

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades



**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS CIENTÍFICO-
COMPUTACIONAIS BASEADAS EM DADOS DE MAGNETÔMETROS
PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E PREVISÃO DO CLIMA
ESPACIAL**

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

Sony Su Chen (UNITAU, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: sony.chen@dae.inpe.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin (DAE/INPE, Orientador)

E-mail: clezio.denardin@inpe.br

COLABORADORES

Laysa Cristina Araújo Resende (DAE/INPE, Doutoranda)

Juliano Moro (DAE/INPE, Doutorando)

Laís Maria Guizelli Moraes (DAE/INPE, Iniciação Científica)

Julho de 2012

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

Dados de Identificação

Bolsista:

Sony Su Chen

Curso: 2º ano de Engenharia Elétrica e Eletrônica

UNITAU: Universidade de Taubaté

Orientador:

Dr. Clezio Marcos De Nardin

Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – /MCT

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCTI

São José dos Campos – SP

Local de Trabalho/Execução do Projeto:

O projeto foi desenvolvido na Divisão de Aeronomia (DAE) da Área de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), sob a orientação do Dr. Clezio Marcos De Nardin, pesquisador da divisão.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

Se vi mais longe, foi que estar de pé sobre ombros de gigantes
Sir Isaac Newton

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

*Aos meus pais,
Mei Yu Jin Chen
e Chen Rong Kui,
e ao meu orientador
Dr. Clezio Marcos De Nardin.*

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

Ao meu orientador Dr. Clezio Marcos De Nardin, pelo apoio, a fim de realizar um bom trabalho.

À minha família, pelo carinho e presença de todos os dias.

Aos meus amigos de trabalho, Laís, Laysa, Juliano e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Em especial, à minha mãe Mei Yu Jin Chen e meu pai Chen Rong Kui, pelo amor, esforço, atenção e por estar sempre ao meu lado.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.1	Introdução	15
1.2	Objetivo Científico	15
2	REVISÃO TEÓRICA DE TEMAS DE CUNHO CIENTÍFICOS	17
2.1	O Sol do Sistema Solar	17
2.1.1	Estruturas Internas	18
2.1.1.1	Núcleo	18
2.1.1.2	Zona Radioativa	19
2.1.1.3	Zona de convecção	19
2.1.2	Estruturas Externas	20
2.1.2.1	Fotosfera	20
2.1.2.2	Cromosfera	20
2.1.2.3	Coroa Solar	21
2.1.2.4	Zona de Transição	21
2.1.3	Mancha Solar	22
2.1.3.1	Ciclo de mancha solar	23
2.1.4	Eventos na Atmosfera Solar	24
2.1.4.1	Vento solar	24
2.1.4.2	Ejeções de massa coronal	25
2.1.4.3	Observações destes eventos	26
2.2	Magnetosfera e Campo Magnético da Terra	27
2.2.1	Campos Magnéticos Internos	28
2.2.2	Mapas Magnéticos	29
2.2.3	Campos Magnéticos Externos	30
2.2.3.1	Corrente Anelar	30
2.2.3.2	Corrente do Sistema Sq	31
2.2.3.3	Corrente do Eletrojato Equatorial	32
2.2.3.4	Corrente do Eletrojato Auroral	33

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Relatório Final de Atividades

2.3	Índice Geomagnético.....	34
2.3.1	O índice Kp e Σ Kp.....	35
3	REVISÃO TEÓRICA DE TEMAS RELACIONADOS COM ANÁLISE DE DADOS.....	38
3.1	Descrição Estatística de Dados.....	38
3.1.1	Momentos de uma Distribuição.....	38
3.1.2	Correlação Linear	39
3.2	Modelagem de Dados.....	40
3.2.1	Ajustando os Dados para uma Linha Reta	41
4	ATIVIDADES RELACIONADAS À INSTRUMENTAÇÃO	43
4.1	Instrumentação	44
4.1.1	Intercalibração	47
4.1.2	Resultados das Análises dos Dados de Intercalibração.....	49
4.2	Estudo Comparativo entre Dados do Verão de 2002 e 2012	53
4.3	Resumos Submetidos para Congressos	55
4.3.1	Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE)	55
4.3.2	IV Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (SBGEA) ...	55
4.3.3	XXIV Salão de Iniciação Científica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SICUFRGS).....	56
4.3.4	International Symposium of Equatorial Aeronomy (ISEA).....	56
5	CONCLUSÕES	58

ÍNDICE DE FIGURAS E TABELAS

Figura 1: Representação das camadas internas do Sol e sua atmosfera.	18
Figura 2: Aparência de grânulos na superfície da zona de convecção.	19
Figura 3: Cromosfera vista durante um eclipse total solar.....	20
Figura 4: Coroa solar fotografada durante o eclipse solar em 26 de fevereiro de 1998.....	21
Figura 5: Composição de imagens da zona de transição da atmosfera solar vista por quatro diferentes comprimentos de ondas.	22
Figura 6: Grupo de manchas solares na região ativa.	23
Figura 7: Diagrama borboleta correspondente às regiões de manchas solares (painel superior) e a área média diária das manchas (painel inferior). .	23
Figura 8: Média do número de manchas solares por ano do ciclo solar 11 anos.....	24
Figura 9: Representação da espiral de linhas do campo magnético interplanetário congelado na direção radial o qual vento solar se expande a 400 km/s .	25
Figura 10: Ejeções de massa coronal visto pelo LASCO C2 (a) e LASCO C3 (b)	26
Figura 11: Representação da magnetosfera e suas regiões internas.....	27
Figura 12: Representação de um dipolo magnético na Terra.	29
Figura 13: Latitude e longitude geomagnética.....	30
Figura 14: Sistemas de correntes que circulam na magnetosfera terrestre.....	31
Figura 15: Esquemática do sentido da corrente do sistema de Sq e do eletrojato equatorial.	32
Figura 16: Densidades da corrente do eletrojato equatorial de 2600 passagens do satélite CHAMP sobre o equador magnético entre 11 e 13 LT.	33
Figura 17: Representação dos Sistemas de correntes elétricas, dentre elas, o eletrojato auroral ao centro da figura.	33
Figura 18: Elementos lineares e angulares do campo magnético terrestre.....	34
Figura 19: Fotografia de um sistema de magnetômetro utilizado pela Rede EMBRACE, composto por um sensor de variação magnética (à esquerda) e um sistema de aquisição de dados (à direita).....	44

Figura 20: Informações contidas no arquivo “Setuplog.cfg” do EMBRACE-05.....	45
Figura 21: Exemplo de conteúdo dos arquivos de minuto do sistema de magnetômetro.....	46
Figura 22: Fotografia das antenas de GPS (à esquerda) e os cabos de GPS conectados na parte posterior da caixa de controle do magnetômetro (à direita).....	47
Figura 23: Fotografia do local em que é realizado a intercalibração em CXP.....	48
Figura 24: Exemplo de planilha de dados da intercalibração do EMBRACE-02 utilizando o OriginPro 8.....	49
Figura 25: Gráficos da variação da componente H medida pelos diversos magnetômetros em calibração e de referência (à esquerda) e gráficos de dispersão mostrando a relação entre as medidas da componente H e o respectivo ajuste linear (à direita) antes da correção dos valores de calibração instrumental.....	50
Figura 26 Gráficos da variação da componente H medida pelos diversos magnetômetros em calibração e de referência (à esquerda) e gráficos de dispersão mostrando a relação entre as medidas da componente H e o respectivo ajuste linear (à direita) depois da correção dos valores de calibração instrumental.....	52
Figura 27: Variação diária média das componentes H das estações de SLZ (painel superior) e de EUS (painel médio), além da influência do EEJ ao nível solo nos verões de 2002 e 2012.	54
Tabela 1: Observatórios cujos dados são utilizados no cálculo do Kp.....	35
Tabela 2: Localização dos magnetômetros da Rede EMBRACE.....	43
Tabela 3: Datas selecionadas para análise de intercalibração.....	48
Tabela 4: Datas selecionadas para a análise comparativa.....	53

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS DO TRABALHO

1.1 Introdução

Neste trabalho estão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de agosto de 2011 até julho de 2012, na qual foram desenvolvidas atividades teóricas e práticas relacionadas à fase inicial do projeto.

Em relação às atividades teóricas foram realizadas revisões bibliográficas sobre o Sol, a interação Sol-Terra, o campo magnético terrestre, a magnetosfera terrestre e o funcionamento básico de magnetômetros. Nas atividades práticas foram realizadas atividades de calibração e análise de dados de magnetômetros da Rede do Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE).

Portanto, nos Capítulos 2 e 3 estão apresentados trabalhos de revisão teórica, a qual tem a finalidade de desenvolver a formação acadêmica, bem como os conceitos necessários para a área de aeronomia, geomagnetismo e nos conceitos matemáticos associados às análises de dados. No Capítulo 4 serão apresentadas as atividades relacionadas com as instrumentações e as atividades de pesquisa e processamento de dados desenvolvidos no trabalho, isto é, são sumarizadas as atividades realizadas e são apresentados os resultados observados nessa pesquisa, as quais cumprem os dois objetivos do projeto (formação acadêmica e o estudo e monitoramento do campo magnético na região equatorial). Por fim, no Capítulo 5 serão apresentadas as conclusões deste relatório.

1.2 Objetivo Científico

O principal objetivo científico deste projeto é caracterizar estatisticamente e analisar o comportamento do campo magnético na região equatorial, com atenção

voltada para a presença do eletrojato equatorial. O interesse nesta região tropical é devido a ela apresentar uma grande diversidade de fenômenos de interesse científico para a área da aeronomia, os quais também são capazes de interferir nas comunicações transionosféricas. A outra motivação é a possibilidade dos resultados deste estudo levar ao desenvolvimento de ferramentas eficientes de previsão do clima espacial local, ou seja, ferramentas que nos permitam antever possíveis efeitos das atividades “eruptivas” solares no ambiente ionosférico.

No ambiente espacial brasileiro, os efeitos do clima espacial são particularmente mais intensos devido à grande extensão territorial do país, sua localização geográfica na região equatorial e à ocorrência de anomalias regionais no campo magnético e em camadas ionosféricas. Os serviços gerados pelos sistemas estrangeiros não levam em conta os fenômenos típicos das regiões equatoriais. Portanto, é importante iniciarmos nossos esforços para estabelecer as bases de um sistema científico brasileiro para pesquisas, monitoramento e previsão do clima espacial, capaz de realizar essas atividades de maneira a atender as necessidades regionais de maneira mais eficiente.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO TEÓRICA DE TEMAS DE CUNHO CIENTÍFICOS

Na primeira parte deste capítulo serão apresentados os conceitos relacionados às interações Sol-Terra necessários para o estudo e monitoramento do clima espacial. A grande maioria dos eventos estudados tem origem no Sol, alguns destes estão relacionados às variações do vento solar, aos *flares* solares e às ejeções de massa coronal, as quais podem causar variabilidades no ambiente terrestre. Estas variabilidades são uma das razões pelo qual o Programa EMBRACE vem monitorando o clima espacial.

Na sequência são apresentados nossos entendimentos sobre temas relacionados com o campo magnético terrestre. Estes são os elementos centrais de nossa pesquisa, uma vez que são as suas componentes que são medidas pelos magnetômetros.

Finalmente, apresentaremos uma breve discussão sobre os índices magnéticos K, os quais estão associados à ferramentas de diagnóstico do clima espacial, um dos objetivos científicos deste projeto.

2.1 O Sol do Sistema Solar

O Sol está situado a 1 unidade astronômica (UA), o que equivale a aproximadamente $1,50 \times 10^8$ km. Ele é classificado como anã amarela devido à sua temperatura e ao seu tamanho. Ele mede aproximadamente $1,39 \times 10^6$ km e possui massa em torno de $1,989 \times 10^{30}$ kg. Os principais constituintes do Sol são átomos de hidrogênio e hélio, os quais representam 92,1% e 7,8% do total da massa, respectivamente. Sua matéria encontra-se no estado de plasma (KIVELSON; RUSSEL, 1995).

A energia liberada pelo Sol tem origem no seu interior e se transfere até a superfície solar, o qual pode ser estudado em partes, como estruturas internas e externas. A separação por estruturas permite estudar com mais detalhes a origem dos eventos de interesse do clima espacial. A Figura 1 mostra as estruturas internas e externas do Sol, que serão discutidas a seguir.

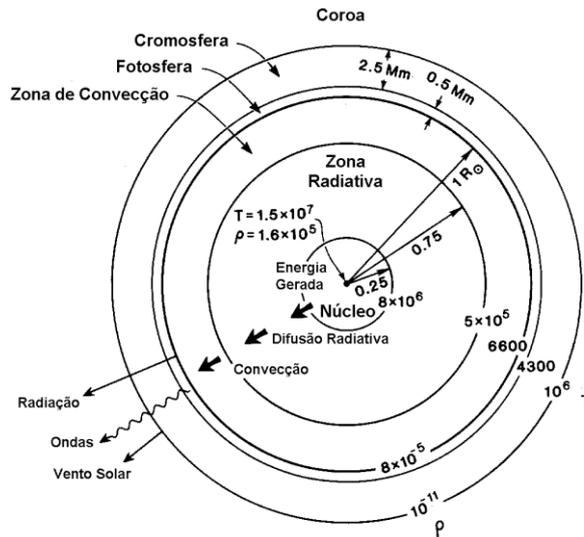


Figura 1: Representação das camadas internas do Sol e sua atmosfera.

FONTE: Adaptada de Kivelson e Russel (1995, pp. 61).

2.1.1 Estruturas Internas

As estruturas internas do Sol são divididas em camadas. Conforme nos afastamos do núcleo até a superfície solar, ocorre a liberação de energia através do processo de fusão nuclear. Os seguintes tópicos deste capítulo irão tratar destas estruturas e de suas principais características.

2.1.1.1 Núcleo

O núcleo do Sol é a camada mais interna, e mede o que corresponde a aproximadamente 25% do raio solar. Sua densidade varia de ~158 g/cm³ no centro e ~20 g/cm³ à sua superfície. A sua temperatura varia em torno de 15

milhões a 8×10^6 K e a pressão corresponde a aproximadamente $2,5 \times 10^{11}$ atmosferas terrestres. Estas propriedades propiciam a fusão nuclear. Nesse processo, as fusões de átomos de hidrogênio formam átomos de hélio com liberação de energia, que por sua vez é liberada na forma de radiação gama e fótons, que atingem à zona de radiação.

2.1.1.2 Zona Radioativa

A zona radioativa é a camada de propagação de energia seguinte ao núcleo, cuja espessura é pode ser de 25 a 75% do raio solar. Devido à baixa densidade, variando de ~ 20 a $\sim 0,01$ g/cm³, e à baixa temperatura, de $\sim 8 \times 10^6$ a $\sim 5 \times 10^5$ K, não há produção de energia, apenas a dissipação de energia entre as camadas seguintes do Sol. Neste caso, a energia segue então para a zona de convecção.

2.1.1.3 Zona de convecção

A zona convecção é a camada mais afastada do núcleo solar e corresponde a 25% do raio solar. Ela atinge a superfície solar a uma temperatura de 6600 K. Uma das características desta camada é a existência de grânulos, mostrado na Figura 2.

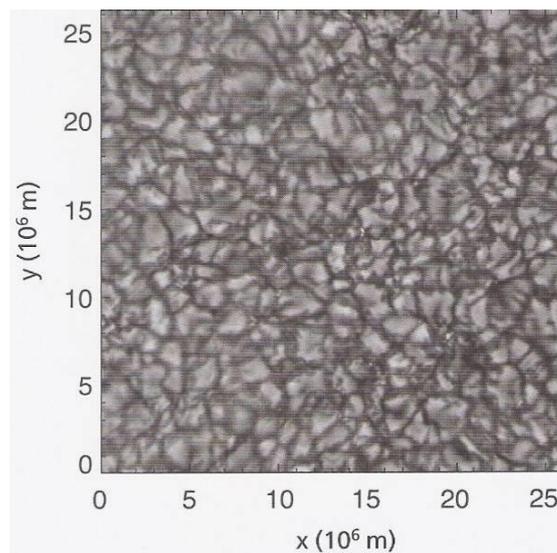


Figura 2: Aparência de grânulos na superfície da zona de convecção.

FONTE: Lang (2001).

2.1.2 Estruturas Externas

As estruturas externas abrangem o que se chama de atmosfera solar. Esta região é a fronteira entre Sol propriamente dito e o meio interplanetário. Assim como as estruturas internas, as estruturas externas se dividem em camadas conhecidas como fotosfera, cromosfera e coroa solar. A seguir, serão apresentados tópicos detalhados sobre de cada uma destas regiões.

2.1.2.1 Fotosfera

A fotosfera solar é a primeira camada da atmosfera solar, mede cerca de 500 km de espessura. A temperatura e a densidade decrescem conforme variam a altura, cerca de ~ 6600 a ~ 4300 K e de $\sim 4 \times 10^{-7}$ a $\sim 8 \times 10^{-8}$ g/cm³ entre a zona de convecção e a cromosfera.

2.1.2.2 Cromosfera

A cromosfera é uma camada anelar que pode ser identificada pela observação do limbo durante o eclipse total, como mostra a Figura 3. Sua espessura mede cerca de 2500 km e sua temperatura varia de ~ 4300 a $\sim 10^6$ K a uma densidade de $\sim 8 \times 10^{-8}$ para $\sim 10^{-14}$ g/cm³.



Figura 3: Cromosfera vista durante um eclipse total solar.

FONTE: Lang (2001).

2.1.2.3 Coroa Solar

A coroa solar é a camada mais externa do Sol. Ela se localiza acima da cromosfera e, assim como esta última, pode ser identificada pela observação do Sol durante o eclipse solar. Uma das principais características vista na coroa é a identificação das linhas do campo magnético do Sol. Figura 4 mostra a coroa solar vista através de um eclipse solar.

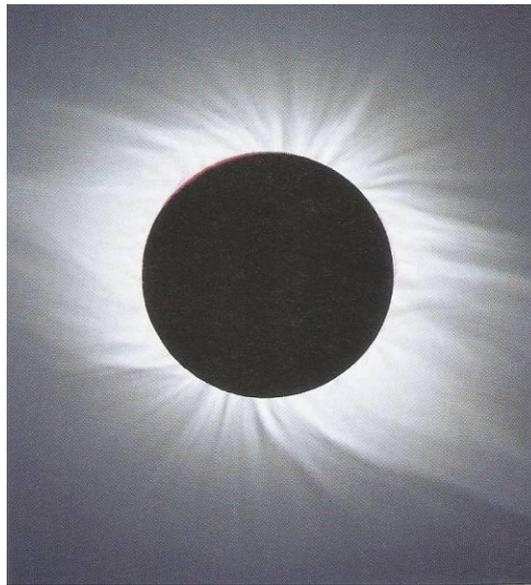


Figura 4: Coroa solar fotografada durante o eclipse solar em 26 de fevereiro de 1998.

FONTE: Lang (2001).

2.1.2.4 Zona de Transição

Entre a cromosfera e a coroa solar existe uma região de súbito aumento de temperatura, chamada zona de transição. Na Figura 5 são apresentadas imagens da zona de transição em vários comprimentos de onda, mostrando a matéria solar em diferentes temperaturas. A imagem alaranjada (5a) representa o Sol observado usando um filtro que nos permite selecionar somente o comprimento de onda de 304 \AA a uma temperatura de 6×10^4 a 8×10^4 K. Já na imagem azul (5b), o comprimento de onda é de 171 \AA e corresponde a uma temperatura de 1×10^7 K. Na imagem verde (5c) foi selecionado um comprimento de onda de 195 \AA ,

correspondente a uma temperatura de $1,5 \times 10^7$ K. Por fim, a imagem amarela (5d) foi obtida selecionando-se um comprimento de onda de 284 \AA a 2×10^7 K.

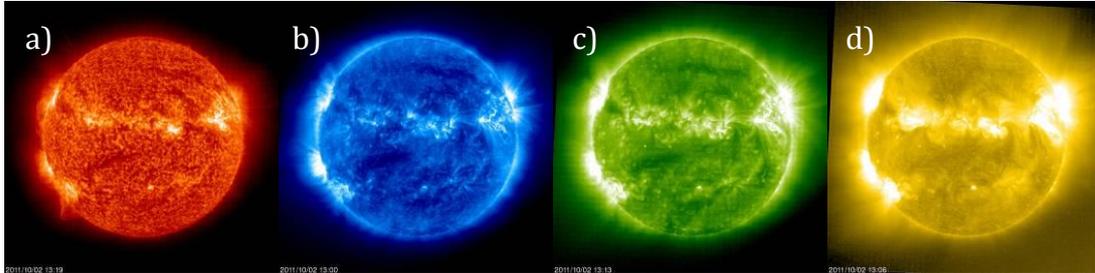


Figura 5: Composição de imagens da zona de transição da atmosfera solar vista por quatro diferentes comprimentos de ondas.

FONTE: Larsen (2011)

2.1.3 Mancha Solar

As manchas solares são regiões escuras na fotosfera solar. Uma de suas características é a existência de uma região central escura, chamada úmbria, e uma região mais periférica, chamada de penumbra. Essas manchas possuem intenso campo magnético, podendo surgir em grupos ou individualmente, caracterizadas pela associação da polaridade magnética. Estas, por sua vez, são classificadas pelo tipo de polaridade que possuem, entre elas, unipolar, bipolar e complexa (HALE; NICHOLSON, 1938).

A temperatura nessa região é de aproximadamente 4300 K, temperatura inferior à sua superfície que está em torno de 5800 K. A Figura 6 mostra um grupo de manchas solares distribuídas na superfície solar. A ocorrência destas manchas ocorre com regularidade, estas podem ser vista pelo ciclo de mancha solar, descrito a seguir.

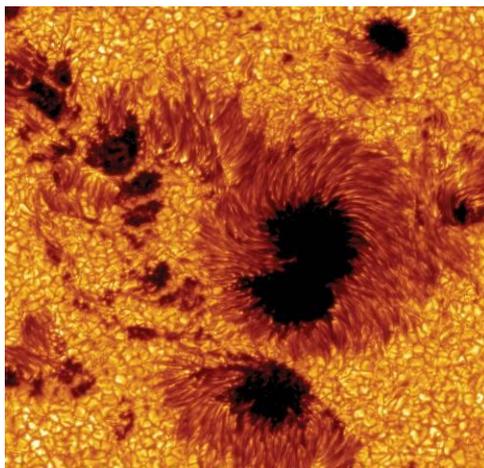


Figura 6: Grupo de manchas solares na região ativa.

FONTE: Lang e Zirin (2011).

2.1.3.1 Ciclo de mancha solar

As manchas solares aparecem nas regiões ativas do Sol e são distribuídas entre +30 a -30° de latitude solar. A distribuição dessas manchas apresenta uma periodicidade de 11 anos. Aparecem em altas latitudes e movem-se em direção ao equador solar. A Figura 7 mostra a distribuição e número de manchas solares ao longo dos anos de 1870 a 1980. O painel superior da Figura 7 é conhecido como diagrama borboleta. No painel inferior é mostrada a área média diária das manchas solares neste mesmo período.

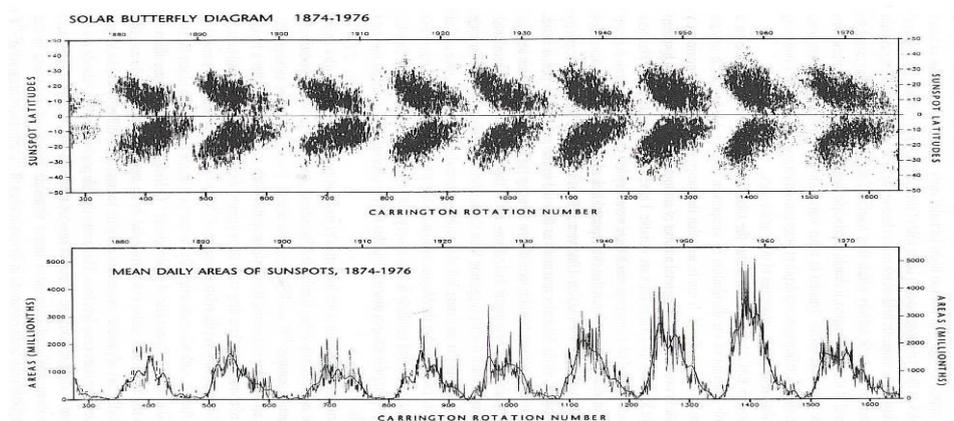


Figura 7: Diagrama borboleta correspondente às regiões de manchas solares (painel superior) e a área média diária das manchas (painel inferior).

FONTE: Campbell (2001).

Contudo, nem sempre, o ciclo de manchas solares apresentou-se dessa forma. No final da metade do século 17 até o começo do século seguinte, o Sol entrou num período que se chamou “Pequena Era do Gelo” ou mínimo de Maunder, na qual a frequência do número de manchas solares ficou muito baixa por um longo tempo (ver Figura 8).

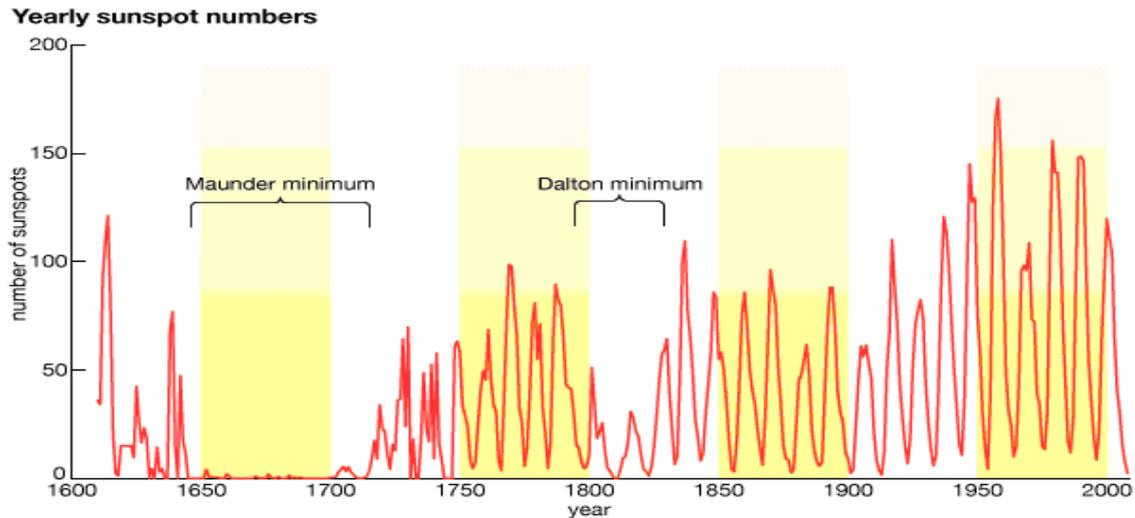


Figura 8: Média do número de manchas solares por ano do ciclo solar 11 anos.

FONTE: Lang e Zirin (2011).

A relação entre as manchas solares e outros fenômenos tais como proeminências e distúrbios coronais na atmosfera solar é conhecida como atividade solar que estão relacionados ao campo magnético solar (THOMAS; WEISS, 1992).

2.1.4 Eventos na Atmosfera Solar

Serão apresentados nesta seção dois fenômenos observados na atmosfera solar, o vento solar e ejeção de massa coronal (EMC) e outras observações relacionadas às interações Sol-Terra.

2.1.4.1 Vento solar

O vento solar é um fluxo de partículas eletricamente carregadas liberadas constantemente pela superfície solar. Estas partículas consistem principalmente de

prótons e elétrons e a sua velocidade atinge ~ 400 km/s a uma distância de 1 UA em períodos de baixa atividade solar. A velocidade do vento solar varia na presença de buracos coronais, chega a atingir mais de 2000 km/s em casos específicos. A rotação diferencial do Sol dá origem à característica espiral das linhas do campo magnético (ver Figura 9).

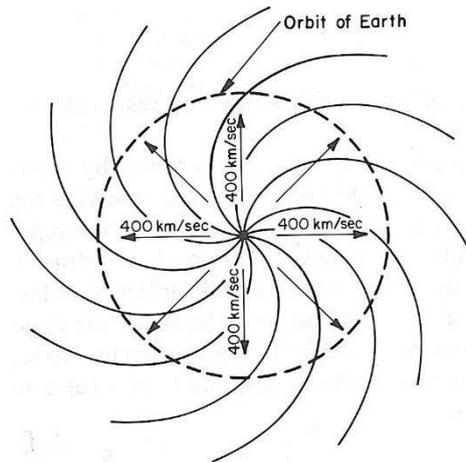


Figura 9: Representação da espiral de linhas do campo magnético interplanetário congelado na direção radial o qual vento solar se expande a 400 km/s .

FONTE: Kivelson e Russel (1995, pp. 108).

O vento solar surge na coroa solar, onde a temperatura é muito alta e a força gravitacional é insuficiente para reter prótons e elétrons. A interação entre o campo magnético da Terra e o vento solar produz a magnetosfera terrestre, a qual é achatada na região entre o Sol e a Terra, e alongada no hemisfério que se encontra no lado noturno.

2.1.4.2 Ejeções de massa coronal

As EMC, em inglês *Coronal Mass Ejection* (CME), são ejeções de plasma nas regiões de campos magnéticos que se recombina na coroa solar, detectadas na cor branca nos coronógrafos. A sua ocorrência é mais frequente quando o ciclo de manchas solares se encontra no período de maior atividade. As partículas associadas a estes eventos têm potencial de criarem auroras austrais e boreais, quando eles são direcionados à Terra.

2.1.4.3 Observações destes eventos

Um dos equipamentos utilizados nas observações dos fenômenos citados acima é o *Large Angle Spectroscopy Coronagraph Observatory* (LASCO). Ele é um coronógrafo de espectroscopia que é capaz de captar imagens da coroa solar, bloqueando a luz que vem diretamente do Sol com um disco ocultador, criando um eclipse artificial dentro do próprio instrumento (vide Figura 10). A posição do disco solar é indicada nas imagens pelo círculo branco. Uma característica da coroa são os fluxos coronais, os quais são bandas quase radiais que podem ser vistas tanto no LASCO C2 e LASCO C3, Figura 10a e 10b, respectivamente. Ocasionalmente, uma EMC pode ser vista sendo expulsa para longe do Sol e atravessando os campos de vista de ambos os coronógrafos. A sombra atravessando o canto inferior esquerdo para o centro da imagem do LASCO C3 é o suporte para o disco ocultador.

As imagens do LASCO C2 mostram a coroa solar interior até $8,4 \times 10^6$ km de distância do Sol como mostra a Figura 10a. Já as imagens do LASCO C3 têm um maior campo de visão, elas englobam 32 diâmetros do Sol. Para colocar isto em perspectiva, o diâmetro de suas imagens é de 45×10^6 km, ou a metade do diâmetro da órbita de Mercúrio. Muitas estrelas brilhantes podem ser vistas atrás do Sol como mostra a Figura 10b.

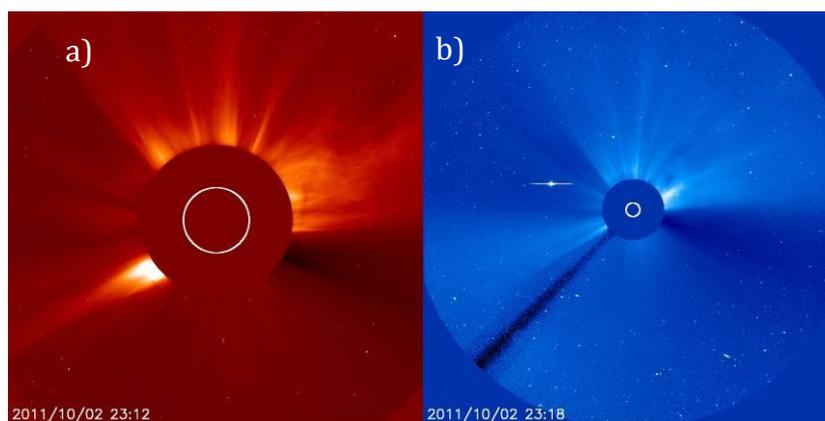


Figura 10: Ejeções de massa coronal visto pelo LASCO C2 (a) e LASCO C3 (b)

FONTE: Larsen (2011)

2.2 Magnetosfera e Campo Magnético da Terra

A magnetosfera é uma região dinâmica do campo geomagnético que interage com o campo magnético interplanetário e o vento solar (MENDES JR., 1992; SIMÕES, 2011). O vento solar que se choca com a magnetosfera terrestre exerce uma forte pressão capaz de modificar a disposição das linhas do campo geomagnético, podendo ocorrer à penetração de plasma na magnetosfera. A magnetosfera por sua vez, age como um escudo contra a penetração de partículas ionizadas, de radiações cósmicas e solares. A Figura 11 mostra a configuração da magnetosfera e algumas das suas regiões internas, como: a onda de choque, a bainha magnética, a magnetopausa, a lâmina de plasma, a lâmina neutra, a plasmasfera, e a ionosfera.

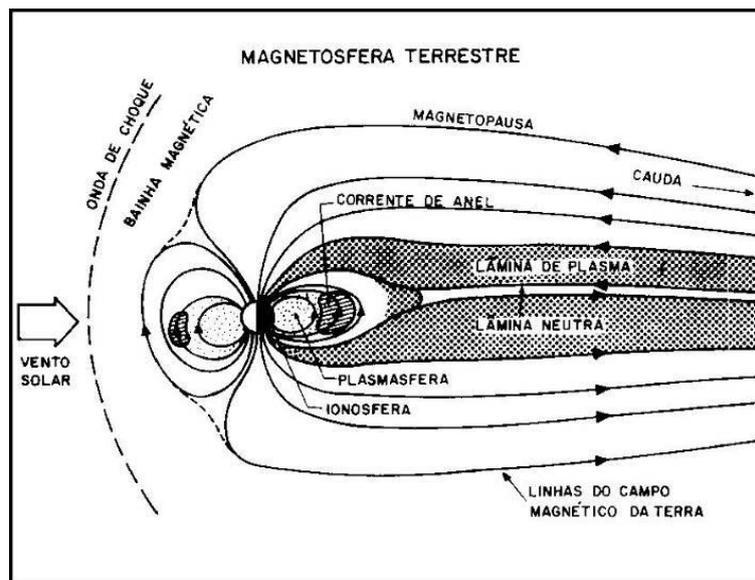


Figura 11: Representação da magnetosfera e suas regiões internas.

FONTE: Mendes Jr. (1992).

O tamanho da magnetosfera é determinado pelo balanço de pressão na fronteira entre a pressão do vento solar de um lado e a pressão magnética do campo planetário do outro lado (KICHHOFF, 1991). O lado diurno é representado pela parte do campo que se encontra em direção ao Sol, tendo ação do campo geomagnético até 10 raios terrestres. Já o lado noturno é representado pela parte

do campo que se encontra oposta à direção do Sol podendo chegar até 100 raios terrestres (CAMPBELL, 2001; KIRCHHOFF, 1991).

O campo geomagnético é composto por um campo magnético interno e outro externo. O campo interno, também é conhecido como campo principal, representa mais de 99% do campo total. O segundo campo é o externo, que tem origem a partir de correntes da magnetosfera e da alta atmosfera, representa os outros 1%, além da existência do campo vindo de regiões com maior concentração de materiais ferromagnéticos na crosta terrestre. Esse campo principal tem uma inclinação de 11,5° o eixo vertical da Terra (CAMPBELL, 1997; HARTMANN, 2005).

2.2.1 Campos Magnéticos Internos

Uma das teorias que define a existência do campo geomagnético é baseada na existência de um núcleo ferromagnético. No entanto, sabe-se que o núcleo terrestre é constituído por ferro em estado líquido, o que o leva a atingir temperaturas acima do ponto da característica ferromagnética. Desde modo, acredita-se que a existência deste campo magnético tem sua origem através da indução eletromagnética, chamada de dínamo auto excitado. Esta teoria é chamada de teoria do dínamo, e define o processo que dá origem ao campo magnético da Terra.

De acordo com Gauss, o campo magnético pode ser descrito pelo gradiente do potencial escalar na seguinte equação:

$$B = -\nabla\Phi = -\nabla(\Phi^i - \Phi^e), \quad (2.1)$$

na qual B é a intensidade do campo magnético, Φ é o campo magnético real, Φ^i é o campo magnético de fonte interna (núcleo interno) e Φ^e é o campo magnético de fonte externa (correntes induzidas na alta atmosfera terrestre) (KIVELSON; RUSSEL, 1995).

Já mencionamos que o campo magnético terrestre sofre alteração na forma devido à interação com o vento solar, portanto não tem a forma de um dipolo. Contudo, o campo magnético próximo de 2 raios terrestres pode ser aproximado por um dipolo. Na verdade, a configuração de suas linhas de campo pode ser representada pelo exemplo mostrado na Figura 12. No dipolo magnético a densidade de linhas do campo é proporcional à intensidade do campo, ou seja, na região próxima aos polos magnéticos a densidade das linhas de campo é maior e nas regiões mais afastadas ocorre o contrário.

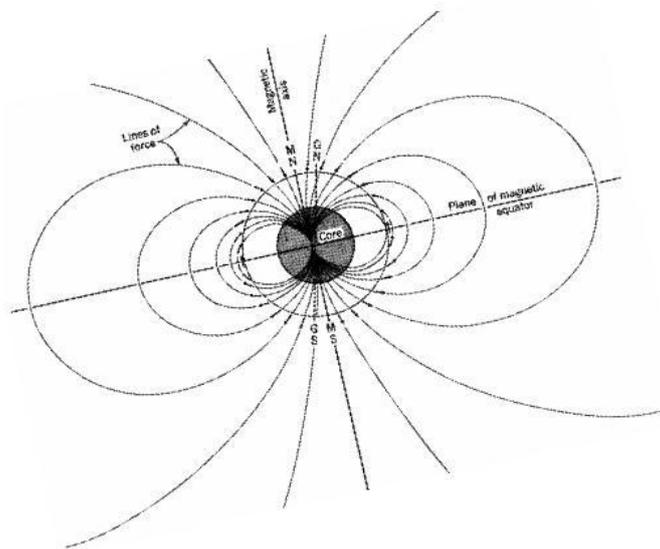


Figura 12: Representação de um dipolo magnético na Terra.

2.2.2 Mapas Magnéticos

Os mapas do campo geomagnético são representados pelas componentes do campo geomagnético e estão associados ao campo principal, desconsiderando os campos externos. A Figura 13 apresenta a latitude e longitude magnética em relação à projeção cartográfica de Mercator. Esses mapas geomagnéticos auxiliam na criação de modelos para o estudo das partículas que ionizadas na atmosfera terrestre, dentre eles, o movimento do plasma em diferentes regiões do campo, como na magnetosfera, cujo movimento de partículas ionizadas é controlado pelas variações do campo geomagnético (KIRCHHOFF, 1991).

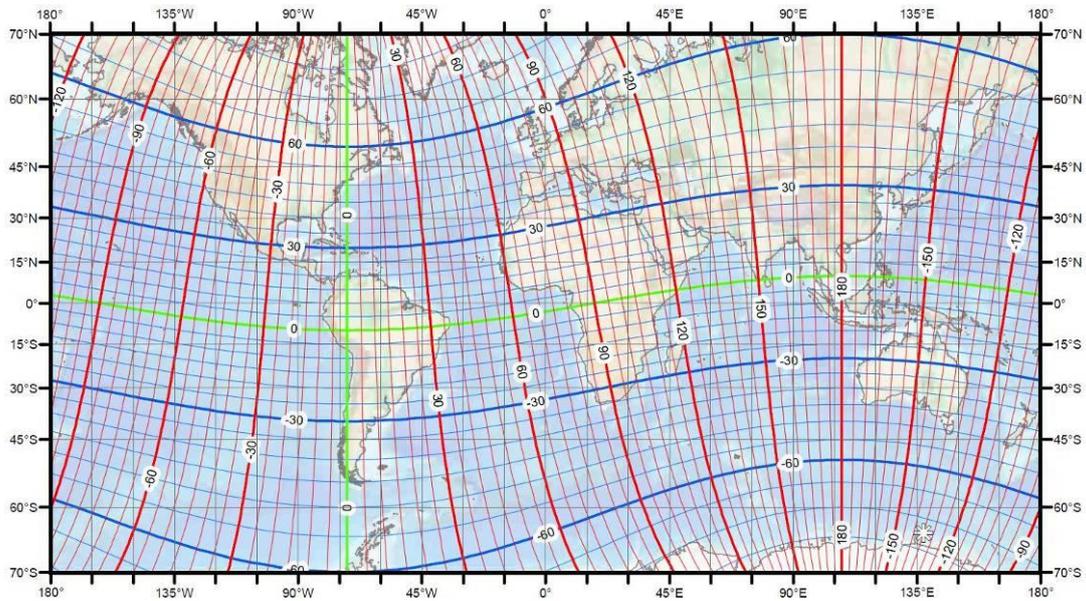


Figura 13: Latitude e longitude geomagnética.

FONTE: Maus et al. (2010, pp. 96).

2.2.3 Campos Magnéticos Externos

Os campos magnéticos externos são campos magnéticos que não se originam no interior do núcleo terrestre. Esses campos são sustentados por correntes elétricas induzidas na magnetosfera, na ionosfera, nos cinturões de radiação de Van Allen, e as correntes alinhadas ao campo, bem como as correntes de média e baixa latitude (DENARDINI, 2003; MENDES JR., 1992). Na ionosfera cita-se o sistema de correntes do *Solar quiet* (Sq), a corrente elétrica do eletrojato equatorial (*Equatorial Electrojet - EEJ*), e a corrente elétrica do eletrojato auroral.

2.2.3.1 Corrente Anelar

A corrente anelar flui próximo à região equatorial do globo terrestre e é responsável pelas variações do campo magnético em períodos de tempestade magnética (LUCAS, 2005; GUARNIERI, 2005). O desenvolvimento da tempestade magnética pode ser acompanhado pela variação da intensidade em que a corrente elétrica que flui na corrente anelar através do índice de atividade magnética D_{st} , o qual é obtido através de quatro estações magnéticas próximas ao equador

magnético (LUCAS, 2005). A Figura 14 mostra a esquematização das correntes elétricas na magnetosfera terrestre. Ao centro desta, está localizada a corrente anelar também chamada de corrente de anel.

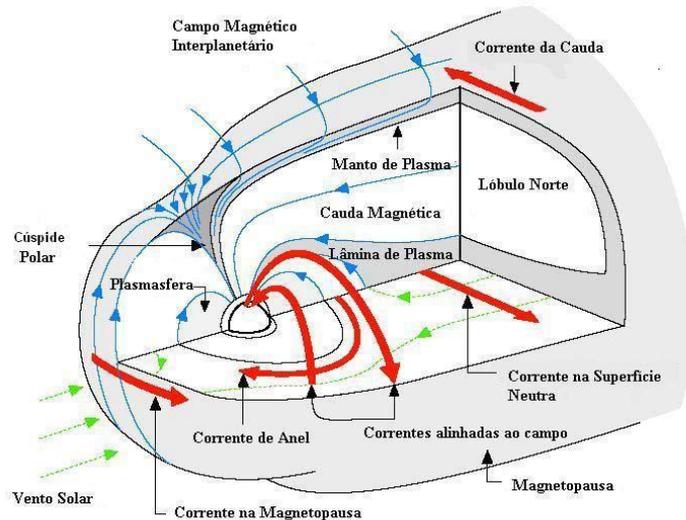


Figura 14: Sistemas de correntes que circulam na magnetosfera terrestre.

FONTE: Adaptação de Kivelson e Russel (1995, pp. 22).

2.2.3.2 Corrente do Sistema Sq

A corrente do sistema Sq (Figura 15) foi descoberta a partir dos estudos das variações do campo geomagnético em períodos de 24 horas, monitorando-se o índice de atividade solar (CAMPBELL, 1997; PÁDUA, 2005). Observou-se que nas variações registradas em magnetogramas apresenta uma curva característica, denominada corrente Sq. O sistema que gera a corrente Sq se localiza na ionosfera terrestre. Esta é a camada condutora da atmosfera neutra terrestre constituída por partículas e moléculas gasosas neutras que entram em processo de ionização devido à absorção parcial ou total da radiação solar na faixa extremo ultravioleta e raios-X que retiram os elétrons de sua valência (DENARDINI, 2003; KIRCHHOFF, 1991; SILVIA, 2009). Nesta camada, o aquecimento da atmosfera neutra na região mais equatorial faz com que os ventos neutros se desloquem para as regiões mais frias próximas aos polos geográficos. Os ventos neutros “arrastam” o plasma

ionizado que tendem a se deslocar no sentido anti-horário no hemisfério norte e horário no hemisfério sul. Este deslocamento do plasma nestes sentidos é causado pela presença do campo magnético da terra.

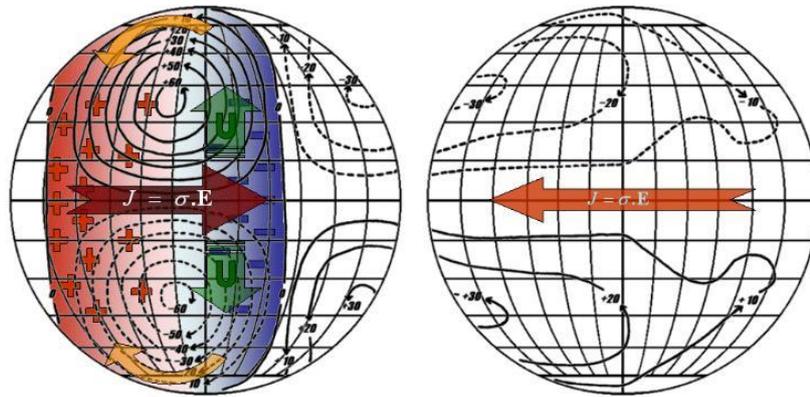


Figura 15: Esquemática do sentido da corrente do sistema de Sq e do eletrojo equatorial.

FONTE: Denardini (2003).

2.2.3.3 Corrente do Eletrojo Equatorial

O eletrojo equatorial (EEJ) é a intensificação da corrente elétrica que flui ao longo do equador magnético devido à alta condutividade nas alturas entre 100 e 110 km da ionosférica, e à corrente do sistema Sq. O sentido corrente do EEJ segue para leste durante o dia e para oeste durante a noite (CHAPMAN; BARTELS, 1940; DENARDINI, 2003). Essa corrente elétrica atinge seu máximo de corrente no meio dia local, quando fotoionização é máxima. Devido a sua presença, temos uma intensificação da componente H do campo magnético terrestre medido com magnetômetros ao longo do equador magnético (Figura 16).

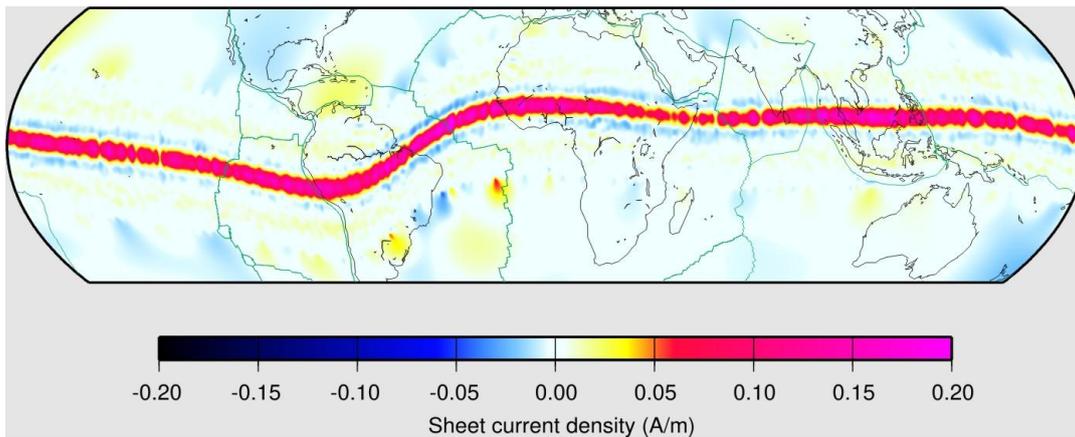


Figura 16: Densidades da corrente do eletrojo equatorial de 2600 passagens do satélite CHAMP sobre o equador magnético entre 11 e 13 LT.

FONTE: Maus e Alken (2010).

2.2.3.4 Corrente do Eletrojo Auroral

O eletrojo auroral está localizado na região dos polos magnético. Para a formação do eletrojo auroral, a corrente recebe a contribuição do sistema de corrente Sq junto com as correntes alinhadas ao campo da magnetosfera, localizadas próximas à oval auroral. Quando ocorre precipitação de plasma na ionosfera da região polar, o eletrojo se expande para baixas latitudes. A Figura 17 mostra a esquematização das correntes ionosféricas, dentre elas o eletrojo auroral.

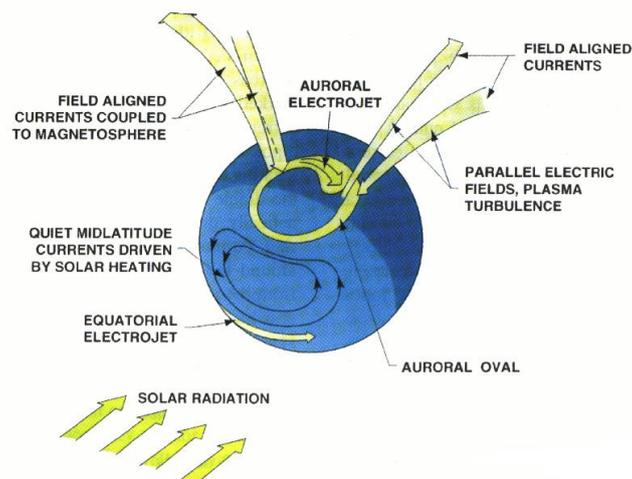


Figura 17: Representação dos Sistemas de correntes elétricas, dentre elas, o eletrojo auroral ao centro da figura.

FONTE: Lühr (2000)

Assim como no caso do EEJ esta corrente ionosférica causa uma intensificação da componente H medida pelo magnetômetro ao nível do solo do lado diurno.

2.3 Índice Geomagnético

Nesta fase do projeto, o objetivo desta revisão sobre índices geomagnéticos é delinear a definição e o método de derivação do índice de atividade geomagnética do Kp. Este índice geomagnético depende da localização geográfica do observatório geomagnético de onde os dados são coletados. Os índices podem ser utilizados em estudos estatísticos da interação Sol-Terra.

Tradicionalmente, as variações do campo geomagnético são gravadas no sistema de coordenadas magnéticas (H, D e Z) ou no sistema de coordenadas geográficas (X, Y e Z), mostrado na Figura 18.

Nestes sistemas, X indica o norte geográfico e H indica o norte magnético, enquanto que D é a declinação que relaciona o norte geográfico com o norte magnético; Y indica o leste geográfico, Z em ambos os sistemas indica a amplitude do campo magnético na direção vertical. Em qualquer um dos sistemas a combinação das três componentes resulta na componente F.

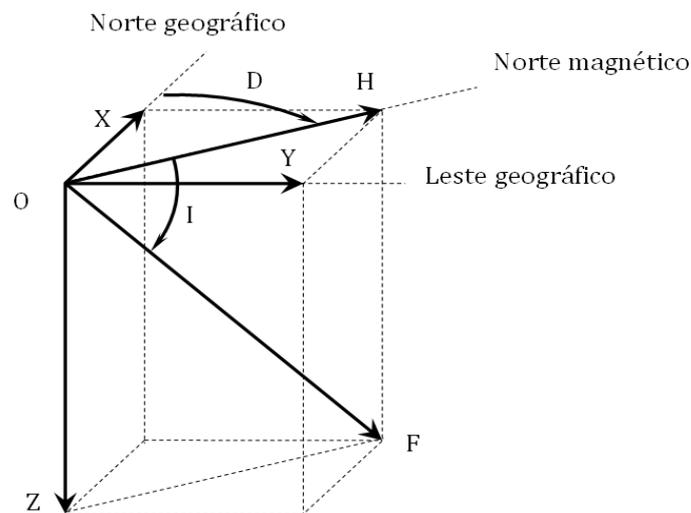


Figura 18: Elementos lineares e angulares do campo magnético terrestre.

2.3.1 O índice Kp e Σ Kp

O índice Kp é o índice global, desenvolvido para indicar o nível de atividade geomagnética dentro de um intervalo de 3 horas, Ele foi introduzido primeiramente por Bartels (1949a) e revisado por Bartels e Veldkam (1949). O índice é derivado de uma composição estatística da variação de um grupo selecionado de estações na região auroral mostrado na Tabela 1 retirada de Rostoker (1972).

Tabela 1: Observatórios cujos dados são utilizados no cálculo do Kp.

Observatório	Latitude geomagnética Norte (graus)	Longitude geomagnética Leste (graus)	Comentário
Sitka	60,0	275,3	-
Meannook	61,8	301,0	-
Agincourt	55,1	247,0	Até1969
Ottawa	57,0	351,5	Desde 1969
Fredricksburg	49,6	349,8	-
Hartland	54,6	79,0	-
Eskdalemuir	58,5	82,9	-
Lerwick	62,5	88,6	-
Witteveen	54,1	91,2	-
Wingst	54,6	94,1	-
Rude Skov	55,9	98,5	-
Lovö	58,1	105,8	Desde 1954
Amberly	-47,7	252,5	-
Toolangi	-46,7	220,8	Desde 1972

FONTE: Rostoker (1972)

O processo pelo qual o Kp é derivado é um pouco complexo. O cálculo é dividido em três etapas:

O cálculo do índice K: O índice K foi introduzido em 1938 no intervalo de 3 horas e foi adotado internacionalmente em Setembro de 1939. Historicamente, os valores numéricos envolviam o cálculo do índice K obtido pelo estudo dos dados da estação de médias latitudes, Niemegek (54° N, 13° E geomagnético) (Bartels et al., 1939). Mais tarde tornou-se uma estação padrão. O índice K é derivado dos dados

de cada observatório para um intervalo de 3 horas na hora universal (00-03,03-06,...,21-24). Para cada intervalo, a diferença δ entre o máximo e o mínimo absoluto da componente é medida para cada componente H, D e Z (ou X, Y e Z). O máximo de desvio δ_{\max} das três componentes é então estabelecido e denominado de *range*. Cada observatório possui a sua própria tabela quase logarítmica para conversão do *range* para um índice K, os valores da tabela são determinados pela latitude geomagnética de cada observatório. Os valores K vão de 0 (baixa atividade) até 9 (intensa atividade). A descrição detalhada do método pela qual o índice K é calculado foi dada por Mayaud (1968);

O cálculo do índice Ks: Uma das dificuldades em fazer estudos estatísticos nos quais o índice K é utilizado reside no fato de haver uma variação diurna que deve ser levada em consideração; por exemplo, o intervalo de 3 horas perto da meia noite local tende a ser substancialmente mais perturbado do que todos os outros intervalos durante o dia. Além disso, a variação diurna apresenta uma variabilidade sazonal que também deve ser levada em consideração. Assim, um processo de normalização foi desenvolvido para contornar essas dificuldades. Esse método consiste no desenvolvimento de tabelas de conversão, na qual subdivide por estações do ano (inverno do hemisfério norte, verão do hemisfério norte, e os equinócios) e pelo intervalo de hora universal. À resultante denomina-se de índice Ks, a qual é definida como uma variável contínua (em oposição ao K integral) variando entre 0,0 e 9,0 e é subdividida em terços de um número inteiro. Deve ser salientado que os valores limite de Ks 0,0 e 9,0; e

O cálculo do índice Kp: O índice planetário de atividade magnética Kp é simplesmente derivado para cada intervalo de 3 horas por uma média do índice Ks de treze observatórios listados na Tabela 1. Assim como padronizaram o índice Ks, os intervalos de Kp através de 28 graus a partir de 0,0 a 9,0.

Nas tabelas típicas dos índices, os 8 valores do Kp de um dia são somados para fornecer uma indicação sobre todos os níveis de atividade durante o dia. A

resultante do $\sum Kp$ deve ser tratada com atenção, assim como Bartels apontou em 1957. O somatório do Kp quase logarítmico pode fornecer resultados enganosos. Assim, dias em que os valores de Kp são (0+0+0+0+0+0+0+9) e (2+2+2+1+1+1+0+0) possuem $\sum Kp = 9$ mas possuem diferentes tipos de características conjuntas da atividade magnética.

CAPÍTULO 3

3 REVISÃO TEÓRICA DE TEMAS RELACIONADOS COM ANÁLISE DE DADOS

3.1 Descrição Estatística de Dados

Os dados utilizados nesse trabalho foram estudados em grande parte com o uso de métodos estatísticos. Portanto, foi feita uma breve revisão teórica que será sumarizada neste capítulo.

Inicialmente apresentaremos os momentos estatísticos que incluem média, variância, desvio padrão e desvio médio. Em seguida discutiremos correlação linear e algumas quantidades estatísticas associadas a ela e finalmente discutiremos modelagem de dados que incluem ajuste de curvas. Por fim, na última sessão abordada neste capítulo trataremos do ajuste de uma reta a um conjunto de dados.

3.1.1 Momentos de uma Distribuição

Quando um conjunto de valores tem uma tendência de se agrupar em torno de um valor principal a determinação deste valor pode ser útil para a caracterização do conjunto. O mais conhecido valor principal é a média de valores x_1, \dots, x_N , definida pela Equação 2.2

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i. \quad (2.2)$$

A média estima o valor central em torno do qual agrupamento ocorre. Note que a utilização de uma barra superior é usada para demonstrar a média. Outra forma de representá-la é utilizando colchetes, por exemplo, $[x]$ (Press et al., 1992).

Depois de caracterizado a distribuição central de um valor, a próxima caracterização é a variabilidade em torno desse valor, conhecido como variância, definida pela Equação 2.3,

$$\text{Var}(x_1 \dots x_N) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2, \quad (2.3)$$

ou desvio padrão (em termos de raiz quadrada), definida pela Equação 2.4

$$\sigma(x_1 \dots x_N) = \sqrt{\text{Var}(x_1 \dots x_N)}. \quad (2.4)$$

Os valores obtidos a partir das Equações 2.3 ou 2.4 não vão convergir num aumento do número de pontos, nem apresentar qualquer consistência a partir do conjunto de dados definidos para conjunto de dados extraídos a mesma distribuição. Uma estimativa mais robusta variância é o desvio médio ou desvio médio absoluto, definida pela Equação 2.5,

$$\text{ADev}(x_1 \dots x_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i - \bar{x}|. \quad (2.5)$$

Este desvio médio absoluto pode ser entendido como sendo o ponto medido mais próximo do desvio padrão calculado.

3.1.2 Correlação Linear

Uma vez que, na fase inicial de nosso projeto, estávamos interessados no processo de calibração dos magnetômetros e não nos dados propriamente ditos, poderíamos calcular a média e o desvio padrão para comparar as suas sensibilidades. Contudo, optamos por realizar uma análise de correlação entre as medições dos magnetômetros tomados dois a dois. Neste caso, o comportamento médio é implicitamente ignorado e analisamos indiretamente as variações das medições duas a duas.

Deste modo, para pares de quantidades (x_i, y_i) , onde x_i representa os dados do magnetômetro de referência e y_i os dados do magnetômetro com sensibilidade diferente da referência, e i varia de 1 a N , o coeficiente de correlação linear r é dada pela Equação 2.6

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.6)$$

onde, \bar{x} é a média dos x_i , \bar{y} é a média dos y_i .

O valor de r encontra-se entre -1 e 1 . Para um valor de 1 , o termo usado é correlação positiva completa, no qual os pontos dos dados estão sobre uma linha reta com inclinação positiva, com x e y em conjunto crescente. Se os pontos dos dados encontram-se sobre uma linha reta com inclinação negativa, y decrescente à medida que x aumenta, então r tem o valor -1 , denominado correlação negativa completa. Um valor de r próximo de zero indica que as variáveis x e y não são correlacionadas.

O valor de r pode ser entendido como uma informação sobre os resíduos (raiz dos desvios médios quadráticos), os quais são esperados se os dados são montados em uma linha reta pelo método dos mínimos quadrados. Contudo, r é uma variável da estatística que é inapropriada para decidir se uma correlação observada é estatisticamente significativa.

3.2 Modelagem de Dados

Uma vez que a correlação linear pode ser interpretada como um ajuste de uma curva linear a um conjunto de dados e que o r (fator de correlação) pode ser entendido como um qualificador deste ajuste. Cabe agora apresentarmos alguns

conceitos associados a este ajuste que nada mais é do que uma modelagem de dados.

Dado um conjunto de dados, queremos muitas vezes condensar e resumir os dados ajustando estes a um modelo de parâmetros variáveis. Certos casos o modelo é uma classe conveniente de funções, tais como retas, polinômios ou gaussianas, e o ajuste fornece os coeficientes apropriados. Outras vezes, os parâmetros do modelo se originam de alguma teoria subjacente que os dados devem satisfazer. A modelagem também pode ser usada como um tipo de interpolação, para ampliar o número de pontos de dados em uma função contínua, mas com a ideia subjacente de que essa função deve ser parecida.

A função de mérito é um exemplo de teorias subjacentes que os dados devem satisfazer de modo que os valores dos parâmetros sejam analisados. Os parâmetros do modelo são então ajustados para atingir uma função, resultando em melhor ajuste de parâmetros. O processo de ajuste é, assim, um problema de minimização em várias dimensões. O ajuste de parâmetros não é o fim de toda a estimativa dos parâmetros. Para ser útil, um procedimento de ajuste deve fornecer (i) os parâmetros, (ii) as estimativas dos parâmetros de erro, e (iii) uma medida estatística do melhor ajuste.

3.2.1 Ajustando os Dados para uma Linha Reta

Consideramos o problema da modelagem de um conjunto de N pontos de dados de (x_i, y_i) para um modelo linear

$$y(x) = a + bx, \quad (2.7)$$

também chamado de regressão linear. Assumimos que a incerteza associada com σ_i e que cada medição y_i é conhecida, e que os x_i (valores da variável dependente) também sejam.

Para medir o quão bem o modelo está de acordo com os dados, usamos o teste do chi-quadrado da função de mérito (Equação 2.8), que neste caso é

$$\chi^2(a,b) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - a - bx_i}{\sigma_i} \right)^2. \quad (2.8)$$

CAPÍTULO 4

4 ATIVIDADES RELACIONADAS À INSTRUMENTAÇÃO

Inicialmente iremos introduzir uma breve descrição do funcionamento básico do sistema dos magnetômetros da Rede EMBRACE utilizados nesta fase inicial do projeto, incluindo nossa participação na instalação das antenas de sincronização de tempo usando satélites de GPS. Logo em seguida trataremos do procedimento de intercalibração destes equipamentos utilizando os métodos de análise de dados vistos no Capítulo 3.

Uma vez que os magnetômetros foram intercalibrados, podemos então colocá-los para operar com o foco no desenvolvimento de pesquisas. Por fim, apresentaremos um estudo comparativo dos dados de dois magnetômetros depois de concluído a intercalibração.

A Rede EMBRACE possui sete magnetômetros, sendo que atualmente três estão em operação nas seguintes estações: Cachoeira Paulista, SP (EMBRACE-05, CXP, 22,70°S, 45,01°W, dip:-41,3°), Eusébio, CE (EMBRACE-02, EUS, 3,88°S, 38,42°W, dip:-7,3°) e São Luís, MA (EMBRACE-03, SLZ, 2,59°S, 44,21°W, dip:-16,5°). Os demais magnetômetros estão localizados em Cachoeira Paulista aguardando o período de intercalibração, com exceção do EMBRACE-01 que passa por reparos e o EMBRACE-04 que está calibrado, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Localização dos magnetômetros da Rede EMBRACE.

Magnetômetro	Sigla	Localização	Lat. e Long.	Situação
EMBRACE-01	-	-	-	Reparos
EMBRACE-02	EUS	Eusébio, CE	3,88°S, 38,42°W	Operando
EMBRACE-03	SLZ	São Luís, MA	2,59°S, 44,21°W	Operando
EMBRACE-04	-	-	-	Calibrado
EMBRACE-05	CXP	Cachoeira Paulista, SP	22,70°S, 45,01°W	Operando
EMBRACE-06	-	-	-	Calibração
EMBRACE-07	-	-	-	Em espera

4.1 Instrumentação

Os magnetômetros da Rede EMBRACE são compostos por um sensor de variação magnética e um sistema de aquisição de dados, os quais podem ser vistos na Figura 19. A instalação destes equipamentos deve atender, basicamente, algumas medidas de precaução para se obter uma melhor qualidade na aquisição de dados e o máximo de rendimento na manipulação deles, conforme a recomendação do fabricante do magnetômetro.

Neste caso, o sensor de variação magnética deve ser instalado a aproximadamente 80 cm de profundidade do solo, aproximadamente 25 m do sistema de aquisição de dados e o mais afastado possível de quaisquer objetos metálicos móveis. Já o sistema de aquisição de dados deve ser instalado num local com acesso à internet, fornecimento de energia elétrica estável e suporte técnico periódico.



Figura 19: Fotografia de um sistema de magnetômetro utilizado pela Rede EMBRACE, composto por um sensor de variação magnética (à esquerda) e um sistema de aquisição de dados (à direita).

O reconhecimento de cada magnetômetro da Rede é feita através de um arquivo “Setuplog.cfg” que contém as informações básicas de operação do equipamento. As principais informações apresentadas neste arquivo são a seguir e mostradas na Figura 20:

a estação e o código da estação onde está localizado o magnetômetro;

a numeração do magnetômetro da rede;

a longitude e a latitude geográfica do magnetômetro;

a altitude do magnetômetro em relação ao nível do mar; e

os valores de calibração instrumental das componentes do campo magnético.

```

"Station                ", "CACHOEIRA PAULISTA"
"IAGA code              ", "CXP"
"Magnetometer           ", "EMBRACE-05"
"Longitude              ", "-45°00'52"
"Latitude               ", "-22°42'07"
"Altitude(m)           ", "601"
"Enable GPS             ", "no"
"COM Number Port        ", "9"
"Set send file time (min) ", "2"

"valores de calibracion instrumental"
"ScaleH value(mV/nT)    ", "2.85"
"ScaleD value(mV/nT)    ", "2.85"
"ScaleZ value(mV/nT)    ", "3.31"
    
```

Figura 20: Informações contidas no arquivo "Setuplog.cfg" do EMBRACE-05.

A aplicação básica do sistema de magnetômetro consiste na medição das variações das componentes magnéticas do campo magnético terrestre, registradas pelo seu sensor. A variação medida pelo sensor é processada pelo sistema de aquisição de dados e então gravada num arquivo de texto que é enviado para o servidor de arquivos da Rede no INPE de São José dos Campos.

O magnetômetro grava três tipos de arquivos. O primeiro arquivo apresenta dados na resolução de tempo em segundos, gravados na linguagem ASCII. O segundo arquivo é gravado com os valores de voltagem com resolução de minutos, obtido através da média dos dados de segundos do primeiro arquivo. Por fim, o terceiro arquivo é o dado gravado na resolução de um minuto, o qual apresenta os valores da variação do campo magnético. Este último pode ser visto na Figura 21.

O conteúdo do arquivo é apresentado iniciando por um cabeçalho no qual estão dispostas as informações sobre a estação magnética e sobre o conteúdo de cada uma das colunas que estão contidas no arquivo. Este arquivo é nomeado a partir da sigla da estação magnética seguido pela data e o tipo de dado, vistos no arquivo da imagem. No interior destes dados estão registradas a localização e a identificação do magnetômetro, o dia Juliano em que o dado está gravado e a resolução em que

os dados foram gravados. Neste caso, a resolução de tempo é de um minuto. Ainda neste arquivo, os dados são separados em colunas o dia, mês, ano, hora e minuto e as componentes do campo geomagnéticos (D, H, Z, I e F, respectivamente).

DD	MM	YYYY	HH	MM	D(Deg)	H(nT)	Z(nT)	I(Deg)	F(nT)
02	12	2011	00	00	-21.4782	17326.6	-13753.2	-38.4411	22121.5
02	12	2011	00	01	-21.4784	17326.6	-13753.2	-38.4412	22121.5
02	12	2011	00	02	-21.4805	17326.2	-13753.3	-38.4419	22121.3
02	12	2011	00	03	-21.4800	17326.5	-13753.3	-38.4415	22121.4
02	12	2011	00	04	-21.4802	17326.6	-13753.2	-38.4412	22121.5
02	12	2011	00	05	-21.4804	17326.5	-13753.2	-38.4412	22121.4
02	12	2011	00	06	-21.4799	17326.8	-13753.1	-38.4406	22121.6
02	12	2011	00	07	-21.4779	17326.7	-13752.9	-38.4405	22121.4
02	12	2011	00	08	-21.4784	17326.5	-13753.0	-38.4408	22121.3
02	12	2011	00	09	-21.4788	17326.3	-13752.9	-38.4409	22121.1
02	12	2011	00	10	-21.4789	17326.3	-13752.8	-38.4408	22121.1

Figura 21: Exemplo de conteúdo dos arquivos de minuto do sistema de magnetômetro.

Uma vez que foi apresentada uma breve descrição da instrumentação utilizada neste projeto, podemos citar a participação em uma visita técnica ao INPE de Cachoeira Paulista para a instalação de duas antenas receptoras de sinais de GPS em dois magnetômetros da rede. Esta visita foi realizada no dia 10 de novembro de 2011 sob a supervisão do engenheiro também fabricante dos magnetômetros, Oscar Veliz, acompanhado do Dr. Clezio Marcos De Nardin e do técnico responsável pelo suporte do magnetômetro de CXP, Wagner Sarjob Coura Borges. A implementação desta antena teve como finalidade aumentar a precisão do instante em que o dado foi gravado.

Durante a instalação foi necessário a atualização do *software* de aquisição de dados dos magnetômetros operavam na estação, habilitando o reconhecimento do sinal de GPS. O posicionamento da antena foi feito na área externa da sala de operação do sistema de aquisição de dados. A Figura 22 mostra o posicionamento da antena à esquerda e a conexão dos cabos necessários para o funcionamento da mesma, à direita. As portas utilizadas para o recebimento dos sinais de GPS foram: "ANT", que conectar a antena e "COM", que processa a hora exata gravada nos dados. Também,

fez-se um teste com as antenas dos magnetômetros EMBRACE-06 e EMBRACE-07 e verificarmos que estes estão recebendo o sinal de GPS.

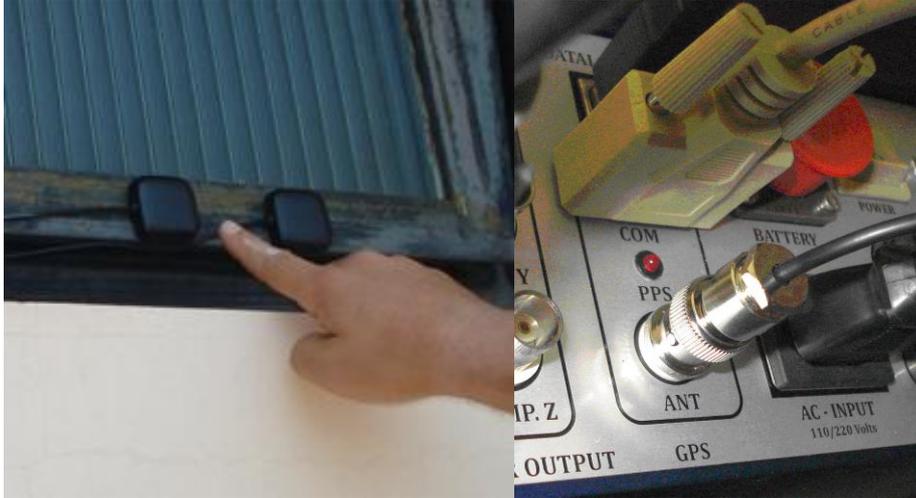


Figura 22: Fotografia das antenas de GPS (à esquerda) e os cabos de GPS conectados na parte posterior da caixa de controle do magnetômetro (à direita).

4.1.1 Intercalibração

Foi realizado um procedimento de intercalibração da rede para garantir a mesma sensibilidade de todos os equipamentos sujeitos à mesma variação do campo terrestre. Este procedimento baseia-se na correção do fator de calibração das componentes magnéticas medidas por cada um dos sistemas de magnetômetro individualmente. Para isso, foi realizada uma análise preliminar, na qual consiste na leitura dos valores de voltagem e a sua conversão para valores de nano Tesla (nT), resultando na medida de campo magnético. Desta forma, todos estes equipamentos estão intercalibrados com o equipamento de referência da rede que encontra-se em CXP. Para a realização deste procedimento os magnetômetros passam por duas etapas. A primeira etapa consiste na operação destes magnetômetros por um período de dois a três meses. Dessa forma garante-se que os magnetômetros estejam registrando a variação do campo magnético num mesmo intervalo de tempo. A Figura 23 mostra o local o qual é realizado a intercalibração em CXP.



Figura 23: Fotografia do local em que é realizado a intercalibração em CXP.

Logo após este período de coleta de dados, foram selecionados os dados nas datas de menor perturbação magnética obtida com base no *World Data Center for Geomagnetism* (WDC) localizado em Kyoto no Japão. O WDC fornece todo o mês a uma sequência de 15 dias de cada mês, sendo 10 dias calmos e 5 dias de perturbação magnética. Estes dados foram obtidos em sua página de internet.

Neste contexto, foram analisados e processados os conteúdos de cada dado coletado nos dias calmos do período de intercalibração. A Tabela 4 mostra as datas selecionadas relevantes ao período de intercalibração dos magnetômetros da Tabela 3.

Tabela 3: Datas selecionadas para análise de intercalibração.

Magnetômetro		Datas selecionadas	
Referência	Calibração	Mês, Ano	Dias
EMBRACE-01	EMBRACE-02	Julho, 2011	16, 17, 24, 27, 28
EMBRACE-01	EMBRACE-03	Julho, 2011	16, 17, 24, 27, 28
EMBRACE-01	EMBRACE-04	Dezembro, 2011	06, 07, 15, 16, 17, 26, 27
EMBRACE-01	EMBRACE-05	Dezembro, 2011	06, 07, 15, 16, 17, 26, 27
EMBRACE-05	EMBRACE-06	Em andamento	-
EMBRACE-05	EMBRACE-07	Em espera	-

A partir das datas selecionadas do período de intercalibração foram feitas as análises e processamentos das componentes H, D e Z, magnéticas dos dados por

meio do *software* OriginPro 8. Em seguida foi aplicada a metodologia para a correção dos fatores de calibração das componentes magnéticas (H, D e Z) fornecidas pelo fabricante. A metodologia adotada consiste da correlação linear das componentes do magnetômetro de CXP com os demais da rede. A Figura 24 mostra um exemplo de planilha utilizada para o processamento dos dados da intercalibração do EMBRACE-02 realizado.

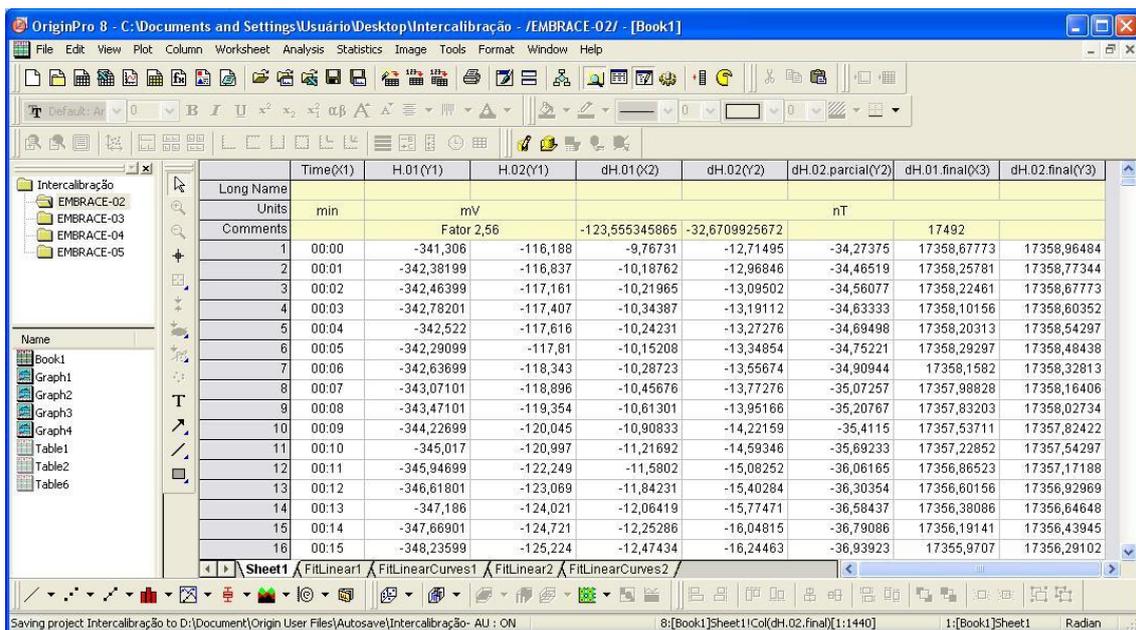


Figura 24: Exemplo de planilha de dados da intercalibração do EMBRACE-02 utilizando o OriginPro 8.

4.1.2 Resultados das Análises dos Dados de Intercalibração

A intercalibração resultou nos gráficos das Figuras 25 e 26. Nestas figuras, os conjuntos de imagens mostrados à sua esquerda mostram as variações da componente H para a estação de CXP na cor preta, enquanto a linha de cor vermelha mostra a variação da componente H do magnetômetro sendo calibrado. Estas variações são para mesmo local, período e variação magnética. Já o conjunto de imagens à direita mostra a correlação linear entre os dados dos magnetogramas.

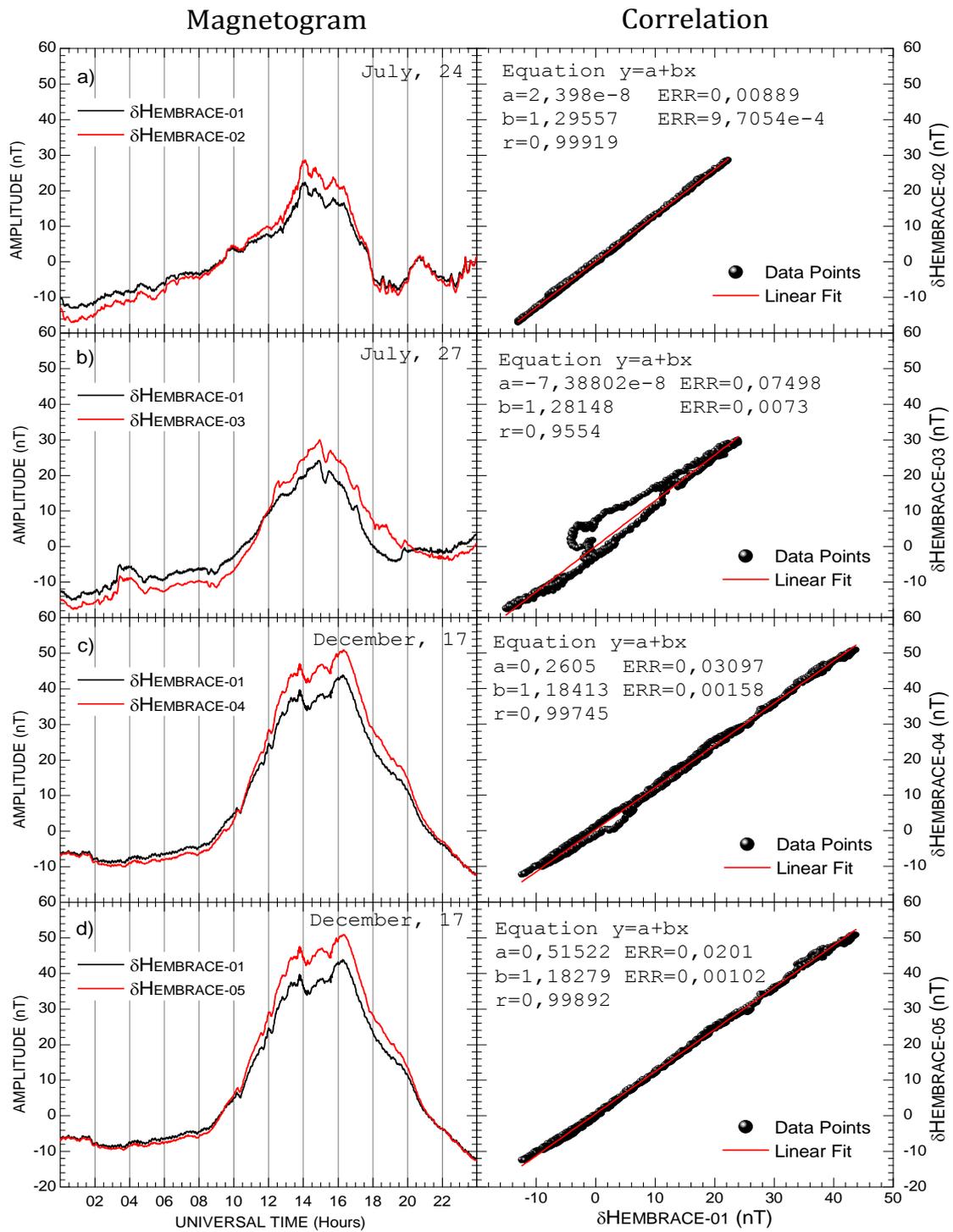


Figura 25: Gráficos da variação da componente H medida pelos diversos magnetômetros em calibração e de referência (à esquerda) e gráficos de dispersão mostrando a relação entre as medidas da componente H e o respectivo ajuste linear (à direita) antes da correção dos valores de calibração instrumental.

Os resultados referentes às medições dos magnetômetros antes da correção do fator de sensibilidade (Figura 25) mostraram características singulares, dentre elas:

- A Figura 25a mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-02 possuía uma amplitude de 29% maior do que a do EMBRACE-01;
- A Figura 25b mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-03 possuía uma amplitude de 28% maior do que a do EMBRACE-01;
- A Figura 25c mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-04 possuía uma amplitude de 18% maior do que a do EMBRACE-01; e
- A Figura 25d mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-05 possuía uma amplitude de 18% maior do que a do EMBRACE-01;

Dos valores observados nos gráficos da Figura 25, observou-se que o comportamento dos magnetogramas é similar aos magnetogramas do EMBRACE-01, exceto pelas amplitudes. Estas, por sua vez, possuíam valores acima dos registrados pelo EMBRACE-01, as quais representavam 15 a 30% de erro de medição para cada fator de sensibilidade dos magnetômetros.

A correção do fator de sensibilidade foi obtida por meio do produto escalar entre o fator de calibração fornecido pelo fabricante com o coeficiente angular da reta da correlação (Figura 25). Desta forma, aplicaram-se os valores corrigidos do fator de intercalibração nos mesmos dados. Obtiveram-se os gráficos da Figura 26, os quais apresentavam as seguintes características:

- A Figura 26a mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-02 passou a ter uma amplitude de 2% menor do que a do EMBRACE-01;
- A Figura 26b mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-03 passou a ter uma amplitude de 6% maior do que a do EMBRACE-01;
- A Figura 26c mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-04 passou a ter uma amplitude de 5% maior do que a do EMBRACE-01; e
- A Figura 26d mostra que a amplitude medida pelo EMBRACE-05 passou a ter uma amplitude de 6% maior do que a do EMBRACE-01;

Após a correção observou-se que a diferença na amplitude medida por cada magnetômetro diminuiu, representado pelos magnetogramas da Figura 26.

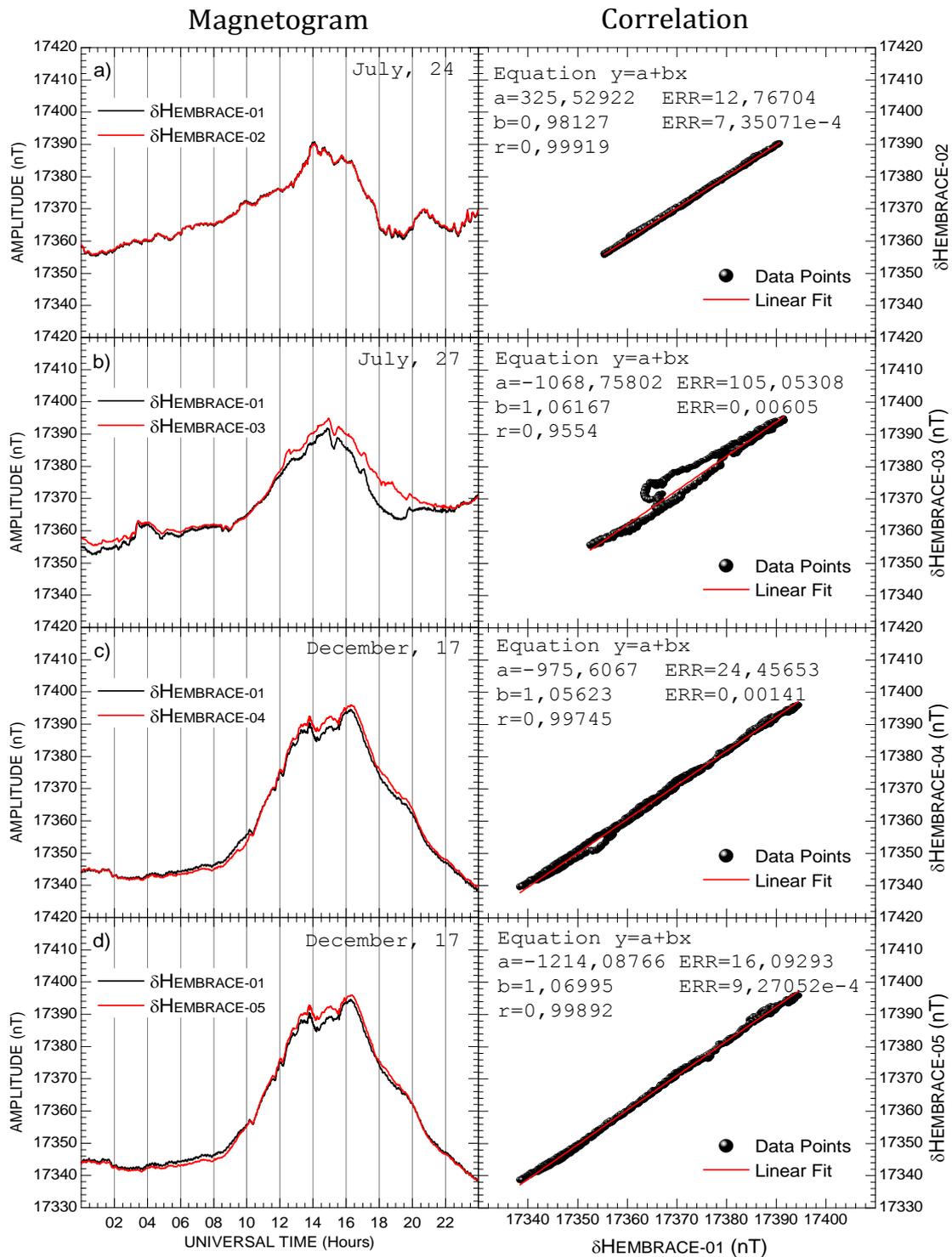


Figura 26 Gráficos da variação da componente H medida pelos diversos magnetômetros em calibração e de referência (à esquerda) e gráficos de dispersão mostrando a relação entre as medidas da componente H e o respectivo ajuste linear (à direita) depois da correção dos valores de calibração instrumental.

De posse das correções do fator de calibração dos magnetômetros foram instalados os sistemas de magnetômetro EMBRACE-02 e EMBRACE-03 em EUS e SLZ, respectivamente. Desta forma foi possível realizar um estudo comparativo entre os dados coletados pelos magnetômetros da Rede EMBRACE que operaram no verão de 2012 com os dados do verão de 2002.

4.2 Estudo Comparativo entre Dados do Verão de 2002 e 2012

Uma vez apresentado instrumento que é usado e feito o processo de intercalibração, nós procedemos a uma análise de dados que é apresentado nesta sessão. Essa análise de dados consiste em obter as variações médias da componente H de SLZ e EUS no período do verão de 2012 para obter o efeito do EEJ ao nível do solo. Além disso, esse resultado também foi comparado com o estudo anterior realizado por Denardini et al. (2009). Para este estudo foram selecionados e analisados dados de magnetômetros de SLZ e EUS separados por quase ciclo solar, especificamente selecionamos dados dos cinco dias mais calmos dos meses de Janeiro, Fevereiro e Março do verão dos anos 2002 e 2012 vistos na Tabela 4.

Tabela 4: Datas selecionadas para a análise comparativa

Ano	Mês	Dias
2002	Janeiro	3, 4, 5, 6, 30
	Fevereiro	3, 14, 15, 16, 23
	Março	14, 16, 17, 27, 28
2012	Janeiro	4, 14, 18, 19, 31
	Fevereiro	2, 12, 16, 17, 23
	Março	20, 25, 26, 29, 31

A Figura 27 mostra os gráficos da variação diária média dos verões de 2002 (à esquerda) e 2012 (à direita) das componentes H das estações de SLZ (painel superior) e de EUS (painel central), também mostra a variação do EEJ ao nível do solo (painel inferior). Esta última é calculada pela diferença das variações das componentes H de SLZ menos as variações das componentes H de EUS.

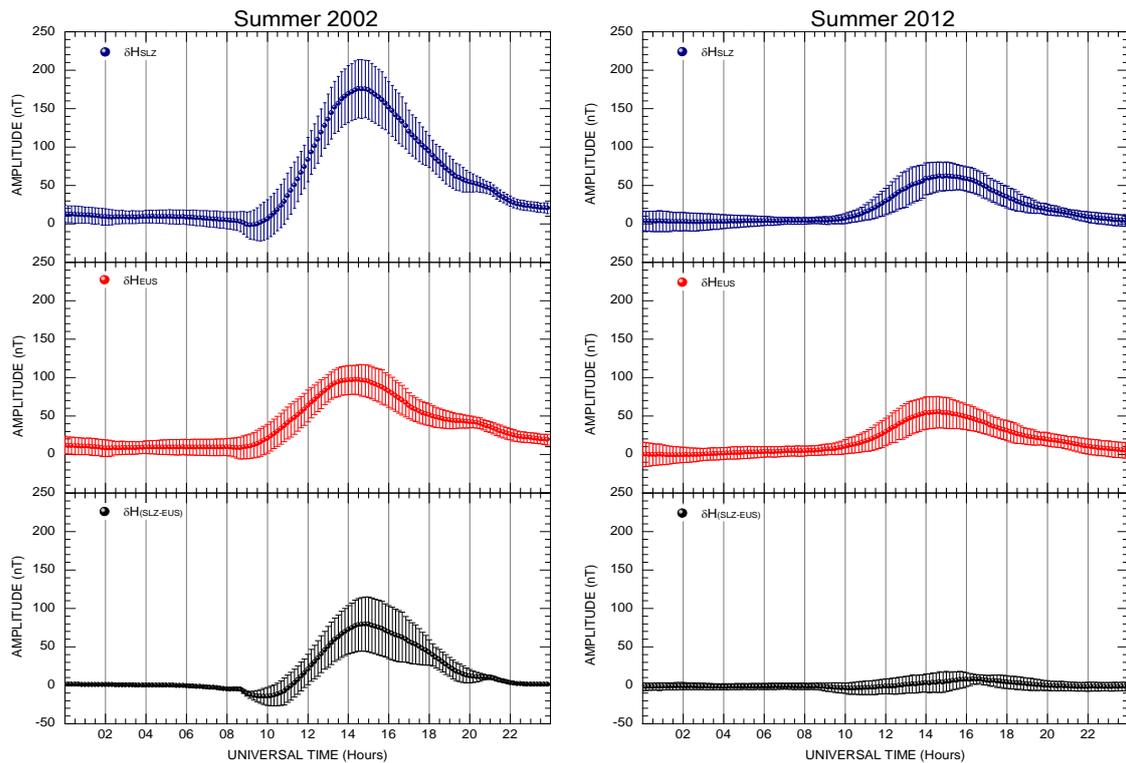


Figura 27: Variação diária média das componentes H das estações de SLZ (painel superior) e de EUS (painel médio), além da influência do EEJ ao nível solo nos verões de 2002 e 2012.

Nos gráficos da Figura 27, observou-se que as componentes H tanto de EUS e como a de SLZ começam a registrar variações mais significativas a partir das 9UT (6LT). Esse comportamento se encerra por volta das 22UT (19LT) em ambos os verões. Também se observou que as variações mais significativas eram medidas próximo as 15UT (12LT). A variação média máxima medida da componente H da estação de SLZ em 2002 foi de 175 nT. O mesmo não se observa em 2012, que media 60 nT. Já a variação média máxima medida da componente H da estação de EUS em 2002 foi de 100 nT. Em 2012 passou a medir 60 nT. A diferença entre a variação média máxima em SLZ com a de EUS resulta numa variação média máxima de 80 nT em 2002, para 8 nT.

A nossa interpretação dos resultados observados é que há algumas diferenças nas amplitudes máximas de SLZ e EUS de 2002 para 2012. As variações observadas nas amplitudes nos levam a acreditar que em 2002 SLZ estava dentro de uma região de

influência do EEJ), registrando a influência desta corrente do EEJ (pelo campo induzido) em parte da magnitude do seu campo. Para a configuração de 2012, SLZ parece já estar fora da região de influência do EEJ, uma vez que o afastamento está levando nossos registros de variação média diária do efeito do EEJ no nível do solo caírem de um valor máximo ao meio dia local de 80 nT para dentro do valor do desvio padrão associado à análise. Quanto a EUS as diferenças observadas podem ser devido às condições do próprio Sistema Sq, da sua localização dentro do Sistema Sq, ou ainda uma pequena influência do EEJ que ocorria em 2002 e não mais ocorre.

4.3 Resumos Submetidos para Congressos

Nessa sessão apresentaremos os resumos dos trabalhos submetidos para os congressos de iniciação científica e de encontros científicos nacionais e internacionais, nos quais participei como autor principal ou coautor dos trabalhos.

4.3.1 Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE)

Local: São José dos Campos (INPE) – São Paulo

Período: 01 e 02 de Agosto de 2012

Trabalhos: Chen, S. S.; Denardini, C. M.; Resende, L. C. A.; Moro, J; Guizelli, L. M. Desenvolvimento de Ferramentas Científico-Computacionais Baseadas em Dados de Magnetômetros para Aplicação no Monitoramento e Previsão do Clima Espacial.

4.3.2 IV Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia (SBGEA)

Local: Mackenzie – São Paulo

Período: 10 a 14 de Setembro de 2012

Trabalhos: Chen, S. S.; Denardini, C. M.; Resende, L. C. A.; Moro, J.; Guizelli, L. M. Intercalibração da Rede EMBRACE de Magnetômetros.

Denardini, C. M.; Abalde, J. R.; S. S. Chen; Guizelli, L. M.; Resende, L. C. A.; Moro, J.; Padilha, A. L.; Sant'Anna, N.; Petry, A.; Fagundes, P. R.; Correia, E.; Schuch, N. J.; Domingos, S.; Borges, W. S. C.; Mesquita, F. P. V.; Avicena F°; Cunha Neto, A.; Castilho, C.; Gargarela Jr., W.; R. Lima, A. A. A Magnetometer Network in South America in South America: the station k index.

4.3.3 XXIV Salão de Iniciação Científica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (SICUFRGS)

Local: UFRGS – Porto Alegre

Período: 01 a 05 de Outubro de 2012

Trabalhos: Chen, S. S.; Denardini, C. M. Relação entre a variação na componente H do campo geomagnético e o índice K local para as estações da Rede EMBRACE de Magnetômetros.

4.3.4 International Symposium of Equatorial Aeronomy (ISEA)

Local: Jicamarca - Peru

Período: 12 a 16 de Março de 2012

Trabalhos: Denardini, C. M.; Abalde, J. R.; Chen, S. S.; Guizelli, L. M.; Resende, L. C. A.; Moro, J.; Padilha, A. L.; Sant'Anna, N.; Fagundes, P. R.; Correia, E.; Schuch, N. J.; Domingos, S.; Borges, W. S. C.; Mesquita, F. P. V.; Avicena F°; Cunha Neto, A.; Castilho, C.; Gargarela Jr., W.; Lima, R. A. A. The New EMBRACE Magnetometer Network in South America. In: 13th International Symposium on Equatorial Aeronomy, 2012, Paracas. Book of Abstracts, 2012. v. 1. p. 102-103.

Moro, J.; Denardin, C. M.; Abdu, M. A.; Correia, E.; Resende, L. C. A.; Guizelli, L. M.; Chen, S. S.; Schuch, N. J.; Makita, K. Latitudinal Dependence of Cosmic Noise Absorption in the Ionosphere over the SAMA Region during the September 2008 Magnetic Storm. In: 13th International Symposium on Equatorial Aeronomy, 2012, Paracas. Book of Abstracts, 2012. v. 1. p. 95.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES

Nesta fase inicial do projeto, o bolsista deu início aos primeiros contatos com o com a área de previsão e monitoramento do clima espacial, o qual aprendeu a manipular alguns dos dados de magnetômetro, participando também de procedimentos de intercalibração. Este procedimento foi desenvolvido no OriginPro 8, utilizando-se dos recursos de processamento e gráficos do *software*.

Através da intercalibração dos magnetômetros, os dados magnetômetros instalados nas estações de SLZ e EUS passaram a medir valores condizentes com o magnetômetro de referência. Desta forma, o bolsista pôde realizar um estudo comparativo da influência do EEJ no nível do solo nos verões de 2002 e 2012. O estudo mostrou que a região de influência do EEJ não atinge a estação de SLZ, devido às variações seculares do campo geomagnético vistos em sua revisão teórica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTELS, J. The standardized index, Ks, and the planetary index, Kp, Int. Union Geod. Geophys. IATME Bull., no. 12b. 97, 1949.
- BARTELS, J. The geomagnetic measures for the time variations of solar corpuscular radiation described for use in correlation studies in other geophysical fields, Ann. Int. Geophys. Year, 4, part 4, 127, 1957.
- BARTELS, J.; VELDKAMP, J. Geomagnetic and solar data, J. Geophys. Res., 54, 295, 1949.
- BARTELS, J.; HECK, N. H.; JOHNSTON, H. F., The three-hour range index measuring geomagnetic activity, J. Geophys. Res., 44, 411, 1939.
- CAMPBELL, W. H. Introduction to geomagnetic fields. First published. Cambridge University Press, 1997.
- CAMPBELL, W. H. Earth Magnetism: A Guide Tour Through Magnetic Fields. Complementary Science Series. Academic Press, 2001.
- CHAPMAN, S.; BARTELS, J. Geomagnetism: Volume 1 Geomagnetic and related phenomena. Third published. London: Oxford, 1940.
- DENARDINI, C. M. Estudo da eletrodinâmica da ionosfera equatorial durante o período de máxima atividade solar (1999-2002). 284 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.
- DENARDINI, C. M.; ABDU, M. A.; AVEIRO, H. C.; RESENDE, L. C. A.; ALMEIDA, P. D. S. C.; OLÍVIO, Ê. P. A.; SOBRAL, J. H. A.; WRASSE, C. M. Counter electrojet features in the Brazilian sector: simultaneous observation by radar, digital sounder and magnetometers, Ann. Geophys., 27, 1593-1603, doi:10.5194/angeo-27-1593-2009, 2009.

- GUARNIERI, F. L. Estudo da origem interplanetária e solar de eventos de atividade auroral contínua. 316 p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.
- HARTAMANN, G. A. A Anomalia Magnética do Atlântico Sul: Causas e Efeitos. Dissertação (Mestrado em Ciências Geofísicas) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2005.
- JURSA, A. S. Handbook of Geophysics and the Space Environment. U. S. Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom Air Force Base, Mass, 1985.
- KIRCHHOFF, V. W. J. H. Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991.
- KIVELSON, M. G.; RUSSEL, C. T. Introduction to space physics. Cambridge: Cambridge University Press, 1995.
- LANG, K. R. The Cambridge Encyclopedia of the Sun. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- LANG, K. R.; ZIRIN, H. Sun (astronomy): Sunspots. Britannica Encyclopedia. [on-line] Disponível em <<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/573494/Sun>> Outubro, 2011.
- LARSEN, K. P. About the Very Latest SOHO Images. Solar and Heliospheric Observatory Home Page. [on-line] Disponível em <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/image-description.html>> Outubro, 2011.
- LUCAS, A. Estudo da dinâmica da corrente de anel durante a fase principal de supertempestades magnéticas. 262 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.
- LÜHR, H. CHAMP Magnetic Field Recovery. GFZ Potsdam. [on-line] Disponível em <http://op.gfz-potsdam.de/champ/science/magnetic_SCIENCE.html> Março, 2012.

- MAUS, S.; MACMILLAN, S.; MCLEAN, S.; HAMILTON, B.; THOMSON, A.; NAIR, M.;
ROLLINS, C. The US/UK World Magnetic Model for 2010-2015. NOAA
Technical Report NESDIS/NGDC, 2010.
- MAUS, S.; ALKEN, P. Equatorial Electrojet. Geomagnetism [on-line]. Disponível em
<http://info.geomag.us/equatorial_electrojet.html> Março, 2012.
- MAYAUD, P. N., Indices Kn, Ks, et Km, pp. 1-155, Éditions du Centre National de la
Recherche Scientifique, Paris, 1968.
- MENDES JR., O. A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das
tempestades geomagnéticas moderadas (1978 - 1979). 307 p. Tese
(Doutorado em Ciência Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
(INPE), São José dos Campos, 1992.
- HALE, G. E.; NICHOLSON, S. B., Magnetic Observations of Sunspots 1917-1924.
Publ. Carnegie Inst. 498; Washington, DC: Carnegie Inst, 1938.
- PÁDUA, M. B. Estudo da indução eletromagnética na caracterização de estruturas
profundas sob a borda sul do cráton de São Francisco. 164 p. Tese
(Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.
- PRESS, W. H.; TEUSKOLSKY, S. A.; VETTERLING, W. T.; FLANNERY, B. P. Numerical
Recipes in C : The Art Of Scientific Computing. 2nd ed. Cambridge: Cambridge
University Press, 2002.
- ROSTOKER, G. Geomagnetic Indices, Rev. Geophys. Space Phys., 10, 157, 1972.
- SIMÕES, M. C. Identificação de distúrbios em magnetogramas associados às
tempestades geomagnéticas utilizando técnicas wavelets. 151 p. Dissertação
(Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas
Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2011.
- VUOLO, J. H. Fundamentos da Teoria de Erros. 2ª Ed. Edgard Blücher, 2000.