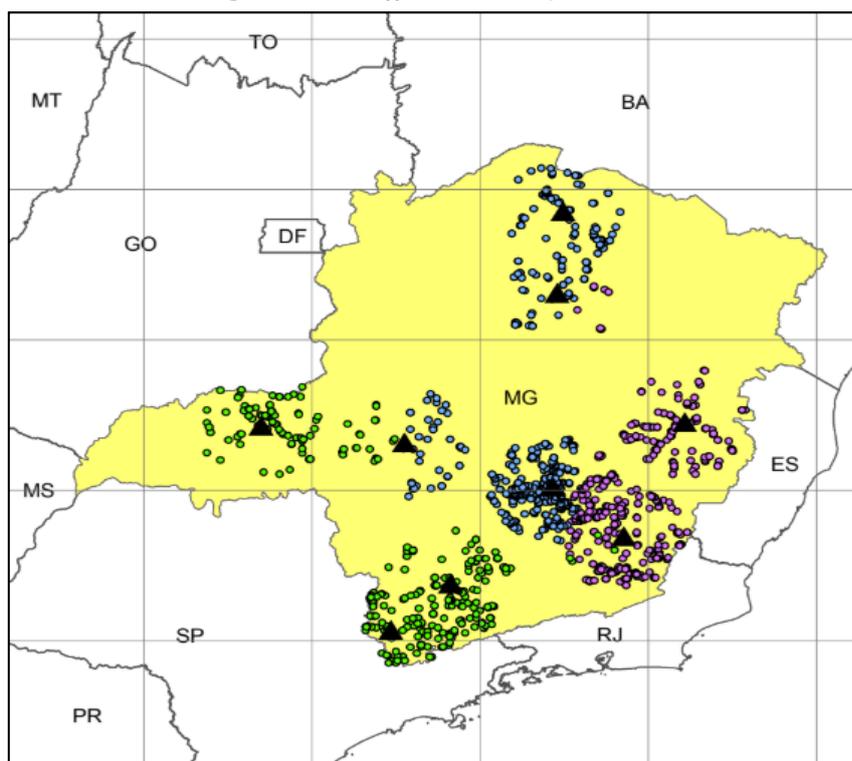
Elaboração: O autor.

A Figura 20 ilustra o comportamento da componente altimétrica. A linha pontilhada, em vermelho, aponta a tendência que estes dados seguem e os pontos azuis são os valores altimétricos nas respectivas datas de coletas, que são diárias.

### 3.3 Aquisição dos dados ANA

Nesta etapa, foram estabelecidos dois pré-requisitos. O primeiro consistia em uma filtragem das estações ANA que estivessem mais próximas geograficamente da estação GNSS escolhida. Para tanto, criou-se um *buffer* com raio de 50 km centrado na estação da RBMC, Figura 21.

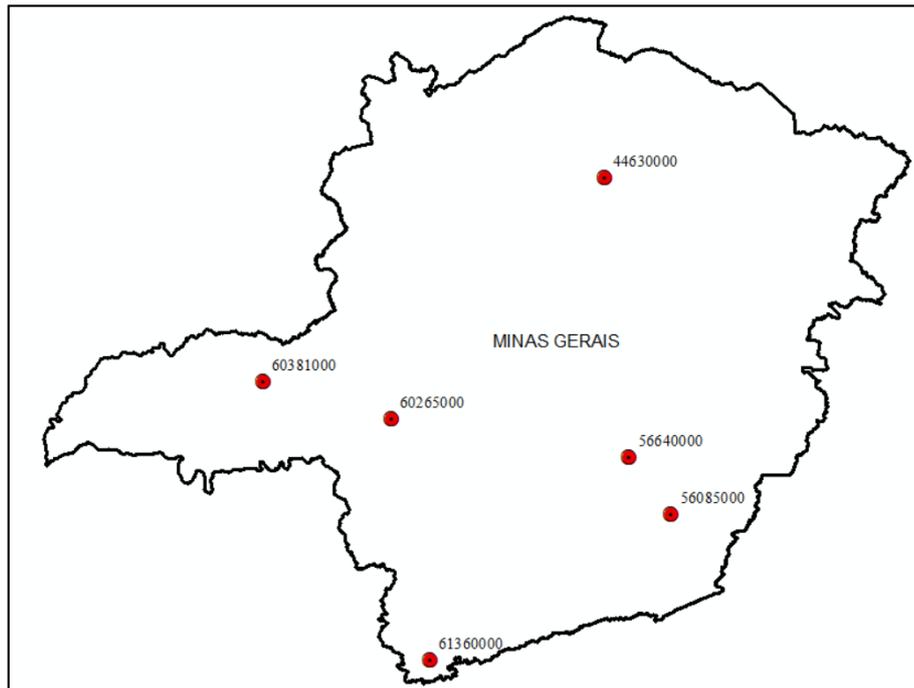
Figura 21 – *Buffer* das estações ANA.



Fonte: BORGES, F. R (2018)

O segundo parâmetro foi analisar quais das estações inclusas no *buffer* possuía maior temporalidade de dados, além da sobreposição de época em relação aos dados GNSS e GRACE, isto é, procurou-se nas 3 informações a mesma época de informações, sendo o ano de 2002 o início de todas as séries temporais. Vale salientar que, as cores das estações fluviométricas da ANA foram definidas de acordo com as três bacias, Bacia Atlântico Leste, Bacia do Rio Paraná e Bacia do Rio São Francisco, as quais encontram-se as seis réguas linimétricas. A Figura 22 ilustra as estações fluviométricas definidas.

Figura 22 – Estações fluviométricas ANA.



Elaboração: O autor.

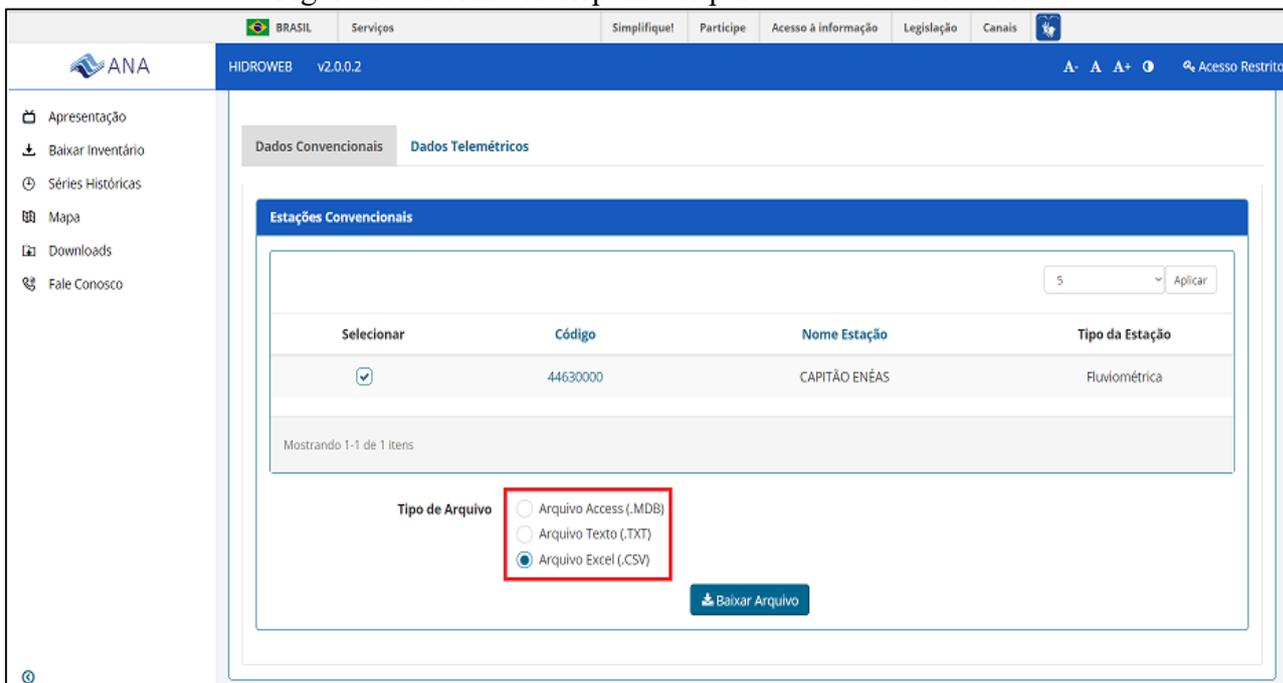
Concluída a primeira etapa, foi realizado o *download* dos dados referente a cada estação. Para tanto, por meio do site <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>, na aba Séries Históricas (Figura 23), realizou-se uma consulta através do código das estações.

Figura 23 - Aquisição dos dados ANA por meio do HidroWeb.

Fonte: Adaptado de [http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf), acesso em 21 de abr. 2019.

Feita a consulta, a plataforma disponibiliza três formatos de arquivos para *download*: *access* (.mdb); texto (.txt) e excel (.csv) (Figura 24). O formato escolhido para todas as estações foi o .csv.

Figura 24 - Formatos disponíveis para *download* dos dados.



Fonte: Adaptado de [http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes\\_historicas\\_abas.jsf](http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf), acesso em 21 de abr. 2019.

Concluída a aquisição dos dados, foi efetuada a organização dos mesmos no *software* excel. No que tange à consistência dos dados, eles são dispostos de duas formas que são dados brutos e consistidos. Os consistidos passam por um tratamento e os brutos não, porém, é importante citar que não foi encontrada no site maiores informações sobre a manipulação realizada nos dados consistidos, (Figura 25).

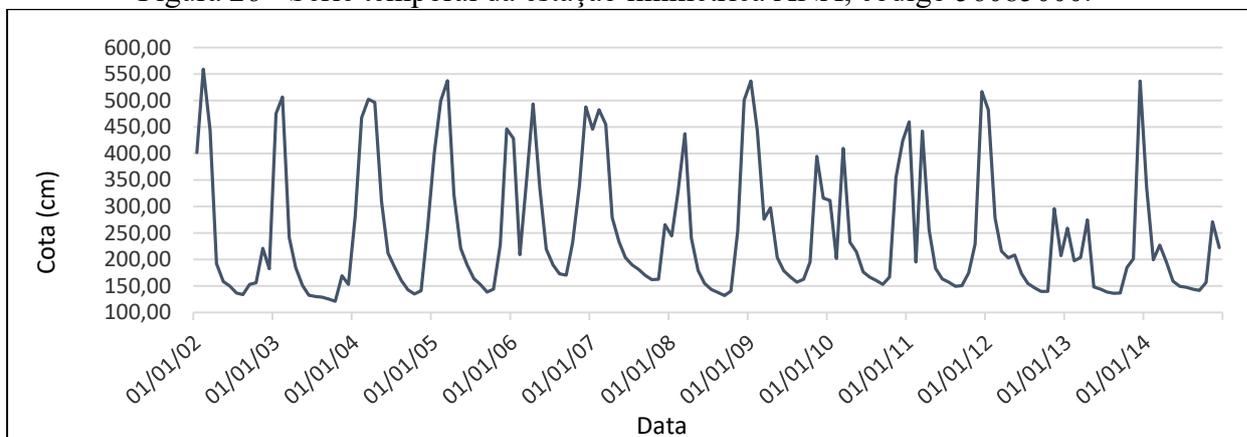
Figura 25 - Disposição dos dados na planilha eletrônica.

Sistema de Informações Hidrológicas									
Versão Web 3.0									
© 2018 Agência Nacional de Águas (ANA)									
NivelConsistencia: 1 = Bruto, 2 = Consistido									
MediaDiaria: 0 = Não, 1 = Sim									
TipoMedicaoCotas: 1 = Escala, 2 = Linígrafo, 3 = Data Logger									
Status: 0 = Branco, 1 = Real, 2 = Estimado, 3 = Duvidoso, 4 = Régua Seca									
Restrições da consulta:									
Código da Estação:44630000									
EstacaoCodigo	Data	Hora	Cota01	Cota02	Cota03	Cota04	Cota05	Cota06	Cota07
44630000	01/05/2008	01/01/1900 07:00	198	196	196	198	198	200	204
44630000	01/05/2008	01/01/1900 17:00	196	196	196	198	198	202	200
44630000	01/01/2005		366	359	351	348	350	403	404
44630000	01/12/2004		363	363	361	351	290	286	279
44630000	01/07/2003		130	130	130	130	130	130	130
44630000	01/06/2018	01/01/1900 07:00	179	168	158	162	163	168	165
44630000	01/06/2018	01/01/1900 17:00	172	162	160	163	166	167	167
44630000	01/01/2007		515	544	486	471	462	439	432

Fonte: O autor.

Após esta filtragem houve também o ajuste das datas afim de padronizá-las com as datas das outras fontes de dados. É importante ressaltar que a periodicidade dos dados ANA utilizados é diário. Contudo, após todas as etapas citadas neste tópico foi executado um experimento gráfico para averiguar a consistência dos dados baixados da série temporal da estação ANA (Figura 26). Vale salientar que foi aplicado o filtro 1-2-1 conhecido como *window* para suavizar o gráfico. Além disso, será testado outros modelos de filtros e também a quantidade ideal de aplicação do mesmo para uma boa suavização.

Figura 26 - Série temporal da estação linimétrica ANA, código 56085000.



Elaboração: O autor 2019.

Por fim, foi realizado uma análise das características dos rios nas seis estações da ANA por meio da localização das mesmas e foi elaborada a Tabela 1 contendo as informações de cada estação ANA.

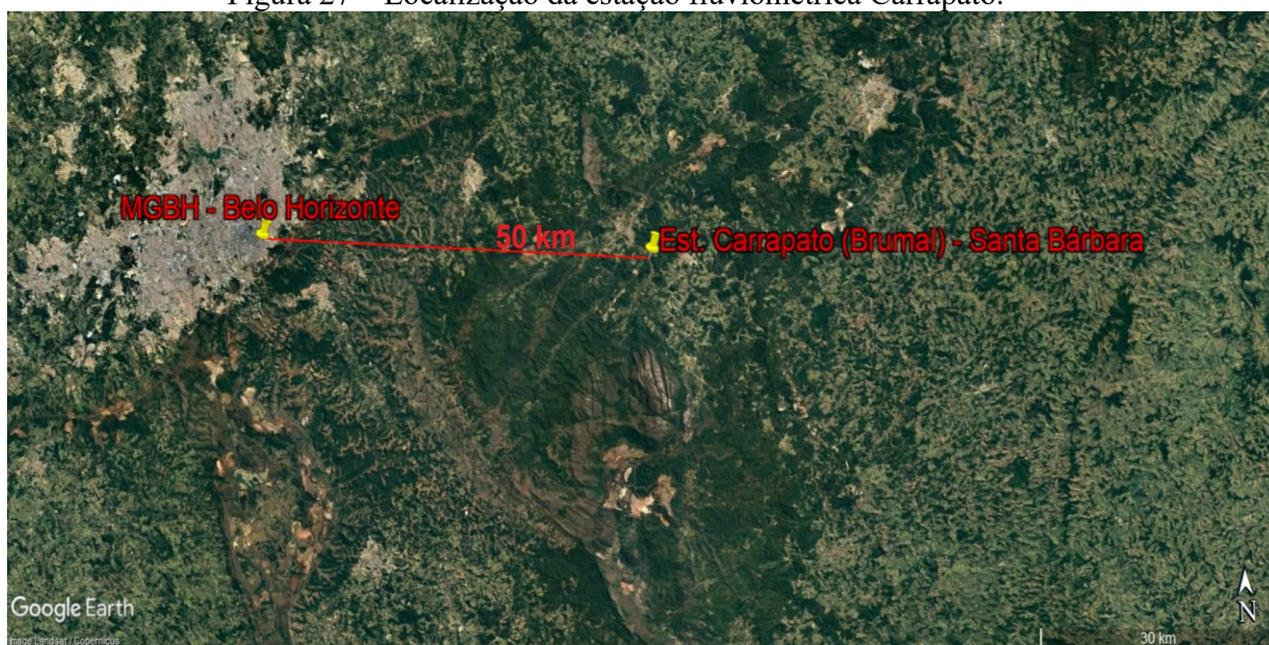
Tabela 1 – Informações das estações fluviométricas.

Código	Nome da Estação	Bacia	Rio	Município	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )
56640000	Carrapato (Brumal)	Atlântico, trecho leste	Ribeirão Santa Bárbara	Santa Bárbara	609
56085000	Seriquite	Atlântico, trecho leste	Turvo sujo	Viçosa	342
61360000	Cambuí	Rio Paraná	Itaim	Cambuí	116
60265000	Ibiá	Rio Paraná	Misericórdia	Ibiá	1370
60381000	Fazenda Letreiro	Rio Paraná	Paranaíba	Uberlândia	777
44630000	Capitão Enéas	Rio São Francisco	Verde Grande	Capitão Enéas	3570

Elaboração: O autor 2019.

A estação fluviométrica de carrapato cujo código é 56640000, a mesma se encontra na latitude  $-19^{\circ}58'18''$  e longitude  $-43^{\circ}27'32''$  e o curso d'água é o ribeirão santa barbara, Figura 27, se relaciona neste estudo com a estação MGBH.

Figura 27 – Localização da estação fluviométrica Carrapato.

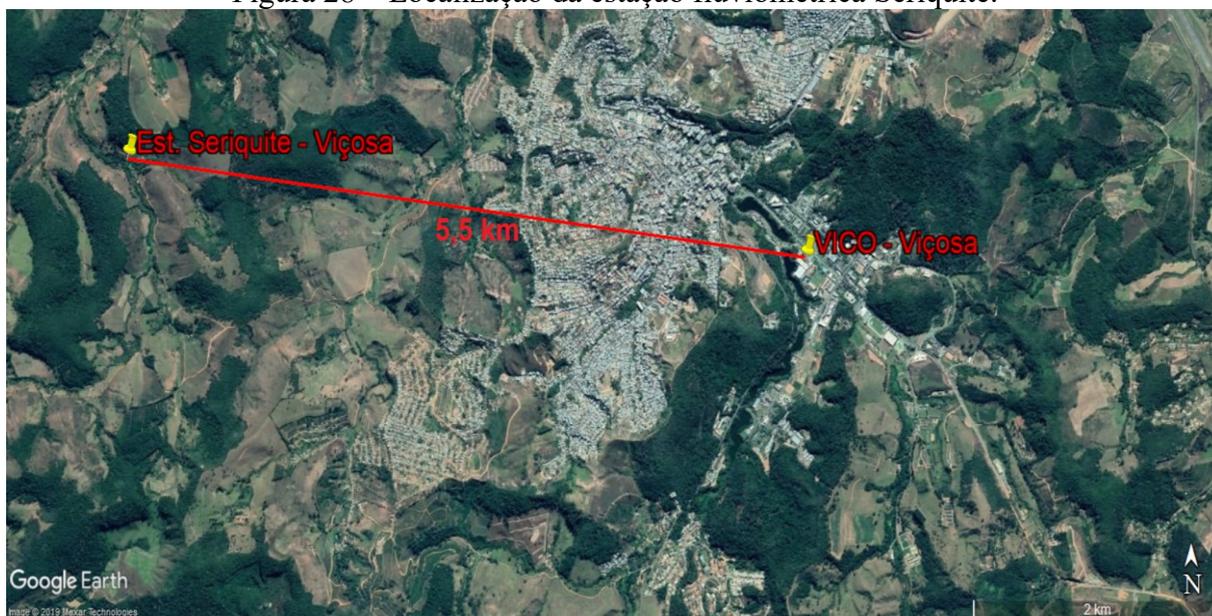


Elaboração: O autor 2019.

Foi observado na Figura 27 que a distância entre a estação MGBH e ANA é de 50 km a topografia varia entre 572 m a 736 m. A largura do rio onde encontra-se a estação fluviométrica é de aproximadamente 15 m.

A estação fluviométrica de seriquite cujo código é 56085000, a mesma se encontra na latitude  $-20^{\circ}45'25''$  e longitude  $-42^{\circ}55'23''$  e o curso d'água é o rio turvo sujo, Figura 28, se relaciona neste estudo com a estação VICO.

Figura 28 – Localização da estação fluviométrica Seriquite.



Elaboração: O autor 2019.

Foi observado na Figura 28 que a distância entre a estação VICO e ANA é de 5,5 km a topografia varia entre 502 m a 675 m. A largura do rio onde encontra-se a estação fluviométrica é de aproximadamente 5 m.

A estação fluviométrica de Cambuí cujo código é 61360000, a mesma se encontra na latitude  $-22^{\circ}36'25''$  e longitude  $-46^{\circ}02'30''$  e o curso d'água é o rio itaim, Figura 29, se relaciona neste estudo com a estação MGIN.

Figura 29 – Localização da estação fluviométrica Cambuí.

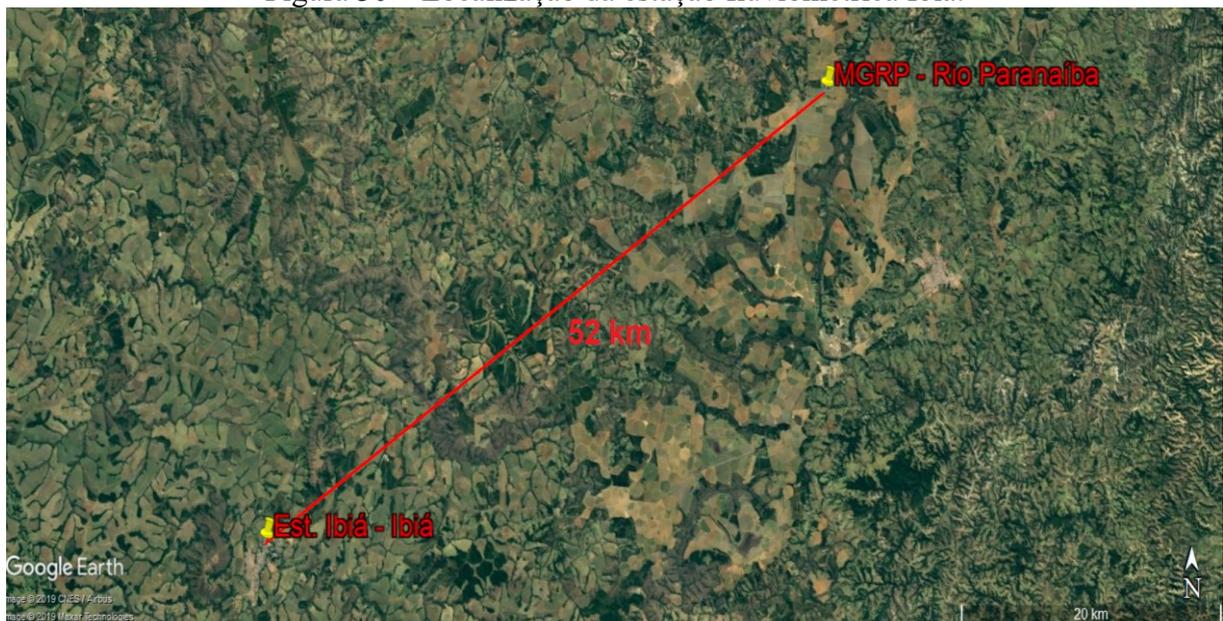


Elaboração: O autor 2019.

Foi observado na Figura 29 que a distância entre a estação MGIN e ANA é de 43,5 km. A largura do rio onde encontra-se a estação fluviométrica é de aproximadamente 7,5 m.

A estação fluviométrica de Ibiá cujo código é 60265000, a mesma se encontra na latitude  $-18^{\circ}28'30''$  e longitude  $-46^{\circ}32'31''$  e o curso d'água é o rio misericórdia, Figura 30, se relaciona neste estudo com a estação MGRP.

Figura 30 – Localização da estação fluviométrica Ibiá.



Elaboração: O autor 2019.

Foi observado na Figura 30 que a distância entre a estação MGRP e ANA é de 52 km a topografia varia entre 776 m a 872 m. A largura do rio onde encontra-se a estação fluviométrica é de aproximadamente 20 m.

A estação fluviométrica de Fazenda Letreiro cujo código é 60381000, a mesma se encontra na latitude  $-18^{\circ}59'18''$  e longitude  $-48^{\circ}11'25''$  e o curso d'água é o rio Uberabinha, Figura 31 se relaciona neste estudo com a estação MGUB.

Figura 31 – Localização da estação fluviométrica Fazenda Letreiro.



Elaboração: O autor 2019.

Foi observado na Figura 31 que a distância entre a estação MGUB e ANA é de 10,80 km a topografia varia entre 356 m a 816 m. A largura do rio onde encontra-se a estação fluviométrica é de aproximadamente 25 m.

A estação fluviométrica de Capitão Enéas cujo código é 44630000, a mesma se encontra na latitude  $-16^{\circ}20'26''$  e longitude  $-43^{\circ}46'59''$  e o curso d'água é o rio verde grande, Figura 32, se relaciona neste estudo com a estação MGMC.

Figura 32 – Localização da estação fluviométrica Capitão Enéas.



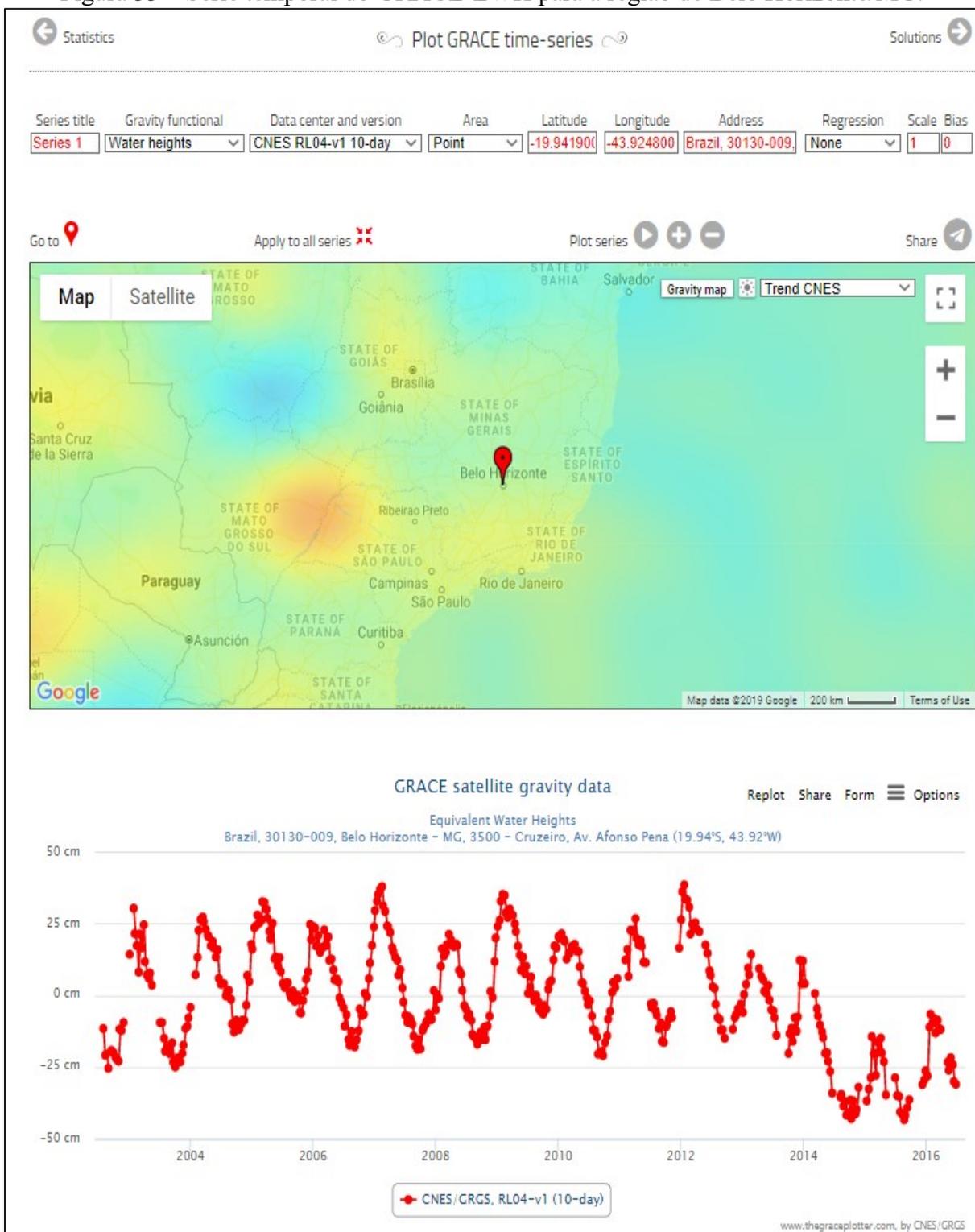
Elaboração: O autor 2019.

Foi observado na Figura 32 que a distância entre a estação MGMC e ANA é de 42,50 km a topografia varia entre 533 m a 958 m. A largura do rio onde encontra-se a estação fluviométrica é de aproximadamente 6 m.

### 3.4 Aquisição dos dados GRACE

A obtenção dos dados GRACE se deu por meio do site <http://www.thegraceplotter.com>. Neste site é possível obter diretamente os valores do EHW mensal e também dez dias. Para tanto, basta definir o tipo de versão desejada, neste caso foi a solução RL04-v1 10-day, e informações a cada dez dias. Feito isso, basta inserir as coordenadas onde se deseja obter os valores e posteriormente realizar o download no formato .txt (Figura 33). A vantagem deste site é que os dados podem ser obtidos para um único local pré-determinado. Sendo assim, não há necessidade de recortes apenas das áreas de interesse. Salienta-se que as medidas contidas nos arquivos .txt são em centímetros para os dados do EWH.

Figura 33 – Série temporal do GRACE-EWH para a região de Belo Horizonte/MG.



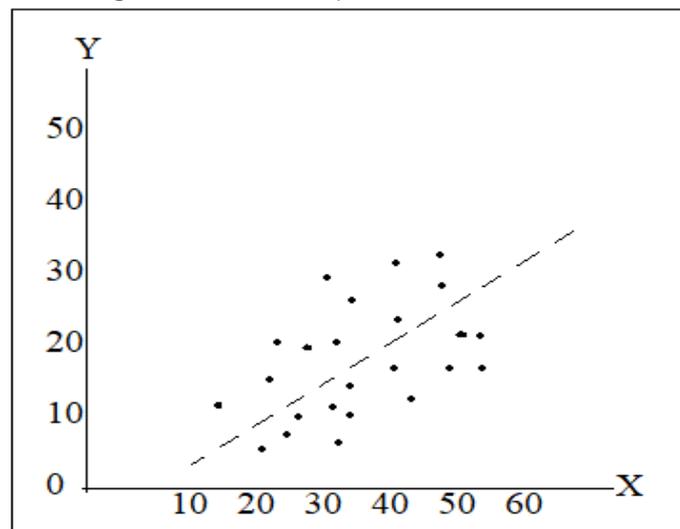
Fonte: Adaptado <http://www.thegraceplotter.com>. Acesso em 11 de nov. 2019

Ressalta-se que, além do CNES, há outros grupos produzindo modelos de campo de gravidade a partir dos dados do GRACE. São eles, *Astronomical Institute at the University of Bern (AIUB)*, *Center for Space Research (CSR)*, *Huazhong University of Science Technology (HUST)*, *Jet Propulsion Laboratory (JPL)*, *Technical University of Graz (TUGRAZ)*.

### 3.5 Coeficiente de correlação e ajustamento da reta de regressão

Para que comparações entre duas variáveis independentes X e Y (GRACE versus GNSS e GRACE versus ANA) possa ocorrer de fato, é necessário o emprego de métodos estatísticos de comparação e ajustamento (COSTA, 2011). O coeficiente de correlação de Pearson pode ser interpretado como medida associativa entre variáveis distintas ao qual mensura-se a variância compartilhada entre os elementos em estudo através de um índice que oscila entre valores de -1 a 1. A partir desta oscilação detecta-se o grau de relacionamento entre as variáveis, onde valores próximos de 1 tendem a se correlacionar mais e valores próximos a -1 se correlacionam menos (FIGUEIREDO FILHO; SILVA JÚNIOR, 2009). A Figura 34 apresenta um caso hipotético de uma relação linear entre duas variáveis qualquer X e Y.

Figura 34 - Correlação linear entre X e Y.



Fonte: Adaptado de Figueiredo Filho; Silva Júnior, 2009.

O coeficiente de Pearson é calculado em função da covariância entre as duas variáveis, dividido pelo produto de seus desvios padrão, dado pela equação 14, (MORETTIN, 2017):

$$r = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (14)$$

onde X são as séries temporais das grades GRACE (EWH) e Y são os dados *in situ* da ANA ou do GNSS. A covariância,  $Cov(X, Y)$ , é dada (15) (COSTA, 2011):

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y) \quad (15)$$

e

$\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são os desvios padrão de X e Y e são dados por:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}} \quad (16)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{n \sum y^2 - (\sum y)^2}{n^2}} \quad (17)$$

Substituindo as equações 15, 16 e 17 na equação 14, tem-se:

$$r = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n})(\sum Y^2 - \frac{(\sum Y)^2}{n})}} \quad (18)$$

As séries temporais do GRACE e dos dados *in situ* ANA e GNSS são ajustadas pela inversão linear dos mínimos quadrados, a fim de obter o melhor ajustamento entre as séries temporais, assumindo-se o seguinte relacionamento linear (19) (MATOS et al., 2009; ALMEIDA FILHO, 2009):

$$Y(t) = aX(t) + b \quad (19)$$

onde  $a$  é o coeficiente angular e  $b$  é o linear, sendo o valor da interseção com o eixo Y, os quais são obtidos por (20) e (21):

$$a = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (20)$$

$$b = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (21)$$

Adicionalmente, o coeficiente de determinação,  $r^2$ , mensura a proporção da variabilidade nos conjuntos de dados considerados no modelo estatístico. Em uma regressão linear de variáveis simples, ele é igual ao quadrado do coeficiente de correlação (COSTA, 2011).

### 3.6 Estatística descritiva e Análise de correlação

Para a descrição e sumarização de cada conjunto de dados utilizados neste trabalho realizou-se o estudo da estatística descritiva por meio da obtenção da média, desvio padrão, mínimo, máximo e além disso o histograma de cada variável para cada um dos seis locais em estudo, a Tabela 2 apresenta os valores obtidos.

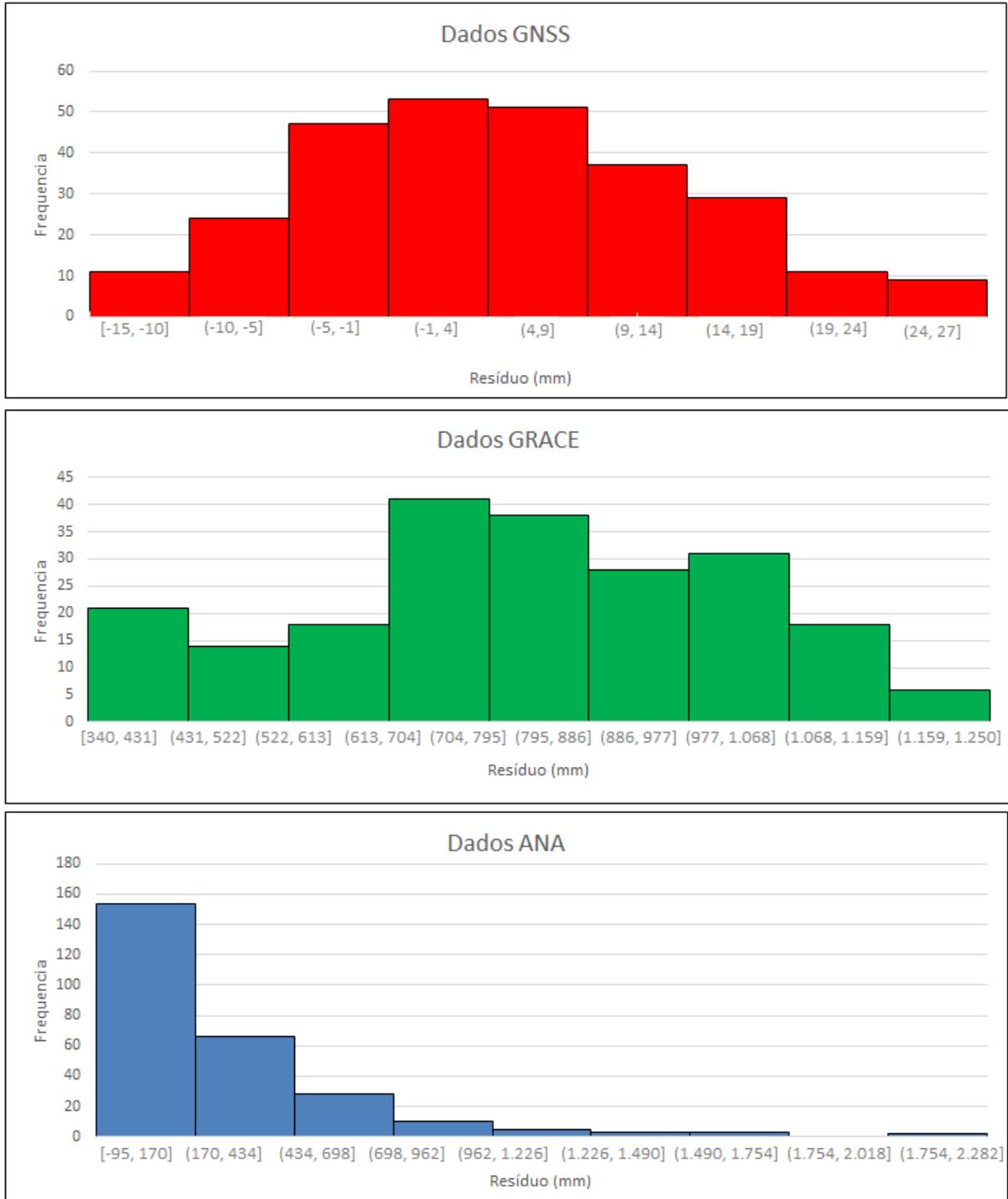
Tabela 2 – Estatística descritiva dos dados ANA.

Código	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)
56640000	23,331	349,401	-316,259	2011,741
56085000	-82,933	225,363	-381,213	1050,787
61360000	-10,313	151,642	-469,301	512,699
60265000	0,000	470,571	-707,517	2057,483
60381000	30,025	279,228	-405,001	1082,999
44630000	103,600	1191,303	-1016,939	3507,061

Elaboração: O autor 2019.

A Figura 35 apresenta o histograma dos dados das estações GNSS da RBMC, GRACE-EWH e estações fluviométricas da ANA para a região de Belo Horizonte.

Figura 35 – Histogramas dos dados GNSS, GRACE e ANA para a região de Belo Horizonte.

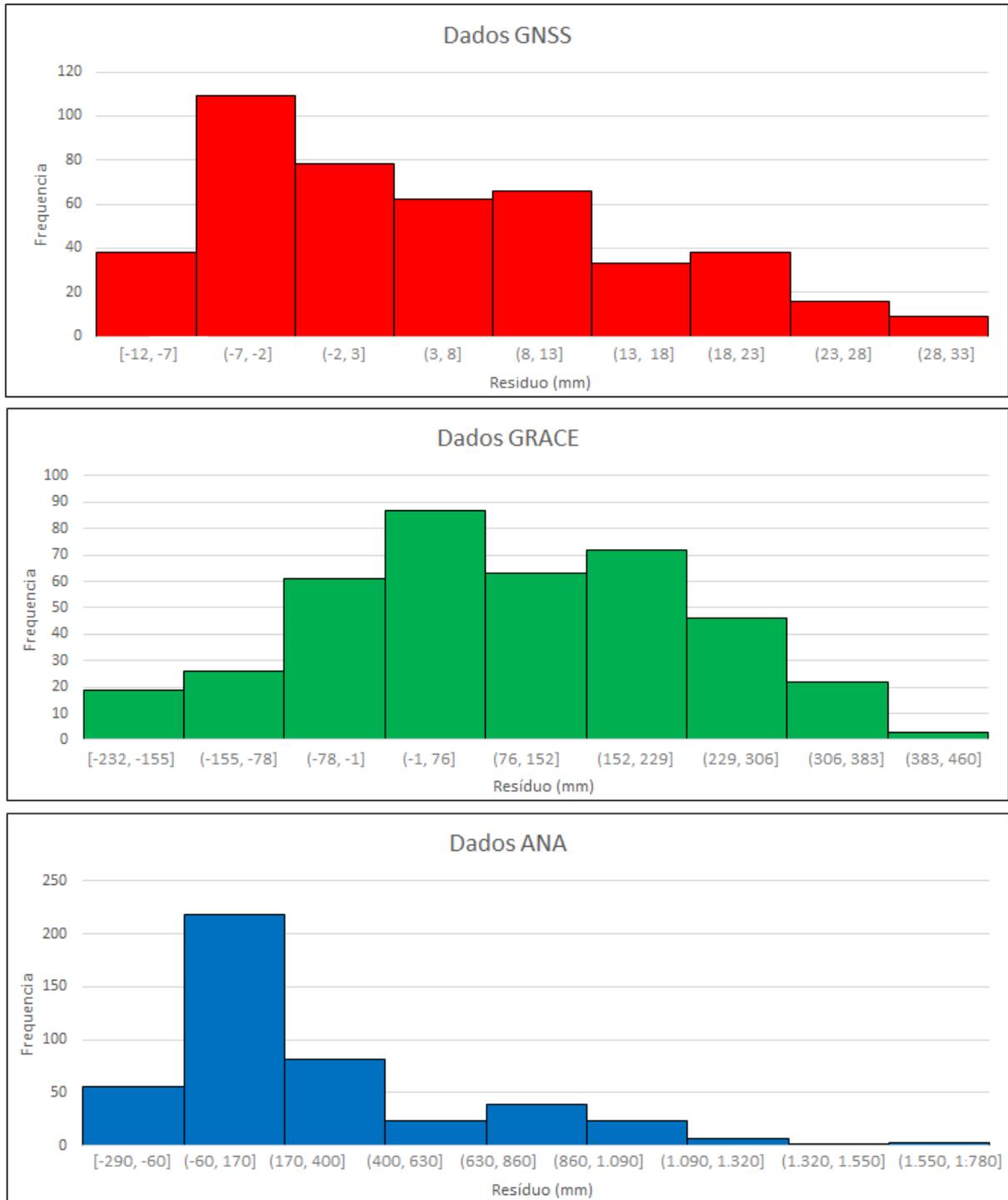


Elaboração: O autor 2019.

Por meio da análise da Figura 35, observa-se que os dados GRACE e GNSS seguem uma distribuição normal. Entretanto o mesmo não ocorre com os dados ANA, o que explica a pequena correlação existente entre as variáveis.

A Figura 36 apresenta o histograma dos dados das estações GNSS da RBMC, GRACE-EWH e estações fluviométricas da ANA para a região de Viçosa.

Figura 36 – Histogramas dos dados GNSS, GRACE e ANA para a região de Viçosa.



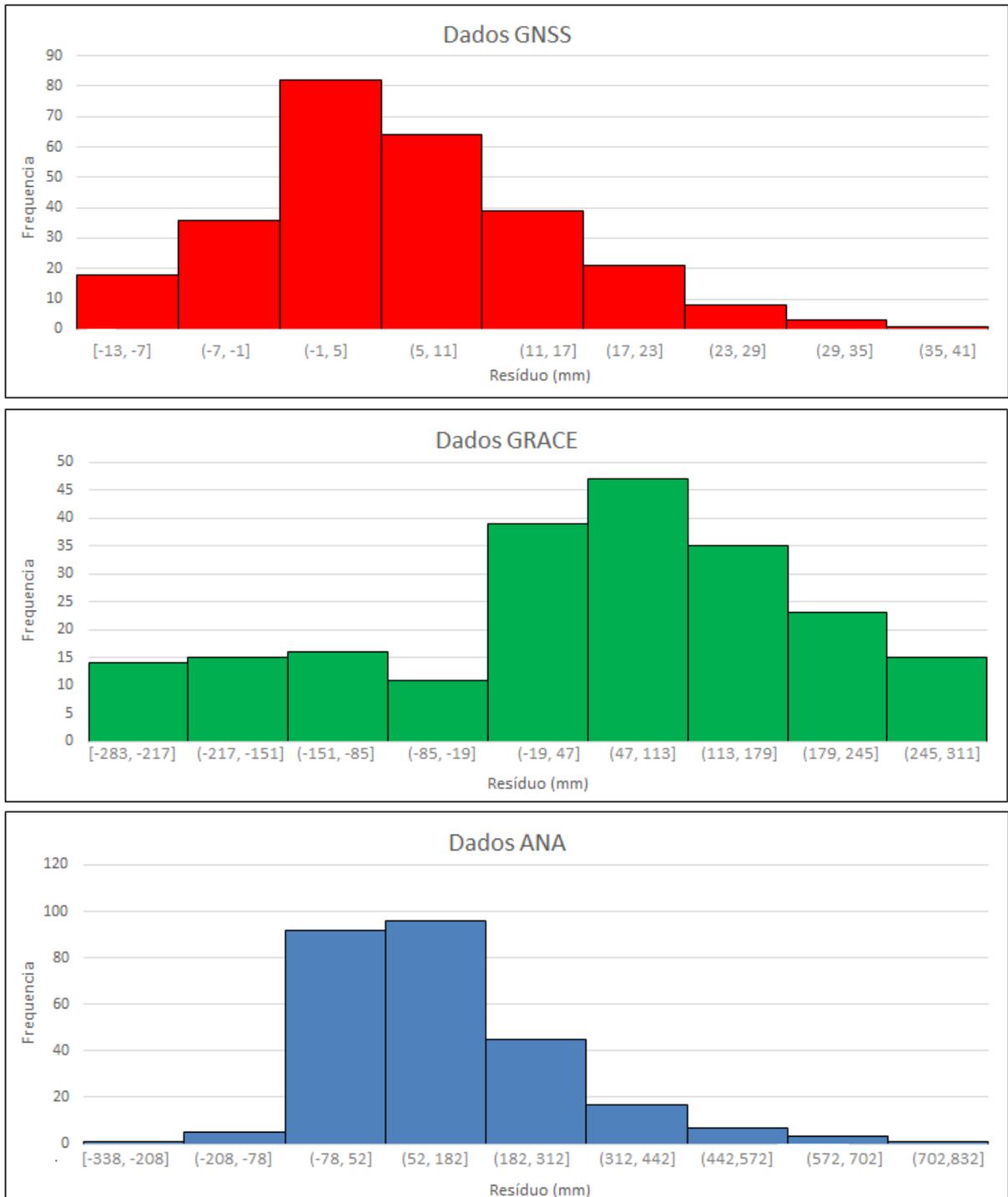
Elaboração: O autor 2019.

A Figura 36 apresenta uma distribuição normal dos dados com valores afastados da média. É possível observar o salto que ocorre com os dados ANA por meio do histograma onde

apresenta uma variação brusca dos valores indo de -130,46 a 132,04 num curto espaço de tempo. Este comportamento influencia diretamente nos pequenos valores de correlação encontrados no trabalho.

A Figura 37 apresenta o histograma dos dados das estações GNSS da RBMC, GRACE-EWH e estações fluviométricas da ANA para a região de Inconfidentes.

Figura 37 – Histogramas dos dados GNSS, GRACE e ANA para a região de Inconfidentes.

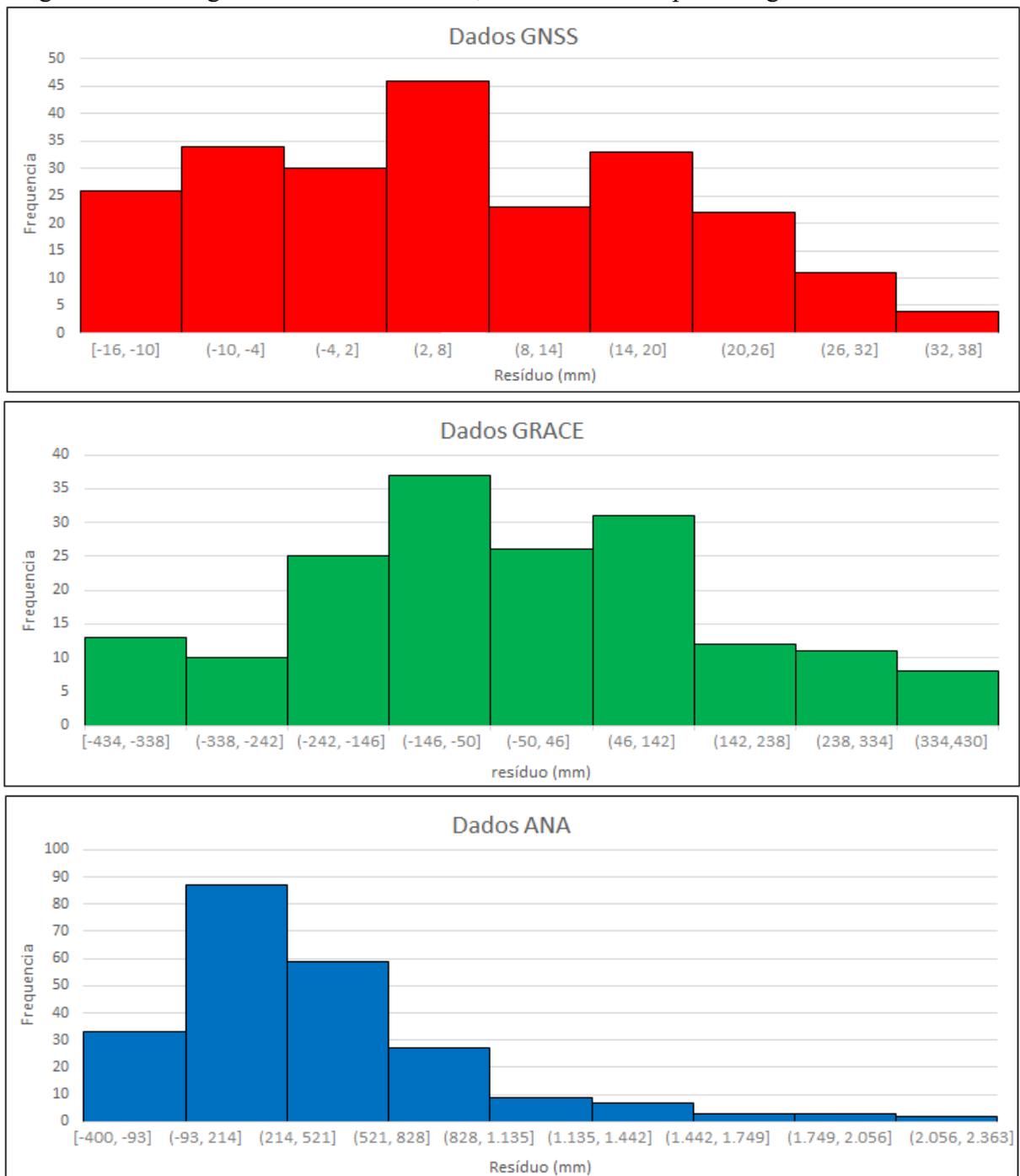


Elaboração: O autor 2019.

A Figura 37 aponta que os dados ANA segue um comportamento diferente do apresentado na Figura 35. Isso pode explicar a maior correlação encontrada para a região de Inconfidentes com  $r > 0,42$  entre GRACE e ANA. Além disso, percebe-se que há períodos que não possuem informações das cotas no rio Itaim.

A Figura 38 apresenta o histograma dos dados das estações GNSS da RBMC, GRACE-EWH e estações fluviométricas da ANA para a região de Rio Paranaíba.

Figura 38 – Histogramas dos dados GNSS, GRACE e ANA para a região de Rio Paranaíba.

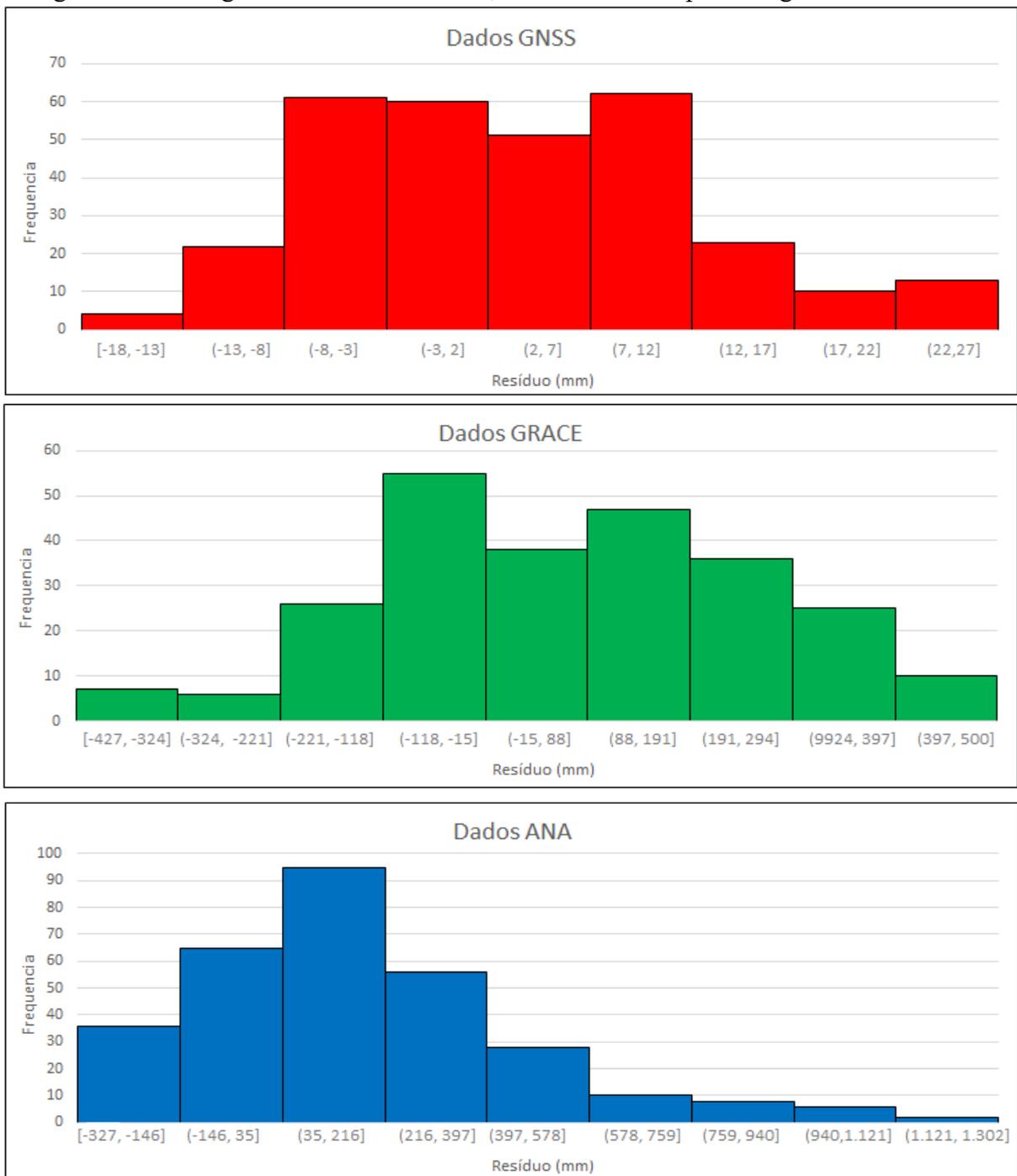


Elaboração: O autor 2019.

Observa-se na Figura 38 que o comportamento dos dados possuem menor variabilidade que os das demais regiões estudadas, ou seja, tem uma melhor distribuição normal dos dados. Isso explica por que essa região obteve o melhor desempenho nos resultados, já que as três fontes analisadas possuem melhores comportamentos.

A Figura 39 apresenta o histograma dos dados das estações GNSS da RBMC, GRACE-EWH e estações fluviométricas da ANA para a região de Uberlândia.

Figura 39 – Histogramas dos dados GNSS, GRACE e ANA para a região de Uberlândia.

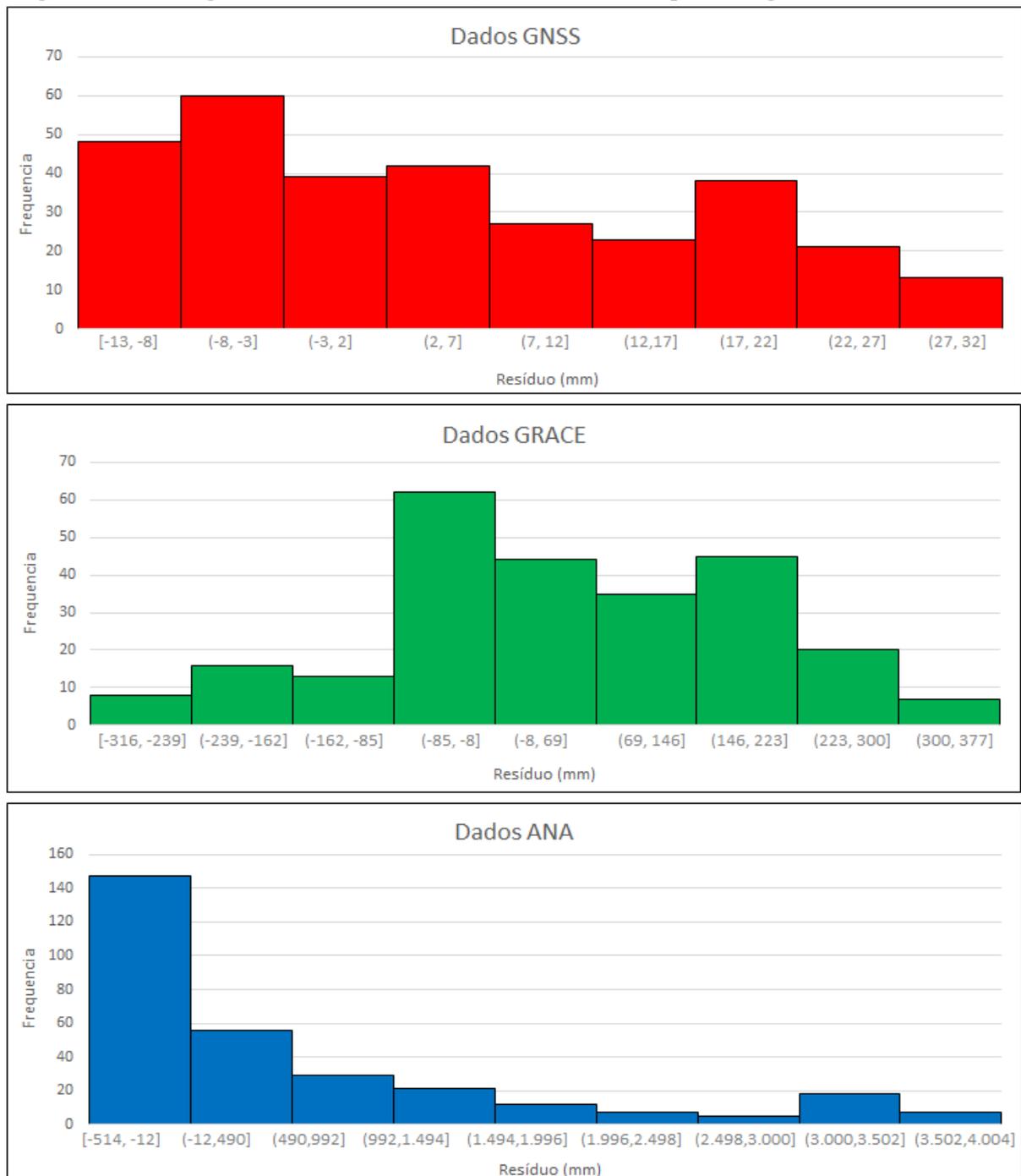


Elaboração: O autor 2019.

Assim como a região de Rio Paranaíba, a região de Uberlândia também apresenta um melhor comportamento e distribuição normal dos dados, principalmente dos dados ANA. Devido a isso, melhores resultados também foram obtidos nas análises de correlação para essa região.

A Figura 40 apresenta o histograma dos dados das estações GNSS da RBMC, GRACE-EWH e estações fluviométricas da ANA para a região de Montes Claros.

Figura 40 – Histogramas dos dados GNSS, GRACE e ANA para a região de Montes Claros.



Elaboração: O autor 2019.

Nota-se na Figura 40 que os dados GNSS não possuem uma distribuição normal, os valores de altitudes estão dispersos em relação a média, e por causa disso os resultados encontrados de correlação envolvendo a variável GNSS foram pequenos.

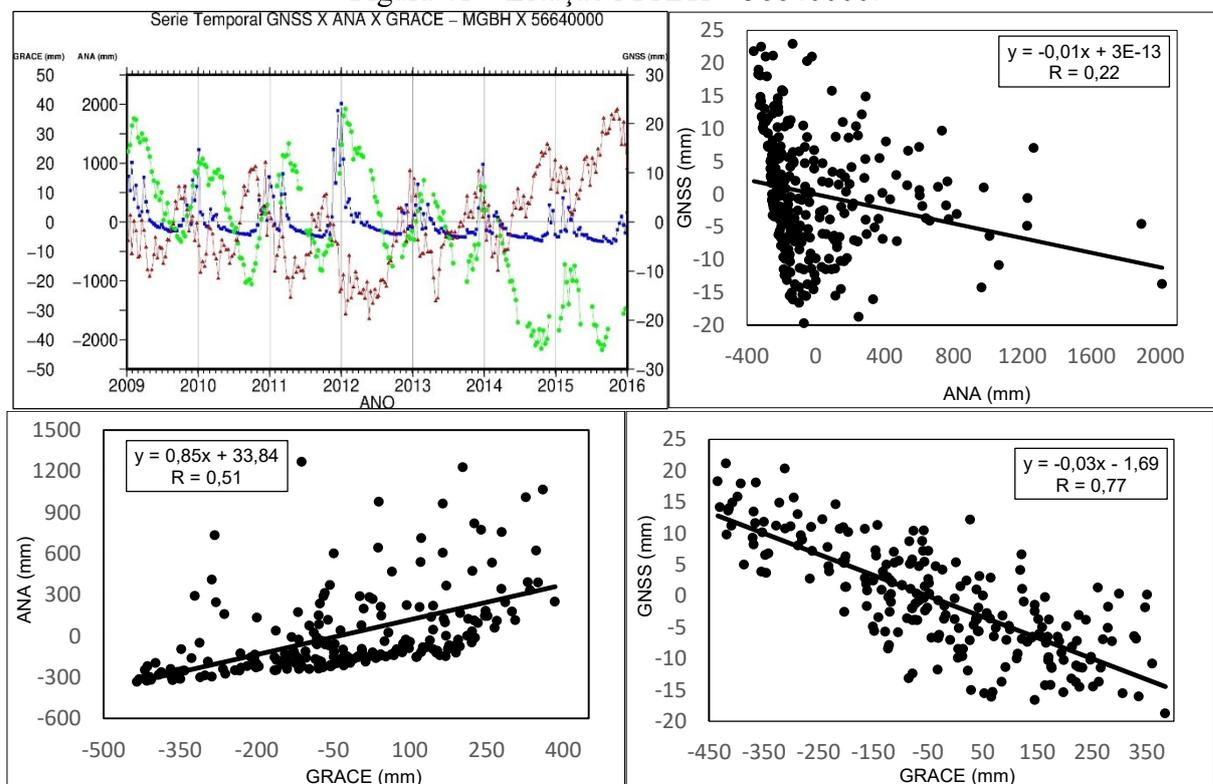
A análise de correlação entre as informações geoespaciais e *in situ* ocorreu por via da correlação de Pearson (Equação 14) e reta de regressão linear (Equação 19). Para proceder o estudo de correlação, primeiramente foi calculada a média móvel das variáveis em questão. Obtido os valores residuais, foi utilizado o *software* excel para calcular o coeficiente de Pearson e reta de regressão linear, neste *software* também realizou-se a análise de tendência dos dados. Feito isso, num segundo momento foram elaboradas as figuras que ilustram tanto a tendência de cada uma das relações, GRACE vs. ANA, GRACE vs. GNSS e ANA vs. GNSS. Além disso, ilustra os valores encontrados de coeficiente de Pearson e a equação da reta. As figuras estão dispostas nos resultados deste trabalho e tomou-se como exemplo para elaboração as Figuras 6 e 7, feitas por ALMEIDA FILHO (2009).

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos de correlação de Pearson, reta de regressão linear. Além disso, também serão apresentados os *plot's* das séries temporais, que exibem como se deu o comportamento entre os dados do equivalente a altura d'água do GRACE, dados das estações fluviométricas da ANA e dados das estações GNSS da RBMC por meio das Figuras 41, 42, 43, 44, 45 e 46. Cada figura concerne a uma localidade distinta do estado de Minas Gerais e pertencentes à diferentes bacias hidrográficas. Para os *plot's* das séries temporais tem-se na cor azul a representação da variável ANA, na cor verde a variável GRACE e em vermelho a variável GNSS.

Assim posto, a Figura 41 trata-se da estação fluviométrica Brumal código 56640000, localizada na Bacia Atlântico Leste pertencente à sub-bacia do Rio Doce, e ao rio Ribeirão Santa Bárbara. Possui uma área de drenagem de 609 km<sup>2</sup>, cuja altitude é 755 metros. A estação GNSS é a MGBH localizada na cidade de Belo Horizonte cuja altitude é de 974,85 metros.

Figura 41 – Estação MGBH – 56640000.



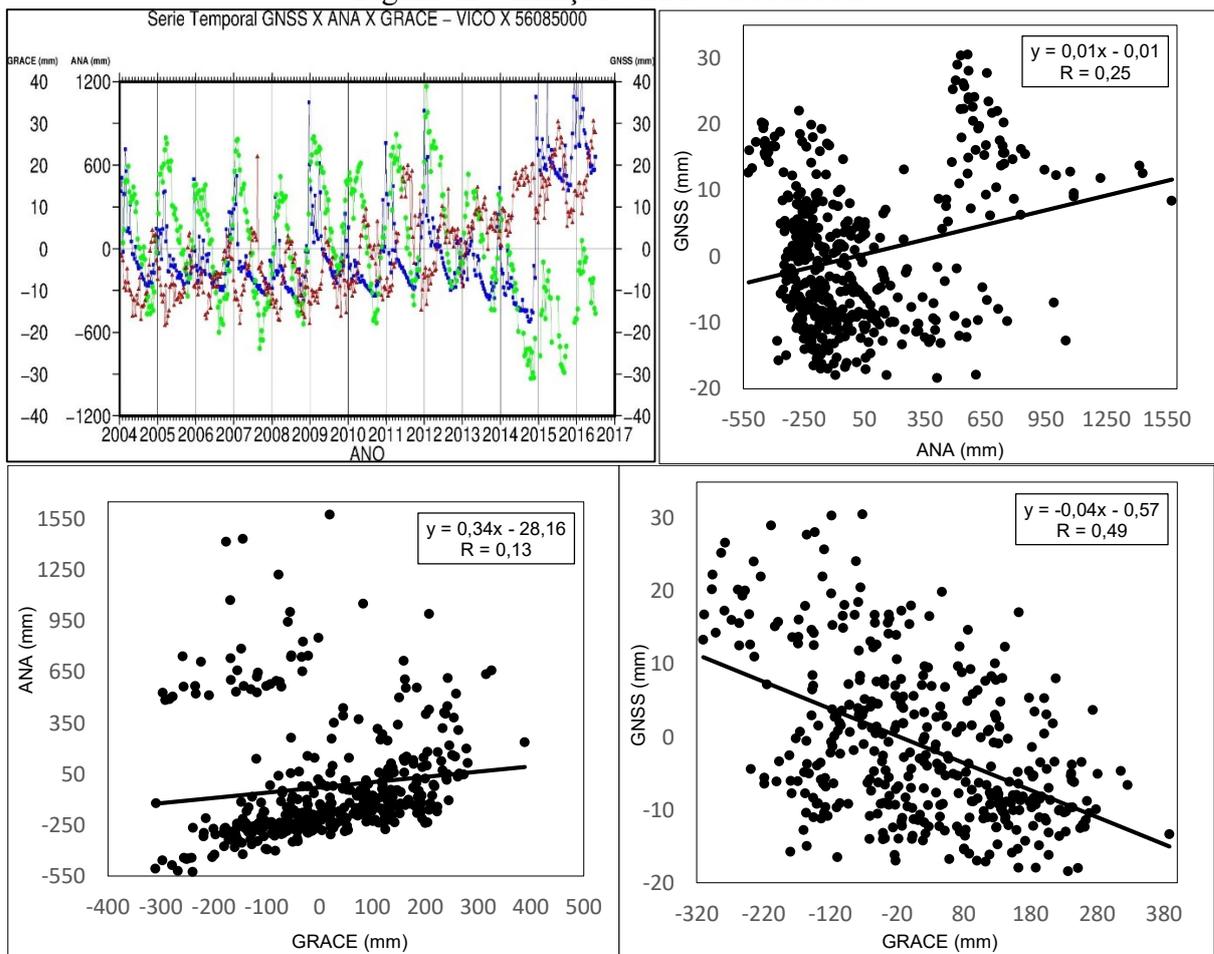
Fonte: O autor.

Uma possível análise a ser realizada na Figura 41 concerne à seca que teve início no ano de 2014 atingindo grande parte do Brasil, principalmente a região Sudeste. Para tanto,

observou-se que a variável GRACE-EWH decaiu a partir dessa data, o que até então não ocorria já que o ciclo hidrológica era bem definido com períodos chuvosos no início do ano, aumentando o volume de água, e secas no meio do ano, diminuindo o volume de água, ocasionado o efeito senoidal visto na Figura 31 até o ano de 2013. Entretanto, mesmo com o período de seca severa em 2014 o comportamento senoidal se manteve, porém sempre negativo chegando aproximadamente a -45 mm em outubro de 2014. Este comportamento se repete nas demais estações.

A Figura 42 trata-se da estação fluviométrica Seriquite código 56085000, localizada na Bacia Atlântico, Trecho Leste pertencente à sub-bacia do Rio Doce, e ao rio Turvo Sujo. Possui uma área de drenagem de 342 km<sup>2</sup>, cuja altitude é 621 metros. A estação GNSS é a VICO localizada na cidade de Viçosa cuja altitude é de 665,95 metros. Essa estação também pertence à Rede de Densificação do IGS e à Rede de Referência do SIRGAS.

Figura 42 – Estação VICO – 56085000.

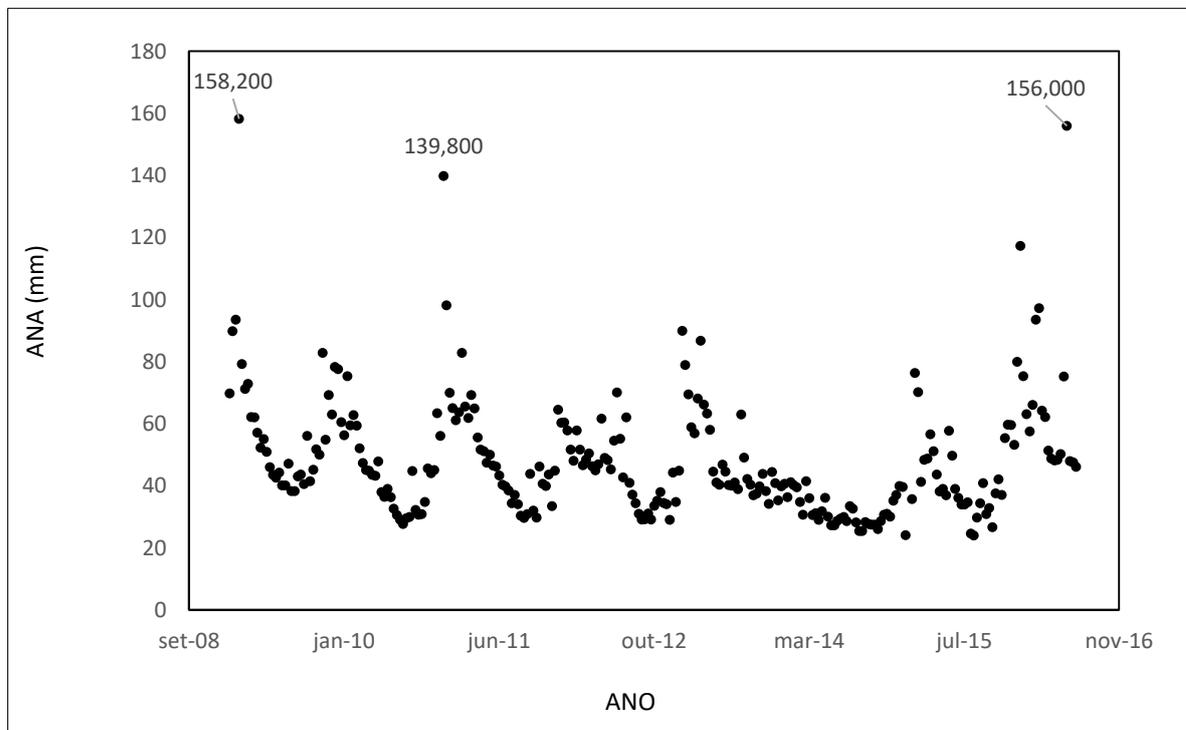


Fonte: O autor.

Nota-se na Figura 42 o movimento senoidal por toda extensão da série no que tange aos dados GRACE-EWH e nesta variável observa-se uma amplitude bem definida de ~30mm a - 15mm. Um comportamento anômalo foi detectado na relação entre ANA x GNSS, onde a reta de regressão é positiva e nas demais estações é negativa. Além disso, Figura 32 percebe-se que no final de 2014 os dados de fluviometria cresce bruscamente, o que não era esperado devido à seca severa neste período e que é bem evidenciada pelas informações do GRACE-EWH. O comportamento anômalo da estação VICO, possivelmente tem relação com a questão da dinâmica hidrológica da região. O GRACE-EWH em períodos chuvosos chega a medir valores de até 40 mm de altura equivalente de água.

Para região de Inconfidentes foi observado três erros grosseiros nas medidas *in situ*, Figura 33. Afim de comprovar tal premissa, realizou-se uma verificação dos dados da estação pluviométrica de Cambuí que está mais próxima da estação fluviométrica de Inconfidentes. Com essa análise constatou que os três valores mostrados na Figura 43 tratavam-se de falhas cometidas, possivelmente, pelos profissionais da ANA ao realizar as medidas, já que na mesma data a estação pluviométrica de Cambuí não detectou grandes precipitações na região. Isso posto, os três valores foram eliminados das análises estatísticas para essa região.

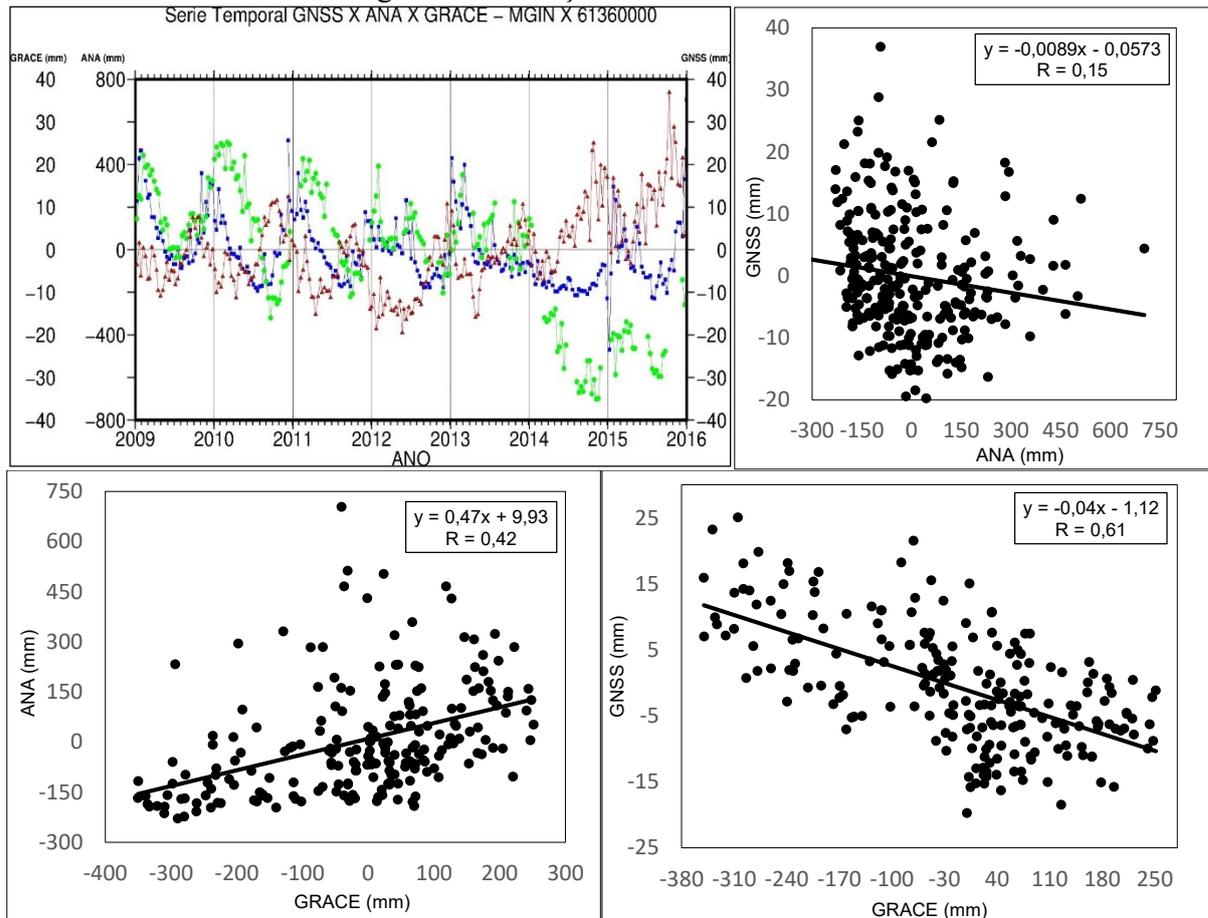
Figura 43 – Erros encontrado nos dados ANA para estação fluviométrica 61360000.



Fonte: O autor.

A Figura 44 trata-se da estação fluviométrica Cambuí código 61360000, localizada na Bacia do Rio Paraná pertencente à SubBacia do Rio Grande, e ao rio Itaim. Possui uma área de drenagem de 116 km<sup>2</sup>, cuja altitude é 980 metros. A estação GNSS é a MGIN localizada na cidade de Inconfidentes cuja altitude é de 883,72 metros.

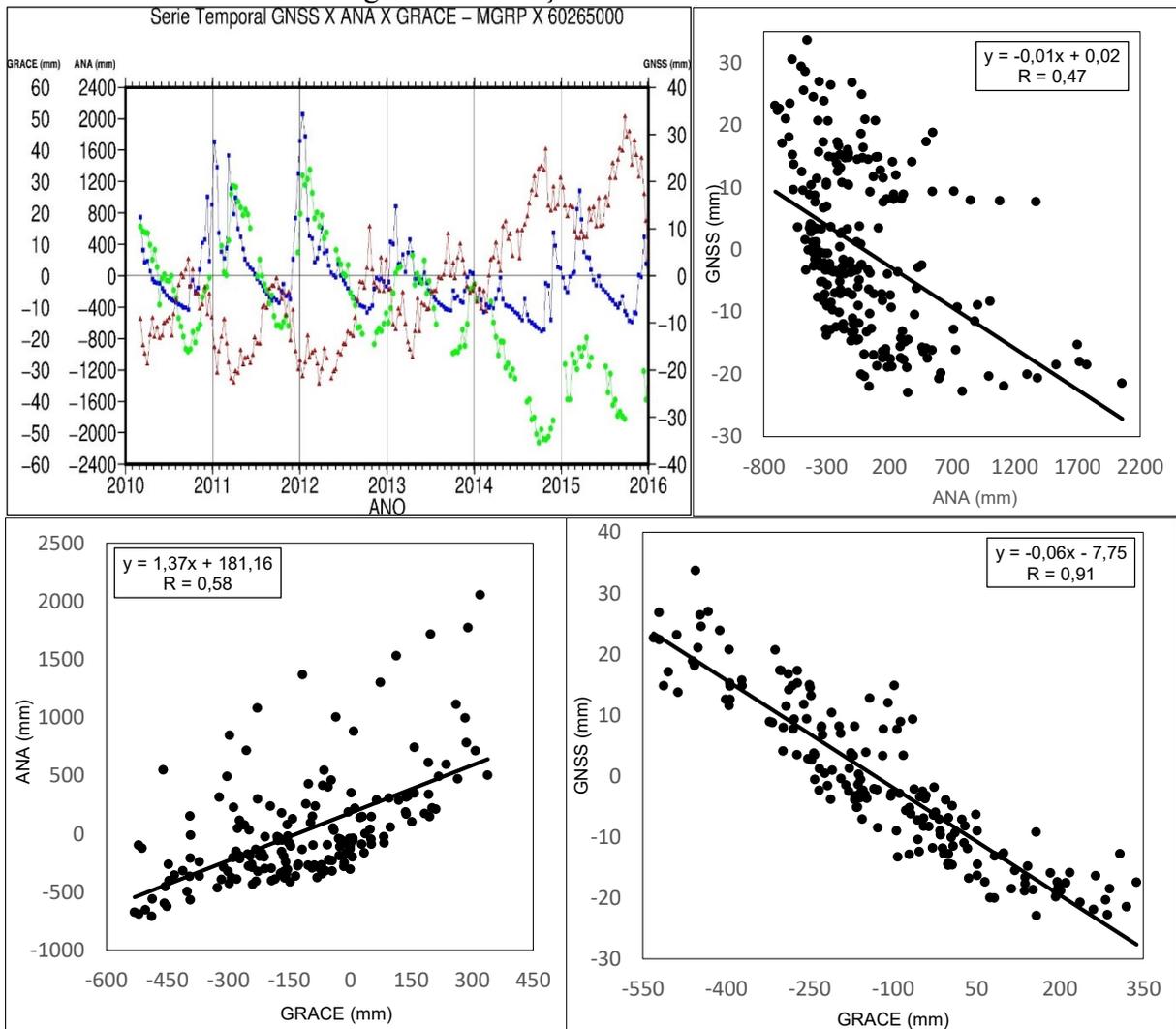
Figura 44 – Estação MGIN – 61360000.



Fonte: O autor.

A Figura 45 trata-se da estação fluviométrica Ibiá código 60265000, localizada na Bacia do Rio Paraná pertencente à sub-bacia do Rio Paranaíba, e ao rio Misericórdia. Possui uma área de drenagem de 1370 km<sup>2</sup>, cuja altitude é 880 metros. A estação GNSS é a MGRP localizada na cidade de Rio Paranaíba cuja altitude é de 1.123,49 metros.

Figura 45 – Estação MGRP – 60265000.



Fonte: O autor.

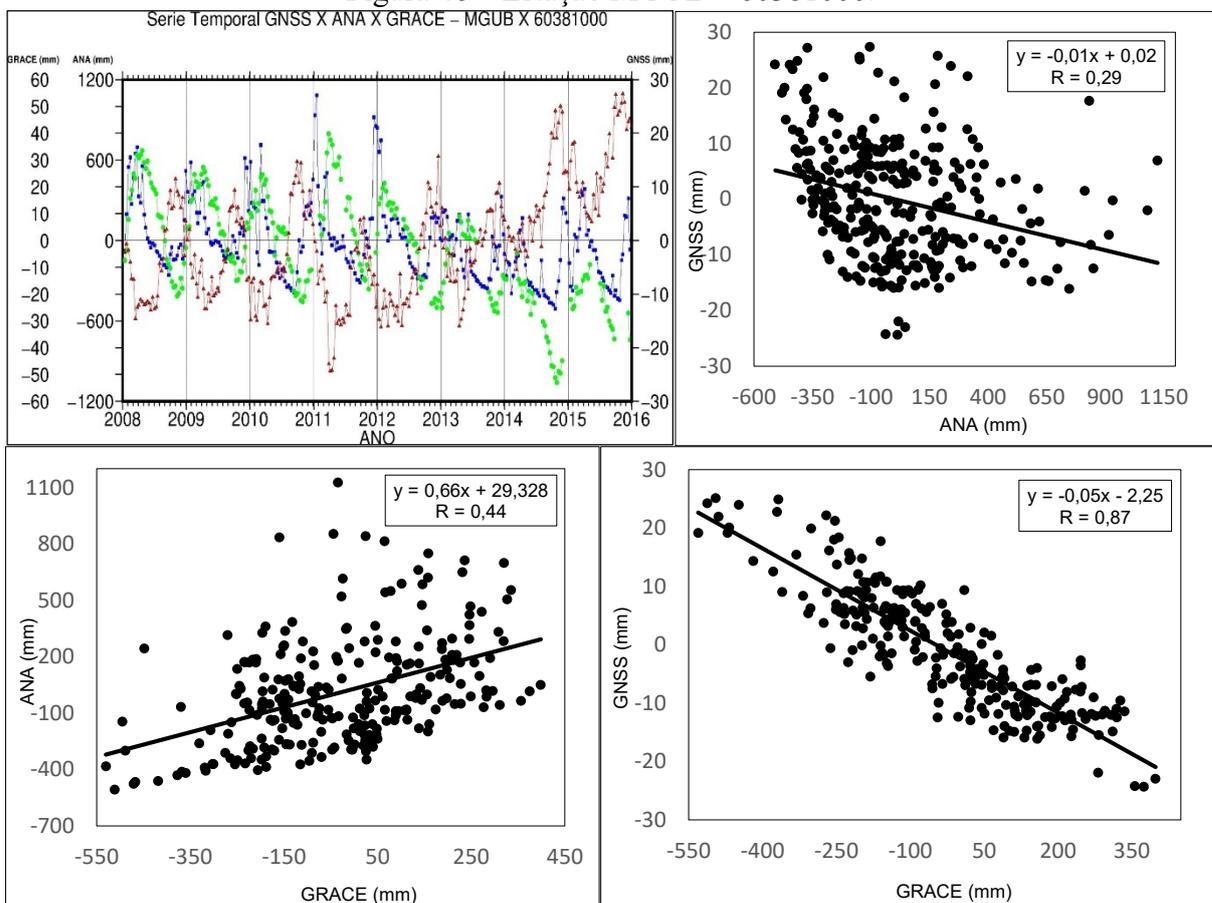
Por meio dos dados GNSS na série temporal da Figura 45 é possível verificar que houve movimento vertical da crosta terrestre de  $\sim 25$  mm para a região de Rio Paranaíba. Observou-se que durante o período de seca severa em 2014 o comportamento dos dados GNSS foram opostos ao comportamento dos dados do GRACE-EWH, ou seja, devido a essa seca houve o soerguimento da crosta. O mesmo movimento ocorreu nas demais estações, porém em Viçosa com menor amplitude.

O sentido notado entre os dados do GRACE-EWH e GNSS, quando um cresce o outro decresce e vice-versa, é explicado por meio da variação de massa da região monitorada. Em período chuvosos a superfície e abaixo dela acumula mais água, consequentemente mais massa. Isso ocasiona uma alteração, para mais, na força gravitacional atuante entre o satélite e o globo. Com isso, a força de gravidade faz com que haja um rebaixamento da superfície terrestre já que a crosta se torna mais pesada. E em períodos de seca percebe-se a diminuição da quantidade de

água superficial e subterrânea que, conseqüentemente, ocasiona a diminuição de massa naquela região e altera a força de gravidade que atua sobre a superfície física, e em razão disso há a expansão da crosta.

A Figura 46 trata-se da estação fluviométrica Fazenda Letreiro código 60381000, localizada na Bacia do Rio Paraná pertencente à sub-bacia do Rio Paranaíba, e ao rio Uberabinha. Possui uma área de drenagem de 777 km<sup>2</sup>, cuja altitude é 800 metros. A estação GNSS é a MGUB localizada na cidade de Uberlândia cuja altitude é de 869,24 metros.

Figura 46 – Estação MGUB – 60381000.

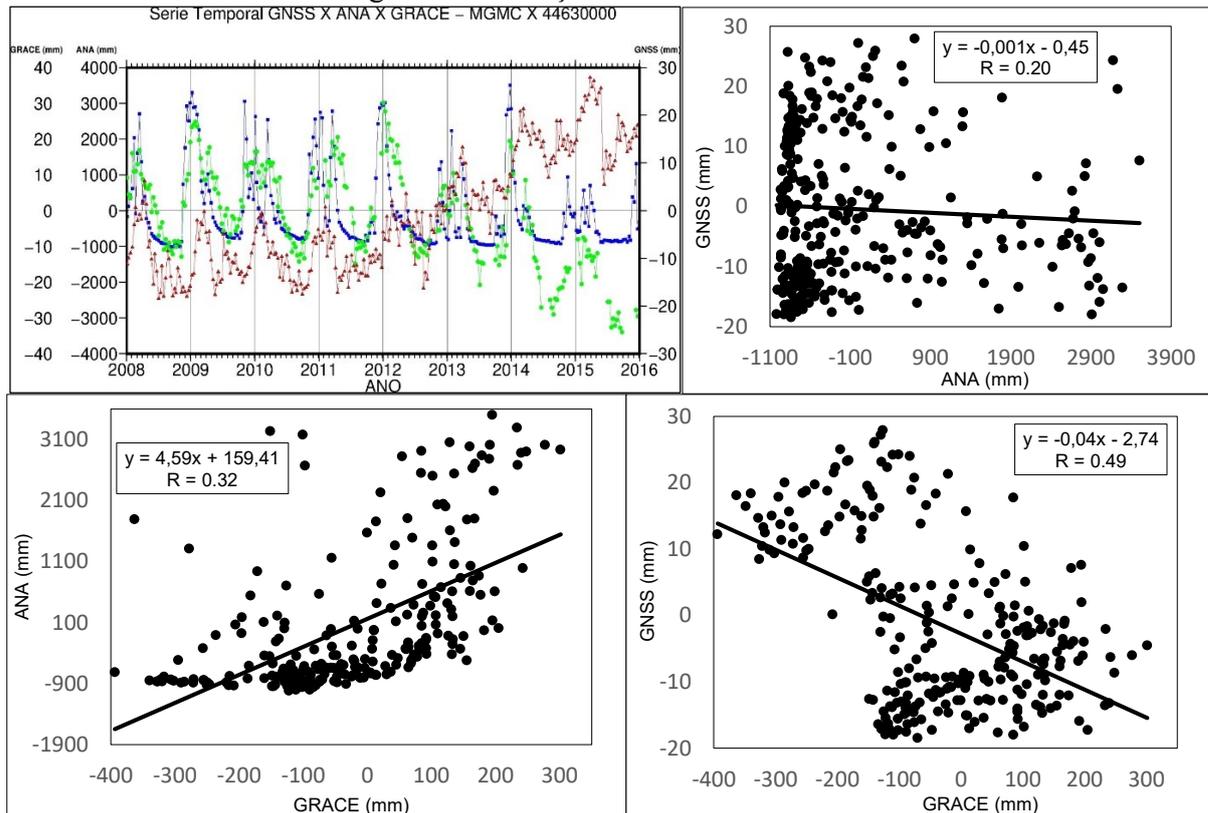


Fonte: O autor.

Por meio da Figura 46 foi observado um *offset* entre os dados do GRACE-EWH e dados da estação fluviométrica da ANA. Isso ocorre devido a um atraso na obtenção dos dados do GRACE. Afirma-se que este atraso é maior que dez dias, pois a obtenção dos dados do GRACE ocorre a cada dez dias. Além disso, verificou-se que também há perdas de dados do GRACE em algumas épocas sendo mais evidente no final da missão GRACE e início da missão GRACE – FO, o que é comum em finais e inícios de missões espaciais. Em todas as estações percebe-se estes comportamentos.

A Figura 47 trata-se da estação fluviométrica Capitão Enéas código 44630000, localizada na Bacia do Rio São Francisco pertencente à sub-bacia Rio São Francisco, e ao rio Verde Grande. Possui uma área de drenagem de 3570 km<sup>2</sup>, cuja altitude é 560 metros. A estação GNSS é a MGMC localizada na cidade de Montes Claros cuja altitude é de 618,16 metros.

Figura 47 – Estação MGMC – 44630000.



Fonte: O autor.

Na Figura 47, em se tratando dos dados da estação fluviométrica Capitão Enéas, foi percebido um comportamento onde há uma subida brusca e um decaimento acentuado na série temporal. Entretanto, após cada decaída os dados permaneceram quase constantes por um longo período em todos os anos. Este comportamento foi observado para todas as estações, porém a estação VICO foi a que apresentou a maior variabilidade de subida e queda acentuada. Este comportamento quase constante do nível de alguns rios se dá, entre outros fatores, devido à sua configuração como o relevo (superfície acidentada que produz rios de corredeiras, por exemplo), a cobertura vegetal das margens e nascentes e os aspectos do solo. Quando o solo possui pouca impermeabilização a amplitude da variação é grande, sendo constituída por violentas cheias e enormes vazantes.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grau de relacionamento entre ANA e as demais variáveis foi, para quase todas as estações,  $r < 0,3$ . Isso, pode ser justamente devido ao fato de alguns rios terem características similares, como já dito no último parágrafo dos resultados. Com isso, para comprovar tal suposição é necessário uma análise profunda da hidrologia e características topológicas locais.

No tocante ao movimento da crosta a maior amplitude observada foi de ~25mm para a estação MGRP. A mesma possui o maior valor de correlação de 0,91 entre os dados do GRACE-EWH e dados GNSS da RBMC. A movimentação de 2,5 cm é muito pequena se comparada às movimentações ocorridas na região amazônica apontadas no trabalho de ALMEIDA FILHO (2008) onde obtém uma amplitude de aproximadamente 10 cm. Essa diferença de quatro vezes o valor encontrado para a estação de Rio Paranaíba tem relação com o ciclo hidrológico na Amazônia que é bem definido e com altos índices de precipitação.

No que diz respeito ao atraso dos dados do GRACE-EWH em relação aos dados *in situ* das estações fluviométricas da ANA, o mesmo pode ser estimado por meio de modelagem computacional em trabalhos futuros. Outra sugestão para estudos futuros está na análise do ciclo hidrológico em cada rio.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. G. V. **Variação temporal do campo gravitacional detectada pelo satélite GRACE: Aplicação na bacia Amazônica**. 2009. Tese de Doutorado. PhD thesis-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- ALVES, D. B. M.; DE ABREU, P. A. G.; SOUZA, J. S. GNSS: status, modelagem atmosférica e métodos de posicionamento. **Brazilian Journal of Geomatics**, v. 1, n. 1, p. 2-7, 2013. DOI: 10.3895/rbgeo.v1n1.5431
- BERNARDI, J. V. E.; LANDIM, P. M. B. **Aplicação do Sistema de Posicionamento Global (GPS) na coleta de dados**. Universidade Federal de Rondônia, 2002.
- BLEWITT, G., HAMMOND, W. C., C. KREEMER (2018), **Harnessing the GPS data explosion for interdisciplinary science**, *Eos*, 99, <https://doi.org/10.1029/2018EO104623>.
- BLITZKOW, D., MATOS, A. C. C. **A evolução dos referenciais usados em geodésia: a era moderna**. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 8, n. 1, 2002.
- BLITZKOW, D.; MATOS, A. C. O. C. DE; GUIMARÃES, G. DO N.; COSTA, S. M. A. O conceito atual dos referenciais usados em geodésia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, 11.
- CAGIDO, A. C. F. **Variação temporal da coordenada altimétrica a partir de dados GNSS e dados GRACE**. 2017. URL: <http://hdl.handle.net/1884/49427>
- CASTRO JÚNIOR, C. A. C. **Arcabouço gravimétrico brasileiro e o meio ambiente: possibilidades e perspectivas**. 2018. 234 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/8460>. Acesso em 10 Abr. 2019.
- COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validação da avaliação pelo GRACE do acúmulo de água no subsolo da bacia amazônica com base em dados de linígrafos. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 18, n. 2, p. 262-281, Jun. 2012. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S198221702012000200006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S198221702012000200006&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 29 mar. 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702012000200006>.
- DA SILVA, L. M.; DE FREITAS, S. R. C. Estimativa da posição atual do Datum Vertical Brasileiro de Imbituba a partir de dados maregráficos, observações GNSS e Altimetria por Satélites. **Simpósio Sirgas**, p. 16-20, 2015.
- DOS REIS, S.A. **Demanda por Transporte Ferroviário: o caso do transporte de açúcar na malha ferroviária da Região Centro-Sul**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Recuperado de [https://www.maxwell.vrac.pucRio.br/4244/4244\\_5.PDF](https://www.maxwell.vrac.pucRio.br/4244/4244_5.PDF), 2007.

FIGUEIREDO FILHO, D. B., SILVA JÚNIOR, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. 2009. Revista PolíticaHoje, RPH - UFPE. Vol. 27, N. 2 - Editorial. Revista Política Hoje - ISSN: 0104-7094, [S.l.], v. 27, n. 2, p. 1-5, dez. 2018. ISSN 0104-7094. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/politicahoje/article/view/240530>>. Acesso em: 21 de abril 2019.

FERREIRA, V. G.; MONTECINO, H. C., NDEHEDEHE, C. E., HECK, B., GONG, Z. DE FREITAS, S. R. C., WESTERHAUS, M. Space-based observations of crustal deflections for drought characterization in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 644, p. 256-273, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.277>

FERREIRA, V.G.; ASIAH, Z.; XU, J.; GONG, Z.; ANDAM-AKORFUL, S.A. Land Water-Storage Variability over West Africa: Inferences from Space-Borne Sensors. *Water* 2018, 10, 380.

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

GUZATTO, M. P.; KLEIN I.; MATSUOKA, M. T. ROFATTO, V. F.; VERONEZ M. R. Análise gráfica das variáveis do controle de qualidade de dados geodésicos por meio de testes estatísticos. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 6, n. 3, p. 194-209, 2018. DOI: [10.3895/rbgeo.v6n3.7097](https://doi.org/10.3895/rbgeo.v6n3.7097)

MARCUZZO, F. F. N.; MELATI, M. D. Precipitação pluviométrica mensal nas sub-bacias que integram à bacia do Atlântico – Trecho Sudeste. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 21, 2015b, Brasília. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2015b.

MELATI, M. D.; MARCUZZO, F. F. N. Estudo de Perfis de Estações Fluviométricas: Transcrições de Campo, Ajuste de Escritório e Efeito nos Atributos Hidráulicos. In: XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014, Natal. **Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Porto Alegre: ABRH, 2014. p. 1-10. Disponível em: [http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17448/3/perfis\\_transversais.pdf](http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17448/3/perfis_transversais.pdf). Acesso em: 24 abr. 2019

MORETTIN, Pedro Alberto; BUSSAB, WILTON OLIVEIRA. **Estatística básica**. Editora Saraiva, 2017. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=vDhnDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA4&dq=morretin+estatística&ots=DXi5cfbYVl&sig=14UyyhAJRF0HOGAsu4v6YkeuiIo#v=onepage&q=morretin%20estatística&f=false>. Acesso em: 11 de Nov. 2019

NASCIMENTO, L.A; DAL POZ, W. R.; SANTOS, A. P.; FREITAS, K. X. S. Geração automatizada de séries temporais de dados posicionais utilizando o ibge-ppp. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [S.l.], v. 23, n. 1, mar. 2017. ISSN 1982-2170. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/51426>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

PINTO, E. Geopolítica da água. **Revista de Geopolítica**, v. 8, n. 1, p. 19-32, 2017.  
Disponível em: <http://revistageopolitica.com.br/index.php/revistageopolitica/article/view/172>.  
Acesso em: 21 de Fev. 2019

PROL, F.; JUNIOR, J. M.; PARANHOS FILHO, A. C.. Análise do Posicionamento Geodésico como Ferramenta para Monitorar as Variações do Nível de um Rio. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 81-85, 2016.

ROSENHAIM, T. L. **Observações da missão Grace aplicadas ao monitoramento do armazenamento d'água na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

TEIXEIRA, N. N.; FERREIRA, L. D. D. Estabelecimento de Redes Geodésicas Locais de Alta Precisão para o Monitoramento de Deformações da Crosta: Estudo de Caso de uma Barragem de Usina Hidrelétrica. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 11, n. 1, 2005.

XAVIER, L. N. R. **Modelagem Hidrológica com o Aporte de Dados da Missão Espacial GRACE: Aplicação a Bacias Brasileiras**. Tese de Doutorado. Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 250 p., 2012.

## INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por monitoramentos ambientais sejam terrestres ou remotos, precisos e de alta qualidade tem desencadeado novas tecnologias e subáreas de pesquisas como é o caso da Hidro-Geodésia (FERREIRA et al. 2018). A Hidro-Geodésia tem contribuído de forma ímpar nos processos que tange ao conhecimento apurado e tecnológico para a mensuração dos processos geodinâmicos. A missão espacial GRACE (*Gravity Recovery & Climate Experiment*) propôs obter dados referentes ao geóide e aos fenômenos físicos que ocorrem acima, sobre e abaixo da superfície da Terra e tem se destacado no que concerne às observações do campo de gravidade para estes fins (CASTRO JUNIOR, 2018). Além das informações obtidas remotamente pelo GRACE é possível estudar o soerguimento da crosta por meio de medidas na superfície terrestre. Neste contexto, tem-se utilizado informações advindas de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e estações linimétricas advindas da ANA (Agência Nacional de Águas) (COSTA; MATOS; BLITZKOW 2012).

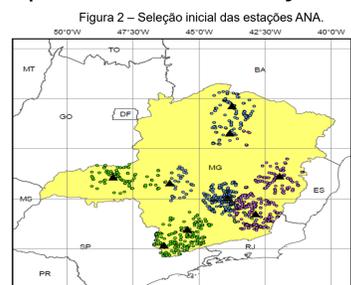
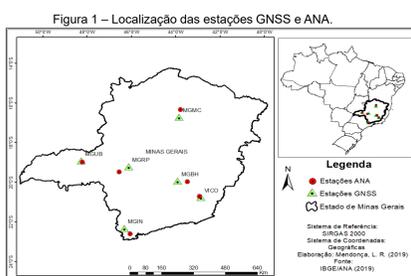
O presente trabalho tem por objetivo comparar as informações sobre equivalente à altura d'água adquiridas por meio dos modelos GRACE-EWH com os dados *in situ* obtidos nas estações linimétricas da ANA e nas estações GNSS, com o propósito de verificar a variação de água subterrânea e superficial no estado de Minas Gerais relacionando-o à sazonalidade do ciclo hidrológico.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de Estudo e Dados Utilizados

A área de estudo é o estado de Minas Gerais, na qual foram selecionadas seis estações GNSS pertencente à RBMC e seis estações fluviométricas pertencentes à ANA (Figura 1).

Para a determinação das estações GNSS procurou-se a melhor distribuição geográfica no estado, além de séries temporais mais longas. No caso das estações ANA foram criados *buffers* com 50 km de raio a partir das estações GNSS (Figura 2). Foram selecionadas as estações que apresentaram maior série temporal, além de proximidade da estação GNSS.



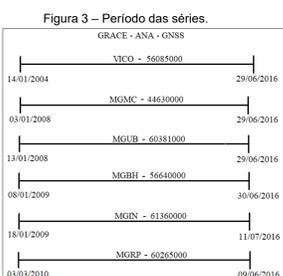
### Aquisição dos dados GNSS, ANA e GRACE

Os dados GNSS foram adquiridos por meio do site: <http://geodesy.unr.edu/magnet.php>. Trata-se de soluções diárias processados do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), utilizando efemérides precisas IGS do tipo rápida IGS.

Os dados das estações linimétricas da ANA foram adquiridos por meio do site <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>. o serviço disponibiliza séries históricas de dados fluviométricos e pluviométricos. Neste estudo foram utilizadas estações pertencentes a três bacias hidrográficas: Paraná, São Francisco e Atlântico Sudeste.

A obtenção dos dados GRACE foi por meio do site <http://www.thegraceplotter.com>. Foi utilizada a solução pontual, isto é, por meio das coordenadas da estação de interesse foi possível ter acesso a funcional EHW. A solução selecionada foi a CNES RL04-v1 10-day.

A Figura 3 ilustra o período das séries temporais para cada uma das seis estações. Utilizou-se como parâmetro o período de máxima sobreposição das três fontes de dados.



A metodologia empregada neste trabalho é baseada na correlação de Pearson e na regressão linear. O coeficiente de Pearson é calculado em função da covariância entre as duas variáveis, dividido pelo produto de seus desvios padrão:

$$r = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

onde neste estudo X são as informações do GRACE (EWH) e Y são os dados *in situ* da ANA ou do GNSS. A covariância,  $Cov(X, Y)$ , é dada pela equação:

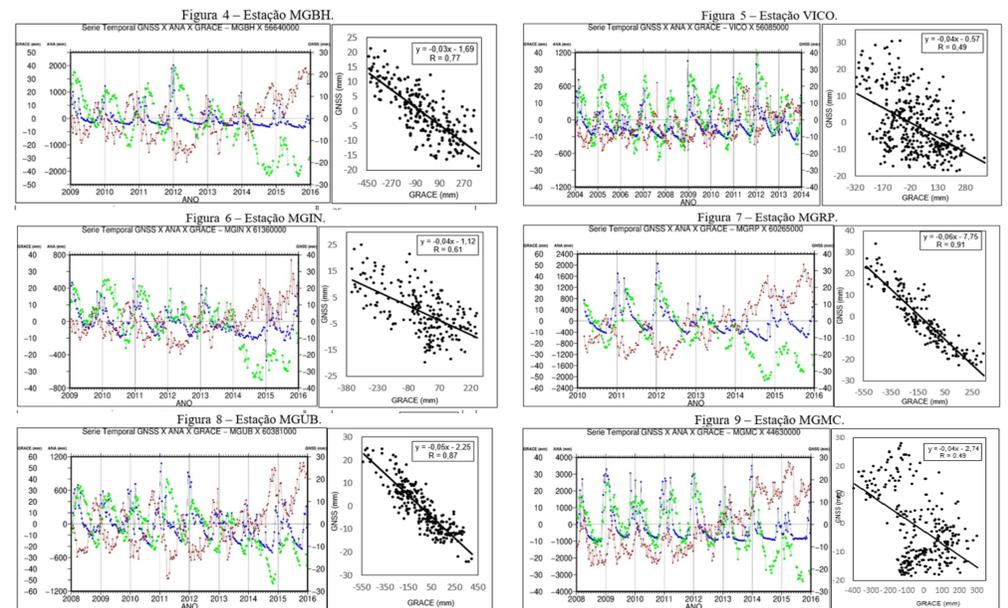
$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y)$$

e  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são os desvios padrão de X e Y e são dados por:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{n \sum x^2 - (\sum x)^2}{n^2}} \quad \sigma_y = \sqrt{\frac{n \sum y^2 - (\sum y)^2}{n^2}}$$

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise das séries temporais foi realizada em termos da diferença de cada observação com a média da série. Vale destacar que as soluções EWH são a cada 10 dias. As soluções dos dados GNSS e ANA possuem soluções diárias. Com isso foi aplicado uma média móvel para obter soluções 10-dias. As Figuras 4, 5, 6, 7, 8 e 9 exibem os resultados gráficos das séries temporais e a regressão linear envolvendo GRACE e GNSS. Em azul são os dados ANA, em verde GRACE e vermelho GNSS.



Uma primeira análise no tocante ao resultados diz respeito ao comportamento das estações fluviométricas. Verificar-se nos gráficos que para os períodos de estiagem, os valores decaem lentamente, permanecendo próximos a zero. Por outro lado, nas épocas chuvosas há expressivos picos (por exemplo no início de 2012), onde somente a estação MGIN não evidencia o ocorrido. As estações fluviométricas evidenciaram a seca que houve no país a partir de 2014. É possível verificar a menor amplitude a partir da referida data.

Em se tratando das informações de EWH, observa-se o comportamento cíclico em todas as séries comprovando a eficiência da missão em detectar variação de água superficial e subterrânea ao longo do tempo. Nota-se que a partir de 2014 os valores de EWH decaem, permanecendo negativos, exceto para a estação VICO. O mesmo evento é observado para as estações GNSS, porém com a direção contrária. Tal fato pode ser explicado pelo período de seca que houve no país. Ainda sobre os resultados de EWH é possível verificar uma correlação negativa com os dados advindos das estações GNSS. Para as estações MGRP e MGUB verifica-se uma correlação negativa maior que 0,8. As estações MGBH e MGIN possuem valores acima de 0,6.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia aplicada neste trabalho demonstrou-se satisfatória em termos de analisar a variação de água subterrânea a partir de informações da missão GRACE. Embora a região de estudo não possua características próximas a região amazônica, em termos de ciclo hidrológico, foi possível analisar a variação de água em diferentes partes do estado. Além disso, verificou-se de forma exitosa a correlação negativa com informações advindos das estações GNSS.

Foi possível detectar a seca que assolou o país a partir de 2014 a partir das informações de EWH e das estações GNSS. Sugere-se que haja um aprofundamento nas análises das estações ANA, em termos de hidrologia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Projeto Universal Processo: 420555/2016-1 e as pesquisadoras Dra. Ana Cristina Cancoro de Oliveira Matos e Dra. Sônia Maria Alves Costa pela disponibilização do script para gerar as Figuras.

## REFERÊNCIAS

- CASTRO JÚNIOR, C. A. C. Arcabouço gravimétrico brasileiro e o meio ambiente: possibilidades e perspectivas. 2018. 234 f. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2018.
- COSTA, S. M. A.; MATOS, A. C. O. C.; BLITZKOW, D. Validação da avaliação pelo GRACE do acúmulo de água no subsolo da bacia amazônica com base em dados de linígrafos. Boletim de Ciências Geodésicas., Curitiba, v. 18, n. 2, p. 262-281, Jun. 2012.
- FERREIRA, V.G.; ASIAH, Z.; XU, J.; GONG, Z.; ANDAM-AKORFUL, S.A. Land Water-Storage Variability over West Africa: Inferences from Space-Borne Sensors. Water 2018, 10, 380.