



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DO MAGNETÔMETRO DO NANOSAC-BR1 COM DADOS DE MAGNETÔMETROS DE SOLO

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Vitor Vaz Schultz (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: xultezz@gmail.com

Dr. Clezio Marcos De Nardin (EMBRACE/INPE, Orientador)
E-mail: Clezio.denardin@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Juliano Moro (CRS/INPE)
Dr. Nelson Jorge Schuch (CRS/INPE)

Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Rosângela Vaz Schultz e Sergio Schultz, que são os melhores e sempre me incentivaram a evoluir. Aos meus avôs Ivo Schultz e Bozano de Almeida Vaz os quais eu tenho a honra de seguir os conselhos. E também devo agradecer a minha namorada Laura Buss e a gurizada, que ouviram muitas vezes os assuntos tratados neste trabalho. Por último, mas não menor importante, um agradecimento ao meu orientador Dr. Clezio M. Denardini e os coorientadores Dr. Nelson Jorge Schuch e Dr. Juliano Moro, que gastaram um tempo considerável me orientando na vida pessoal e profissional. O bolsista aproveita para agradecer ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, assim como ao Coordenador do Programa PIBIC/INPE – CNPQ/MCTIC, pela oportunidade para desenvolver seu potencial acadêmico através deste Projeto de Iniciação Científica.

RESUMO

Na análise comparativa dos dados do magnetômetro do NANOSATC-BR1 com dados de magnetômetros de solo, além da diferença na altitude entre os equipamentos, é usual que os equipamentos estejam em faixas geográficas distintas em razão da órbita do satélite que, via de regra, apresenta poucos pontos de sobreposição com a localização exata dos equipamentos fixos em solo. Portanto, nesta fase do trabalho estamos apresentando a comparação entre os dados da Rede Embrace (Estudo e Monitoramento do Clima Espacial Brasileiro) de magnetômetros e modelagens com o modelo de campo geomagnético *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). Essa comparação foi realizada como um estudo do ajuste linear e correlações entre o módulo do campo e as componentes H e Z medidas em nano Tesla (nT), e a declinação (DIP) e inclinação (I) medidas em graus obtidas de dados de magnetômetros com resultados do modelo. A partir desta validação dos dados magnéticos contra um modelo empírico podemos, não só usar o IGRF para contrastar as medidas do NANOSATC-BR1, quanto podemos estimar e quantificar as diferenças esperadas pelo resultado do modelo. O modelo IGRF utiliza dados de magnetômetros que, em sua maioria, estão instalados no hemisfério norte. Esse modelo é uma série harmônica semi-normalizada com coeficientes esféricos de Gauss e coeficientes obtidos dos polinômios de Legendre. Os dados dos magnetômetros utilizados correspondem à meia noite local do dia mais calmo de cada mês durante um ano para as seguintes estações da América Latina: São José dos Campos (SJC), São Luís (SLZ), Jataí (JAT), São Martinho da Serra (SMA) e, em Rio Grande (RGA) na Argentina. O estudo comparativo foi realizado entre os dados gerados pelo modelo IGRF (na superfície terrestre e na altura em que se encontra o NANOSATC-BR1, 615 km) e para as alturas e coordenadas das cinco cidades. Os resultados mostram boa concordância entre as componentes obtidas pelo IGRF com o valor medido dos magnetômetros, com maiores diferenças no ângulo DIP para as cidades de JAT, SJC, e SMS. Os resultados são apresentados e discutidos em termos da localização das estações em relação à Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS).

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Componente H e ângulo de Declinação.....	20
Figura 2.2: Mapa da intensidade total do campo geomagnético obtido com o modelo IGRF.	22
Figura 2.3: Ilustração dos satélites da constelação SWARM.....	24
Figura 2.4: Ilustração das órbitas dos satélites da constelação SWARM.....	25
Figura 2.6: Instrumento <i>Laser Retro Reflector</i> (LRR).	27
Figura 3.1: Disponibilidade de dados de magnetômetros do programa Embrace para cada estação.	29
Figura 4.1: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em SLZ.....	35
Figura 4.2: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para SLZ.	36
Figura 4.3: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em JAT.	37
Figura 4.4: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para JAT.....	38
Figura 4.5: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em SJC.....	39
Figura 4.6: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para SJC.	40
Figura 4.7: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em RGA.....	41
Figura 4.8: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para RGA.	42
Figura 4.9: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em SMS.	43
Figura 4.10: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para SMS.	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Tabela das publicações de correção do modelo IGRF a cada 5 anos.	21
Tabela 3.1: Tabela das coordenadas geográficas e magnéticas das estações de magnetômetros utilizadas nesse trabalho.	28

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CRS	Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais
EMBRACE	Programa de Estudos e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MCTIC	Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovação e Comunicações
IGRF	<i>International Geomagnetic Reference Field</i>
IRI	<i>International Reference of Ionosphere</i>
MSIS	<i>Mass Spectrometer Incoherent Scatter</i>
SLZ	São Luís
JAT	Jataí
SJC	São José dos Campos
SMS	São Martinho da Serra
RGA	Rio Grande

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	15
2	REVISÃO TEÓRICA.....	18
2.1	<i>INTERNATIONAL GEOMAGNETIC REFERENCE FIELD</i> (IGRF).....	18
2.1.1	CAMPO GEOMAGNÉTICO.....	18
2.1.2	DEFINIÇÕES DO CAMPO GEOMAGNÉTICO.....	19
2.1.3	O MODELO IGRF.....	20
2.1.4	ANOMALIA MAGNÉTICA DA AMÉRICA DO SUL (AMAS).....	22
2.2	<i>INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE</i> - IRI.....	23
2.3	<i>MASS SPECTROMETER INCOHERENT SCATTER</i> - MSIS.....	23
2.4	OS SATÉLITES DA MISSÃO SWARM.....	24
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA.....	28
3.1	REDE EMBRACE DE MAGNETÔMETROS.....	28
3.1.1	ATIVIDADES REALIZADAS EM IDL.....	30
3.2	MODELO IGRF.....	32
3.2.1	ATIVIDADES REALIZADAS EM IDL.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	34
4.1	RESULTADOS: SLZ - SÃO LUÍS, MARANHÃO.....	35
4.2	RESULTADOS: JAT – JATAÍ, GOIÁS.....	37
4.3	RESULTADOS: SJC – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SÃO PAULO.....	39
4.4	RESULTADOS: RGA – RIO GRANDE, TF, ARGENTINA.....	41
4.5	RESULTADOS: SMS – SÃO MARTINHO DA SERRA, RIO GRANDE DO SUL.....	43
4.6	ATIVIDADES ADICIONAIS REALIZADAS PELO BOLSISTA.....	46
5	CONCLUSÕES.....	47
6	REFERÊNCIAS.....	48
7	ANEXO.....	49

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Neste trabalho são apresentadas as atividades desenvolvidas no período de Agosto de 2016 até Julho de 2017 referentes ao Projeto de Iniciação Científica intitulado “**Análise Comparativa dos Dados do Magnetômetro do Nanosatc-Br1 com Dados de Magnetômetros de Solo**”. As seguintes etapas do projeto são discutidas no presente relatório:

1. Aprender a trabalhar com os dados coletados pelos magnetômetro do satélite NANOSATC-BR1.
2. Pesquisar entre os diversos instrumentos e modelos existentes, quais são aqueles compatíveis com as análises e objetivos deste projeto.
3. Aprender uma linguagem de programação para gerar rotinas de manipulação que possibilite o estudo dos dados magnéticos através da modelagem.
4. Adequar os dados dos instrumentos e os resultados dos modelos para realizar as análises pertinentes ao projeto.
5. Adequar as metodologias e ferramentas para realizar um estudo comparativo entre modelos e dados magnéticos (NANOSATC-BR1 e Rede Embrace).
6. Continuar e aprimorar a revisão bibliográfica sobre Ionosfera, campo geomagnético, AMAS, modelos empíricos e magnetômetros, bem como os principais resultados obtidos atualmente pela comunidade científica.

Para alcançar o primeiro objetivo foram realizadas atividades relacionadas com a análise dos dados científicos obtidos com o magnetômetro XEN-1210, abordo do primeiro Nano Satélite Científico Brasileiro, o NANOSATC-BR1. No entanto, como obtenção do conjunto

de dados está diretamente ligada com a passagem do satélite sobre a estação terrena de rastreamento (duas passagens diárias), há uma grande descontinuidade na série temporal dos dados. Dessa forma, optou-se em não utilizar os dados do NANOSATC-BR1. Como alternativa, iniciou-se o estudo para realizar análises dos dados magnéticos do satélite da missão SWARM, que é uma missão da Agência Espacial Européia com o objetivo de estudar o campo magnético da Terra por meio de três satélites em diferentes órbitas polares, entre 450 e 550 km de altitude.

O segundo objetivo é apresentado e discutido na revisão teórica, em que o bolsista realizou estudos teóricos sobre os seguintes modelos empíricos: *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF) de campo magnético, *International Reference Ionosphere* (IRI) referente à ionosfera terrestre, e ao *Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Model* (NRLMSISE-00) referente à atmosfera neutra. Esses modelos são muito utilizados em Geofísica Espacial. Dentre esses três modelos, o modelo IGRF é o mais compatível com as análises e objetivos deste projeto.

O terceiro objetivo do projeto consiste no aprendizado de uma linguagem de programação para analisar as saídas do modelo IGRF e os dados de magnetômetros. Para isso o bolsista iniciou os estudos em *Interactive Data Language* (IDL), sendo esta a linguagem de programação já utilizada pelos demais pesquisadores do grupo no qual o bolsista faz parte. As rotinas construídas encontram-se no capítulo de Instrumentação e Metodologia.

Finalmente, o bolsista realizou as análises de correlação entre as componentes do vetor campo magnéticas medidas com os magnetômetros da Rede Embrace (Estudo e Monitoramento do Clima Espacial Brasileiro), e as mesmas componentes modeladas com o IGRF, atingindo assim o quarto, quinto e sexto objetivos.

O presente Relatório Final está estruturado da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta a Revisão Teórica sobre as pesquisas e revisões bibliográficas realizadas durante o projeto;
- O Capítulo 3 refere-se à instrumentação e metodologia utilizada, Rede Embrace de magnetômetros, modelo IGRF, e a análise realizada;
- No Capítulo 4 são apresentadas as discussões dos resultados obtidos das análises da evolução temporal das propriedades do campo geomagnético calmo durante aproximadamente um ano, para cinco locais estrategicamente selecionados;
- O Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo;
- As Referencias utilizadas estão no Capítulo 6; e
- No Capítulo 7 está em anexo o resumo submetido ao Seminário de Iniciação Científica (SICINPE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

2 REVISÃO TEÓRICA

O presente capítulo trata dos modelos empíricos, uma introdução sobre a constelação de satélites SWARM que possui detectores de campo magnético, e atividades realizadas em IDL para a leitura das saídas de modelos e manipulação dos dados dos satélites SWARM.

2.1 *INTERNATIONAL GEOMAGNETIC REFERENCE FIELD (IGRF)*

O *International Geomagnetic Reference Field* – IGRF (Finlay et al. 2010) é um modelo numérico que permite obter o campo geomagnético de 1900 até o presente, para todas as coordenadas geográficas da Terra e alturas de 6.370 km (superfície) até 6.970 km de altitude. O modelo é produzido e mantido por um grupo de modeladores de campo geomagnético sobre os cuidados da Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA) e utiliza dados coletados de satélites, observatórios magnéticos e estações magnéticas, dentre outros. Este modelo é utilizado por cientistas no estudo do Clima Espacial, e em investigações de anomalias magnéticas locais.

2.1.1 CAMPO GEOMAGNÉTICO

O campo geomagnético pode ser interpretado como um dipolo magnético onde os polos estão muito próximos do Norte e Sul Geográfico. A teoria do dínamo descreve o processo pelo qual um fluido condutor em rotação e convecção mantém um campo magnético. O campo geomagnético é composto de uma soma de campos de origens diferentes: campo principal, campo crustal e o campo induzido por correntes, conforme a Equação 2.1.

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \vec{B}_m(\vec{r}, t) + \vec{B}_c(t) + \vec{B}_a(\vec{r}, t). \quad (2.1)$$

Esses termos são:

- a) O campo principal (\vec{B}_m) é gerado por correntes que circulam na parte externa do núcleo da Terra e representa mais de 95% da intensidade do campo geomagnético.
- b) O campo crustal (\vec{B}_c), da crosta/manto da Terra, decorre das rochas magnetizadas, ele varia espacialmente e pode ser considerado constante no tempo.
- c) O Campo induzido por correntes (\vec{B}_a) é devido a correntes que circulam na ionosfera e magnetosfera, incluindo correntes elétricas na crosta terrestre variando no espaço e no tempo (McLean et al. 2004).

2.1.2 DEFINIÇÕES DO CAMPO GEOMAGNÉTICO

Consideremos as seguintes informações:

- O eixo Norte e Sul geográfico tem aproximadamente 11° de angulação entre o eixo Norte e Sul magnético; e
- O Norte geográfico é o Sul magnético, e vice versa.

O campo geomagnético é um vetor tridimensional que varia no tempo e no espaço, ou seja, cada ponto da superfície terrestre possui um vetor campo geomagnético diferente com diferentes propriedades. Utilizando o ângulo de inclinação (I) foi definido que o equador magnético é a região onde o vetor campo magnético tem 0° de inclinação, ou seja, encontra-se tangente a superfície da Terra. Para compreender como foi definido o vetor campo geomagnético, vamos utilizar a referência geográfica Norte e Sul, e o plano cartesiano x , y , z . A dimensão x é definida como positiva a direção Norte, a dimensão z será positiva na direção Nadir (centro da Terra) e a componente y definida como positiva para Leste.

Para analisar o campo geomagnético convém analisar o plano horizontal “ x y ”, em que a componente horizontal (H) é positiva quando orientada para o Norte Magnético, e tem módulo igual a $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$, conforme ilustrado na Figura 2.1.

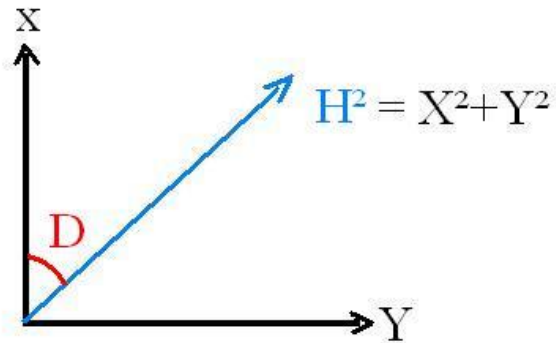


Figura 2.1: Componente H e ângulo de Declinação
 Fonte: Produção do autor.

O vetor campo geomagnético no sistema de coordenadas (H,D,I) consiste em um valor escalar e dois ângulos, análogo as coordenadas esféricas. Através da componente H define-se a declinação (D), que é o ângulo entre a componente horizontal e o eixo X. A componente inclinação (I) é o ângulo entre a componente H e a direção do campo geomagnético \vec{B} . As relações entre as coordenadas são:

- $D = \arctan(y/x)$; e
- $I = \arctan(z/H)$.

2.1.3 O MODELO IGRF

As mudanças que ocorrem no campo geomagnético são demoradas em relação a escala de tempo de dias, semanas, ou até meses, mas existem. Conseqüentemente o modelo IGRF deve ser revisado e atualizado, para se obter mais precisão. A Tabela 2.1 mostra o resumo de todas as gerações do modelo IGRF, da primeira versão em 1955 até a versão final.

Tabela 2.1: Tabela das publicações de correção do modelo IGRF a cada 5 anos.

Geração	Válido para	Referencia
IGRF-11	1900 – 2015	Finlay et al. (2010)
IGRF-10	1900 – 2010	Maus et al. (2005)
IGRF-9	1900 – 2005	Macmillan et al. (2003)
IGRF-8	1900 - 2005	Mandea & Macmillan (2000)
IGRF-7	1900 - 2000	Barton (1997)
IGRF-6	1945 – 1995	Langel (1992)
IGRF-5	1945 – 1990	Langel et al. (1998)
IGRF-4	1945 - 1990	Barraclough (1987)
IGRF-3	1965 – 1985	Peddie (1982)
IGRF-2	1955 – 1980	IAGA (1975)
IGRF-1	1955 – 1975	Zmuda(1971)

O modelo IGRF é uma série numérica que aproxima o campo geomagnético total, de origem interna, com suas variações no tempo. É uma séria harmônica esférica truncada para representar corretamente o potencial escalar V :

$$\mathbf{B} = -\nabla V \quad (2)$$

$$V(r, \theta, \phi) = \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} P_n^m(\cos\theta) \cdot (g_n^m \cos\phi + h_n^m \sin\phi) \quad (3)$$

em que (r, θ, ϕ) são as coordenadas esféricas geocêntrica, a é uma referencia de raio (tomado para medir o raio da Terra), g_n^m e h_n^m são os coeficientes tridimensionais de Gauss; convencionalmente medido em nT. Os coeficientes de Gauss servem para delimitar localização tridimensional através das coordenadas esféricas, sendo elas, a Latitude, a Longitude e a distancia radial que varia da superfície até 6.970 Km.

Os termos $P_n^m(\cos\theta)$ são obtidos da semi-normalizada série de Schmidt associada com polinômios de Legendre. A estimativa destes polinômios é atualizados a cada 5 anos e é produzida através de quadrados mínimos ponderados das medidas do satélite Orsted, que órbita próximo do polo à uma altitude média de 760 km (de 640 até 880 km). Os dados são gerados durante a noite em períodos magnéticos calmos e tem resoluções de 1 minuto. Os coeficientes obtidos dos polinômios de Legendre são atualizados a cada 5 anos, como mencionado antes.

2.1.4 ANOMALIA MAGNÉTICA DA AMÉRICA DO SUL (AMAS)

A região da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS) é uma região onde o campo geomagnético tem sua intensidade reduzida. A AMAS é ilustrada na Figura 2.2, onde é possível ver que há uma região onde o campo é de baixa intensidade quando comparado com o campo em outras isolinhas, em outras regiões. Atualmente a AMAS encontra-se próximo ao Paraguai e Sudoeste do Brasil. A AMAS ocorre pois o eixo de rotação do planeta Terra possui aproximadamente 11° de diferença do eixo do dipolo magnético

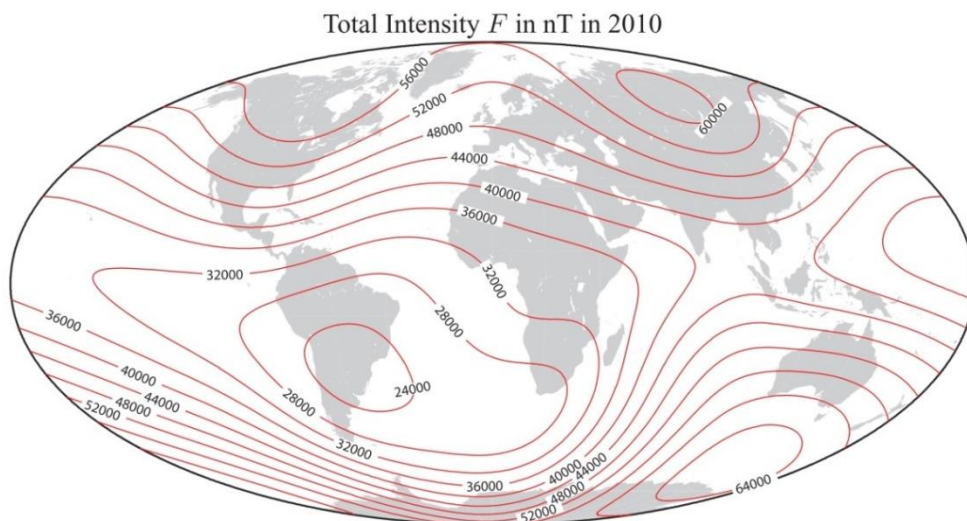


Figura 2.2: Mapa da intensidade total do campo geomagnético obtido com o modelo IGRF.
Fonte: Finlay et al. 2010.

2.2 INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE - IRI

O modelo empírico *International Reference Ionosphere* – IRI (Bilitza and Reinisch 2008) é considerado o modelo da atmosfera ionizada padrão internacional desde 1999. O modelo é patrocinado pelo *Comettee on Space Research* (COSPAR) e pelo *International Union of Radio Science* (URSI). Para uma boa precisão o modelo conta com um número extensivo de fonte de dados, dentre eles, redes mundiais de ionossondas, radares de espalhamento incoerente, satélites e foguetes. O modelo é atualizado anualmente durante encontros científicos, como por exemplo, o *COSPAR*.

A densidade eletrônica da ionosfera é uma variável difícil de quantificar, mudanças significativas são observadas em varias escalas temporais distintas, dentre elas, o ciclo solar é uma condição importante. A uma altura fixa a densidade eletrônica é modulada pela expansão da ionosfera e pela variação da concentração de íons. Esses dois efeitos variam conforme a radiação ultravioleta que vem do Sol.

Sendo o IRI um modelo mundial, ele estipula propriedades dos elementos que constituem a ionosfera, o Conteúdo Eletrônico Total, a probabilidade de ocorrência de Espalhamento F e a deriva equatorial na direção vertical dos íons entre 50 km e 1.500 km. O modelo necessita das escolhas de altitude, coordenadas de referencia (exceto regiões aurorais), hora e data e as demais saídas do modelo são: temperatura dos íons e elétrons, densidade eletrônica e composição dos íons O^+ , H^+ , N^+ , He^+ , O^+ , NO^+ .

2.3 MASS SPECTROMETER INCOHERENT SCATTER - MSIS

O modelo *Mass Spectrometer and Incoherent Scatter Model* (NRLMSISE-00, que a partir daqui será escrito apenas como MSIS, Picone et al. 2002) tem, como base, dados de radares de frequências incoerentes e, com isso, infere a temperatura em latitudes específicas, enquanto que satélite com espectrômetros de massa provém à composição de maneira

global. Esta combinação de rede de dados atualmente permite representar mais precisamente o perfil de temperatura dos constituintes neutros e as densidades de O₂, H, N, He, O, N₂, Ar e densidade total de massa neutra entre a superfície terrestre e 1.000 km de altura para determinado local, hora e data. Os principais sistemas que contribuem com dados para o MSIS são medidas obtidas de espectrômetros de massa a bordo de satélites, foguetes e de radares de espalhamento incoerente.

2.4 OS SATÉLITES DA MISSÃO SWARM

A missão SWARM dispõe de uma constelação de três satélites dedicados a ser a fonte de dados do campo geomagnético, e sua variação temporal, mais avançada que há. Nesse capítulo são apresentados: a órbita de voo, as cargas úteis dos satélites e depois a forma e estrutura dos satélites. A plataforma utilizada pelos satélites SWAM é ilustrada na Figura 2.3.

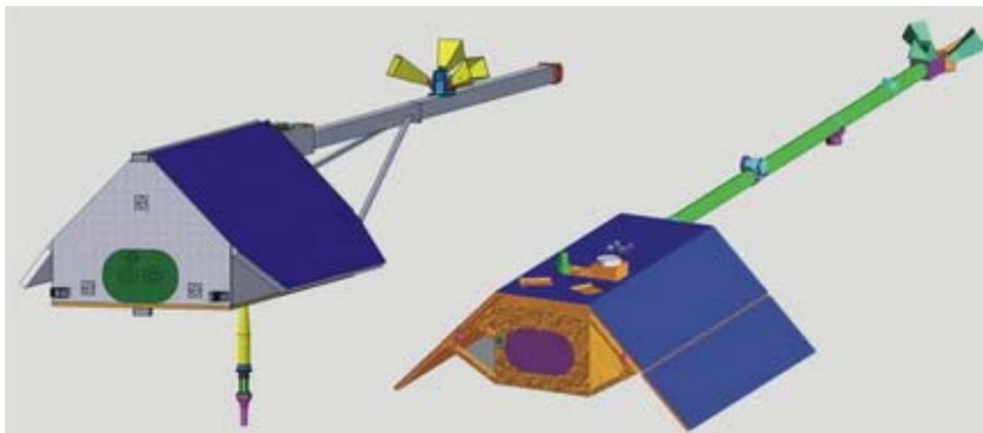


Figura 2.3: Ilustração dos satélites da constelação SWARM.
Fonte: Esa (2004).

O lançamento dos três satélites que compõem a constelação SWARM ocorreu no dia 22 de Novembro de 2013. Os satélites possuem órbita Polar com altitude de aproximadamente

460 km para o satélite SWARM A e SWARM C e 640 km para o SWARM B. Os satélites estão dispostos em dois diferentes planos orbitais, ilustrados na Figura 2.4:

- Dois satélites em um plano de $87,4^\circ$ de inclinação e um no plano de $86,8^\circ$ de inclinação;
- Os dois satélites que estão em $87,4^\circ$ possuem altitude média de 470 km a separação leste-oeste é de $1,5^\circ$ e a diferença de tempo das órbitas é de aproximadamente 10 segundos; e
- O satélite com menor inclinação possui 530 km de altitude média de voo.

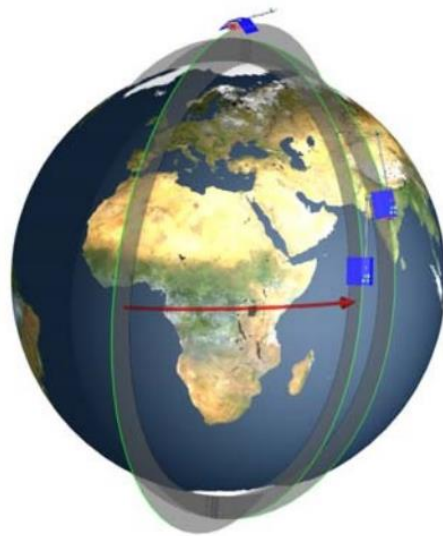


Figura 2.4: Ilustração das órbitas dos satélites da constelação SWARM.
Fonte: Esa (2004).

A missão SWARM utiliza os magnetômetros chamados de *Absolute Scalar Magnetometer* (ASM). O desempenho dos magnetômetros à bordo é crucial para o sucesso da missão. A carga útil dos satélites SWARM consiste nos seguintes instrumentos:

- | | |
|--|-------|
| 1. <i>Absolute Scalar Magnetometer</i> | (ASM) |
| 2. <i>Vector Field Magnetometer</i> | (VFM) |
| 3. <i>Electrical Field Instrument</i> | (EFI) |
| 4. <i>Acelerometer</i> | (ACC) |
| 5. <i>Laser Retro Reflector</i> | (LRR) |

Com relação aos instrumentos:

- 1) O ASM tem como objetivo calibrar o vetor campo geomagnético obtido pelo magnetômetro escalar (VFM), para manter a absoluta precisão. A precisão obtida é menor que 3 nT, com resolução $<0,1$ nT sendo que os valores globais são entre 15.000-65.000 nT.
- 2) O VFM é o principal instrumento da missão SWARM, ele realiza medidas do campo geomagnético e suas componentes. Disposto de uma escala de $\pm 65 \mu T$ e com um erro de medida aleatório de menos de 1 nT para todas as frequências maiores que 4 Hz. O sensor do magnetômetro é uma esfera compacta de bobinas como é ilustrado na Figura 2.5.

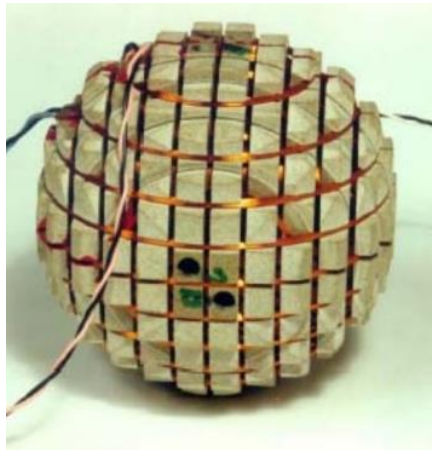


Figura 2.5: Sensor *Compact Spherical Coil* (CSC).

Fonte: Esa (2004).

- 3) O principal parâmetro a ser medido pelo EFI é a densidade de íons, a velocidade de drift dos elétrons e o campo elétrico existente através da expressão ($v \times B$). O EFI consiste de três sensores, sendo eles: *Ion Drift Meter* (IDM) para medir as componentes da velocidade dos íons, *Retarding Potential Analyser* (RPA) que serve para mensurar o

módulo da velocidade dos íons, e uma *Planar Langmuir Probe* (PLP), a qual é utilizada para medir o potencial do meio interplanetário

- 4) O Acelerômetro (ACC) mede as acelerações não gravitacionais, causadas por ventos, pressões de radiações solares, dentre outros. Serve para controlar e amenizar as acelerações do centro de massa do satélite.
- 5) O objetivo do LRR é mensurar o tempo de ida e volta de um sinal de laser, que é emitido e recebido por estações terrenas depois de refletir no LRR. O instrumento é composto de quatro prismas montados em forma de pirâmide numa estrutura de alumínio. O LRR é ilustrado na Figura 2.6.



Figura 2.5: Instrumento *Laser Retro Reflector* (LRR).
Fonte: Esa (2004).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Nesse capítulo são discutidos os instrumentos utilizados na pesquisa e os métodos utilizados neste projeto de pesquisa.

3.1 REDE EMBRACE DE MAGNETÔMETROS

O Programa Embrace é um programa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTIC que visa à difusão do conhecimento sobre o Clima Espacial. O programa monitora em tempo real as condições do ambiente solar-terrestre, com os observatórios de radio telescópio, telescópios de múons, estações de receptor GPS, observatórios de ionosfera e estações de magnetômetros. A descrição básica da Rede Embrace é encontrado em Denardini et al. (2015). Em resumo, cada estação possui um magnetômetro de núcleo saturado (*fluxgate*), que realiza medidas com resolução de 0,1 nT, com um intervalo de amostragem de até 1s. Na Tabela 3.1 estão indicadas as cidades em que se encontram as estações com magnetômetros utilizados nesse trabalho, que são: São Luís - MA (SLZ), Jataí - GO (JAT), São José dos Campos - SP (SJC), São Martinho da Serra - RS (SMS) e Rio Grande (RGA), na Argentina.

Tabela 3.1: Tabela das coordenadas geográficas e magnéticas das estações de magnetômetros utilizadas nesse trabalho.

Código IAGA	Cidade	Latitude	Longitude	Período
SLZ	São Luís	2°32'20"S	44°16'58"O	De Janeiro/2013 até Janeiro/2014
JAT	Jataí	17°52'45"S	51°43'17"O	De Janeiro/2014 até Janeiro/2015
SJC	São José dos Campos	23°12'50"S	45°53'39"O	De Dezembro/2013 até Dezembro /2014
SMS	São Martinho da Serra	29°32'7"S	53°51'14"O	De Fevereiro/2014 até Março/2015
RGA	Rio Grande	53°47'9"S	67°42'0"O	De Julho/2013 até Julho/2014

A última coluna da Tabela 3.1 mostra o período de utilização dos dados. O principal critério na seleção das estações foi à disponibilidade contínua de dados durante aproximadamente um ano inteiro. Conforme pode ser observado na Figura 3.1, que mostra a disponibilidade de dados coletados pela maioria dos magnetômetros da Rede Embrace, temos períodos com dados disponíveis (regiões em verde), enquanto outros períodos não há (regiões amarelas). As estações selecionadas são aquelas que apresentam maior número de dados durante um ano.

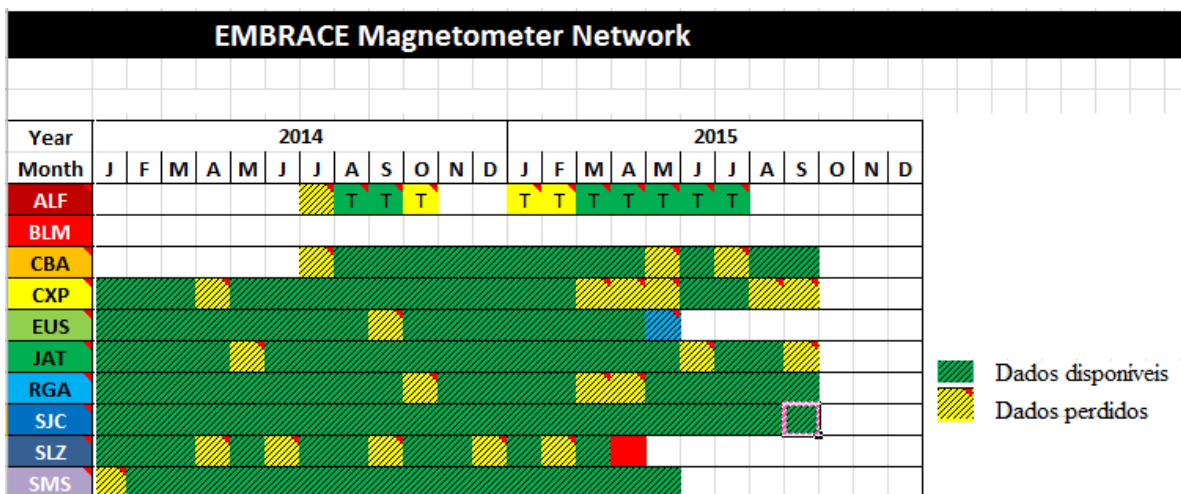


Figura 3.1: Disponibilidade de dados de magnetômetros do programa Embrace para cada estação. Fonte: Produção do autor.

Para cada uma das cinco estações foram selecionados os períodos que possuem 1 ano completo de dados. Em seguida foram selecionados os valores das componentes do campo magnético a meia noite (hora local) do dia mais calmo do mês segundo o site *Geomagnetic Data Service* Kyoto/Japão (disponível em <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/qddays/index.html>). Seguindo esta metodologia, tem-se um dado por mês para cada uma das componentes à serem comparadas com o modelo.

Além desse critério, as estações foram selecionadas levando em conta a posição do equador magnético e a região da AMAS, onde o centro se encontra próximo a SMS, região onde é registrado cerca de 22.500 nT para o módulo do campo geomagnético. A cidade de São Luís (SLZ) foi escolhida por estar mais distante de São Martinho da Serra (SMS), o que pode ser observado na Figura 3.1, e também possuir distância semelhante ao magnetômetro que se encontra em Rio Grande (RGA), sendo RGA, outra região selecionada. As outras regiões escolhidas foram São José dos Campos (SJC) e Jataí (JAT), pois possuem disponibilidade de dados em um período semelhante.

3.1.1 ATIVIDADES REALIZADAS EM IDL

Os dados da Rede Embrace de Magnetômetros gera um arquivo para cada dia de observação com resolução temporal de 1s. O bolsista criou um programa em IDL para ler um conjunto de arquivos de dados, calcular o dia fracionário (os dias em segundos) e criar um único arquivo de saída contendo todos os dias de dados solicitados junto com uma coluna do tempo referente aos dias selecionados. O programa é ilustrado na Figura 3.2.

```

pro Read_EMBRACE_Data
----- ABSTRACT
This routine returns the Components of Geomagnetic field measured by
the network EMBRACE of Magnetometers. The program get some days of data
calculate the Fractional time and save one file .txt to computer.
It calculate the h component and also put the l angle to radians.
On Line downloads can be made in the INPE - EMBRACE web site at:
http://www2.inpe.br/climaespacial/

Selected parameters are:
1 Height, km
2 B_Total, nT
3 B_north, nT
4 B_east, nT
5 B_down, nT
6 Mag. Inclination (DIP), deg.
7 Mag. Declination, deg

----- CAPTION
----- Strings
MainPath_in Main path to IGRF file
MainPath_out Main path to save IGRF file
Namedata_in Name of IGRF file
Namedata_out Name to save the IGRF file
Yes_Save Save ASCII file
X_Comp Matrix of X component [nT], B_north
Y_Comp Matrix of Y component [nT], B_east
Z_Comp Matrix of Z component [nT], B_down
I_Comp Matrix of I component [deg], Mag. inclination (DIP)
D_Comp Matrix of D component [deg], Mag. declination
H_Comp Matrix of H component [nT]
ResMTX Matrix for results

-----
By: Vitor Vaz Schultz - xultez@gmail.com
Date: April 10, 2017
Modification:
April 16, 2017 (Vitor Vaz Schultz -> Ploting and saving graphics)
Status: Complete

IF (N_ELEMENTS(MainPath) EQ 0) THEN MainPath = 'D:\IDL\EMBRACE_DATA'
IF (N_ELEMENTS(Namedata_out) EQ 0) THEN Namedata_out = 'Embrace_MtxData_jat_mar2015'
IF (N_ELEMENTS(Namedata_in) EQ 0) THEN Namedata_in = 'IGRF_H_Comp_Vs_Height'
IF (N_ELEMENTS(Yes_Save) EQ 0) THEN Yes_Save = 1
IF (N_ELEMENTS(Yes_Plot) EQ 0) THEN Yes_Plot = 1
; Create paths strings
Pth_out = MainPath + '\' + Namedata_out + '.txt'
Pth_in_IGRF_out = MainPath + '\' + Namedata_in + '.txt'
MtxPath = $DIALOG_PICKFILE(path=MainPath,FILTER=['*.17m'],/MULTIPLE_FILES)
N_days = N_ELEMENTS(MtxPath)

FOR i=0,N_days-1 DO BEGIN
PthLoop = MtxPath(i,0)
IF (i EQ 0) THEN BEGIN
realread = ''
junkread = ''
contador = 0
OPENR, Aux, PthLoop, /GET_LUN ;Abre e escreve o patch
WHILE (NOT EOF(Aux)) DO BEGIN
contador = contador + 1
IF (CONTADOR LE 4) THEN READF, Aux, junkread ELSE BEGIN
READF, Aux, realread
Mtdata = $STR$PLIT(realread, ' ', /EXTRACT)
IF (contador EQ 5) THEN BEGIN
Day = [Day, FLOAT(Mtdata[00])] ; Matrix of Altitude
Month = [Month, FLOAT(Mtdata[01])] ; Matrix of Altitude
Year = [Year, FLOAT(Mtdata[02])] ; Matrix of Altitude
Hour = [Hour, FLOAT(Mtdata[03])] ; Matrix of B total
Minute = [Minute, FLOAT(Mtdata[04])] ; Matrix of X component
D_Comp = [D_Comp, FLOAT(Mtdata[05])] ; Matrix of D component
H_Comp = [H_Comp, FLOAT(Mtdata[06])] ; Matrix of Y component
Z_Comp = [Z_Comp, FLOAT(Mtdata[07])] ; Matrix of Z component
I_Comp = [I_Comp, FLOAT(Mtdata[08])] ; Matrix of I component
F_Comp = [F_Comp, FLOAT(Mtdata[09])] ; Matrix of I component
aux1 = Hour/24
aux2 = minute/1440
TimeFr = (aux1*aux2-2)
Minute = [Minute, FLOAT(Mtdata[04])] ; Matrix of X component
D_Comp = [D_Comp, FLOAT(Mtdata[05])] ; Matrix of D component
H_Comp = [H_Comp, FLOAT(Mtdata[06])] ; Matrix of Y component
Z_Comp = [Z_Comp, FLOAT(Mtdata[07])] ; Matrix of Z component
I_Comp = [I_Comp, FLOAT(Mtdata[08])] ; Matrix of I component
F_Comp = [F_Comp, FLOAT(Mtdata[09])] ; Matrix of I component
aux1 = Hour/24
aux2 = minute/1440
TimeFr = (aux1*aux2-2)
END ELSE BEGIN
Day = [Day, FLOAT(Mtdata[00])] ; Matrix of Altitude
Month = [Month, FLOAT(Mtdata[01])] ; Matrix of Altitude
Year = [Year, FLOAT(Mtdata[02])] ; Matrix of Altitude
Hour = [Hour, FLOAT(Mtdata[03])] ; Matrix of B total
Minute = [Minute, FLOAT(Mtdata[04])] ; Matrix of X component for j=0, varaux do Begin
D_Comp = [D_Comp, FLOAT(Mtdata[05])] ; Matrix of D component ; FakeTime[j]=j
H_Comp = [H_Comp, FLOAT(Mtdata[06])] ; Matrix of Y component ; Times FLTARR(varaux)
Z_Comp = [Z_Comp, FLOAT(Mtdata[07])] ; Matrix of Z component ; Time[j] = (Time[j]) + (TimeFr[j])
I_Comp = [I_Comp, FLOAT(Mtdata[08])] ; Matrix of I component
F_Comp = [F_Comp, FLOAT(Mtdata[09])] ; Matrix of I component
aux1 = Hour/24
aux2 = minute/1440
TimeFr = (aux1*aux2)
IF (j GT 1440) AND (j LE 2882) THEN BEGIN
Time[j] = (Time[j]+1) + (TimeFr[j])
IF (j GT 2882) THEN BEGIN
Time[j] = (Time[j]+2) + (TimeFr[j])
END
ENDIF
ENDIF
ENDIF
ENDFOR
a= N_ELEMENTS(D_Comp)
ResMTX = FLTARR(6,a)
; Matrix for results
ResMTX[0,*] = TimeFr ; puts the altitudes
ResMTX[1,*] = D_Comp ; puts the B total (nT)
ResMTX[2,*] = I_Comp ; puts the B total (nT)
ResMTX[3,*] = H_Comp ; puts the X component (nT)
ResMTX[4,*] = Z_Comp ; puts the altitudes
ResMTX[5,*] = F_Comp ; puts the B total (nT)
IF (Yes_Save) THEN BEGIN
OPENR, AuxSave, Pth_out, /GET_LUN ; create an ASCII file
PRINTF, AuxSave, ' DayFraction(s) D(Rad) I(Rad) H(nT)
PRINTF, AuxSave, ResMTX, Format = "(Gf)" ; uses 8 columns
CLOSE, AuxSave & FREE_LUN, AuxSave ; close file
ENDIF
ENDIF
ENDIF
END

```

Figura 3.2: Programa em IDL desenvolvido pelo bolsista para a leitura dos dados de magnetômetros.
Fonte: Produção do autor.

3.2 MODELO IGRF

A simulação realizada do modelo IGRF foi através de um arquivo executável que necessita as seguintes entradas: ano, mês, dia, altitude (de 6.370 Km até 6.971 Km) e coordenadas geográficas. O modelo retorna os dados simulados que são apresentados na Figura 3.3.

```
Model: WMM2010
Latitude: -29 deg, -32 min, -7 sec
Longitude: -53 deg, -51 min, -14 sec
Altitude: 6370.20 km
Date of Interest: 2014-2-13 <yyyy-mm-dd>
-----
Date      D      I      H      X      Y      Z      F
<yr>    <deg min> <deg min> <nT>    <nT>    <nT>    <nT>    <nT>
2014.12  -14d 35m  -37d  5m   18024.8 17443.6 -4540.0 -13627.6 22596.6
-----
Date      dD      dI      dH      dX      dY      dZ      dF
<yr>    <min/yr> <min/yr> <nT/yr> <nT/yr> <nT/yr> <nT/yr> <nT/yr>
2014.12   -9.8    -13.1    -71.8    -82.4    -31.4    -53.7    -24.7
-----
Enter
0) to quit.
1) to select a new model input file.
2) to compute for a new point using same data file.
==>
```

Figura 3.3: Saídas das simulação do modelo IGRF.
Fonte: Produção do autor.

A escolha da altitude foi escolhida conforme a altitude de voo do NANOSATC-BR1 que é de 614 km de altitude, ou seja, a altitude desejada era de 6.984 km, entretanto o modelo só vai até 6.971 km. Portanto foi escolhida a altitude máxima de 6.971 km, 14 km abaixo da altura de voo do NANOSATC-BR1. A metodologia utilizada consiste em simular o mesmo dia calmo segundo o site de Kyoto/Japão e nas mesmas coordenadas das cinco cidades em questão. Assim é obtido 1 valor por mês para cada componente.

3.2.1 ATIVIDADES REALIZADAS EM IDL

As atividades realizadas pelo bolsista, em IDL, consiste em um programa que lê arquivos de dados gerados pelo site do modelo IGRF para um determinado intervalo de dias, como mostra a Figura 3.4. Como exercício o programa lê os dados retirando o cabeçalho, converte os ângulos de declinação e inclinação de graus para radianos, e calcula a componente H . Por fim cria um arquivo do tipo ASCII contendo as colunas de altitudes, módulo do campo, componente H e Z , declinação e inclinação do vetor campo geomagnético.

```

PRO Read_IGRF_data_02
;----- ABSTRACT
; This routine returns the magnetic field simulated by IGRF model.
; It calculate the H component and also put the I angle to radians.
; On Line simulations can be made in the NASA web site at:
; http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/igrf_vitmo.html
; Example:
; Input parameters:
; Year= 2000
; latitude= -2.33, longitude= 315.8, height= 100.
; Pofile name: Height
; Profile parameters: start= 100., stop= 1000., step= 50.
; Selected parameters are:
; 1 Height, km
; 2 B_total, nT
; 3 B_north, nT
; 4 B_east, nT
; 5 B_down, nT
; 6 Mag. Inclination (DIP), deg.
; 7 Mag. Declination, deg
;----- CAPTION
;---- Strings
; MainPath_in      Main path to IGRF file
; MainPath_out     Main path to save IGRF file
; Namedata_in      Name of IGRF file
; Namedata_out     Name to save the IGRF file
; Yes_Save         Save ASCII file
;---- Vectors
; MtData           Matrix of data
; Height           Matrix of Height [km]
; Btotal           Matrix of B_total [nT]
; X_Comp           Matrix of X component [nT], B_north
; Y_Comp           Matrix of Y component [nT], B_east
; Z_Comp           Matrix of Z component [nT], B_down
; I_Comp           Matrix of I component [deg], Mag. inclination (DIP)
; D_Comp           Matrix of D component [deg], Mag. declination
; H_Comp           Matrix of H component [nT]
; ResMTX           Matrix for results
;-----
; By:              Vítor Vaz Schultz - E-mail:xultezz@gmail.com
; Date:            MArch, 2017
;-----
; Declares the constants and flags for the procedure
IF (N_ELEMENTS(MainPath) EQ 0) THEN MainPath = 'C:\Users\Schultz\Desktop\IDL\Banco de dados'
IF (N_ELEMENTS(Namedata_in) EQ 0) THEN Namedata_in = 'VSS'
IF (N_ELEMENTS(Namedata_out) EQ 0) THEN Namedata_out = 'SMS'
IF (N_ELEMENTS(Yes_Save) EQ 0) THEN Yes_Save = 1
; Create paths strings
PthIGRF_in = MainPath + '\' + Namedata_in + '.lst'
PthIGRF_out = MainPath + '\' + Namedata_in + '.txt'
; This section declares the variables needed for the routine -----
MtData = FLTARR(07,19) ; Matrix of data
Height = FLTARR(19) ; Matrix of Alitude
Btotal = FLTARR(19) ; Matrix of B total
X_Comp = FLTARR(19) ; Matrix of X component
Y_Comp = FLTARR(19) ; Matrix of Y component
Z_Comp = FLTARR(19) ; Matrix of Z component
I_Comp = FLTARR(19) ; Matrix of I component
D_Comp = FLTARR(19) ; Matrix of D component

```

Figura 3.4: Exemplo da rotina criada no estudo da linguagem IDL para trabalhar com o modelo IGRF.

Fonte: Produção do autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho faz uma comparação, através de análises estatísticas, entre os valores do campo magnético simulados pelo modelo de campo geomagnético, IGRF, na superfície terrestre e em 601 km de altura e os valores obtidos de medidas dos pelos magnetômetros da Rede Embrace. Num primeiro momento, espera-se que o valor da variação temporal do módulo e componentes H e Z sejam menos intensos para as simulações a 601 km de altura, do que para a superfície terrestre. Além disso, espera-se que os valores obtidos das componentes modeladas na superfície estejam próximos (ou muito próximos) dos valores medidos pelos magnetômetros da Rede Embrace.

Nas próximas seções são apresentados e discutidos os resultados dessa comparação para as componentes H e Z , e do módulo (F) do campo geomagnético (medidos em nano Tesla), e inclinação e declinação (medidos em graus) para cada uma das seguintes estações: São Luís, Jataí, São José dos Campos, Rio Grande e São Martinho da Serra. Cada gráfico contém o ajuste linear entre as curvas medidas e simuladas. Um coeficiente angular negativo representa um decréscimo nesse ajuste durante o ano analisado. As medidas obtidas pelos magnetômetros da Rede Embrace são sempre apresentados em cor azul. Os resultados obtidos pela simulação do modelo IGRF na superfície, e em 601 km de altitude, estão apresentados nas cores vermelho e preto, respectivamente. Esse é o padrão para todos os gráficos das próximas seções.

Dentre os gráficos, também foi construído um conjunto de gráficos das propriedades do campo geomagnético, no qual o eixo das ordenadas é constituído dos dados da Rede Embrace de magnetômetros e no eixo das abcissas os dados simulados pelo modelo IGRF a 601 km de altitude, que é muito próximo da altitude de voo do NANOSATC-BR1. Nestes gráficos o ajuste linear ajuda a visualizar e entender as diferenças da evolução temporal entre os valores, ou seja, quanto mais próximo de 1 for o coeficiente do ajuste linear, melhor é a previsão do modelo ao passar dos meses.

4.1 RESULTADOS: SLZ - SÃO LUÍS, MARANHÃO

A comparação da evolução mensal do comportamento do campo geomagnético de Janeiro de 2013 até Janeiro de 2014 para as coordenadas geográficas da estação de São Luís (SLZ), localizada na região equatorial brasileira, é apresentada nos gráficos da Figura 4.1. O resultado do modelo IGRF apresenta valores de acordo com o valor esperado. Para a superfície, os valores do modelo (linha vermelha) estão muito próximos aos valores medidos pelos magnetômetros (linha azul). Uma pequena diferença é observada apenas na inclinação magnética. Para a modelagem em 601 km de altura (linha preta), os valores mostraram uma intensidade menor que para a superfície (linhas azul e vermelha).

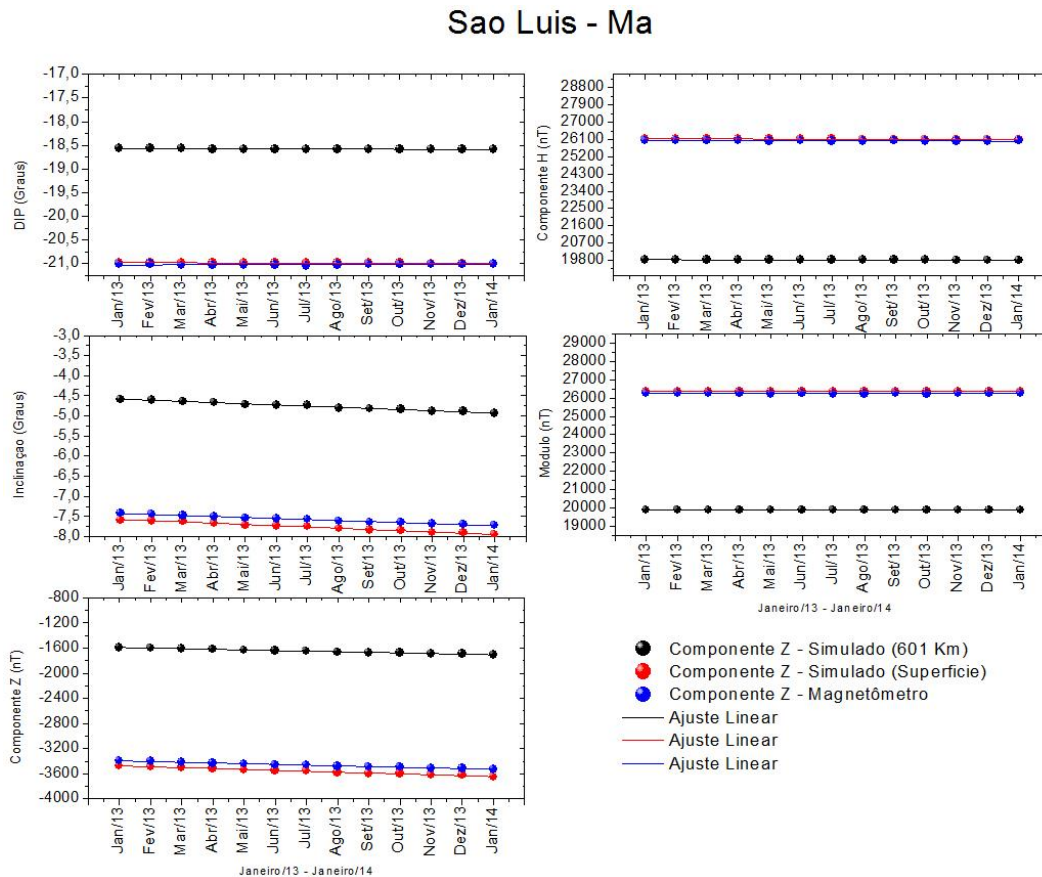


Figura 4.1: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em SLZ.

Fonte: Produção do autor.

O próximo conjunto de gráficos a ser apresentado relaciona as medidas dos magnetômetros da Rede Embrace com os valores simulados pelo modelo IGRF.

SLZ - MA

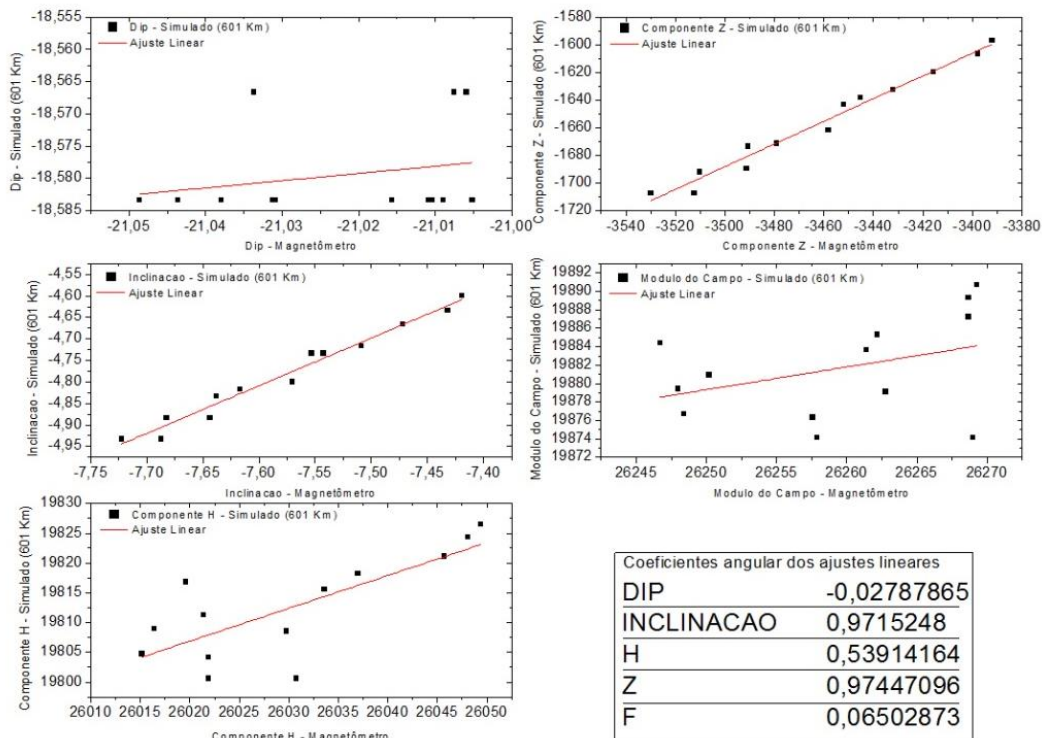


Figura 4.2: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para SLZ.

Fonte: Produção do autor.

Os coeficientes angulares mostraram que há uma boa relação entre a inclinação e a componente Z , o que representa uma boa previsão da evolução temporal. Entretanto para a componente H o coeficiente angular foi aproximadamente 0,6, levando a uma diferença na evolução temporal entre o valor medido e simulado. Para o módulo e a declinação magnética, o coeficiente angular possui um valor próximo de zero o que indica que ao passar dos meses o modelo fica estável em um valor enquanto que o valor medido do campo geomagnético evolui.

4.2 RESULTADOS: JAT – JATAÍ, GOIÁS

A estação de Jataí também revelou resultados que eram esperados, exceto no ângulo de declinação magnética. No gráfico do DIP é possível verificar que há uma diferença entre o valor simulado na superfície e o valor medido pelo magnetômetro. É notável que os valores simulados na superfície e medidos por magnetômetros estão de acordo.

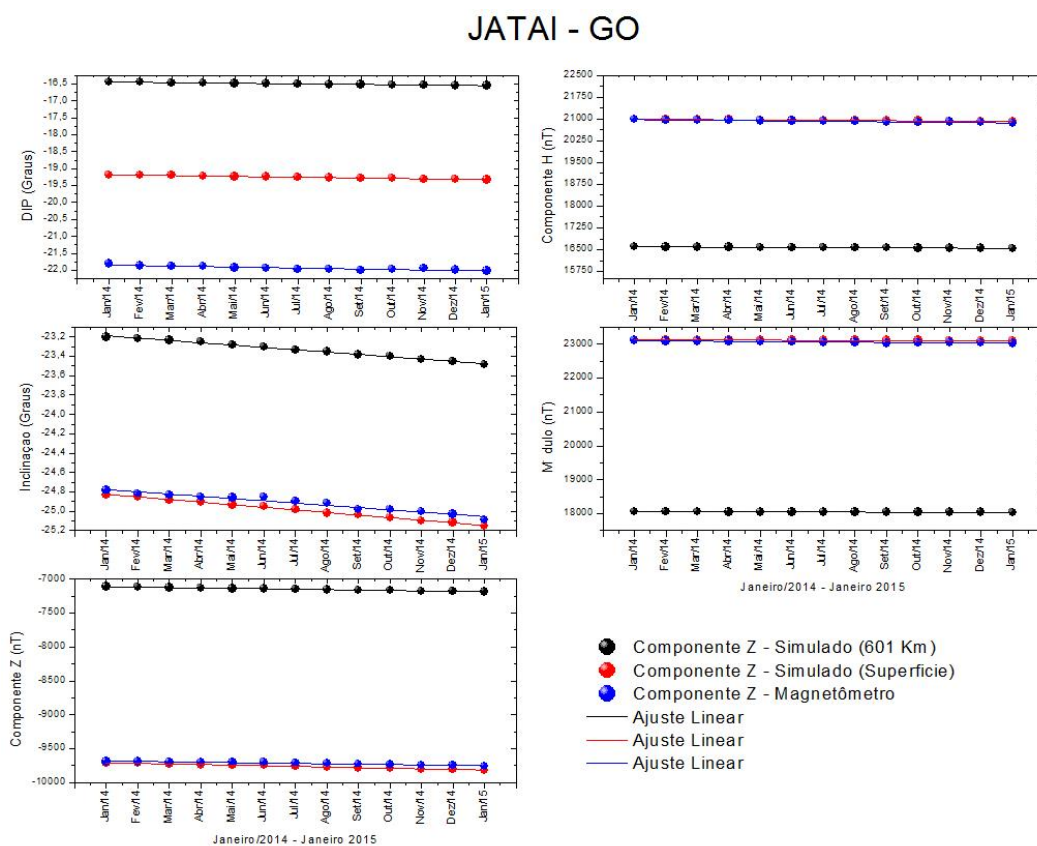


Figura 4.3: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em JAT.

Fonte: Produção do autor.

O próximo conjunto de gráficos da Figura 4.4 relacionam as medidas dos magnetômetros da Rede Embrace com os valores simulados pelo modelo IGRF.

JAT - GO

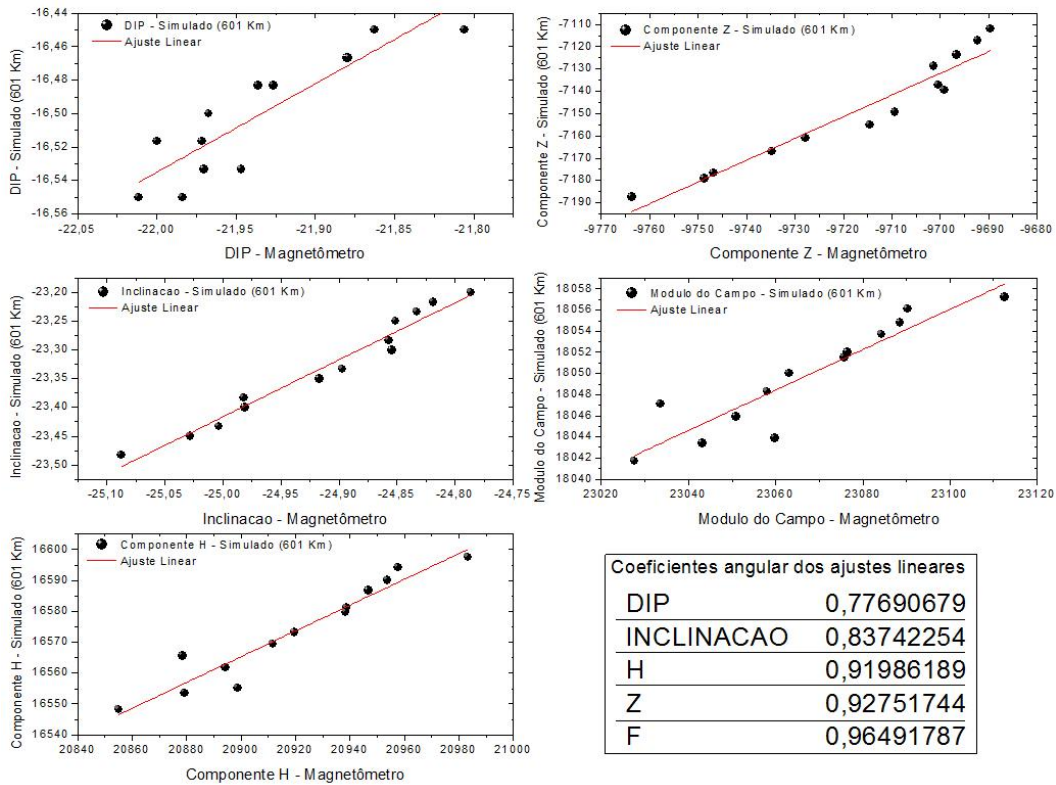


Figura 4.4: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para JAT.

Fonte: Produção do autor.

Na tabela da Figura 4.4 está descrito os valores dos coeficientes angulares de cada componente do campo geomagnético, inclinação e declinação. Os valores foram próximos de 1 o que representa que ambos estão progredindo proporcionalmente ao passar dos meses de Janeiro de 2014 até Janeiro de 2015.

4.3 RESULTADOS: SJC – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SÃO PAULO

Para São José dos Campos houve pouca diferença entre os coeficientes angulares dos ajustes lineares no gráfico da inclinação e na declinação do vetor campo geomagnético. O modelo gerou valores mais intensos que os valores medidos pelos magnetômetros da Rede Embrace. Nas outras componentes do campo geomagnético o modelo simulou valores muito próximos e de acordo com o esperado.

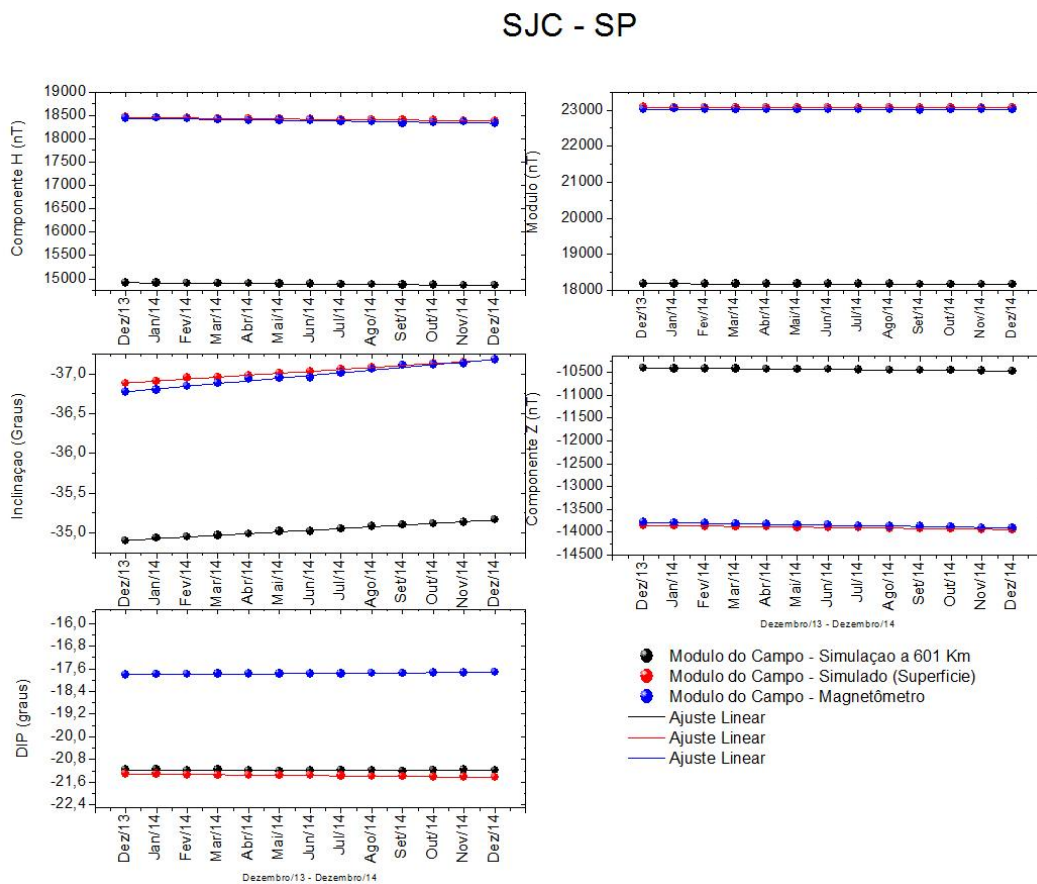


Figura 4.5: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em SJC.

Fonte: Produção do autor.

O próximo conjunto de gráficos, da Figura 4.6, relacionam as medidas dos magnetômetros da Rede Embrace com os valores simulados pelo modelo IGRF.

SJC - SP

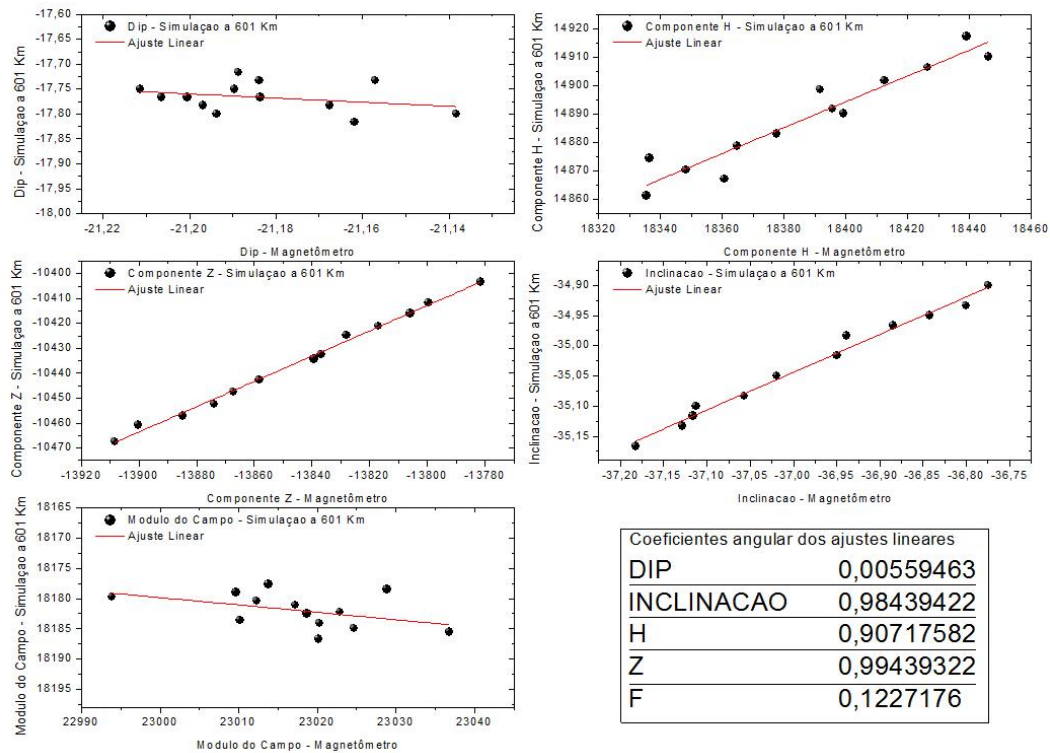


Figura 4.6: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para SJC.

Fonte: Produção do autor.

Nos gráficos da Figura 4.6 é possível notar que nos gráficos do módulo e do ângulo DIP o ajuste linear se aproxima de zero, ou seja, de uma reta. Isso sugere que a variação dos valores medidos pela Rede Embrace de magnetômetros varia mais rápido no tempo do que os valores simulados pelo modelo IGRF à 601 km de altitude.

4.4 RESULTADOS: RGA – RIO GRANDE, TF, ARGENTINA

Os resultados da comparação entre a estação de Rio Grande, na Argentina mostrou uma boa correlação para o módulo do campo geomagnético. Para as outras componentes, a simulação condiz com as intensidades esperadas, de maneira que o valor medido pelo magnetômetro está próximo da simulação feita na superfície. Entretanto, no ângulo de declinação o modelo gerou valores com aproximadamente 0,6 graus de diferença do valor medido pelos magnetômetros.

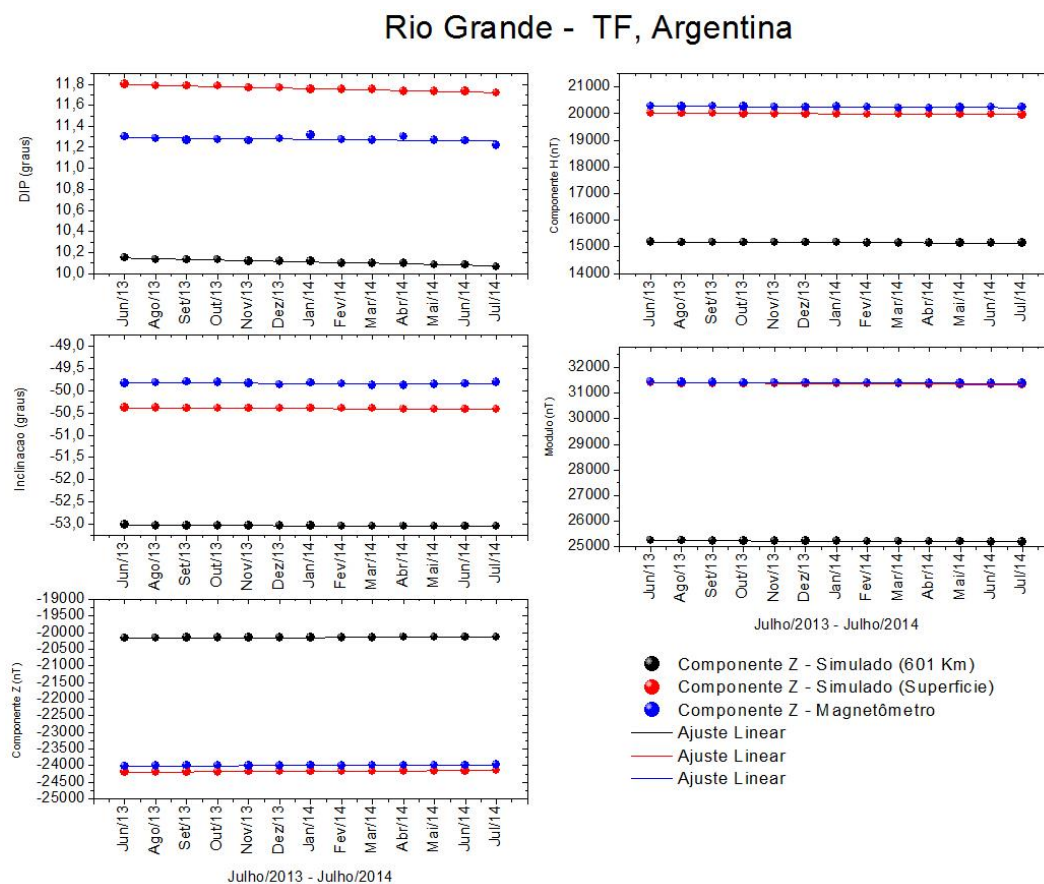


Figura 4.7: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em RGA.

Fonte: Produção do autor.

O próximo conjunto de gráficos, da Figura 4.8, relacionam as medidas dos magnetômetros da Rede Embrace em Rio Grande (RGA), com os valores simulados pelo modelo IGRF.

Rio Grande - TF, Argentina

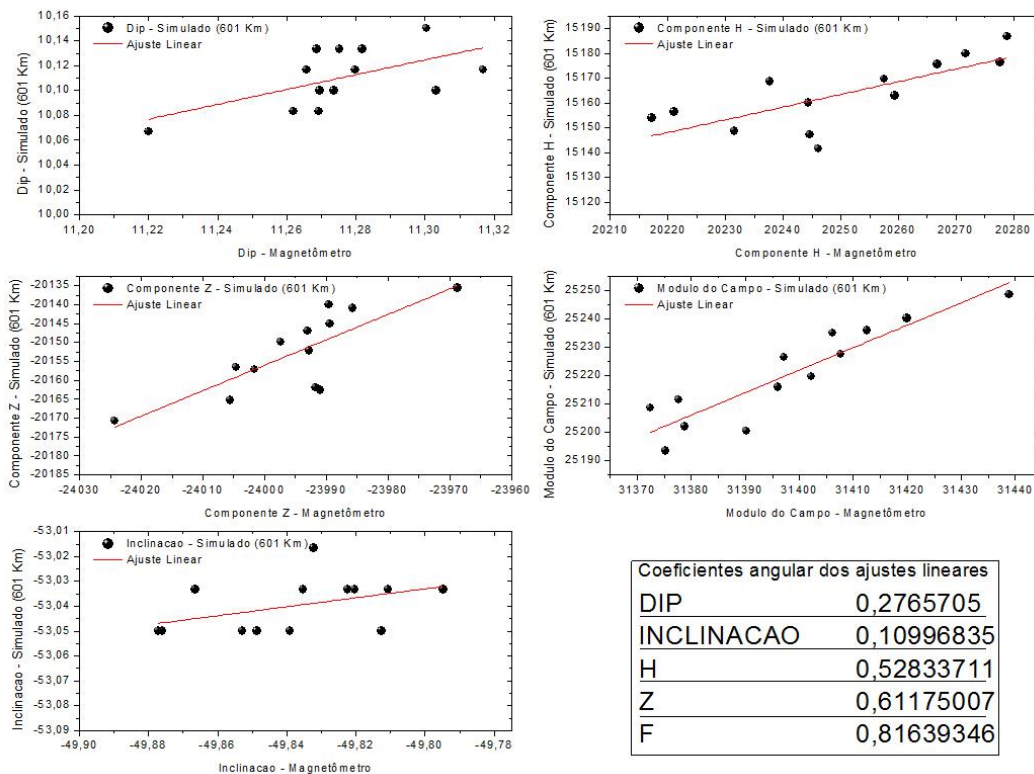


Figura 4.8: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para RGA.

Fonte: Produção do autor.

Os valores dos coeficientes mostrados na Figura 4.8 mostram a relação entre a evolução temporal dos valores medidos pela rede Embrace de magnetômetros e o modelo IGRF, a melhor simulação foi no módulo do vetor campo geomagnético. Nas componentes H e Z o valor do coeficiente angular da reta vermelha foi aproximadamente 0,5. Entretanto os valores dos coeficientes angulares dos ângulos de inclinação e declinação mostraram maior diferença na variação temporal, ou seja, os magnetômetros medem maior progressão no tempo e o modelo varia menos ao passar dos meses.

4.5 RESULTADOS: SMS – SÃO MARTINHO DA SERRA, RIO GRANDE DO SUL

Os resultados obtidos na análise de São Martinho da Serra (SMS) revelaram alguns pontos interessantes, principalmente para a componente Z, declinação e inclinação magnética. No módulo do campo e na componente horizontal, os valores simulados e medidos estão próximos, mas uma comparação da diferença para as outras estações indica que é maior para SMS.

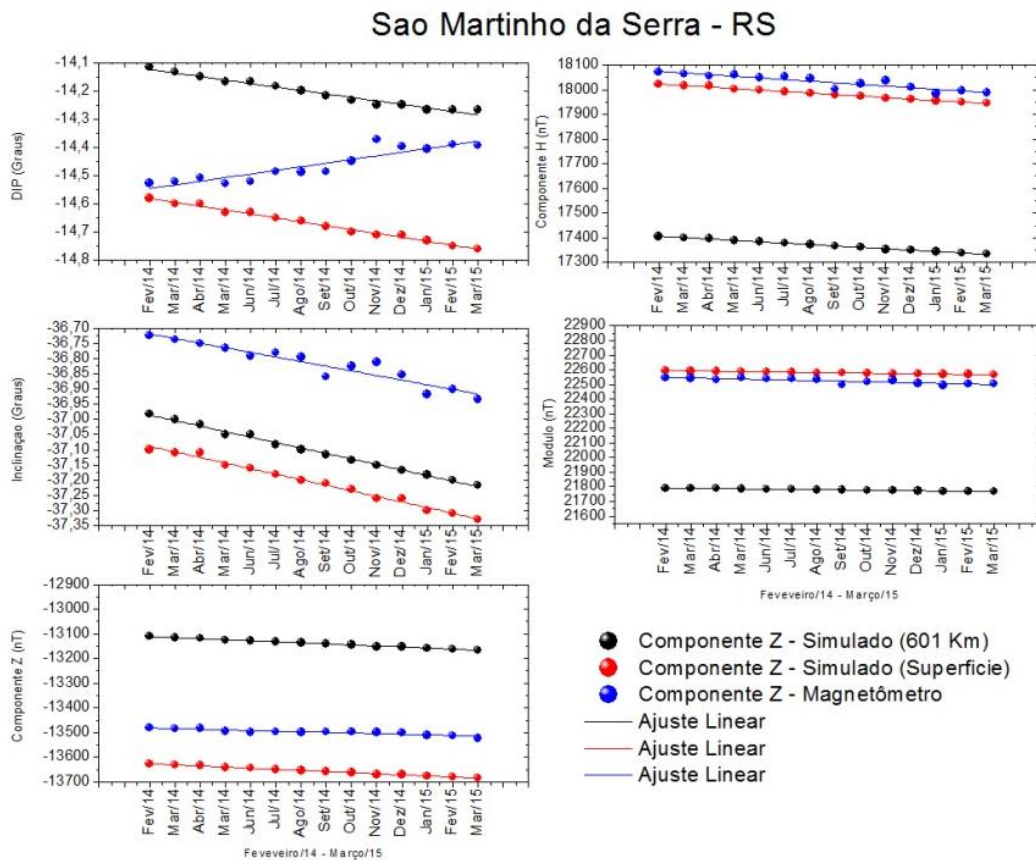


Figura 4.9: Conjunto de gráficos contendo as componentes H , Z , módulo, inclinação e declinação do campo geomagnético em SMS.

Fonte: Produção do autor.

Percebe-se que para o ângulo DIP há uma grande diferença entre os valores obtidos pelo modelo IGRF na superfície e os medidos pelos magnetômetros. Inclusive, nota-se que ao longo dos meses há uma anticorrelação. No ângulo de inclinação magnético e componente Z as diferenças entre os valores medidos e simulados também são perceptíveis.

Por fim, na Figura 4.10 encontra-se o conjunto de gráficos que relacionam as medidas dos magnetômetros da Rede Embrace com os valores simulados pelo modelo IGRF. Aqui é possível verificar a característica descrita antes. Para a declinação, o coeficiente angular do ajuste linear simulado pelo modelo apresenta um valor negativo, ou seja, está diminuindo com o passar dos meses, porém o ajuste linear dos valores medidos pelos magnetômetros é caracterizado por um valor positivo, ou seja, está aumentando o ângulo ao passar dos anos.

Os coeficientes do modelo IGRF que são atualizados a cada 5 anos para a modelagem do campo geomagnético em todas as partes do globo. A evolução temporal do modelo IGRF é correta também, entretanto foi observado que somente para o DIP na região central da AMAS o modelo está fazendo previsões com diferenças mais significativas em relação as medidas experimentais. O motivo pelo qual isto ocorre não parece estar ligado aos coeficientes utilizados no modelo, visto que o modelo está correto para as demais estações observadas.

Caso o mesmo erro for encontrado, após uma investigação no magnetômetro da Rede Embrace e uma nova comparação com o modelo IGRF, uma correção do modelo IGRF pode ser necessária para esta região.

Sao Martinho da Serra - RS

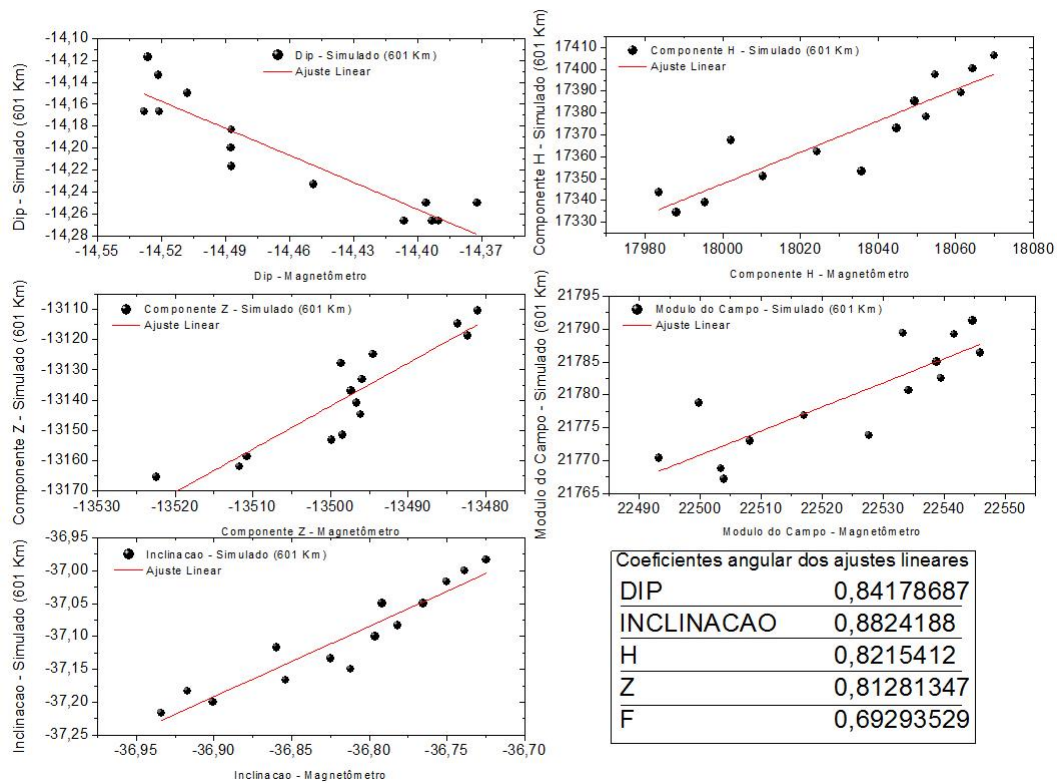


Figura 4.10: Ajuste linear entre o resultado do modelo IGRF em função dos dados da Rede Embrace de magnetômetros para SMS.

Fonte: Produção do autor.

Apesar de ocorrer a discrepância entre os valores do ângulo DIP, os coeficientes angulares da análise do coeficiente angular do ajuste linear das propriedades do campo geomagnético permaneceram próximos de 0,8. Isto indica que a evolução temporal das medidas e da simulação estão próximas.

4.6 ATIVIDADES ADICIONAIS REALIZADAS PELO BOLSISTA

Além das atividades descritas pelo bolsista nas seções anteriores, ele também é responsável pela manutenção do magnetômetro da Rede MAGDAS-5, que conta com uma estação em São Martinho da Serra, que foi instalado em parceria com a Universidade de Kyushu do Japão. Dentre as atividades necessárias para a manutenção do magnetômetro estão a troca de cartões de memória onde os dados são armazenados, e manutenção do sistema.

5 CONCLUSÕES

Dentre os objetivos traçados no início do Projeto de Iniciação Científica, o principal objetivo é capacitar o bolsista e torna-lo apto a realizar uma pesquisa seguindo uma correta metodologia. Neste trabalho o bolsista viu que necessitava aprender a utilizar a linguagem IDL para concluir, de maneira alternativa, a comparação entre os dados da Rede Embrace de Magnetômetros e dados de um satélite em órbita. A constelação Swarm serve para a comparação entre os dados, porém utiliza o formato *Common Data File* (CDF). Para a utilização deste formato é necessário maior experiência em IDL, que o bolsista pretende desenvolver no futuro.

A respeito da comparação feita entre as simulações do modelo IGRF e a Rede Embrace de magnetômetros, o principal resultado observado foi que em São Martinho da Serra (SMS), onde é o centro da Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS), houve a maior discrepância entre as componentes medidas e simuladas. As análises dos gráficos da simulação do modelo IGRF em função dos valores medidos pelos magnetômetros mostram que o modelo vai se ‘distanciando’ do valor real ao longo dos anos. Em RGA, SJC e SLZ essa diferença é maior no ângulo DIP. O modelo é apresenta resultados sem grandes variações ao longo dos meses analisados, enquanto que os magnetômetros da Rede Embrace revelaram variações não previstas pelo modelo. Com isso, essas diferenças observadas nas medidas magnéticas devem ser observadas para realizar o processo de calibração do modelo. Isso ocorre a cada 5 anos, para que o modelo represente a intensidade do campo geomagnético com bastante precisão.

6 REFERÊNCIAS

- Barton, C.E., 1997. International Geomagnetic Reference Field: The Seventh Generation, *J. Geomag. Geoelect.*, 49, 123–148.
- Barracough, D.R., 1987. International Geomagnetic Reference Field: The Fourth Generation, *Phys. Earth. planet. Int.*, 48, 279–292.
- Bilitza D, Reinisch B (2008) International reference ionosphere 2007: improvements and new parameters. *Adv Space Res* 42:599–609.
- Denardini, C.M., Rockenbach, M., Gende, M.A., Chen, S.S., Fagundes, P.R., Schuch, N.J., Petry, A., Resende, L.C.A., Moro, J., Padilha, A. L., Sant’Anna, N., Ribeiro, L.A., 2015. The initial steps for developing the South American K index from the embrace magnetometer network. *Braz. Geophys. J.* 33 (1), 79–88.
- ESA, Swarm - The Earth's Magnetic Field and Environment Explorers Technical and Programmatic Annex, 2004, disponível em http://esamultimedia.esa.int/docs/EEUCM/SWARM_TPA.pdf , acesso em 10 de Abril de 2017.
- Finlay, C. C. et al. (2010). International Geomagnetic Reference Field: the eleventh generation. *Geophysical Journal International*, 183, 1216-1230.
- IGAGA Division I Study Group on Geomagnetic Reference Fields, International Geomagnetic Reference Field 1975., *J. Geomag. Geoelect.*, 27, 437–439.
- Langel, R.A., 1992. International Geomagnetic Reference Field: The Sixth Generation, *J. Geomag. Geoelect.*, 44, 679–707.
- Langel, R.A., Barracough, D.R., Kerridge, D.J., Golovkov, V.P., Sabaka, T.J. & Estes, R.H., 1988. Definitive IGRF models for 1945, 1950, 1955, and 1960., *J. Geomag. Geoelect.*, 40, 645–702.
- Mclean et al. (2004) US/UK World Magnetic Model for 2005-2010. Disponível em: <http://www.geomag.us/info/Smaus/Doc/WMM_2005.pdf>. Acesso em: 05 outubro 2016.
- Maus, S. et al., 2005a. The 10th-Generation International Geomagnetic Reference Field., *Geophys. J. Int.*, 161, 561–565.
- Macmillan, S. et al., 2003. The 9th-Generation International Geomagnetic Reference Field., *Geophys. J. Int.*, 155, 1051–1056.
- Mandea, M. & Macmillan, S., 2000. International Geomagnetic Reference Field – The Eighth Generation, 2000, *Earth. Planets, Space*, 52, 1119–1124.
- Peddie, N.W., 1982. International Geomagnetic Reference Field: The Third Generation, *J. Geomag. Geoelect.*, 34, 309–326.
- Picone JM, Hedin AE, Drop DP (2002) NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. *J Geophys Res* 107(A12):1468–1483.
- Zmuda, A.J., 1971. The International Geomagnetic Reference Field: Introduction, *Bull. Int. Assoc. Geomag. Aeronomy*, 28, 148–152.

7 ANEXO

A seguir, encontra-se o resumo já submetido para o Seminário de Iniciação Científica (SICINPE) do INPE, com os resultados preliminares do projeto.

ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DO MAGNETÔMETRO DO NANOSATC-BR1 COM DADOS DE MAGNETÔMETROS DE SOLO

Vítor Vaz Schultz¹ (UFSM, Bolsista PIBIC/CNPq); Dr. Clezio Marcos Denardini² (DAE/CEA/INPE); Dr. Juliano Moro³ (CRS/COCRE/INPE);
Dr. Nelson Jorge Schuch⁴ (CRS/COCRE/INPE).

RESUMO

Na análise comparativa dos dados do magnetômetro do NANOSATC-BR1 com dados de magnetômetros de solo, além da diferença na altitude entre os equipamentos, é usual que os equipamentos estejam em faixas geográficas distintas em razão da órbita do satélite que, via de regra, apresenta poucos pontos de sobreposição com a localização exata dos equipamentos fixos em solo. Portanto, nesta fase do trabalho estamos apresentando a comparação entre os dados da Rede Embrace (Estudo e Monitoramento do Clima Espacial Brasileiro) de magnetômetros e modelagens com o modelo de campo Geomagnético *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF). Essa comparação foi realizada como um estudo do ajuste linear e correlações entre o módulo do campo e as componentes H e Z medidas em nano Tesla (nT), e a Declinação (DIP) e Inclinação (I) medidas em graus obtidas de dados de magnetômetros com resultados do modelo. A partir desta validação dos dados magnéticos contra um modelo empírico podemos não só usar o IGRF para contrastar as medidas do NANOSATC-BR1, quanto podemos estimar e quantificar as diferenças esperadas pelo resultado do modelo. O modelo IGRF utiliza dados de magnetômetros que, em sua maioria, estão instalados no hemisfério norte. Esse modelo é uma série harmônica semi-normalizada com coeficientes esféricos de Gauss e coeficientes obtidos dos polinômios de Legendre. Os dados dos magnetômetros utilizados correspondem à meia noite local do dia mais calmo de cada mês durante um ano para as seguintes estações da América Latina: São José dos Campos (SJC), São Luís (SLZ), Jataí (JAT), São Martinho da Serra (SMA) e, em Rio Grande (RGA) na Argentina. O estudo comparativo foi realizado entre os dados gerados pelo modelo IGRF a 100 km e na superfície terrestre para as alturas e coordenadas das cinco cidades. Os resultados mostram boa concordância entre as componentes obtidas pelo IGRF com o valor medido dos magnetômetros. Entretanto, as maiores diferenças foram encontradas no ângulo DIP para as cidades de JAT, SJC, e SMS. A maior discrepância é observada para o DIP em SMS, em que o modelo prevê um decréscimo ao longo do ano, mas as medidas do magnetômetro revelam o oposto, ou seja, um aumento. Os resultados são apresentados e discutidos em termos da localização das estações em relação à Anomalia Magnética da América do Sul.