



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.16.16.32.08-TDI

ESTUDO PARA A QUALIFICAÇÃO DO ÍNDICE GEOMAGNÉTICO SUL-AMERICANO KSA EM COMPARAÇÃO COM O ÍNDICE GLOBAL KP

Andreas Vestena Bilibio

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Nelson Jorge Schuch, aprovada em 07 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NCHUCN>>

INPE
São José dos Campos
2017

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):

Presidente:

Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação (CPG)

Membros:

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dra. Carina de Barros Melo - Coordenação de Laboratórios Associados (CTE)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação de Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Duca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



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

sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.16.16.32.08-TDI

ESTUDO PARA A QUALIFICAÇÃO DO ÍNDICE GEOMAGNÉTICO SUL-AMERICANO KSA EM COMPARAÇÃO COM O ÍNDICE GLOBAL KP

Andreas Vestena Bilibio

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Nelson Jorge Schuch, aprovada em 07 de março de 2017.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3NCHUCN>>

INPE
São José dos Campos
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Bilibio, Andreos Vestena.

B492e Estudo para a qualificação do índice geomagnético sul-americano Ksa em comparação com o índice global Kp / Andreos Vestena Bilibio. – São José dos Campos : INPE, 2017.
xxii + 93 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2017/02.16.16.32.08-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

Orientadores : Drs. Clezio Marcos De Nardin, e Nelson Jorge Schuch.

1. Índice magnético Ksa. 2. Atividade magnética. 3. Clima espacial. I.Título.

CDU 52-334.5

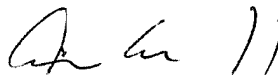
Copyright © 2017 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2017 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aluno (a): **Andreas Vestena Bilbio**
"ESTUDO PARA A QUALIFICAÇÃO DO ÍNDICE GEOMAGNÉTICO SUL-AMERICANO Ksa EM
COMPARAÇÃO COM O ÍNDICE GLOBAL Kp"

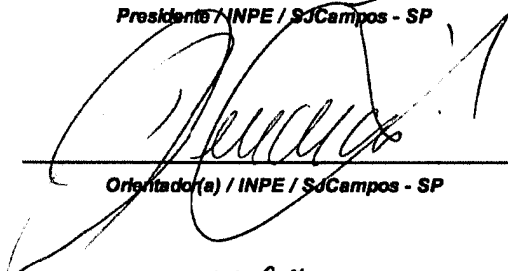
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
**Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente
Solar-Terrestre**

Dra. Alicia Luisa Clúa de Gonzalez



Presidente / INPE / SJCampos - SP

Dr. Clezio Marcos De Nardin



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Nelson Jorge Schuch



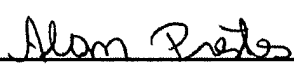
Orientador(a) / INPE / Santa Maria - RS

Dr. Severino Luiz Guimarães Dutra



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Alan Prestes



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 07 de março de 2017

“Não é na ciência que está a felicidade, mas na aquisição da ciência”.

Edgar Allan Poe

A minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço os meus orientadores **Dr. Clezio Marcos De Nardin** e **Dr. Nelson Jorge Schuch**, por todo o apoio, compreensão, amizade, contribuições e a competência, no qual foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Ao **Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE)**, por me fornecer a oportunidade de fazer o curso de Pós Graduação em Geofísica Espacial. Aos professores do Instituto que me ajudaram a evoluir como pessoa e como futuro pesquisador.

Aos meus colegas estudantes, colegas de sala, e principalmente, aos meus colegas de grupo de pesquisa. Nos quais foram fundamentais para obtermos os resultados que esperávamos para este Trabalho. Agradeço em especial meu colega de grupo e de sala, **Sony Su Chen**, onde com a sua experiência e conhecimento, me ajudou no desenvolvimento e entendimento na linguagem de programação e também com o fornecimento dos dados magnéticos necessários. Agradeço também de uma forma especial os Doutores **Juliano Moro** e **Laysa Cristina Araújo Resende** por todo o apoio técnico e pessoal que me foi fornecido.

Agradeço aos meus familiares por todo o apoio pessoal e técnico para que esse trabalho acontecesse. Principalmente aos meus pais, **Luiz Carlos Bilibio** e **Suzana T. Vestena Bilibio** por me darem todo o apoio pessoal tais quais, como o carinho, a compreensão e a educação que hoje eu possuo. Também ao meu irmão **Anderson Vestena Bilibio** por me fornecer o companheirismo, a amizade e ajuda necessária.

Ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico e Telecomunicação (CNPq/MCTIC)**, pelo fornecimento da bolsa de Mestrado através do projeto nº **132595/2015-0**, que me auxiliou na logística financeira para a conclusão deste trabalho. Além disso, agradeço ao Programa de **Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace)** e a **International Real-time Magnetic Observatory Network (Intermagnet)** por me fornecerem os dados necessários para a realização deste Trabalho.

E por fim, aos meus velhos e novos amigos por todo o apoio em momentos difíceis e complicados que tive ao longo dessa caminhada.

RESUMO

O objetivo deste estudo é qualificar um novo índice de atividade geomagnética, o índice geomagnético K sul-americano (K_{sa}), em relação ao índice magnético planetário K_p . O índice K_{sa} é desenvolvido pelo Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Nessa análise são utilizados dados magnéticos coletados pelos magnetômetros da Rede Embrace, e dados da *International Real-time Magnetic Observatory Network* (Intermagnet). Os magnetômetros medem a variação temporal do campo magnético terrestre e, possibilitam a identificação da deposição de energia no sistema magnetosférico terrestre. Nesse estudo são apresentados resultados da qualidade do equipamento utilizado para as medidas magnéticas, da metodologia utilizada para a qualificação do índice K_{sa} e da qualidade do índice K_{sa} frente ao índice de atividade magnética K_p . Os resultados da qualidade do índice K_{sa} são apresentados de acordo com a variação sazonal, e as condições magnéticas. Além disso, é discutida a correlação entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , a fim de validar esse novo índice. Os resultados mostram que o índice K_{sa} possui uma boa estimativa da atividade geomagnética no setor sul-americano. Apesar de apresentar certa discrepância em relação ao índice K_p .

Palavras-chave: Índice Magnético K_{sa} . Atividade Magnética. Clima Espacial.

**STUDY FOR THE QUALIFICATION OF THE SOUTH AMERICAN REGIONAL
GEOMAGNETIC INDEX K_{sa} IN COMPARISON WITH THE GLOBAL INDEX
 K_p**

ABSTRACT

The purpose of this study is to qualify a new geomagnetic activity index, the geomagnetic South American K (K_{sa}), concerning to the planetary magnetic index K_p . The K_{sa} index was developed by the Brazilian Study and Monitoring Program Space Weather (Embrace), in the National Institute for Space Research (INPE). In this analysis are used magnetic data collected by the magnetometers Embrace Network and data from the *International Real-time Magnetic Observatory Network* (INTERMAGNET). The magnetometers measure the temporal variation of the Earth's magnetic field and they allow the identification of the energy deposition in the terrestrial magnetospheric system. Therefore, in this study we present results of the quality of the equipment used for the magnetic measurements, the methodology used to qualify the K_{sa} index and the quality of the K_{sa} index versus the magnetic activity index K_p . The K_{sa} index quality results are presented according to the seasonal variation, and the magnetic conditions. Moreover, the correlation is discussed between magnetic K_{sa} and K_p ratio in order to validate this new index. Finally, the results show that the K_{sa} index has a good estimate of geomagnetic activity in the South American sector. Although it presents a discrepancy in relation to the index K_p .

Keywords: K_{sa} Magnetic Index. Magnetic activity. Space weather.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.2 - Representação das correntes magnetosféricas.....	10
Figura 2.3 - Dimensão das camadas internas da Terra.	13
Figura 2.4 - Sistema de coordenadas polares do campo magnético terrestre.	21
Figura 2.5 – Elementos do vetor campo magnético.	24
Figura 2.6 – O procedimento passo-a-passo para gerar K_p	27
Figura 2.7 – Exemplo do índice K_p mostrando a sua classificação de atividade magnética dada em cada 3 horas ao longo de quatro dias.	29
Figura 2.8 – Distribuição no globo de todos os observatórios que compõem a construção do índice K_p	30
Figura 2.9 – Exemplo dos índices de atividade magnética AU, AL, AE e AO dado em tempo real para o período de um dia em hora universal.	32
Figura 2.10 – Exemplo do índice Dst para o intervalo de 15 dias ao longo do mês de Junho de 2016, gerado a cada uma hora.	33
Figura 2.11 – Distribuição no globo das estações envolvidas no desenvolvimento do índice K_m	35
Figura 2.12 – Exemplo do índice K_{sa} obtido a cada 3 horas através dos dados das estações magnéticas da Rede Embrace de Magnetômetros para um período de 9 a 12 de março de 2016.	37
Figura 2.13 – Distribuição no globo de todas as estações que compõem o índice K_{sa} . Mapa gerado em Dezembro de 2016.	37
Figura 3.1 – Magnetômetro <i>fluxgate</i> para medida direcional do campo geomagnético.	41
Figura 3.2 – Exemplo de medida magnética realizada pelos equipamentos do tipo <i>fluxgate</i> da Rede Embrace de Magnetômetros na estação magnética de Vassouras – RJ, com a intensidade total das componentes H , D e Z do campo magnético terrestre.....	42
Figura 3.3 - Exemplo de magnetômetro da Rede do Clima Espacial instalado em Cachoeira Paulista.	44

Figura 4.1 - a) Espectro de potência obtido com os dados da Rede Embrace.	
b) Espectro de potência obtido com os dados da Rede Intermagnet.	
.....	53
Figura 4.2 – Espectro de potência mostrando (a) a parte real do espectro de potência da componente H ; (b) o logaritmo do mesmo espectro de potência versus o logaritmo da frequência; (c) uma suavização de 30 pontos do espectro apresentado no item anterior, porém limitado à faixa de frequência entre 0,001 e 0,01 Hz; e (d) a diferença entre a suavização apresentada em (c) e o espectro apresentado em (b), limitado à mesma faixa de frequência, todos obtidos pela análise dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro da Rede Embrace (VSSe) no dia 2 de Junho de 2015.	56
Figura 4.3 – Espectro de potência mostrando as mesmas análises, com as mesmas condições mostradas na Figura 4.2. Todos obtidos pelas análises dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro da Rede Intermagnet (VSSi) no dia 2 de Junho de 2015.	57
Figura 4.4 – Variação dia-a-dia do coeficiente angular calculado para os dados magnéticos da Rede Embrace (linha azul) e da Rede Intermagnet (linha vermelha), superposto pela variação da temperatura média diária no sensor do magnetômetro, obtidos ao longo dos dias do mês de Junho de 2016, no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).....	59
Figura 4.5 – Correlação linear (linha vermelha) entre os coeficientes angulares (círculos) obtidos dos ajustes lineares aos espectros de potência dos dados magnéticos da Rede Embrace ($bHEM$) e dos dados magnéticos da Rede Intermagnet ($bHIN$), obtidos ao longo dos dias do mês de Junho de 2016, no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).....	62
Figura 4.6 – Variação mês-a-mês dos coeficientes angulares dos espectros de potência calculado para os dados magnéticos da Rede Embrace (linha azul) e da Rede Intermagnet (linha vermelha), superposto	

	pela variação da temperatura média mensal no sensor do magnetômetro, obtidos ao longo dos meses de Junho de 2015 a Julho de 2016 no Observatório Magnético de Vassouras (VSS)...	63
Figura 4.7	– Correlação linear das mesmas grandezas apresentadas na Figura 4.5, mas agora utilizando os dados magnéticos da Rede Embrace (<i>bHEM</i>) e dos dados magnéticos da Rede Intermagnet (<i>bHIN</i>), obtidos ao longo dos meses de Junho de 2015 a Julho de 2016, no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).....	64
Figura 4.8	– Fluxograma de comparação da metodologia de construção dos índices de atividade magnética K_{sa} e K_p	67
Figura 4.9	– Valores dos Índices de atividade magnética K_p , K_{sa} e $K_p *$ para o período de 01 a 03 de abril de 2016.....	70
Figura 4.10	– Dispersão entre os valores dos índices de atividade magnética $K_p *$ e K_p , obtidos a cada 3 horas para todos os dias do mês de Abril de 2016, perfazendo 240 valores para cada índice, sobreposto pela correlação linear entre eles.	71
Figura 4.11	– Correlação Linear com as mesmas grandezas e período que foi apresentado na Figura 4.10. Mas esta Figura apresenta a correlação dos Índices de atividade magnética K_{sa} versus $K_p *$ ao longo dos dias, para o período de todo o mês de Abril de 2016. ..	72
Figura 4.12	– Correlação linear para 7 meses do índice K_{sa} versus K_p , gerados a cada 3 horas ao longo dos dias, para o período de dados magnéticos de 01 de junho a 31 de dezembro de 2015, fornecidos pelas estações magnéticas apresentadas nas Tabelas 3.1 e 4.1, com dados magnéticos disponíveis.....	73
Figura 5.1	– Correlação linear ano-a-ano entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , dada por valores de 3-a-3 horas, obtido a partir dos dados magnéticos dos magnetômetros da Rede Embrace e Intermagnet, para os meses D, para o período de 2011 a 2015.	76
Figura 5.2	– Correlação linear ano-a-ano entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , dada por valores de 3-a-3 horas, obtido a partir dos dados	

	magnéticos dos magnetômetros da Rede Embrace e Intermagnet, para os meses J, para o período de 2011 a 2015.	77
Figura 5.3 –	Correlação linear ano-a-ano entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , dada por valores de 3-a-3 horas, obtido a partir dos dados magnéticos dos magnetômetros da Rede Embrace e Intermagnet, para os meses E, para o período de 2011 a 2015.	78
Figura 5.4 –	Correlação linear para intervalos com valores de 3 horas distintas do índice K_{sa} versus K_p para períodos calmos, normais e perturbados, para o período de dados magnéticos de 01 de junho a 31 de dezembro de 2015.	80
Figura 5.5 –	Distribuição dos coeficientes lineares (curva azul) e angulares (curva vermelha) das retas dos ajustes lineares, obtidas das correlações lineares entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , ao longo dos meses de funcionamento da Rede Embrace, para todas as estações magnéticas em funcionamento e dados magnéticos disponíveis, ou seja, de outubro de 2010 a abril de 2016.	82

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 – Valores de K e $\Delta\delta_{\max}$ de um observatório situado a 50° de latitude geomagnética.....	27
Tabela 2.2 – Conversão dos valores de K para K_s para o observatório de Lerwick.....	28
Tabela 2.3 – Valores do índice a_p para um dado valor de K_p	30
Tabela 2.4 – Classificação das Tempestades Magnéticas.....	33
Tabela 3.1 – Localização geográfica das estações magnéticas do Embrace (e estações candidatas) com sua correspondente latitude magnética, ângulo de inclinação, limite mínimo para índice K da estação igual a 9 (K_9) e código designado, além do país (UN).....	43
Tabela 4.1 – Tabela com a lista de observatórios magnéticos que contribuem com os dados magnéticos para a construção do índice de atividade magnética K_p	68

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1
2	RELAÇÃO SOL-TERRA E O AMBIENTE MAGNÉTICO TERRESTRE..... 5
2.1.	Característica do Sol e seus efeitos na Terra..... 5
2.2.	A interação solar terrestre 7
2.2.1.	Magnetosfera terrestre..... 7
2.2.2.	Correntes magnetosféricas 9
2.2.3.	A corrente de anel 10
2.2.4.	Dínamo ionosférico..... 11
2.3.	Estrutura e formação do campo magnético terrestre 12
2.3.1.	Resumo histórico dos estudos do campo magnético terrestre 14
2.3.2.	Composição do campo magnético terrestre..... 15
2.3.3.	Variações magnéticas observadas em período calmo 17
2.3.4.	Variações magnéticas observadas em período perturbado 17
2.4.	Representação do campo magnético terrestre 18
2.4.1.	Componente interna (campo dipolar) 21
2.4.2.	Componente interna (campo não dipolar) 22
2.4.3.	Componentes externas (variações solares)..... 23
2.4.4.	Decomposição do campo magnético em suas componentes 24
2.5.	Índices de atividade magnética 26
2.5.1.	Índice Kp 26
2.5.2.	Índice Ap e ap 30
2.5.3.	Índice AE 31
2.5.4.	Índice Dst 32
2.5.5.	Índice Km, Ks e Kn 33
2.5.6.	Índice Ksa 35
3	INSTRUMENTAÇÃO 39
3.1.	Classificação dos Magnetômetros..... 39

3.1.1.	Magnetômetro <i>fluxgate</i> (ou núcleo saturado)	40
3.1.2.	Rede Embrace de Magnetômetros	42
4	METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS	45
4.1.	Análise de qualidade dos dados magnéticos.....	45
4.1.1.	Análise de Fourier.....	46
4.1.2.	Transformada rápida de Fourier.....	47
4.1.3.	Seleção de dados e ajustes lineares.....	51
4.1.4.	Resultados da análise de qualidade dos dados	58
4.2.	Análise do método de construção do Ksa	66
4.3.	Metodologia para a comparação estatística do Ksa com o Kp	72
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
6	CONCLUSÕES.....	85
6.1.	Trabalhos futuros.....	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Os magnetômetros são equipamentos utilizados para medir a variação temporal do campo magnético terrestre (intensidade, direção e sentido). Geralmente são usados em estudos de geofísica, relacionados com o campo magnético da Terra e com a magnetosfera terrestre (TRIVEDI et al, 1995; DENARDINI et al, 2009) e podem oferecer uma ferramenta de identificação da deposição de energia no sistema magnetosférico terrestre devido a eventuais fenômenos relacionados com a relação solar-terrestre através da construção de índices de atividade magnética que dão uma percepção de quão intensa são as atividades magnéticas (TAKAHASHI et al, 2001).

Entre os índices mais comumente encontrados está o Kp , o qual é indicador do nível geral de perturbação que tem a pretensão de ser planetário, como designa sua letra p . Ele é construído a partir de vários observatórios magnéticos e é obtido a cada 3 horas (ROSTOKER, 1972). Outros índices similares a este primeiro são: Km , Ks , Kn . O Km (“ m ” mundial – mundial) é um índice com a mesma finalidade do índice Kp , enquanto o Ks (“ s ” South – Hemisfério Sul) e o Kn (“ n ” North – Hemisfério Norte) são índices que indicam a atividade magnética regional (MAYAUD, 1980).

Nesta dissertação apresentaremos os resultados do estudo para a qualificação de um novo índice magnético regional sul-americano, o índice magnético Ksa , e uma comparação de seu desempenho com índices globais. Este estudo utiliza dados magnéticos coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros (DENARDINI et al., 2016) para se obter o índice Ksa e coletados pela *International Real-time Magnetic Observatory Network* (Rede Intermagnet) para se obter o índice Kp . Além disso, usa dados desta última para realizar comparações entre as medições das variações magnéticas com aquelas medições realizadas pelos magnetômetros da rede brasileira.

O índice K_{sa} (“sa” South American – América do Sul) é um índice de atividade magnética que possibilita estudar os efeitos regionais da atividade magnética da América do Sul. Deste modo, o presente trabalho contribui no sentido de estabelecer um sistema de monitoramento e efetuar previsões de tempestades magnéticas, que podem afetar os sistemas tecnológicos na região de cobertura da Rede Embrace de Magnetômetros. Neste sentido, o presente Trabalho de Pesquisa possui os seguintes objetivos específicos:

- A. Desenvolver uma metodologia para qualificar o índice de atividade magnética sul-americano K_{sa} ;
- B. Aplicar a metodologia desenvolvida para estudar o comportamento do K_{sa} em comparação com as variações do K_p (comparando-os);
e
- C. Observar e estudar as similaridades e diferenças entre esses índices com relação à variação sazonal, condições magnéticas e atividade solar (tentativa).

Como parte integrante desta Dissertação, apresentamos no Capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre conceitos que consideramos relevantes para a compreensão da importância da criação de um índice magnético. Neste contexto, os conceitos básicos da ciência que estuda o campo magnético terrestre são também descritos, os quais incluem fatos históricos que consideramos importantes para o começo do estudo do magnetismo terrestre. Neste capítulo também tratamos sobre os efeitos dos fenômenos solares e suas consequências no campo magnético terrestre, além de sua origem e de suas características. Em seguida, apresentamos neste capítulo os índices de atividade magnética, bem como sua forma de aplicação na classificação da intensidade das tempestades magnéticas.

No Capítulo 3 descrevemos a instrumentação utilizada para realizar esse Trabalho de Pesquisa, o que inclui a descrição da rede disponível de

magnetômetros e suas características básicas para realizar as medições do campo magnético terrestre.

No Capítulo 4, abordamos a metodologia utilizada. A teoria utilizada para subsidiar a discussão sobre a diferença entre os índices K_{sa} e K_p é apresentada. Uma análise sobre a qualidade do K_{sa} , que entendemos ser um resultado, é apresentada no capítulo seguinte.

Apresentamos os resultados e as discussões no Capítulo 5, o qual se encerra com uma análise comparativa entre o índice K_{sa} e o K_p , resumida a uma análise da característica do índice K_{sa} em situações de períodos calmos, normais (que incluem todos os dados coletados, sejam eles em dias de atividade magnética calma ou perturbada) e perturbados.

Finalmente, as conclusões são apresentadas no Capítulo 6. Adicionalmente, apresentamos uma perspectiva de Trabalhos Futuros que possam ser desenvolvidos a partir dos resultados das atividades que foram desenvolvidas nessa Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-graduação em Geofísica Espacial do INPE/MCTIC. Em seguida a este último, são listadas às referências bibliográficas que foram utilizadas neste trabalho de pesquisa.

Além disso, é importante ressaltar aqui que, desenvolvemos, testamos, validamos e aplicamos a metodologia utilizada na construção do índice de atividade magnética K_{sa} . Portanto, podemos considerar que a metodologia utilizada na qualificação do índice K_{sa} , também é um resultado. E que, esse índice não foi elaborado para confrontar ou competir com o índice de atividade magnética K_p , mas sim, para contribuir e elucidar se existem algumas similaridades ou diferenças na atividade geomagnética no setor da América do Sul.

2 RELAÇÃO SOL-TERRA E O AMBIENTE MAGNÉTICO TERRESTRE

Neste capítulo apresentamos alguns conceitos sobre o ambiente magnético terrestre, pertinentes a este Trabalho de Pesquisa. Inicialmente, são apresentados temas associados aos fenômenos solares, seguidos de conceitos referentes à magnetosfera terrestre e suas correntes elétricas. São discutidos temas do ambiente magnético terrestre, incluindo um pequeno histórico das pesquisas magnéticas e a forma como o campo magnético é modelado. Finalmente, são discutidos tópicos relacionados aos índices magnéticos existentes.

2.1. Característica do Sol e seus efeitos na Terra

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e apresenta uma variação da atividade solar caracterizada por ciclos. A coroa solar, que diferentemente da atmosfera terrestre, não está em equilíbrio hidrostático, se expande continuamente, levando matéria da coroa solar para o espaço interplanetário. Esse fluxo de matéria foi chamado de “vento solar” por [Parker \(1958\)](#). O vento solar é um contínuo fluxo de partículas, principalmente elétrons e íons de Hélio, caracterizado por apresentar variações de velocidade em períodos calmos e perturbados. Com isso, a variação da atividade solar tem potencial de causar alterações nos ambientes espaciais próximos a Terra e em alguns ambientes da própria Terra.

O ciclo solar é classicamente caracterizado por uma variação na quantidade de manchas solares, as quais estão intimamente ligadas com as explosões solares e, por consequente, com a atividade solar. Quanto maior o número de manchas, mais alta a atividade. O inverso também é verdadeiro. Essa modificação quantidade de manchas solares, capazes de produzir eventos eruptivos gerando estruturas em direção da Terra, tem potencial de causar perturbações na sua atmosfera e na magnetosfera da Terra. Além de tudo isso, mesmo na ausência de manchas solares, buracos coronais podem surgir na superfície solar, os

quais são capazes de produzir feixes rápidos de plasma solar na direção da Terra, causado interações com a magnetosfera.

Como descrito acima, associadas com as manchas solares estão as ejeções de massa coronal (CMEs, do inglês *Coronal Mass Ejection*). Nestas ejeções, a coroa solar pode liberar uma massa de até 1 bilhão de toneladas. Essas erupções por sua vez aceleram o vento solar entre 400 km/s a 1.000 km/s, com densidade de até duas ordens de grandeza superior à densidade normal do vento solar (KAMIDE; CHIAN, 2007).

No que tange aos buracos coronais, essas regiões apresentam-se mais escuras que a vizinhança, pois possuem densidade mais baixa de partículas, com as linhas de campo magnético abertas, que se fecha em outras regiões na heliosfera. Quando o buraco coronal está em posição “favorável¹” em relação à Terra, o vento solar pode atingir a Terra com uma velocidade acima de 700 km/s. Ou seja, pode afetar o campo magnético terrestre e provocar uma tempestade magnética, em especial na região auroral.

Também é importante lembrar-se do fato que o vento solar apresenta uma característica geométrica similar a uma espiral, provocando um ângulo θ no plano da eclíptica. Isso se deve à configuração do campo magnético solar no meio interplanetário. Deste modo, à medida que a Terra percorre o plano da eclíptica, independente do período do ciclo solar, podemos esperar algumas pequenas modificações no campo magnético terrestre devido à interação do vento solar com a magnetosfera terrestre (HARGREAVES, 1992).

Em todos os casos, seja o fenômeno causado por atividades magnéticas solares no período calmo ou perturbado, o importante é que a interação de partículas carregadas advindas do meio interplanetário ao se

¹ Definido para os propósitos desta Dissertação como a região no centro do disco solar com relação ao equador solar e um pouco a oeste do meridiano central no momento da observação a partir da Terra.

chocarem com o campo magnético terrestre interfere no sistema de correntes magnetosféricas.

2.2. A interação solar terrestre

A interação do campo magnético terrestre com o meio interplanetário condiciona a magnetosfera terrestre, que é definida como a região em que o campo geomagnético domina os processos físicos das partículas vindas por meio do vento solar e do meio interplanetário. Nesta, representada na Figura 2.1, existe uma região que parece separar o ambiente da Terra do ambiente do espaço. Esta região é conhecida como Bainha magnética, e é a região que limita a interação do campo magnético terrestre com o campo do meio interplanetário. Ela vem logo após a região conhecida como “frente de choque”, onde as partículas advindas do espaço se chocam com a magnetosfera terrestre e provocam uma onda de choque. (AKASOFU; CHAPMAN, 1972).

2.2.1. Magnetosfera terrestre

A magnetosfera terrestre é caracterizada pela ação do vento solar na sua estrutura, assim como é mostrado na Figura 2.1. Essa estrutura pode ser subdividida em algumas regiões principais, que são definidas conforme descrito abaixo:

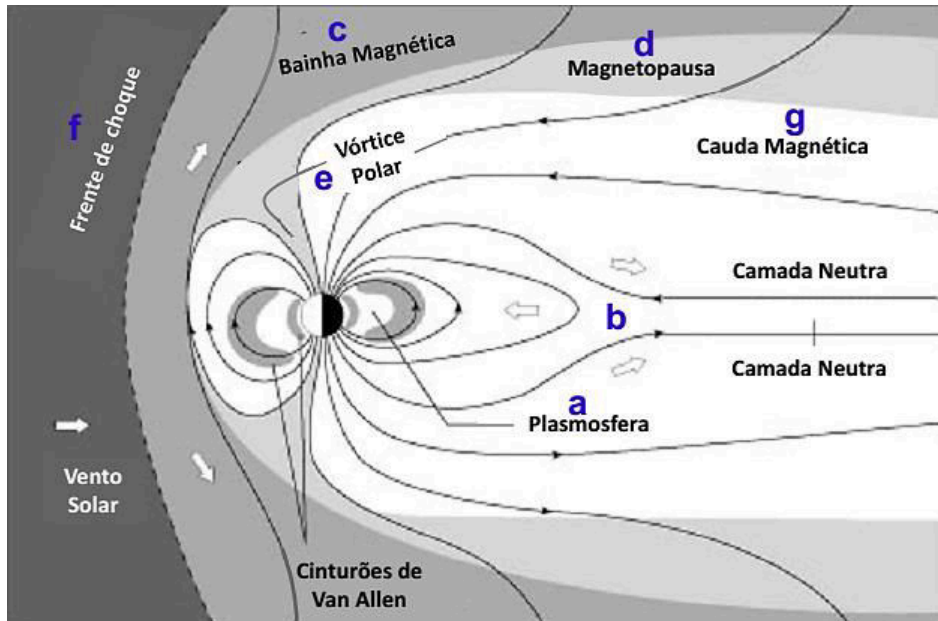
- a) Plamasfera (*plasmasphere*): é a região interna da magnetosfera que contem partículas aprisionadas (cinturões de radiação de Van Allen) e que se caracteriza por conter plasma mais denso, mais frio e de menores energias;
- b) Lâmina Neutra da Cauda (*Plasma sheet* ou *Neutral sheet*): é a região instável localizada na porção noturna da Terra onde fluem correntes elétricas e onde ocorre a reconexão magnética levando a entrada de partículas que gera as auroras;
- c) Bainha magnética (*Magnetosheath*): é a região seguinte à região de choque, onde se observa grande turbulência e que serve de

transição entre a onda de choque do vento solar e a magnetosfera propriamente dita;

- d) Magnetopausa (*Magnetopause*): é o limite da magnetosfera que separa as regiões do campo magnético interplanetário da região do campo geomagnético, sendo que a magnetosfera está contida nesta cavidade cuja dimensão na porção da Terra que está diretamente iluminada pelo Sol atinge até $10 R_E$ (raios terrestres) e no lado terrestre oposto ao lado iluminado a magnetopausa pode atingir até $> 60 R_E$;
- e) Vórtice Polar (*Polar cusp*): é a região sob os polos onde o campo é mais fraco e na qual ocorrem precipitações de partículas, sendo também nessas regiões que se observam as linhas de campo verticais em relação à superfície Terra;
- f) Região de Choque (*Bow Shock*): é a região onde o vento solar encontra a magnetosfera, provocando uma onda de choque; e
- g) Cauda magnética (*Tail Lobe*): é a extensão da magnetosfera no lado noturno terrestre, cujo limite não está bem definido, mas estima-se que chega em $\approx 1000 R_E$ (HARGREAVES, 1992; JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996; KIRCHHOFF, 1991).

A Figura 2.1 ilustra esquematicamente onde cada uma dessas regiões se localiza na magnetosfera terrestre. Neste ponto, cabe lembrar que a localização exata depende das ações advindas do meio interplanetário e do Sol, que podem ser no sentido de comprimir ou expandir cada uma delas. Portanto, a sua estrutura mantém as características, mas sofre deformações, ou seja, achatamento e prolongamento no lado diurno e noturno respectivamente (JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996; KIRCHHOFF, 1991).

Figura 2.1 - Representação esquemática da magnetosfera terrestre.



Fonte: Modificada de [Hargreaves \(1992\)](#).

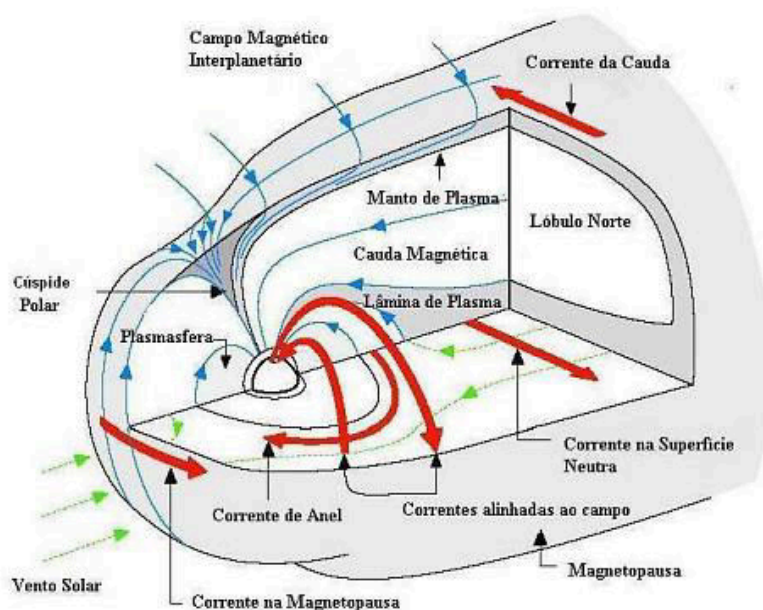
A maioria das partículas que bombardeiam a magnetosfera terrestre é advinda do Sol, havendo uma dependência com a intensidade do seu ciclo e da configuração do campo magnético. Ao se chocarem com a magnetosfera terrestre (e eventualmente penetrarem), essas partículas carregadas ocasionam fenômenos que proporcionam efeitos no próprio campo magnético terrestre que podem ser medidos na superfície terrestre. Estes efeitos podem levar os sistemas tecnológicos atuais a observarem problemas tais como correntes induzidas, em dutos de petróleo e redes elétricas ([MOLDWIN, 2008](#)).

2.2.2. Correntes magnetosféricas

A dinâmica dos elétrons, prótons e íons em uma região de campo magnético gera os sistemas de correntes elétricas presentes na magnetosfera, representadas na Figura 2.2. Estas correntes promovem alterações no formato da magnetosfera, conectando-se em diferentes regiões desta e podem demarcar regiões de fronteira, como a corrente da magnetopausa (Chapman-Ferraro) e a corrente da cauda. Isso tudo, porque o vento solar tem valores pouco variáveis em períodos calmos e

pelo fato da corrente Chapman-Ferraro estar na fronteira do campo magnético terrestre e do meio interplanetário. Ela é a primeira a receber diretamente as ações da atividade solar, tanto em períodos calmos, quanto, em períodos perturbados. A corrente Chapman-Ferraro intensifica todos os outros sistemas de correntes quando há uma forte explosão solar que atinge a Terra de forma geofetiva levando a uma tempestade magnética, promovendo assim uma variação significativa no campo magnético terrestre. Esta variação pode ser observada com bastante intensificação nas regiões polares causadas pelas correntes alinhadas ao campo magnético, dando origem ao eletrojato auroral. Em outras regiões, esta variação ocorre com menor intensidade, causada pelo aumento da corrente anelar (JACOBS, 1987; JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996; HARGREAVES, 1992; HEIKKILA, 2011).

Figura 2.2 - Representação das correntes magnetosféricas.



Fonte: Modificada de Moldwin (2008).

2.2.3. A corrente de anel

A corrente de anel é uma corrente especialmente importante para o nosso trabalho, por estar intimamente relacionada com um índice magnético

específico. Ela se encontra entre 4 ou/e mais raios terrestres, onde partículas entram pela cauda e são aprisionados no campo magnético terrestre. Assim, se movem em direções opostas, ocasionando uma corrente elétrica que induz um \vec{B} contrário ao da Terra. Essa corrente pode ser verificada na componente H do campo magnético terrestre pela medida do índice magnético Dst (Dst, do inglês *Disturbance Storm Time*) (JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996).

A intensificação de partículas carregadas causam efeitos na magnetosfera devido a sua dinâmica em uma região com campo magnético. A interação é descrita pela força de Lorentz que pode ser representada pela relação:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E}) \quad (2.1)$$

Contudo, alguns dos efeitos proporcionados por essa intensificação nesse sistema de correntes podem ser percebidos na superfície terrestre, tais como, as correntes induzidas em oleodutos.

2.2.4. Dínamo ionosférico

Outra forma de interação solar-terrestre ocorre no nível ionosférico, já bem próximo à superfície terrestre quando comparada com a localização da magnetosfera. De forma sucinta, a radiação do Sol causa ionização dos átomos e moléculas presentes na alta atmosfera. Surge um efeito de dínamo, devido ao sistema de ventos horizontal na alta atmosfera que leva os íons e elétrons a se moverem. As moléculas neutras colidem com íons e elétrons fazendo se moverem na direção do vento.

No entanto, a presença do campo magnético modifica o deslocamento das partículas carregadas. Os íons apresentam girofrequência menor que a frequência de colisão e os elétrons apresentam girofrequência maior que a frequência de colisão nas alturas em que o dínamo é observado. Essa diferença faz com que surja um campo elétrico \vec{E} na região E da ionosfera, que pode ser descrito pelas seguintes equações:

$$\vec{j} = \sigma \cdot ((\vec{v}) \times \vec{b} + \vec{e}) \quad (2.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{j} = 0 \quad (2.3)$$

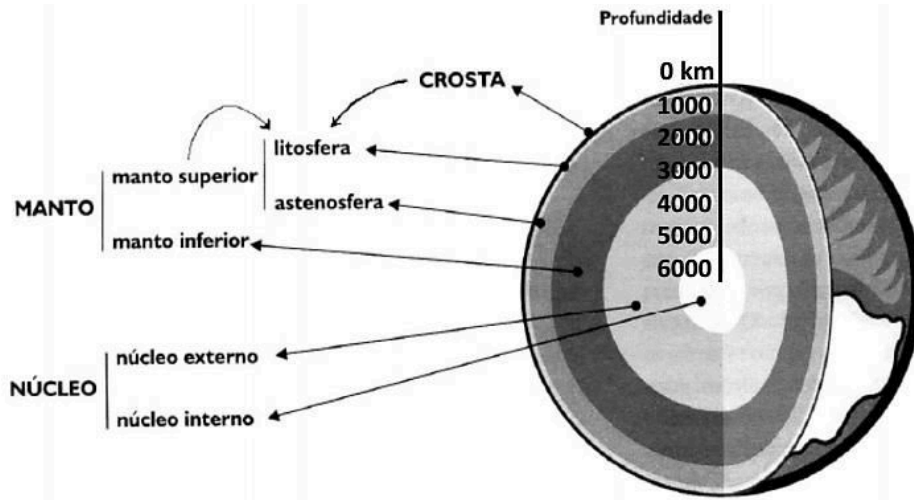
Essas equações são capazes de descrever uma corrente elétrica intensa pertencente ao sistema ionosférico e que circula na região E ionosférica ao longo do equador geomagnético, no lado diurno, com sentido para Leste, conhecido como eletrojato equatorial (FORBES, 1981). Esse sistema de corrente elétrica contribui na intensidade total do campo geomagnético medido por instrumentos em torno do equador magnético.

2.3. Estrutura e formação do campo magnético terrestre

A Terra é provida de materiais e compostos que a estruturam em três camadas principais, os quais nos permitem entender melhor a formação do campo magnético terrestre. Ela é dividida entre núcleo, manto e a crosta (KIRCHHOFF, 1991). As camadas mais internas podem ser estudadas através de estações sísmicas distribuídas por toda a Terra. Já a camada externa pode ser estudada através de satélites, com cargas úteis em foguetes de sondagens e instrumentos na superfície terrestre.

Estudos com medidas em abalos sísmicos baseados na propagação de ondas longitudinais compressionais (ondas P – onda primária, rápida) e ondas transversais de deformação (ondas S – onda secundária, lenta) são comumente usados para determinar as regiões que definem as camadas internas da Terra (MUGGLER, 2005), conforme ilustradas na Figura 2.3.

Figura 2.3 - Dimensão das camadas internas da Terra.



Fonte: Muggler et al. (2005).

A crosta é a camada sólida que caracteriza a superfície terrestre e da forma aos continentes e a base dos oceanos, ou seja, é a região mais externa em relação ao centro da Terra. O manto é a região que envolve o núcleo da Terra. Ele é sólido e tem respostas elásticas quando submetido a um abalo sísmico, podendo ser ainda subdividido em manto interno e externo. O núcleo da Terra é caracterizado em duas regiões: o núcleo interno e o externo, mostrados na Figura 2.3. O núcleo interno é sólido até aproximadamente 1.200 *km* e de caráter esférico, enquanto o núcleo externo é líquido. A confirmação da característica da região acima de 1.200 *km* do centro da Terra ser líquida é demonstrada no estudo pela diferença de propagação entre os modos longitudinais e transversais, uma vez que ondas transversais não se propagam em líquido.

O núcleo é também o principal responsável pela geração do campo magnético terrestre principal. Estudos arqueomagnéticos e paleomagnéticos corroboram com a tese acima de que o núcleo externo terrestre pode ser líquido. Adicionalmente, acredita-se que ele é caracterizado com temperaturas altas devido ao magma derretido e por correntes de convecção (MERRIL; McELHINNY, 1983). Essas características terrestres levam especialistas a afirmar que cerca de 99%

do campo magnético terrestre principal é produzido dentro da Terra. Este fato está associado aos possíveis processos:

- Convecção do núcleo;
- Gradientes de temperatura;
- Correntes termoelétricas; e
- Momento de dipolo.

2.3.1. Resumo histórico dos estudos do campo magnético terrestre

Existem relatos históricos de que o magnetismo era estudado e utilizado pelos chineses desde os séculos 2 e 3 A.C. Desde o ano 300 A.C., eles conheciam as propriedades do “lodestone”, um componente do mineral magnetita (magneto, rocha com propriedades magnéticas). Por volta do século 7 D.C., os chineses já faziam uso da bússola nas suas navegações (MERRIL; McELHINNY, 1983). Posteriormente ocorreram várias descobertas e estudos com publicações tais como aquela oferecida pelo enciclopedista chinês Sho-Kua, que descreveu o imã apontando para o Sul geográfico. Já no continente europeu, existem relatos de relógios de Sol feitos em Nuremberg, o qual mostraram marcas da declinação magnética atualmente conhecidas como gráficos de “William Whiston” de inclinação. Mais tarde, o pesquisador Canton verificou que as variações diárias solares encontradas neste relógio solar parecem ser maiores no verão do que no inverno (CHAPMAN; BARTELS, 1962).

Em 1269, um soldado escreveu uma carta onde relatava leis sobre atração magnética obtidas por um experimento que foi realizado com uma esfera magnética. Esse soldado se chamava Pierre Pélerin, mas utilizava um pseudônimo de Petrus Peregrinus. Sua carta denominada de “Epistolo de Magnete” é considerada o primeiro trabalho de pesquisa no qual se tratava de física experimental, modernamente determinado de geomagnetismo. Petrus traçou linhas de direção que o ferro assumia e verificou que elas circundavam a esfera, convergindo para dois pontos antipodais o qual chamou de polos magnéticos, por analogia aos polos geográficos. Deste ponto, cremos que se iniciou o estudo magnético que

levou ao estudo do Geomagnetismo (MERRIL; McELHINNY, 1983). O Geomagnetismo é, portanto, dentro de nossa visão, uma ciência que estuda a forma e o comportamento do campo magnético da Terra e sua relação com outros fenômenos geofísicos.

Em 1600, William Gilbert em “De Magnete” postulou o que se tornou uma das hipóteses mais aceitáveis sobre o campo magnético terrestre. Ele afirmou que a origem deste campo magnético era de fonte interna e fez a analogia da Terra com um grande ímã permanente. Mais tarde sua teoria foi derrubada por outras observações e teorias concorrente. Em 1839, Carl Friederich Gauss melhorou as técnicas de observações diretas do campo fazendo a primeira medida da intensidade total e introduziu o método matemático dos harmônicos esféricos, o qual é utilizado até hoje (MERRIL; McELHINNY, 1983).

2.3.2. Composição do campo magnético terrestre

O campo magnético terrestre que têm sido estudado e observado ao longo de muitos anos, e hoje é definido em função do que acreditamos que sejam as suas componentes contributivas para o campo geomagnético, as quais temos:

- As correntes elétricas que circulam, profundamente, no interior da Terra (campo principal);
- O material magnetizado da crosta terrestre (campo local);
- As correntes que circulam nas camadas ionizadas da alta atmosfera (ionosfera e magnetosfera); e
- As correntes induzidas na crosta terrestre e oceanos.

Deste modo, na sua forma matemática, podemos definir o campo magnético terrestre pela Equação 2.4:

$$\vec{B}(r, t) = B_p(r, t) + B_c(r, t) + B_e(r, t) + B_i(r, t) \quad (2.4)$$

ou

$$\vec{B} = B(J_{\text{núcleo}}, M_{\text{crosta}}, J_{\text{externo}}, J_{\text{induzido}}) \quad (2.5)$$

no qual os termos, p designa o campo gerado no núcleo ($J_{\text{núcleo}}$, principal contribuinte) dado pelas correntes elétricas que o circundam; c designa o campo gerado na crosta terrestre dado pelo material magnetizado (M_{crosta}); e designa o campo gerado na alta atmosfera (J_{externo} , meio externo a Terra) por correntes que circulam nas camadas ionizadas; e i designa o campo gerado na crosta terrestre e oceanos por correntes induzidas (J_{induzido}); contribuindo assim a componente que se refere ao campo principal \vec{B} .

Outra forma de interpretarmos esta equação é que o campo magnético terrestre é formado por um conjunto de sistemas, sendo o predominante aquele oriundo do sistema de dínamo que opera no núcleo da Terra. A teoria do dínamo foi desenvolvida por W. M. Elsasser e Sir Edward C. Bullard-H. Gellman nos anos 1940-1950. A ação de correntes elétricas que circulam no interior da Terra é a principal hipótese para origem do campo geomagnético, assumindo que o interior da Terra seja constituído de material condutor, capaz de manter correntes elétricas circulando sem grandes dificuldades. Assim o tempo de decaimento de um sistema elétrico de correntes deve ser muito pequeno quando comparado com a idade geológica do planeta.

O ponto crucial desta teoria é encontrar um mecanismo que consiga manter as correntes elétricas. Por isso, a teoria afirma que o núcleo líquido é um fluido altamente viscoso que gira lentamente em relação à crosta sólida, o qual envolve esse núcleo, atuando como um gerador de correntes elétricas que giram ao seu redor, tornando-se eletromagneticamente autoexcitado. Esta rotação é responsável pela característica dipolar básica do campo magnético da Terra e tem um sentido de Leste para Oeste. Além dessas correntes, também há outros sistemas estacionários de correntes (grandes vórtices no núcleo externo) responsáveis pela superposição de características não dipolares ao campo geomagnético (AKASOFU; CHAPMAN, 1972; COOK, 1975). Além da componente interna do campo dipolar há componentes externas, as quais têm origem na ionosfera e na parte exterior à superfície terrestre.

2.3.3. Variações magnéticas observadas em período calmo

A variação do campo magnético externo é caracterizada: (a) pela radiação solar durante a noite, que cai abruptamente na alta atmosfera/ionosfera diminuindo as correntes ionosféricas; (b) pela variação lunar que ocorrem devido aos efeitos de maré sofridos pela ionosfera; e (c) por variações rápidas que estão associadas a perturbações no interior ou nas bordas da magnetosfera (HARGREAVES, 1992; MERRIL; McELHINNY, 1983).

Esse período está associado a períodos “calmos” ou, alternativamente, à variação solar calma (Sq, do inglês *Solar quiet*). A variação diurna no campo magnético em períodos calmos pode ser interpretada matematicamente como uma superposição de ondas com períodos de 12 e 24 horas com uma amplitude da ordem de algumas dezenas de nT (nanotesla). Estas variações são mais intensas no decorrer do dia e insignificantes durante a noite. As correntes elétricas responsáveis pela variação diurna estão localizadas na região mais condutiva da ionosfera, chamada região E (aproximadamente entre 90 e 120 km) (JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996).

2.3.4. Variações magnéticas observadas em período perturbado

Superpostas às variações magnéticas observadas em períodos calmos, estão àquelas associadas à atividade externa interagindo com a Terra (principalmente relação Sol-Terra). Neste caso, as variações no campo magnético são relacionadas à intensa atividade solar, o qual ocasiona uma perturbação nas correntes magnetosféricas dando origem a tempestades magnéticas as quais caracterizam o período perturbado, que pode ser observado por meio do índice de atividade magnética Dst. Essas tempestades magnéticas podem durar períodos que vão desde algumas horas até alguns dias. Existem também os casos em que a interação solar-terrestre provoca a ocorrência de subtempestades, as quais apresentam durações mais curtas do que as tempestades magnéticas. A causa e efeitos das subtempestades é ainda um ponto controverso na

literatura científica. De modo geral, acredita-se que são resultantes de um acúmulo de energia na cauda da magnetosfera a qual é liberada de uma só vez. Essa liberação, por sua vez leva a uma posterior intensificação das correntes elétricas ao longo das linhas do campo geomagnético (JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996).

2.4. Representação do campo magnético terrestre

O modelo mais usual que descreve o campo magnético terrestre é o *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), o qual utiliza o método dos harmônicos esféricos. O IGRF consiste de uma expansão da série de Legendre que englobam somente a componente principal do campo da Terra e sua variação secular (variação homóloga).

A expansão multipolar frequentemente adotada foi utilizada pela primeira vez por Gauss e é obtida como está descrito a seguir. Gauss expressou o campo magnético por uma fórmula concisa que continha muitos parâmetros ajustáveis. Adicionalmente, os campos devem satisfazer as equações de Maxwell, independentemente dos valores dos seus parâmetros (WALT, 1994).

As equações de Maxwell que descrevem o campo magnético são

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, e \quad (2.6)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{j}. \quad (2.7)$$

Temos que, no estado estacionário $\partial/\partial t = 0$, e se não há correntes na região do núcleo externo, então a Equação 2.7 fica:

$$\nabla \times \vec{B} = 0. \quad (2.8)$$

Se o rotacional do campo for igual à zero, Equação 2.8, essa quantidade pode ser representada como sendo o gradiente de um escalar. Logo, existirá um campo potencial $\Psi(r)$ e a sua relação com \vec{B} e dada pela Equação 2.9:

$$\vec{B}(\vec{r}) = -\nabla\psi(\vec{r}). \quad (2.9)$$

A partir da Equação 2.6 tem-se que:

$$\nabla \cdot \vec{B} = -\nabla^2\psi = 0. \quad (2.10)$$

Se a escolha de ψ satisfizer a Equação 2.10, irá satisfazer as Equações 2.6 e 2.8. Portanto, a solução para a Equação 2.10 (equação de Laplace) em coordenadas esféricas é encontrada assumindo que ψ é separável em um produto de funções das três coordenadas, Equação 2.11:

$$\psi = R(r) \cdot \theta(\theta) \cdot \phi(\phi). \quad (2.11)$$

Se inserirmos esta expressão em Equação 2.10, dividindo-se por ψ e separando as variáveis, conduz-se às várias funções que são:

$$R(r) = Ar^n + \frac{B}{r^{n+1}}, \quad (2.12)$$

$$\phi(\phi) = C \cos m\phi + D \sin m\phi, \quad (2.13)$$

$$\theta(\theta) = E P_n^m(\cos \theta) + F Q_n^m(\cos \theta), \quad (2.14)$$

onde P_n^m e Q_n^m são funções de Legendre. As quantidades A, B, C, D, E e F são constantes de integração e n e m são constantes de separação. As constantes de separação não são arbitrárias. A constante m deve ser um inteiro para $\phi(\phi)$ ser um único valor válido. As funções de Legendre na Equação 2.14 têm de ter inteiro n ou eles vão divergir. Da mesma forma, $A = F = 0$, representando o campo da Terra desde que as funções que se multiplicam são infinitas em $r = \infty$ ou no caso que $\theta = 0^\circ$ e 180° . Assim, a forma geral da Equação 2.11 apropriada à representação do domínio do núcleo é

$$\psi = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^n \frac{1}{r^{n+1}} P_n^m(\cos \theta) (C_n^m \sin m\phi + D_n^m \cos m\phi). \quad (2.15)$$

Onde $n = 0$ é o grau do seu termo multipolar e como é uma constante, é

excluído para evitar a divergência de \vec{B} na origem. Em geomagnetismo é costume se escrever a Equação 2.14 como:

$$\Psi = R_E \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{R_E}{r}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m \cos m \varphi + h_n^m \sin m \varphi) P_n^m(\cos \theta), \quad (2.16)$$

onde as funções de Legendre têm a normalização Schmidt, dadas por:

$$P_n^m = \left[\frac{(n-m)!(2-\delta_{0,m})}{(n+m)!} \right]^{1/2} P_{n,m}, \quad (2.17)$$

na qual $P_{n,m}$ são as funções normais de Legendre e $\delta_{0,m}$ é a unidade para $m = 0$ e zero caso contrário. O R_E (raio terrestre) fator constante é incluído na Equação 2.16, para dar g_n^m e h_n^m as dimensões de um campo magnético. Os coeficientes g_n^m e h_n^m estão ajustados para valores experimentais de campo magnético amostrados em uma base mundial.

Embora a soma estende-se a mais de n infinito, a magnitude dos termos cai rapidamente com o aumento de n (WALT, 1994). Portanto, devido à dependência de r^{n+1} em Ψ a importância da ordem mais elevada, os termos diminuem rapidamente com a distância da Terra. Os modelos podem dar as variações seculares para os termos, ou seja, os valores de dg_n^m/dt e dh_n^m/dt , assim cálculos de campo podem ser feitos para qualquer época (WALT, 1994).

A expansão dos coeficientes até polinômio de grau 13 descreve o modelo do campo principal. Uma expansão para polinômio maior que grau 13 começa a representar dados magnéticos da crosta terrestre. Esses coeficientes para os polinômio de Legendre são determinados através de modelagem do campo magnético e a partir de dados do campo magnético medidos por satélites e em observatórios de solo ao redor do planeta, restritos a intervalos de 5 anos, tendo portanto, sua validade contida neste período. Este trabalho é feito pela Associação Internacional de Geomagnetismo e Aeronomia (IAGA, do inglês *International Association of Geomagnetism and Aeronomy*), a qual também se encarrega de distribuir os novos coeficientes para serem incorporados ao IGRF

(THÉBAULT et al., 2015), que já lançou a décima segunda geração internacional de referência do campo geomagnético.

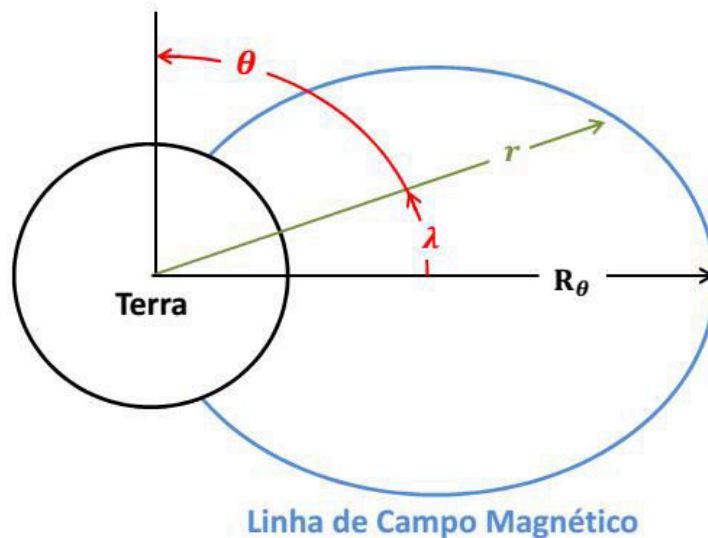
2.4.1. Componente interna (campo dipolar)

A menor ordem da Equação 2.16 é o termo do dipolo com $n = 1, m = 0$. Este é a componente dominante. Além disso, muitas das características importantes do cinturão de radiação podem ser ilustradas com um campo dipolar. Portanto, algumas relações úteis para este campo são apresentadas (WALT, 1994). O potencial do dipolo da Equação 2.16 é:

$$\Psi = R_E \left(\frac{R_E}{r} \right)^2 g_1^0 \cos \theta \quad (2.18)$$

na qual, na Figura 2.4, a distância r é medida a partir do centro do dipolo e θ é o ângulo polar ou colatitude (WALT, 1994).

Figura 2.4 - Sistema de coordenadas polares do campo magnético terrestre.



Fonte: Produção do autor.

Logo, o campo magnético \vec{B} será igual $-\nabla\Psi$. Em coordenadas polares as componentes de \vec{B} são:

$$B_r = -\frac{\partial\Psi}{\partial r} = 2 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 g_1^0 \cos \theta = -2B_0 \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \cos \theta \text{ e} \quad (2.19)$$

$$B_{\theta} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial \theta} = \left(\frac{R_E}{r}\right)^3 g_1^0 \sin \theta = -B_0 \left(\frac{R_E}{r}\right)^3 \sin \theta \quad (2.20)$$

onde B_0 é o valor médio do campo na linha do equador, na superfície terrestre. Nota-se que as componentes são negativas por que o sentido do campo está na direção menos \hat{e}_{θ} e no Hemisfério Norte é no sentido negativo \hat{e}_r . Quando considerando apenas a magnitude do campo dipolar, o sinal de menos pode ser omitido. Para a superfície da Terra $B_0 = 29872$ nT. Neste caso, o campo do dipolo é simétrico sobre o seu eixo de modo que $B_{\phi} = 0$ em todos os lugares (WALT, 1994).

A componente radial do campo magnético também pode ser representada pelo seu momento magnético, μ_m ($A \cdot m^2$), associado ao campo dipolar (WALT, 1994). Logo, em termos do momento de dipolo a componente radial de campo é:

$$B_r = -\left(\frac{4\pi}{\mu_0} \mu_m\right) \frac{2 \cos \theta}{r^3}. \quad (2.21)$$

Já a intensidade do campo de dipolo em qualquer ponto no espaço é dada por:

$$B = \sqrt{(B_r^2 + B_{\theta}^2)} = B_0 \left(\frac{R_E}{r}\right)^3 \sqrt{(1 + \cos^2 \theta)}. \quad (2.22)$$

Nas equações cima, percebemos que a intensidade do campo cai com a variação cúbica do incremento da distância (r^{-3}) e aumenta em direção aos polos terrestres, dada uma distância r fixa. Para um dado valor de r a intensidade do campo é duas vezes mais elevada próximo dos polos do que sobre o Equador. Também notamos na Equação 2.22, que r e θ possuem dependências separáveis. Assim, podemos também afirmar que o campo magnético diminui com variação cúbica do incremento da distância ao longo de qualquer linha de latitude constante.

2.4.2. Componente interna (campo não dipolar)

Se o campo magnético terrestre fosse um dipolo perfeito localizado no centro da Terra, os contornos da constante \vec{B} na superfície da Terra

seriam linhas de latitudes constantes. Entretanto, as assimetrias no sistema atual de corrente no interior da Terra, introduzem termos de ordem superior que são descritas pela Equação 2.16 (WALT, 1994). A maior parte da distorção das linhas de campo é provocada pelo fato de que o eixo do dipolo magnético não é alinhado com o eixo de rotação da Terra e também, o centro do dipolo magnético não é no centro da Terra. Os polos magnéticos são sobre o norte do Canadá e o sul da Austrália. Além desse fato, percebemos uma grande região na costa leste da América do Sul onde o campo geomagnético possui uma intensidade bem menor do que nas demais regiões (WALT, 1994). Esta região é conhecida como, Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS) (TERRA-NOVA et al., 2011).

Assim, sendo a AMAS uma região no campo magnético terrestre onde o campo magnético é mais fraco que nas outras regiões mundiais, esta característica pode facilitar a penetração de partículas por essa região além de também poderem chegar mais perto da superfície terrestre. A AMAS localiza-se sobre parte do Brasil e do oceano atlântico. Acredita-se que essa anomalia é causada pelo fato do dipolo magnético da Terra estar deslocado cerca de 530 *km* na direção do norte do pacífico (HEIRTZLER, 2002).

A anomalia também contribui para modificar o padrão de ionização da ionosfera, alterando, portanto a propagação de ondas de rádio. Por haver maior penetração de partículas nessa região da anomalia, existe um numero grande de falhas já observadas em satélites e até mesmo defeitos graves devido à exposição dos componentes eletrônicos a intensa radiação. Ou seja, a anomalia contribui para a diferença da atividade magnética e possivelmente também é responsável pelo o que observamos nos índices de atividade magnética.

2.4.3. Componentes externas (variações solares)

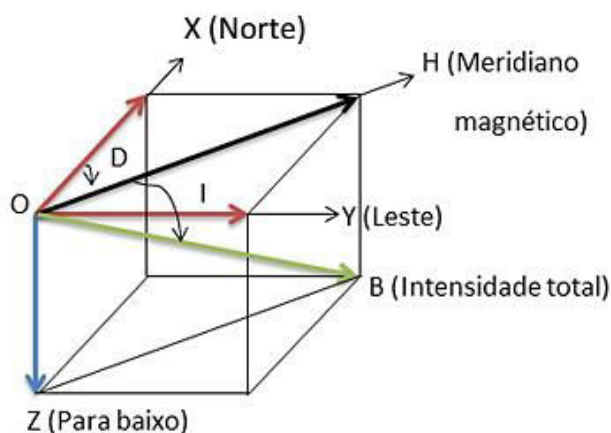
As componentes externas estão relacionadas em sua grande maioria pela variação das atividades solares. Dentre as quais, enquadram-se as atividades solares de regime transiente, como aquelas componentes

associadas aos campos magnéticos que interagem com a Terra advindos de ejeções de massas coronais, de feixes rápidos corrotantes, ou mudanças de setor da Terra em relação ao campo heliosférico. Outra classe de componentes externas são as atividades solares de regime permanente, tais como aquelas componentes associadas às variações lentas do fluxo solar que atuam na atmosfera terrestre de forma a influenciar a densidade eletrônica e o dínamo ionosférico.

2.4.4. Decomposição do campo magnético em suas componentes

As componentes do vetor campo magnético terrestre de um referencial cartesiano, são apresentadas na Figura 2.5, onde as componentes X, Y e Z são respectivamente positivas para o Norte, Leste e para baixo.

Figura 2.5 – Elementos do vetor campo magnético.



Fonte: Produção do autor.

Os elementos geomagnéticos representados na Figura 2.5 são:

- B – (ou F) intensidade total (nanotesla, nT);
- H – intensidade/componente horizontal (nT);
- X – intensidade/componente Norte (ou Norte – Sul) (nT);
- Y – intensidade/componente Leste (ou Leste – Oeste) (nT);
- Z – intensidade/componente nadir (para baixo) (nT);
- D – declinação magnética (grau, °); e
- I – inclinação magnética (grau, °).

Os elementos lineares do campo geomagnético relacionam-se entre si da seguinte maneira:

$$H = B \cos(I) = F \cos(I) \quad (2.23)$$

$$X = H \cos(D) \quad (2.24)$$

$$D = \arctg(Y/X) \quad (2.25)$$

$$H^2 = X^2 + Y^2 \quad (2.26)$$

$$Z = B \sin(I) = F \sin(I) \quad (2.27)$$

$$Y = H \sin(D) \quad (2.28)$$

$$I = \arctg(Z/H) \quad (2.29)$$

$$B^2 = F^2 = X^2 + Y^2 + Z^2 \quad (2.30)$$

A unidade no Sistema Internacional (SI) para as medidas da intensidade do campo magnético é o Tesla (T). Outros sistemas apresentam a mesma intensidade de campo em Gauss (G) ou gama (γ unidade CGS tradicional em geomagnetismo). Os fatores de conversões entre estas unidades são $1 \text{ G} = 10^5 \text{ nT} = 100 \text{ } \mu\text{T}$, ou alternativamente $1 \text{ cG} = 1 \text{ } \mu\text{T}$, $1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$, e ainda $1 \gamma = 1 \text{ nT}$.

As medições do campo geomagnético e/ou de suas componentes são realizadas com instrumentos comumente chamados magnetômetros. As versões modernas destes equipamentos medem as variações do campo e seus transdutores transformam as variações magnéticas em variações de grandezas elétricas proporcionais a estas, tais como a voltagem. O mais comum destes é o magnetômetro de núcleo saturado (*fluxgate*), que mede variações do campo magnético em torno do seu valor médio (ou principal). Este equipamento é apresentado aqui para fins de ilustração e será descrito em maiores detalhes no capítulo que trata da instrumentação. Em contraponto, o magnetômetro de precessão de prótons é muito usado em observatórios geomagnéticos por oferecer medidas absolutas deste campo. Os registros feitos pelos magnetômetros

instalados em observatórios geomagnéticos distribuídos por vários pontos do globo terrestre são denominados magnetogramas.

2.5. Índices de atividade magnética

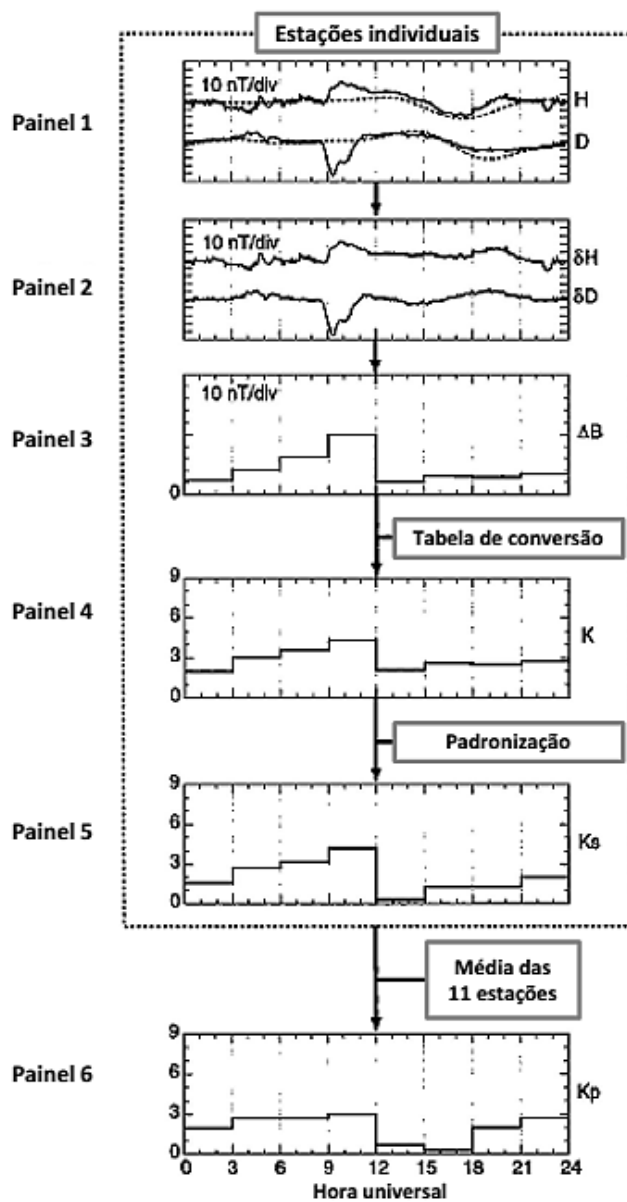
Nesta sessão, apresentamos alguns dos índices magnéticos que são obtidos a partir de medidas de variações do campo magnético terrestre, realizadas com auxílio dos magnetômetros. Isso é feito, pois o índice K_{sa} da Rede Embrace tem características similares a alguns destes índices, o qual nos propomos a fazer o estudo de qualificação.

2.5.1. Índice K_p

O procedimento para gerar o índice K é apresentado na Figura 2.6. No painel 1 é obtida a curva normal ou linha de base da estação magnética para as componentes H e D do vetor campo magnético terrestre. Depois de se conhecer o comportamento da atividade magnética para esse período calmo, o procedimento segue para o segundo painel, onde é apresentada somente a variação relativa destas componentes considerando como referência a linha de base, ou seja, δH e δD no painel 2.

A partir das medidas do desvio máximo (δ_{\max}) das componentes (H e D) é determinada a diferença entre o máximo e o mínimo das componentes. Em seguida, é gerado no painel 3 o ΔB onde por definição é zero ou positivo. ΔB representa a perturbação geomagnética em intervalos de 3 horas, ou seja, cada retângulo é gerado num intervalo de cada 3 horas (e.g., 00:00 – 03:00; 21:00 – 24:00 UT) como é mostrado no painel 4. Para se obter o índice K das medidas dos vários observatórios, precisamos ressaltar que cada observatório tem sua própria tabela para converter o desvio máximo para o índice K (painel 4), que é uma escala pseudo-logarítmica onde assume valores desde $K = 0$ (baixa atividade magnética) até $K = 9$ (atividade magnética extrema), como pode ser visto no exemplo da Tabela 2.1 (ROSTOKER, 2000). Este índice K é um indicador do nível geral de perturbação como mostra na Figura 2.6 de um dado observatório.

Figura 2.6 – O procedimento passo-a-passo para gerar K_p .



Fonte: [Takahashi et al., 2001](#).

Tabela 2.1 – Valores de K e $\Delta\delta_{\text{max}}$ de um observatório situado a 50° de latitude geomagnética.

$K =$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\delta_{\text{máx}} =$		5	10	20	40	70	120	200	330	500

Fonte: [Rostoker \(2000\)](#).

Devido as variação diurna, sazonais e peculiaridades de cada observatório (latitude magnética), um processo de padronização foi desenvolvido para se obter um índice que indicasse o nível de atividade magnética global. Se construiu uma tabela de conversão onde os valores de K devem ser convertidos para os valores de K_s (s , do inglês *standardized*), painel 5.

O índice K_s é definido como sendo uma variável contínua, variando de 0.0 a 9.0 e é estabelecido por um terço de um número inteiro por meio dos símbolos $-$, 0 e $^+$, tal que o intervalo, por exemplo, de 1.5 a 2.5 está incluído nos valores de K_s iguais a 2^- , 2^0 e 2^+ . Já os valores limites de K_s (0^0 e 9^0) estão compreendidos por 1/3 do intervalo inteiro, onde K_s pode assumir 28 valores ($0^0, 0^+, 1^-, 1^0, 1^+, \dots, 9^-, 9^0$). Um exemplo de relação entre os índices K_s e K pode ser vista na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Conversão dos valores de K para K_s para o observatório de Lerwick.

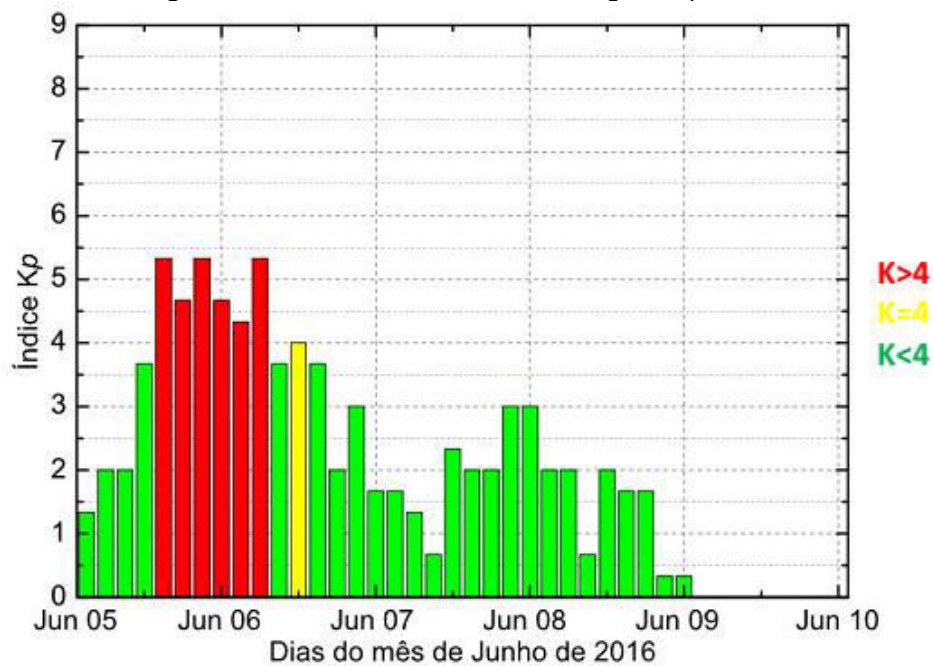
K	UT	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	15-18	18-21	21-24
0	$K_s =$	0	0	0	0	0	0	0	0
1	$K_s =$	1^+	2^-	2^-	1^+	1^0	1^0	1^0	1^0
2	$K_s =$	2^+	3^-	3^0	3^0	3^-	2^+	2^0	2^0
3	$K_s =$	3^+	4^0	4^+	4^+	4^0	3^+	3^0	3^0
4	$K_s =$	4^+	5^0	6^-	6^-	5^0	4^+	4^-	4^0
5	$K_s =$	5^+	6^0	7^-	7^-	6^-	5^0	5^-	5^0
6	$K_s =$	6^0	7^0	7^+	7^+	7^-	6^-	6^-	6^-
7	$K_s =$	7^0	8^-	8^0	8^0	7^+	7^0	7^-	7^-
8	$K_s =$	8^0	8^+	9^-	9^-	8^+	8^0	7^+	7^+
9	$K_s =$	9^0	9^0	9^0	9^0	9^0	9^0	9^0	9^0

Fonte: [Rostoker \(2000\)](#).

Depois de obter todos os valores de K padronizados para os demais observatórios, devemos fazer uma média dos índices K_s dos observatórios envolvidos na construção do índice para conseguir o índice planetário K_p , como apresentado no painel 6 da Figura 2.6 e no fluxograma da Figura 4.8. Atualmente existem 13 observatórios magnéticos que participam da construção do índice K_p segundo a IAGA, como mostra a Figura 2.8. Contudo, geralmente 11 é o número de

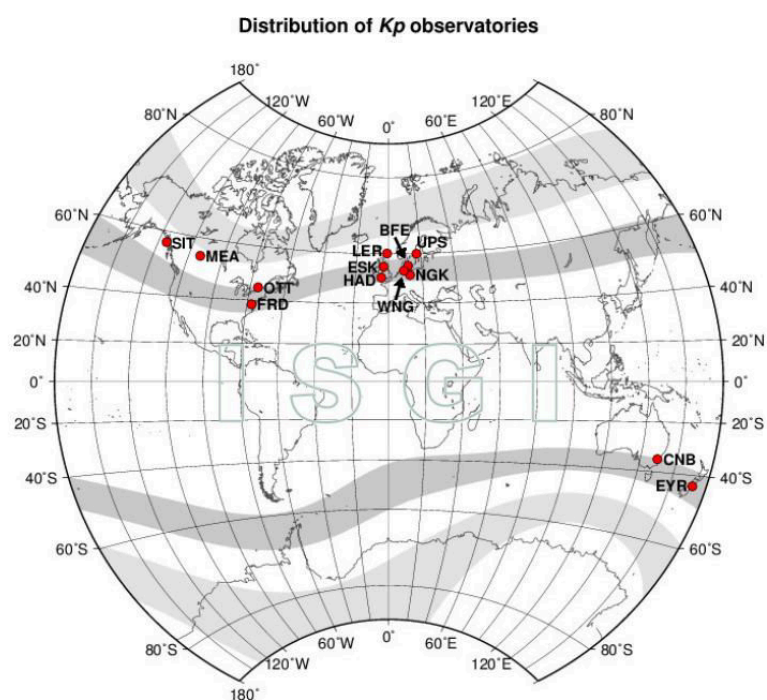
observatórios que realmente compõem o índice. Adicionalmente, é notório que entre estes observatórios envolvidos na sua construção, não fazem parte as estações magnéticas na região da América do Sul.

Figura 2.7 – Exemplo do índice K_p mostrando a sua classificação de atividade magnética dada em cada 3 horas ao longo de quatro dias.



Fonte: Produção do autor.

Figura 2.8 – Distribuição no globo de todos os observatórios que compõem a construção do índice K_p .



Fonte: <http://isgi.unistra.fr/indices_kp.php>. Acessado em 26/11/2016.

2.5.2. Índice A_p e a_p

O índice a_p foi criado a partir do índice K_p como forma de obter as mesmas perturbações da escala aproximadamente logarítmica em uma escala linear. A Tabela 2.3 descreve a relação entre o valor equivalente do índice K_p para o índice a_p .

Tabela 2.3 – Valores do índice a_p para um dado valor de K_p .

Se $K_p =$	0^0	0^+	1^-	1^0	1^+	2^-	2^0	2^+	3^-	3^0	3^+	4^-	4^0	4^+
Então $a_p =$	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
Se $K_p =$	5^-	5^0	5^+	6^-	6^0	6^+	7^-	7^0	7^+	8^-	8^0	8^+	9^-	9^0
Então $a_p =$	39	49	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Fonte: Rostoker (2000).

Em nossa pesquisa bibliográfica, não ficou evidente de onde se originou a escala do ap . Mas os valores de ap correspondente ao $Kp = n_0$ ($n = 1, 2, 3, \dots, 8$) podem ser encontrados pela expressão $ap \approx (\delta_{max}^{n+1} + \delta_{max}^n) / 4$. Adicionalmente, encontramos os valores de ap para os valores $Kp = n \pm$ por interpolação. Para encontrar os valores de ap para $Kp = 8^+, 9^-, 9^0$, ressalta-se que eles dependem da influencia por uma escolha de 400, como o maior valor da escala. Quando definido o índice ap , calcula-se o índice Ap a partir da média dos oito valores de ap computados para cada intervalo de 3 horas (ROSTOKER, 1972).

2.5.3. Índice AE

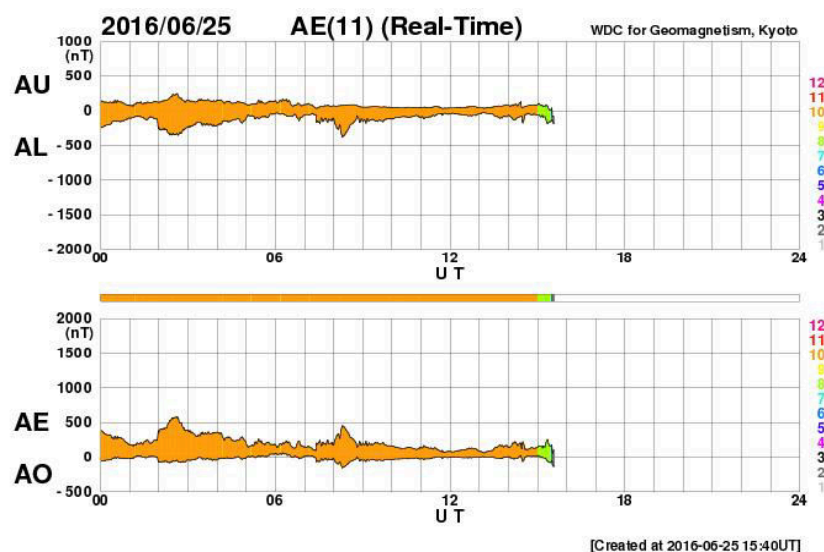
O índice AE apresentado na Figura 2.9, é construído usando-se apenas a componente H da perturbação do campo. A componente H é obtida em cada observatório da rede de magnetômetros usados na medida da componente H em intervalos de 2,5 minutos. Os valores reduzidos são superpostos em formato de magnetograma:

$$AE = AU - AL \quad (2.31)$$

onde AU fornece uma boa representação da máxima perturbação magnética gerada pelo eletrojato para Leste e AL nos fornece uma boa representação da máxima perturbação do eletrojato para Oeste (ROSTOKER, 1972; KAMIDE; ROSTOKER, 2004).

O AE, como descrito na Equação 2.31, é a diferença entre os índices AU ("U", do inglês *Upper*), parte superior do envelope de H e o AL ("L", do inglês *Lower*), parte inferior do envelope da componente H para os observatórios magnéticos envolvidos na composição dos desses índices. Enquanto o AO apresentado na Figura 2.9 é a média dos índices AU e AL.

Figura 2.9 – Exemplo dos índices de atividade magnética AU, AL, AE e AO dado em tempo real para o período de um dia em hora universal.

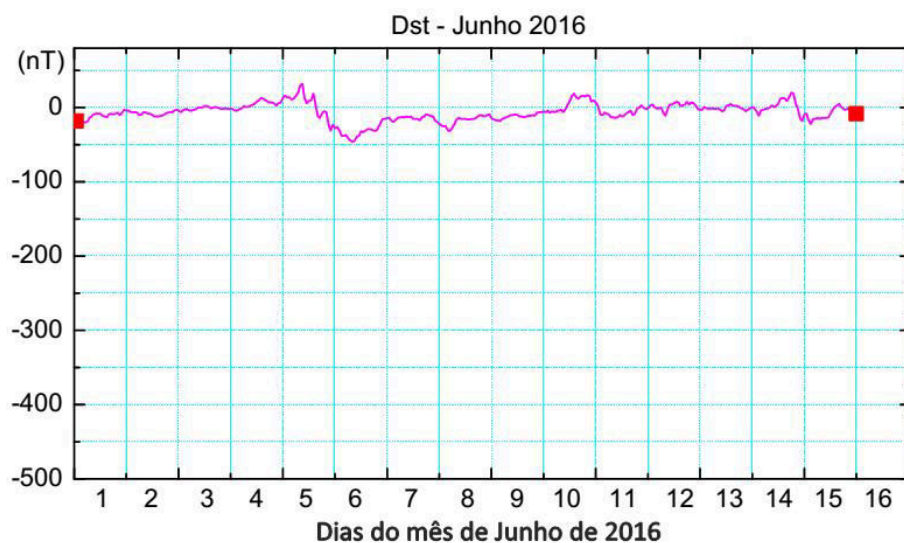


Fonte: <<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>>. Acessado em 26/06/2016.

2.5.4. Índice Dst

O índice Dst como a Figura 2.10 mostra, utiliza a componente H normalizada do campo magnético. Este índice é obtido a partir de medidas por uma cadeia de magnetômetros localizados em quatro observatórios distribuídos em latitudes medianas (Hermanus, Honolulu, Kakioka e San Juan) (YAMASHITA, 1999). Já as estações de altas e baixas latitudes são evitadas para minimizar os efeitos dos eletrojetos aurorais e equatoriais, respectivamente. Medidas deste índice são feitas em intervalos de 1 hora. Alguns estudos descrevem o índice Dst como ter sido desenvolvido para dar uma indicação da corrente anelar. Adicionalmente, utilizam-se as variações da componente H para classificar as tempestades magnéticas em diferentes níveis, que pode ser verificado na Tabela 2.4.

Figura 2.10 – Exemplo do índice Dst para o intervalo de 15 dias ao longo do mês de Junho de 2016, gerado a cada uma hora.



Fonte: Produção do autor.

Tabela 2.4 – Classificação das Tempestades Magnéticas.

Intensas	$Dst \leq -100 \text{ nT}$
Moderadas	$-100 \text{ nT} < Dst \leq -50 \text{ nT}$
Fracas	$-50 \text{ nT} < Dst \leq -30 \text{ nT}$
Baixo Nível de Perturbação	$Dst < -30 \text{ nT}$

Fonte: [Gonzalez et al., 1994](#).

2.5.5. Índice Km, Ks e Kn

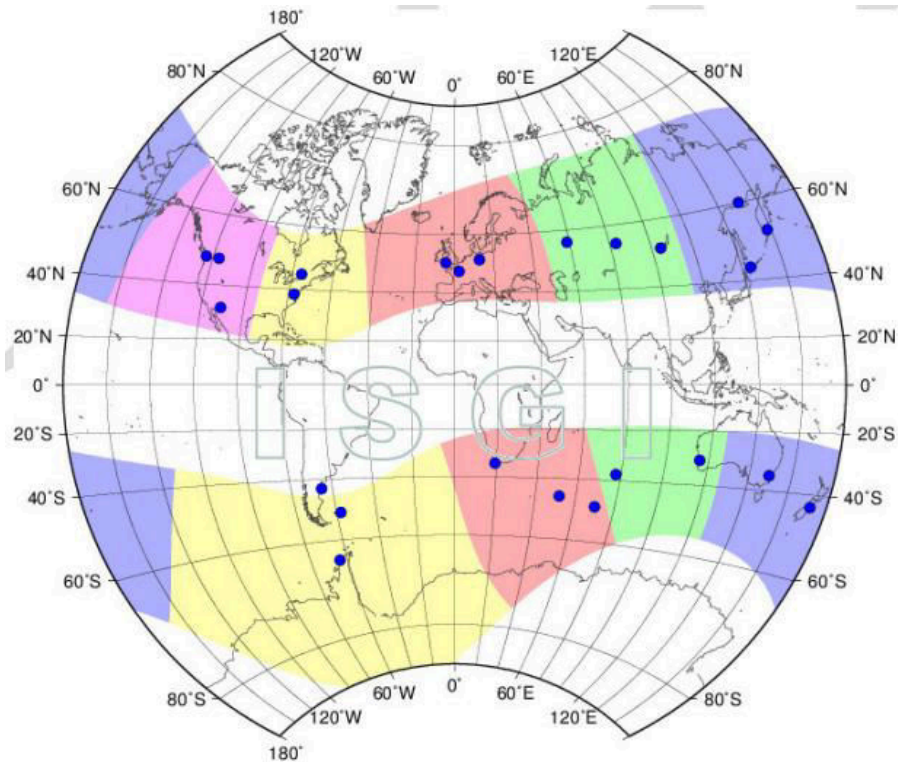
Em cada setor de longitude, o K é dimensionado para cada estação por uma tabela K9 (assim como apresentado nas Tabelas 3.1 e 4.1), é calculado e o resultado é convertido em amplitude. Usando as amplitudes conseguimos calibrar o índice para cada setor do território terrestre. Com isso podemos obter índices globais ou regionais. Um exemplo é dado pela média ponderada das amplitudes do hemisfério norte e pela média ponderada das amplitudes do hemisfério sul, no qual dá origem aos

índices hemisféricos K_n (Norte) e o K_s (Sul). Os fatores de ponderação são os que representam as diferenças nos graus de longitude do setor em cada hemisfério (MAYAUD, 1980).

O índice K_m (“ m ” = média) é obtido a partir da média dos índices K dos observatórios magnéticos envolvidos no seu desenvolvimento. Ou seja, fazendo-se a média dos índices K_n e K_s , que são descritos a seguir. Além disso, ele é um índice magnético que possui a mesma ideia e finalidade do índice K_p (MAYAUD, 1980).

Os índices K_s e K_n são índices de atividades magnéticas regionais. O índice K_s (“ s ”, do inglês *South*) é um índice que dá uma caracterização da atividade magnética no hemisfério sul, enquanto o índice K_n (“ n ”, do inglês *North*) é um índice que caracteriza a atividade magnética no hemisfério norte do globo terrestre. Portanto, o K_n é composto por estações magnéticas localizadas exclusivamente no hemisfério norte enquanto as estações de K_s se localizam exclusivamente no hemisfério sul do globo. As estações estão situadas perto de 50° de latitudes geomagnéticas corrigidas (nas zonas subaurorais) e são reunidas em grupos. Cada uma delas corresponde a um setor de longitude. Há 5 grupos no hemisfério norte, e 4 grupos no hemisfério sul, como mostra a Figura 2.11 da localização das estações a seguir (MAYAUD, 1980). Observe que os grupos das estações estão separadas por cores diferentes.

Figura 2.11 – Distribuição no globo das estações envolvidas no desenvolvimento do índice K_m .



Fonte: <http://isgi.unistra.fr/Documents/am_LWFs_example.pdf>. Acessado em 04/07/2016.

Como esses índices, K_m , K_n , K_s são derivados do índice K , eles são obtidos também em intervalos de cada 3 horas e o K_m está relacionado com o K_n e K_s pela seguinte Equação (MAYAUD, 1980):

$$K_m = \frac{K_n + K_s}{2}, \quad (2.32)$$

tendo assim a média de atividade magnética global.

2.5.6. Índice K_{sa}

O índice K_{sa} apresentado na Figura 2.12 utiliza a componente H normalizada do campo magnético. Este índice é obtido a partir de medidas de uma cadeia de equipamentos da Rede Embrace de Magnetômetros, distribuída como é apresentado no mapa da Figura 2.13. Ele foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores do Programa

Embrase do INPE/MCTIC com objetivo de caracterizar e estudar a atividade magnética regional na América do Sul. Mas com o objetivo de também contribuir com a construção do índice K_p e não confrontá-lo ou substituí-lo, pois até o presente momento, como já mencionado anteriormente, não existe nenhuma estação magnética na América do Sul que contribui para a construção deste índice.

O índice K_{sa} é obtido somente de estações magnéticas localizadas na região da América do Sul enquanto o K_p (p , do inglês *planetary*) possui estações ao redor do mundo que contribuem na sua construção. Portanto, o K_{sa} possui uma construção um pouco diferente a do índice K_p .

O K_{sa} é obtido a partir da curva do dia quieto (QDC, do inglês *Quiet Day Curve*) da componente H . Utiliza-se na construção dele os 5 dias mais quietos de cada mês onde se retira uma média, com isso tem-se a QDC do mês em questão, o ΔH . A partir da curva adotada como referência, tiram-se as variações magnéticas ao longo do mês. Uma vez obtida a QDC, as variações diurnas e sazonais das estações magnéticas são automaticamente eliminadas quando é feita a sua subtração dos dados brutos. Portanto os índices das estações magnéticas envolvidas na construção do índice K_{sa} já são padronizados, ou seja, equivalente ao índice K_s . A partir deste ponto, o passo seguinte consiste em se obter a média dos valores de K_s das estações magnéticas, o que leva à obtenção do índice K_{sa} .

3 INSTRUMENTAÇÃO

Para o estudo pretendido nesta dissertação são essencialmente utilizados magnetômetros cujas medidas do campo magnético terrestre nos fornecem dados que subsidiam a geração de índices geomagnéticos. Estes, por sua vez, oferecem uma ferramenta de estudo da deposição de energia advinda dos eventos solares no sistema magnetosférico terrestre, conforme discutido anteriormente. Portanto, apresentamos os principais conceitos relacionados com a instrumentação que utilizamos em nosso trabalho de mestrado. Após uma pequena introdução, apresentamos a classificação dos magnetômetros e uma breve descrição da Rede Embrace de Magnetômetros. Na sequência, exporemos os locais exatos de todas as estações magnéticas da rede. Por fim, apresentamos um exemplo de uma estação magnética que foi utilizada neste estudo.

3.1. Classificação dos Magnetômetros

Os magnetômetros são equipamentos usados para medir uma ou várias das quantidades a seguir: a intensidade, a direção e o sentido de campos magnéticos em sua proximidade. Geralmente são usados em estudos de geofísica, relacionados com o campo magnético da Terra e com a magnetosfera terrestre. Os magnetômetros podem ser divididos em escalares e vetoriais (KABATA, 2000), conforme a lista a seguir:

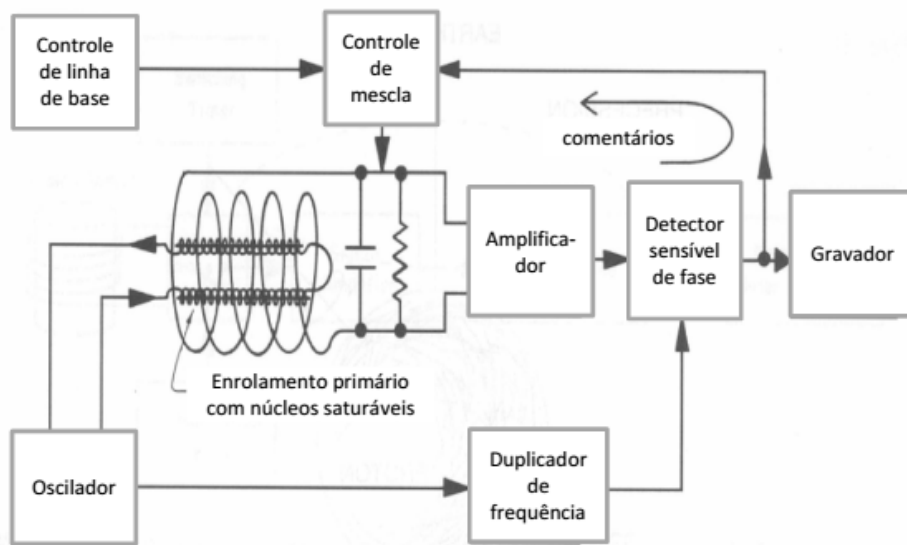
- *Magnetômetros escalares* – São aqueles que medem somente a intensidade do campo magnético. Entre eles estão os magnetômetros de precessão de prótons, indução e de bombardeamento óptico;
- *Magnetômetros vetoriais* – Estes magnetômetros informam a intensidade do campo composto das medidas dos três eixos que formam o vetor campo magnético. Nos magnetômetros vetoriais, encontram-se incluídos os magnetômetros de *fluxgate*, efeito Hall e o SQUIDs. (JACOBS, 1987).

3.1.1. Magnetômetro *fluxgate* (ou núcleo saturado)

Magnetômetro do tipo *fluxgate* (ou de núcleo saturado) tem este nome porque possui um núcleo de material magnético de alta permeabilidade, ou seja, é de fácil saturação. Ele mede a intensidade do campo magnético externo em uma dada direção ao longo do eixo do sensor. O princípio de funcionamento se dá através de duas bobinas ortogonais entre elas, à bobina primária e a secundária. Estas formam um dos eixos de coordenadas das componentes H , D e Z do campo geomagnético (SIQUEIRA, 2006). Para se obter as três componentes precisamos, portanto, de três conjuntos. Com isso, esse magnetômetro pode ser classificado como magnetômetro vetorial. É preciso, contudo, fazer uma orientação correta do sensor com os elementos do vetor campo magnético (Figura 2.6). A desvantagem deste tipo de magnetômetro é que ele somente mede variações do campo e não realiza medidas absolutas da intensidade do campo magnético terrestre.

A Figura 3.1 ilustra a construção interna do sensor magnético tipo *fluxgate*. A bobina primária é responsável pelo controle da permeabilidade do material, que é feito através de um campo magnético adicional, o campo magnético de excitação. Quando não há corrente passando por essa bobina, a permeabilidade do núcleo é a própria do material. Entretanto, se for aplicada uma alta corrente na bobina primária, um campo magnético H maior que o campo magnético de saturação do material H_s será gerado. Isso fará com que a permeabilidade do núcleo decresça para valores próximos ao do vácuo como se não tivesse o núcleo no interior da bobina. Com isso uma variação de distorção no fluxo magnético da bobina secundária é gerada, a qual é a bobina detectora e que é enrolada ao redor do núcleo de alta permeabilidade (JACOBS, 1987; JANKOWSKI; SUCSDORFF, 1996; SIQUEIRA, 2006).

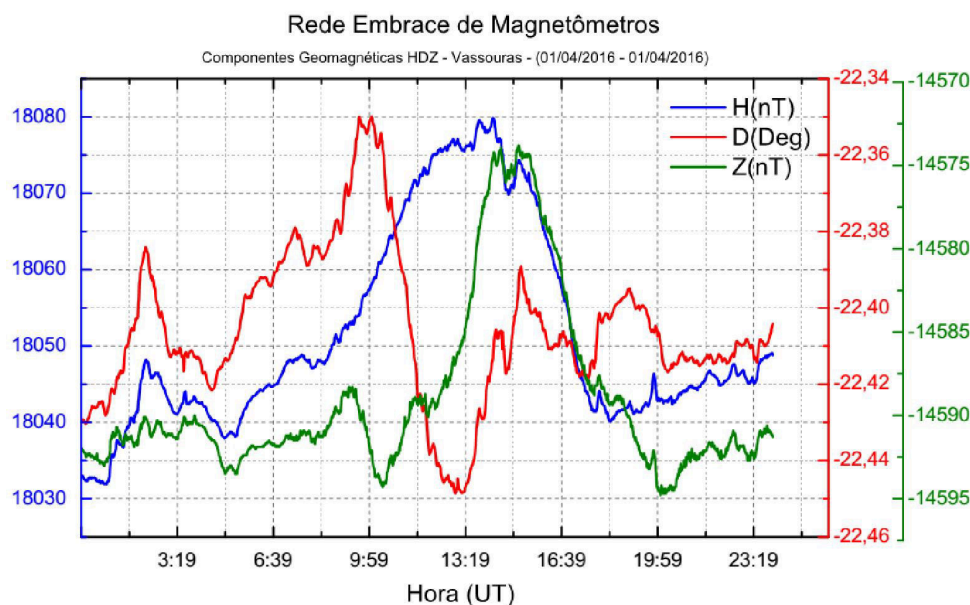
Figura 3.1 – Magnetômetro *fluxgate* para medida direcional do campo geomagnético.



Fonte: Modificada de [Campbell \(1997\)](#).

A bobina detectora faz a detecção da variação do fluxo magnético assim como é apresentado na Figura 3.2. Esta variação está relacionada com a variação da bobina primária que faz o chaveamento entre a saturação e a não saturação do núcleo. Esse processo faz com que ocorra indução de pulsos na bobina secundária. Isso leva à origem a dois pulsos a cada ciclo para se obter um sinal com frequência duas vezes maior que a frequência de excitação. A fase e a amplitude de cada harmônico do sinal presente no secundário são proporcionais à magnitude e a polaridade do campo magnético externo que está presente ao longo do eixo do enrolamento secundário ([ANDRIGHETTO, 2005](#)). Em outras palavras, essa distorção da variação do fluxo magnético em relação ao tempo contém vários harmônicos pares. Ao se considerar o sinal ele pode ser decomposto em suas componentes de Fourier.

Figura 3.2 – Exemplo de medida magnética realizada pelos equipamentos do tipo *fluxgate* da Rede Embrace de Magnetômetros na estação magnética de Vassouras – RJ, com a intensidade total das componentes H , D e Z do campo magnético terrestre.



Fonte: Produção do autor.

3.1.2. Rede Embrace de Magnetômetros

No Brasil existe o Programa de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (Embrace) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/MCTIC). O principal objetivo deste programa é monitorar o ambiente do espaço Sol-Terra, a magnetosfera, a atmosfera superior e os efeitos de correntes induzidas no solo para prever possíveis influências nas atividades tecnológicas e econômicas. Para isso, existem vários equipamentos sob a responsabilidade de pesquisadores de diversas áreas da física das interações solar-terrestre e aeronomia. Dentre estes equipamentos, existe uma rede de magnetômetros que estão instalados em diversos sítios da América do Sul que constituem a Rede Embrace de Magnetômetros. O magnetômetro utilizado nesta rede é o do tipo núcleo saturado, como descrito na seção anterior. As coordenadas geográficas e as características das localidades onde estão instalados esses magnetômetros são apresentadas na Tabela 3.1. Um exemplo de estação

é apresentado na Figura 3.3, a qual ilustra o magnetômetro instalado em Cachoeira Paulista (SP), Brasil.

A Tabela 3.1 descreve a quantidade de magnetômetros que estão disponíveis e que foram comprados atualmente pela Rede Embrace, mas no momento existe em torno de 10 magnetômetros funcionando de forma adequada na coleta de dados. Alguns deles ainda não foram instalados, como o magnetômetro de Belém – PA. Há alguns que estão sob o processo de calibração, e alguns que apresentam problemas de medida e não foram utilizados nesse trabalho.

Tabela 3.1 – Localização geográfica das estações magnéticas do Embrace (e estações candidatas) com sua correspondente latitude magnética, ângulo de inclinação, limite mínimo para índice K da estação igual a 9 (K9) e código designado, além do país (UN).

Estações Magnéticas	Código UN IAGA **	Geográfica		Lat. Geomag. (°)	Altitude (m)	DIP (°)	K9 (nT)
		Lat.	Lon.				
Belém - PA	BLM BR	01°26'28"S	48°26'40"W	-00.4	016	-00.80	600
São Luís - MA	SLZ BR	02°35'39"S	44°12'35"W	-03.6	032	-07.26	500
Alta Floresta - MT	ALF BR	09°52'13"S	56°06'15"W	-03.7	284	-07.50	500
Cachimbo - PA	CXB BR	09°21'27"S	54°54'53"W	-04.0	464	-07.79	500
Manaus - AM	MAN BR	02°53'18"S	59°58'11"W	+04.4	102	+08.09	500
Araguatins - TO	ARA BR	05°36'01"S	48°06'02"W	-05.6	103	-11.30	450
Eusébio - CE	EUS BR	03°52'48"S	38°25'28"W	-08.2	043	-16.51	400
Palmas - TO	PAL BR	10°17'50"S	48°21'41"W	-08.3	231	-16.52	400
Cuiabá- MT	CBA BR	15°33'17"S	56°04'10"W	-08.5	233	-17.10	400
Boa Vista - RR	BOA BR	02°48'02"N	60°40'33"W	+09.4	076	+18.80	400
Jataí – GO	JAT BR	17°55'54"S	51°43'06"W	-12.3	708	-24.60	350
Campo Grande - MS	CGR BR	20°30'24"S	54°37'04"W	-13.7	540	-25.50	350
Tucumán - TU	TCM AR	26°49'20"S	65°11'40"W	-15.8	431	-27.35	300
Cachoeira Paulista - SP	CXP BR	22°42'07"S	45°00'52"W	-18.9	601	-36.43	300
São José dos Campos - SP	SJC BR	23°12'31"S	45°57'49"W	-19.1	583	-36.64	300
Vassouras - RJ	VSS BR	22°24'07"S	43°39'08"W	-19.7	443	-38.40	300
São Martinho da Serra - RS	SMS BR	29°26'37"S	53°49'22"W	-21.6	462	-36.65	300
Rio Grande - TF	RGA AR	53°47'09"S	67°45'42"W	-39.9	010	-50.03	400
Estação Cmdt. Ferraz - AC	ECF BR	62°05'06"S	58°24'12"W	-58.4	010	-53.20	800

** UN = País, BR = Brasil, AR = Argentina

Fonte: Modificado de [Denardini et al., 2016](#).

O objetivo da Rede Embrace de Magnetômetros é cobrir a maior parte da extensão territorial da América do Sul, com a intenção de complementar as lacunas nas medidas geomagnéticas que estão disponíveis *on-line* hoje ([DENARDINI et al., 2016](#)). Para isso, cada estação magnética

apresentada na Tabela 3.1 é provida de no mínimo um magnetômetro do tipo *fluxgate* de três eixos.

Figura 3.3 - Exemplo de magnetômetro da Rede do Clima Espacial instalado em Cachoeira Paulista.



Fonte: Disponível no site do Clima Espacial em:

<http://www2.inpe.br/climaespacial/MainViewer/faces/mag_about.xhtml>.

Acessado em 18 de maio de 2016.

Esses magnetômetros são instalados cuidadosamente com o seu sensor enterrado a 1 metro de profundidade e cobertos (por materiais livres de qualquer liga ou estrutura metálica) para que o sensor não sofra alterações na medida do campo magnético terrestre devido a variações térmicas. Eles são projetados para terem a precisão magnética de 0,1 nT e fazerem medições do campo magnético terrestre na faixa de até ± 70.000 nT e para faixas dinâmicas de ± 250 nT, ± 1000 nT e ± 2.500 nT. Desta forma, cobrindo as variações diurnas de amplitude dos componentes magnéticos de baixa e alta latitude (VELIZ, 2010). Os magnetômetros são instalados em um local que fique aproximadamente, entre 30 e 50 metros de distância da plataforma de controle e fonte da energia elétrica para o seu funcionamento. Para o armazenamento de dados, os magnetômetros possuem um sistema de controle por um computador particular, onde é feito o armazenamento local dos dados e há a disponibilidade de um servidor na Internet para a transferência de dados on-line (DENARDINI et al., 2016).

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo, apresentamos a metodologia desenvolvida e as técnicas matemáticas que utilizamos na análise das variações do índice K_{sa} frente às variações do índice K_p para um mesmo período. Esta metodologia consiste de três fases: (a) uma análise de qualidade e precisão dos dados magnéticos; (b) uma análise do método de construção do K_{sa} ; e (c) finalmente, na comparação estatística das variações dos índices mencionados acima.

A análise da qualidade dos dados magnéticos consiste em uma comparação entre dados coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros e dados coletados para Rede Intermagnet para a mesma localidade e período de tempo. Essa comparação entre os dados coletados se deu através de análise de ajustes lineares aplicados aos espectros de potência diários. Ela é apresentada em detalhes na primeira sessão deste capítulo. A análise do método de construção do K_{sa} consiste na comparação das variações do índice K_p frente as mesmas variações temporária de um índice similar, denominado doravante de K_p^* , construído com os mesmo dados coletados e usados na construção do K_p . Contudo, vale ressaltar que este K_p^* foi construído usando a metodologia aplicada na construção do K_{sa} , enquanto o K_p (disponível para *download* na internet) foi construído usando a metodologia definida pela IAGA. Os resultados desta comparação são apresentados detalhadamente na segunda sessão deste capítulo. Finalmente, a última sessão deste capítulo apresenta a forma como foi realizada a comparação estatística das variações dos índices do K_p e K_{sa} . Os resultados propriamente ditos desta comparação são apresentados e discutidos em detalhes no capítulo seguinte deste trabalho de dissertação de mestrado.

4.1. Análise de qualidade dos dados magnéticos

Nesta sessão apresentamos, inicialmente, a análise de qualidade dos dados magnéticos, incluindo uma revisão sobre as ferramentas

matemáticas utilizadas nesta e em outras análises de nosso estudo. No qual consideramos que o magnetômetro da Rede Intermagnet que é geralmente do tipo de *fluxgate*, está calibrado e é em tese de melhor qualidade e mais sofisticado que os magnetômetros da Rede Embrace. Portanto, esperamos que os dados magnéticos vindos das estações magnéticas dos equipamentos da Rede Embrace se assemelhem aos dos dados magnéticos fornecidos pelos observatórios magnéticos vindos dos equipamentos da Rede Intermagnet.

Os resultados das análises são apresentados imediatamente após a metodologia ser apresentada uma vez que estes sustentam a nossa hipótese de que dados de estações magnéticas podem ser usados para construção de índices magnéticos de forma similar aos dados de observatórios.

4.1.1. Análise de Fourier

Como parte da ferramenta matemática utilizada na análise de qualidade dos dados magnéticos, fizemos uso de análise espectrais, cuja fundamentação encontramos na expansão em termos de Fourier ou série de Fourier que é uma somatória de integrais que podem ser descritas como

$$x(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k e^{iK\omega_0 t}. \quad (4.1)$$

Ou seja, a análise de Fourier pode ser interpretada como um mapeamento de uma função para outra. E, quanto mais termos da expansão da série de Fourier, maior a precisão deste mapeamento (RILEY et al., 2006). A Equação 4.1 é conhecida como Transformada Discreta de Fourier (DFT). A DFT nos fornece uma aproximação para os coeficientes de Fourier (RILEY et al., 2006), os quais podem ser obtidos na forma da equação a seguir: Logo,

$$C_k = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} x(t) \cdot e^{-iK\omega_0 t} dt. \quad (4.2)$$

Com estes conceitos é possível representar uma forma de onda complexa em termo de um conjunto de ondas sinusoidais. E como se conhece bem o comportamento de ondas senos e cossenos, uma série de Fourier em senos e cossenos pode descrever com relativo detalhamento o que está acontecendo nas formas de ondas complexas. A transformada de Fourier pode representar uma função integrável $f(t)$ como a soma de exponenciais complexas, dada por:

$$\mathcal{F}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (4.3)$$

onde ω é a frequência angular em rad/s, e $\mathcal{F}(\omega)$ é amplitude complexa.

$$f(t) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(\omega)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(\omega)e^{i\omega t} d\omega, \quad (4.4)$$

Por uma questão de sinal, utiliza-se uma definição em termos da frequência ordinária,

$$\mathcal{F}_0(f) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-2\pi i f t} dt, \quad (4.5)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}_0(f)e^{2\pi i f t} df, \quad (4.6)$$

onde tem-se que a relação entre as duas equações acima seja:

$$\mathcal{F}_0(f) = \mathcal{F}(2\pi f). \quad (4.7)$$

Finalmente, devido ao seu grande uso, a transformada de Fourier está disponível em várias linguagens de programação de alto nível ([MACHADO, 2000](#)).

4.1.2. Transformada rápida de Fourier

Uma aplicação computacional de transformada de Fourier é descrita na forma da transformada rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*), a qual recebe esse nome justamente por ser um algoritmo

mais rápido de cálculo. A FFT não deixa de ser uma implementação digital da transformada de Fourier. Ela é um algoritmo para calcular a transformada discreta de Fourier e também sua inversa. Ela resolve uma forma de onda do tempo em seus componentes senoidais e leva um bloco de dados no domínio do tempo, retornando o espectro de frequências dos dados. A FFT não produz um espectro contínuo. Ela retorna um espectro discreto, em que o conteúdo de frequência da forma de onda é resolvido em um número finito de linhas de frequência, ou pacotes de onda (MACHADO, 2000; PUPIN, 2011). A principal diferença de uma DFT para a FFT é que esta última é capaz de calcular o espectro apenas em determinadas frequências (múltiplas de f_0/N , onde f_0 é a frequência de amostragem), enquanto DFT pode calcular o espectro em qualquer frequência arbitrária.

Se considerar uma DFT de N pontos tem-se que

$$H_k = \sum_{j=0}^{N-1} h_j \omega^{jk}, \quad (4.8)$$

onde ω é definido por $e^{i2\pi/N}$ ou $e^{-i2\pi/N}$. Portanto, N é definido por $N = 2^R$, onde R é um inteiro positivo (RILEY et al., 2006).

Portanto, um algoritmo de FFT tem (em princípio) a metade das somatórias que um algoritmo de DFT, para o mesmo número N de pontos. Só que são duas somas, uma contendo termos pares e outra contendo termos ímpares. Cada uma torna-se uma DFT de N/2 pontos como:

$$H_k = \sum_{j=0}^{N/2-1} h_{2j}(\omega^2)^{jk} + \sum_{j=0}^{N/2-1} h_{2j+1}(\omega^2)^{jk} \omega^k. \quad (4.9)$$

Respectivamente, pontos pares e ímpares, tornando-se:

$$H_k = H_k^0 + \omega^k H_k^1. \quad (4.10)$$

Com

$$H_k^0 = \sum_{j=0}^{N/2-1} h_{2j}(\omega^2)^{jk} \quad (4.11)$$

e

$$H_k^1 = \sum_{j=0}^{N/2-1} h_{2j+1}(\omega^2)^{jk} \omega^k. \quad (4.12)$$

Percebe-se que as DFTs H_k^0 e H_k^1 de $N/2$ pontos tem o peso ω^2 e período $N/2$. Neste contexto, o H_k^0 define a DFT de $N/2$ pontos de $(h_0, h_2, \dots, h_{N-2})$ e H_k^1 define a DFT de $N/2$ pontos de $(h_1, h_3, \dots, h_{N-1})$. Em outras palavras, para N pontos da FFT, o sistema deve calcular para $(N \log_2 N)$, mas para a DFT, existem (N^2) vezes, fazendo que a FFT seja mais rápida de calcular do que a DFT (PUPIN, 2011).

Adicionalmente aos conceitos associados às transformadas, vale lembrar que é necessário saber que o número de amostras no tempo determina a frequência de amostragem. Assim, no caso dos dados magnéticos deste trabalho:

$$f_s = \frac{1}{60s} = 0,01666 \text{ Hz}, \quad (4.13)$$

ou seja, a frequência de amostragem f_s é descrita por cada dado de amostra, dividido pelo tempo entre cada coleta dessa amostra. Esse tempo, também conhecido como tempo de amostragem, é o período que separa duas amostras consecutivas. No caso desta dissertação utilizamos $60s$. Além de todos estes conceitos, também é importante lembrar que a taxa de amostragem de uma forma de onda no tempo, determina a resolução pela frequência máxima. Pois, o Teorema de *Nyquist* determina que a taxa de amostragem f_s (frequência de amostragem) do sinal observado deve ser no mínimo duas vezes maior que o valor da frequência máxima $f_{\text{máx}}$ alcançada pelo sinal sendo amostrado. Ele estabelece que é possível armazenar o sinal contínuo em todas as frequências num sinal digital se for respeitada uma taxa mínima de amostragem para que se possa reproduzi-lo adequadamente. Esta taxa

mínima é definida de Frequência de *Nyquist* f_{Ny} , alguns autores definem como Frequência de Corte ou *Aliasing Frequency* (BOWMAN, 2006; WILEY, 2011). Matematicamente, a frequência de *Nyquist* pode ser expressa na forma da equação a seguir, já aplicada para o caso dos magnetômetros usados neste trabalho:

$$f_c = f_a = f_{Ny} = \frac{1}{2 \cdot 60s} = 0,008333 \text{ Hz.} \quad (4.14)$$

A partir deste estágio, também é possível determinar a Resolução de Frequência f_r , a qual é expressa da seguinte forma (ainda aplicada aos dados sendo analisados neste trabalho):

$$f_r = \frac{f_a}{NP/2} = \frac{0,00833}{1440/2} = \frac{0,00833}{720} = 0,00115736 \text{ Hz,} \quad (4.15)$$

onde NP é o número de pontos ou seja, o número de dados coletados ao longo de um dia dividido por 2 (uma porção positiva e outra negativa do espectro de frequências). Uma vez que ao longo de um dia, temos $NP = 24$ horas = 1440 minutos ou pontos por dia. Além disso, como estamos analisando dados reais tomados a cada minuto estamos interessados somente a parte real do espectro por se tratar de espectro simétrico com respeito à origem, portanto $NP = 720$ e a Frequência F do sinal analisado será dada pela seguinte equação:

$$F = 720 \cdot f_r. \quad (4.16)$$

Finalmente, revisitados todos estes conceitos sobre as transformadas de Fourier e apresentados os limites para as frequências de corte e a resolução de frequência, aplicados aos dados sendo analisados neste trabalho, os espectros de potências foram obtidos fazendo:

$$G(x) = |\mathcal{F}(x)|^2. \quad (4.17)$$

Ou seja, a magnitude ao quadrado dos coeficientes de Fourier (BOWMAN, 2006), a fim de se obter o módulo da função. Neste caso, da função de onda da componente H do campo magnético terrestre. Sobre este espectro de potência do valor absoluto, realizam-se ajustes lineares

para identificar as características do sinal que descrevem a sua qualidade. Para esta tarefa foi empregado o algoritmo FFT do software *Interactive Data Language*[®] (IDL), o processo é similar ao de se verificar a força do sinal em bandas de frequências designadas (FERREE, 2000).

4.1.3. Seleção de dados e ajustes lineares

De posse da ferramenta matemática escolhida para a análise da qualidade dos dados magnéticos usados no cálculo do K_{sa} , aplicamos uma transformada rápida de Fourier a todos os dados coletados pelos magnetômetros instalados no Observatório Magnético de Vassouras (VSS) no período de 01 de junho de 2015 a 30 de abril de 2016. Neste Observatório Magnético de Vassouras estão instalados magnetômetros do tipo variômetro da Rede Embrace de Magnetômetros e o variômetro da Rede Intermagnet. A transformada foi aplicada para os dados magnéticos coletados a cada dia, individualmente. Isso foi feito separadamente para os dados da Rede Embrace de Magnetômetros e da Rede Intermagnet. Com isso, obtiveram-se dois espectros de potência para cada dia do período acima. Um dos espectros diários corresponde aos dados Rede Embrace de Magnetômetros e o outro para a Rede Intermagnet.

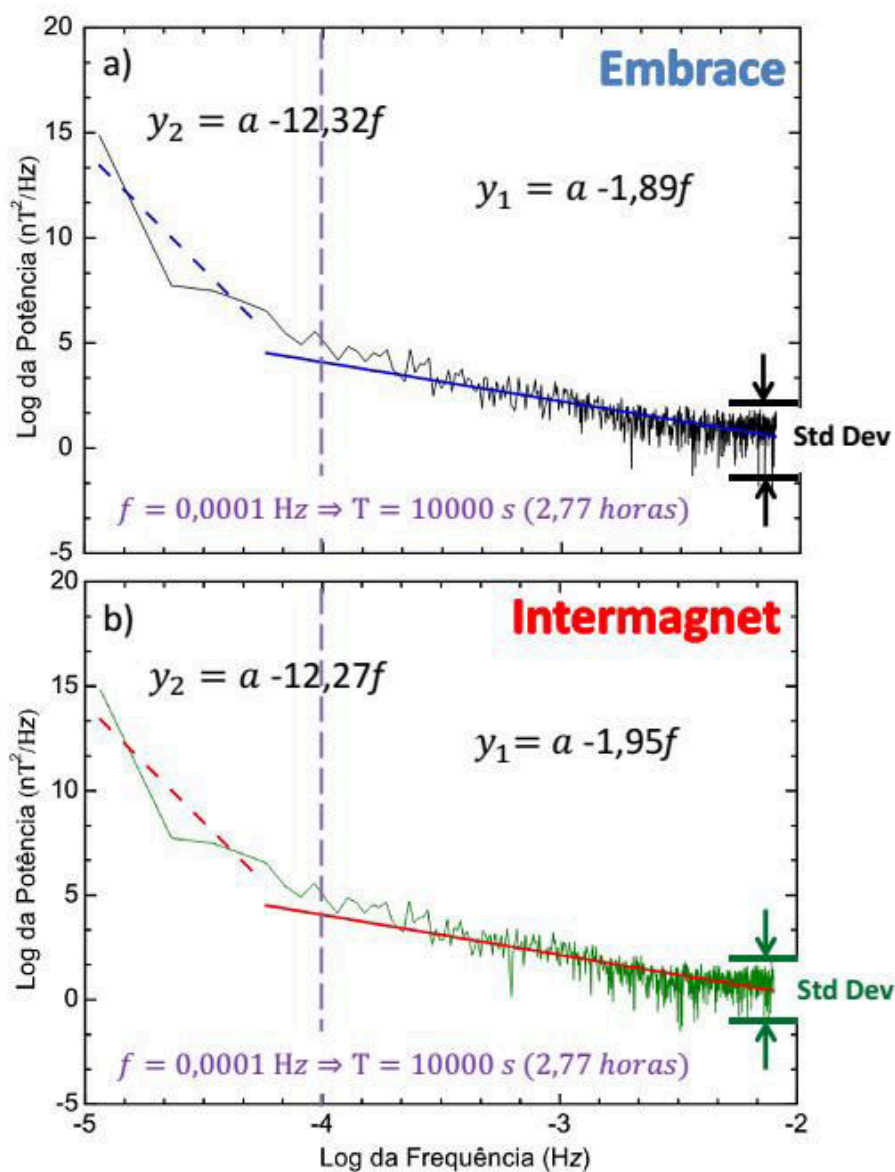
A partir de cada um destes espectros de potência obtidos para cada dia de operação dos magnetômetros foram realizados dois ajustes lineares em cada espectro (independente da rede que coletou os dados). Por meio destes ajustes, verificamos a evolução do comportamento dos dados magnéticos coletados pelas duas redes ao longo do tempo estudado. Esta análise foi realizada somente para a estação de Vassouras, pois os magnetômetros das duas redes estão instalados a poucos metros de distância um do outro.

Para exemplificar como transcorreu a análise dos espectros de potências, apresentamos na Figura 4.1 exemplos de espectros de potência diários, sendo um deles correspondente aos dados coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros, enquanto o outro corresponde aos dados coletados pela Rede Intermagnet. Portanto, este exemplo da Figura 4.1 mostra uma

análise espectral da componente H com os dados magnéticos da Rede Embrace de Magnetômetros (Figura 4.1-a) e com os dados magnéticos da Rede Intermagnet (Figura 4.1-b), para os dados coletados no dia 02 de junho de 2015.

No que tange aos dois ajustes por espectro, o primeiro ajuste (y_1) destes foi aplicado ao conjunto de dados com frequências mais altas (períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas) e a equação da reta ajustada é apresentada junto a linha contínua. O outro ajuste (y_2) foi aplicado aos dados com frequências mais baixas (períodos superiores a $\approx 2,77$ horas) e a equação da reta ajustada é apresentada junto à linha tracejada. Estes ajustes estão respectivamente exemplificados à direita (períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas) e à esquerda (períodos superiores a $\approx 2,77$ horas) nos dois espectros de potência apresentados na Figura 4.1.

Figura 4.1 - a) Espectro de potência obtido com os dados da Rede Embrace. b) Espectro de potência obtido com os dados da Rede Intermagnet.



Fonte: Produção do autor.

Como resultado deste estudo com dados que cobrem o período de 01 de junho de 2015 a 30 de abril de 2016, ilustrados neste exemplo apresentado aqui, conclui-se que a qualidade dos dados da Rede Embrace é boa quando comparada com os dados da Rede Intermagnet. Mesmo considerando somente a porção dos dados coletados pelo magnetômetro da Rede Embrace com frequências maiores (períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas), a sua qualidade dos dados da Rede Embrace é

tão boa quanto àquela da Rede Intermagnet. Este fato é observado nos exemplos de resultado de primeiro ajuste linear de cada espectro mostrados na Figura 4.1-a e -b. Nestes, o coeficiente angular da reta para o primeiro ajuste na Figura 4.1-a é $b = -1,89$, o que é muito próximo do coeficiente para a reta do primeiro ajuste da Figura 4.1-b é $b = -1,95$.

Com relação ao resultado deste exemplo apresentado aqui para os ajustes lineares aplicados aos dados magnéticos correspondentes à períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas, representados pelas retas à direita da Figura 4.1, verificamos que as distribuições dos dados coletados pelas duas redes de magnetômetros são similares. Isso pode ser visto pelos valores do coeficiente angular b em ambas as figuras, Figura 4.1-a e -b. A diferença entre os coeficiente angular permaneceu na casa centesimais. Isto significa que a qualidade dos dados medidos pela Rede Embrace de Magnetômetros é tão boa quanto aos dados da Rede Intermagnet nesta faixa de frequência. De fato, esta é a faixa que temos interesse, pois influencia na construção do índice Ksa (obtido a partir de variações em períodos inferiores a 3 horas).

Adicionalmente, para confirmarmos a boa qualidade dos dados da Rede Embrace de Magnetômetros para dados magnéticos correspondentes à períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas e, como forma de adicionarmos a estes resultados, um qualificador de espalhamento dos resultados (barra de erro), optamos por realizar um estudo da dispersão do espectro de potência da componente H , dos dados magnéticos em relação à reta de ajuste linear para as frequências de 0,001 a 0,01 Hz, respectivamente na escala logarítmica -3 a -2 [$\text{Log}(F)$ Hz]. Uma ilustração deste estudo esta indicada no gráfico da Figura 4.2-d e é detalhado a seguir.

A Figura 4.2-a apresenta a parte real do espectro de potência da componente H dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro da Rede Embrace para o observatório de Vassouras no dia 02 de junho de 2015. A Figura 4.2-b apresenta o logaritmo do mesmo espectro de potência versus o logaritmo da frequência. Na Figura 4.2-c está uma suavização de 30 pontos do espectro apresentado no item anterior, porém

limitado à faixa de frequência entre 0,001 e 0,01 Hz. Por fim, a Figura 4.2-d mostra a diferença entre a suavização apresentada no painel c e o espectro apresentado no painel b desta lista, limitado à mesma faixa de frequência da figura acima. A partir desta variação ao longo desta faixa de frequência tomamos o desvio padrão (Std Dev, do inglês *Standard Deviation*).

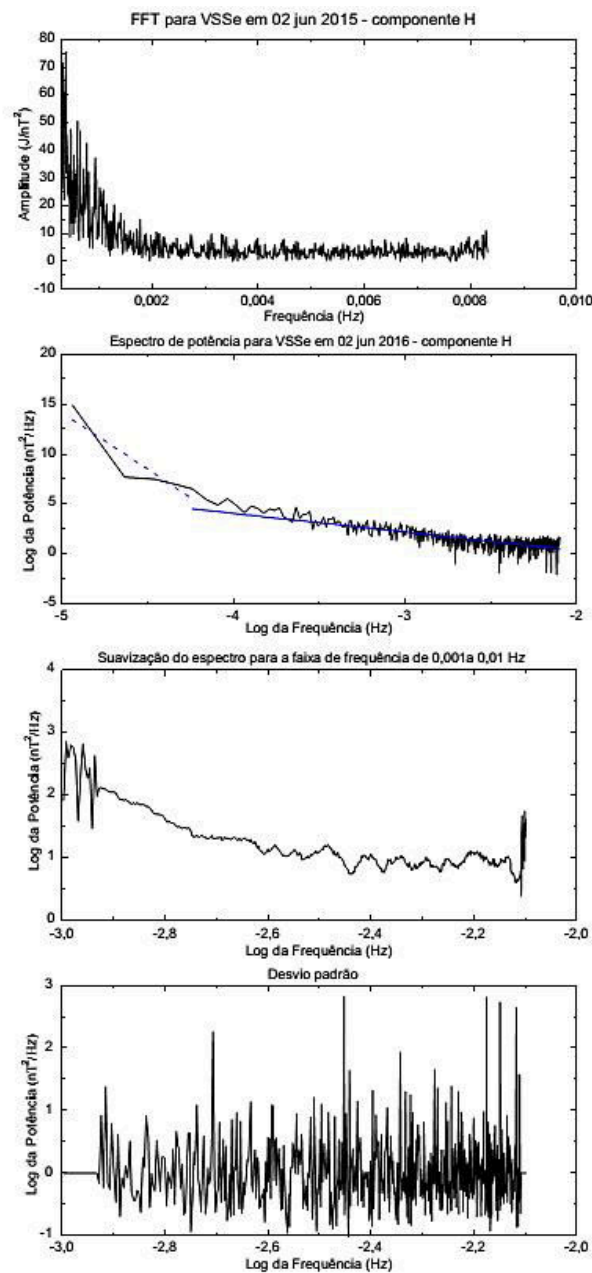
Como resultado deste exemplo, encontramos o desvio padrão de 0,40284 para a parte real do espectro de potência da componente H dos dados magnéticos coletados pelo equipamento da Rede Embrace de Magnetômetros ao longo da faixa de frequência entre 0,001 e 0,01 Hz para o dia 02 de junho de 2015.

Utilizando as propriedades logarítmicas conseguimos obter

$$\log_{10} 0,4 \Leftrightarrow \frac{2,5nT^2}{Hz}. \quad (4.20)$$

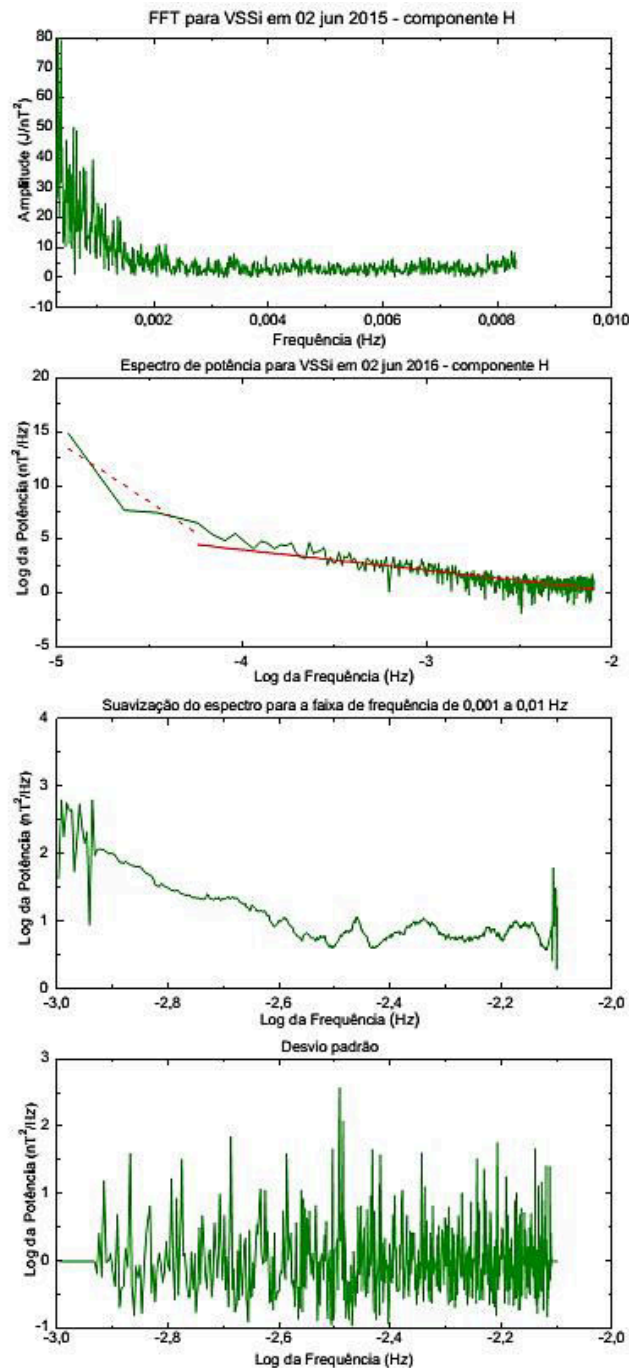
Ou seja, para Vassouras no dia 2 de Junho de 2015 nós tivemos um valor médio de 0,40284 do desvio padrão, o que representa uma flutuação de $2,5 \text{ nT}^2/\text{Hz}$ na faixa que vai de 0,001 Hz a 0,01 Hz. Enquanto a precisão do nosso instrumento é de $0,1 \text{ nT}^2/\text{Hz}$. Portanto, esta dispersão está na ordem de grandeza da precisão do instrumento. Aplicando a mesma análise para a parte real do espectro de potência da componente H dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro do observatório de Vassouras da Rede Intermagnet no mesmo período, obtivemos os resultados apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.2 – Espectro de potência mostrando (a) a parte real do espectro de potência da componente H ; (b) o logaritmo do mesmo espectro de potência versus o logaritmo da frequência; (c) uma suavização de 30 pontos do espectro apresentado no item anterior, porém limitado à faixa de frequência entre 0,001 e 0,01 Hz; e (d) a diferença entre a suavização apresentada em (c) e o espectro apresentado em (b), limitado à mesma faixa de frequência, todos obtidos pela análise dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro da Rede Embrace (VSSe) no dia 2 de Junho de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 – Espectro de potência mostrando as mesmas análises, com as mesmas condições mostradas na Figura 4.2. Todos obtidos pelas análises dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro da Rede Intermagnet (VSSi) no dia 2 de Junho de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Neste caso, o desvio padrão encontrado foi de 0,44135. Portanto:

$$\log_{10} 0,44 \Leftrightarrow \frac{2,7nT^2}{Hz}. \quad (4.21)$$

Ou seja, para o dia 2 de Junho de 2015, nós tivemos um valor médio de 0,44135 para o valor do desvio padrão da parte real do espectro de potência da componente H dos dados magnéticos coletados pelo magnetômetro da Rede Intermagnet ao longo da faixa de frequência entre 0,001 Hz e 0,01 Hz neste dia. Isso representa uma flutuação de $2,7 nT^2 / Hz$ na faixa que vai de 0,001 Hz a 0,01 Hz. Esse resultado não era esperado, pois o equipamento da Rede Intermagnet é um magnetômetro que em tese seria de melhor qualidade, mais sofisticado, geralmente do tipo de *fluxgate*.

4.1.4. Resultados da análise de qualidade dos dados

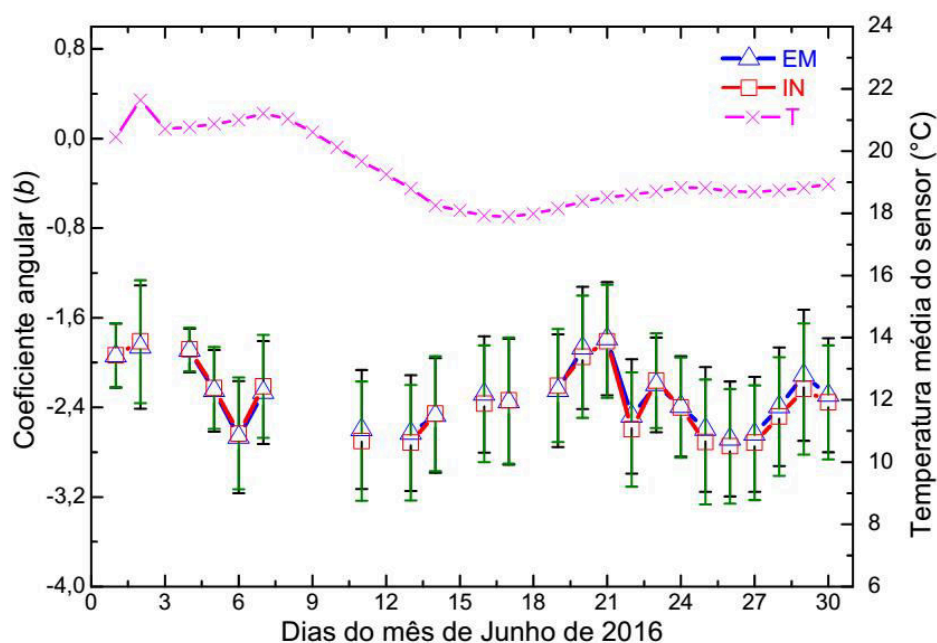
Estabelecida e testada a técnica pela qual realizamos a análise de qualidade dos dados magnéticos, os procedimentos acima foram aplicados a todos os dados coletados por ambos os instrumentos (da Rede Embrace de Magnetômetros e da Rede Intermagnet), ao longo de todo o período descrito no início da sessão anterior, ou seja, de 01 de junho de 2015 a 30 de abril de 2016.

De posse dos resultados, fizemos uma análise estatística para verificar a qualidade dos dados coletados, a fim de verificar se distribuições dos parâmetros dos ajustes lineares e o desvio padrão dos espectros de potência da componente H dos dados magnéticos coletados, pelos magnetômetros de ambas as redes, permanecem estáveis ao longo do tempo. Vale ressaltar neste momento que, o estudo da comparação da evolução dia-a-dia foi realizado com todos os dados do mês mais calmo, em relação ao nível de atividade magnética disponível no período ($Dst > -50 nT$), ou seja Junho de 2016.

Na Figura 4.4, apresentamos o resultado da evolução temporal dia-a-dia dos coeficientes angulares do ajuste linear do estudo do espectro de

potência do dado bruto para altas frequências (períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas). Superposto a esta variação apresentamos a temperatura média diária do sensor do magnetômetro da Rede Embrace.

Figura 4.4 – Variação dia-a-dia do coeficiente angular calculado para os dados magnéticos da Rede Embrace (linha azul) e da Rede Intermagnet (linha vermelha), superposto pela variação da temperatura média diária no sensor do magnetômetro, obtidos ao longo dos dias do mês de Junho de 2016, no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).



Fonte: Produção do autor.

Nesta Figura 4.4 pode-se observar a evolução temporal ao longo dos dias do mês de junho de 2016 das curvas com dos coeficientes angulares dos ajustes lineares aos dados da Rede Embrace de Magnetômetros (triângulos azuis) e da Rede Intermagnet (quadrados vermelhos). Essa curva é apresentada juntamente com o respectivo desvio padrão para região de frequências mais altas (vide ilustração na Figura 4.1). Os desvios padrões correspondentes aos espectros obtidos a partir dos dados da Rede Embrace estão representados em preto, enquanto os demais estão apresentados na cor verde.

Observamos que as curvas praticamente se sobrepõem. Isso significa que o dado coletado por um equipamento da Rede Embrace de Magnetômetros é equivalente ao dado fornecido pela Rede Intermagnet. Isso é observado, mesmo desconsiderando alguns pontos (dias) por falta de dados magnéticos, ou seja, devido a problemas de operação da Rede Intermagnet. Entre esses dias, listamos os dias 03, 08, 09, 10 e 15 de junho. Nos dias 03, 08, 09 e 15 de junho, o magnetômetro da Rede Intermagnet não operou durante o dia completo, inviabilizando a análise espectral. No dia 10 de junho, um dia após o reestabelecimento da operação do magnetômetro da Rede Intermagnet, ambos os equipamentos operaram ao longo de todo o período. Contudo, os dados coletados por este magnetômetro aparentavam ter um comportamento fora da variação diurna normal, quando os comparamos com dados coletado ao longo de dias próximos ao dia 10. Portanto, a fim de evitar possíveis erros na análise os dados coletados ao longo deste dia também foram descartados.

Também desconsideramos os dados coletados pelo magnetômetro Rede Embrace nos dias 12 e 18 de junho. Isso foi feito porque a análise espectral dos dados coletados por este magnetômetro revelou uma flutuação que consideramos anormal para medidas magnéticas. Em consulta ao operador do observatório aferimos que possa ter havido uma aproximação de motores elétricos do equipamento nestes dias. Apesar destes descartes, 23 entre os 30 dias do mês de junho foram considerados na análise. Entre eles há uma sobreposição evidente dos coeficientes angulares, levando a conclusão que os dados coletados pelo magnetômetro da Rede Embrace têm alta correlação com os mesmos dados coletados pelo magnetômetro da Rede Intermagnet.

A fim de ratificar a relação entre as variações temporais descritas acima aplicamos uma correlação linear para medir o grau de relação entre duas variáveis. Neste caso, usamos o coeficiente de correlação de Pearson ([MUKAKA, 2012](#)) para medir a intensidade e a direção da relação linear

entre duas variáveis quantitativas. O coeficiente de correlação de Pearson (r) pode ser descrito pelas equações a seguir:

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (4.22)$$

$$S_{yy} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2, \quad (4.23)$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}), \quad (4.24)$$

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \cdot S_{yy}}}, \quad (4.25)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}}. \quad (4.26)$$

Ou seja,

$$-1 \leq r \leq 1. \quad (4.27)$$

Com essa equação Pearson conseguiu descrever qual o grau de relacionamento linear entre valores emparelhados x e y em uma amostra (MUKAKA, 2012).

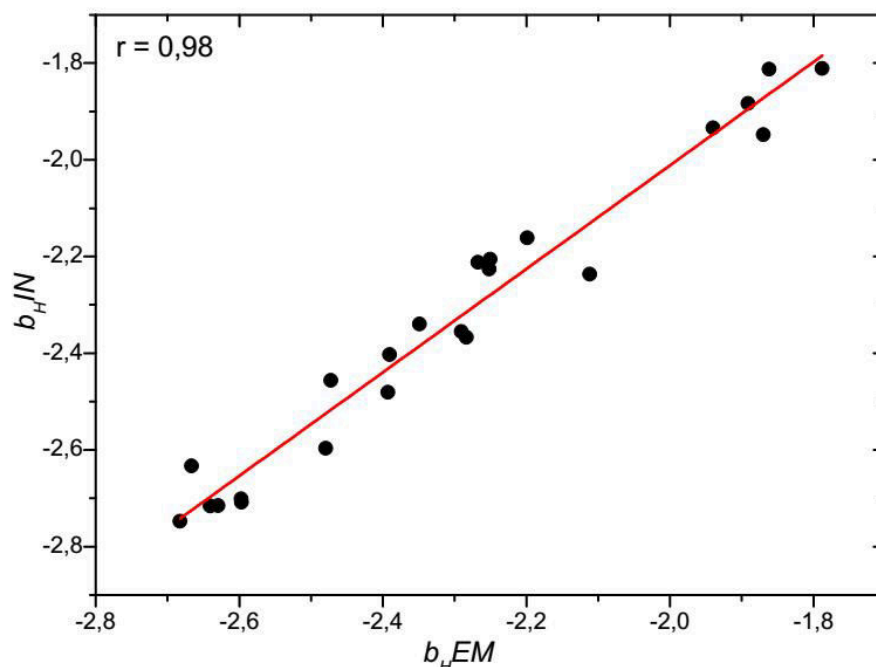
Este resultado de r indica que:

- quanto mais próximo de -1: maior a correlação negativa;
- quanto mais próximo de 1: maior a correlação positiva; e
- quanto mais próximo de 0: menor a correlação linear entre as variáveis x e y envolvidas na análise.

De fato, a Figura 4.5 abaixo, na qual apresentamos a correlação linear entre os coeficientes angulares obtidos dos ajustes lineares aos espectros

de potência dos dados magnéticos da Rede Embrace ($b_H EM$) e dos dados magnéticos da Rede Intermagnet ($b_H IN$), mostra um coeficiente de correlação de Pearson de 0,99 para o mês de junho de 2016. Isto significa que ambos equipamentos estão realmente medido as mesmas quantidades da mesma grandeza física no mesmo intervalo de tempo.

Figura 4.5 – Correlação linear (linha vermelha) entre os coeficientes angulares (círculos) obtidos dos ajustes lineares aos espectros de potência dos dados magnéticos da Rede Embrace ($b_H EM$) e dos dados magnéticos da Rede Intermagnet ($b_H IN$), obtidos ao longo dos dias do mês de Junho de 2016, no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).



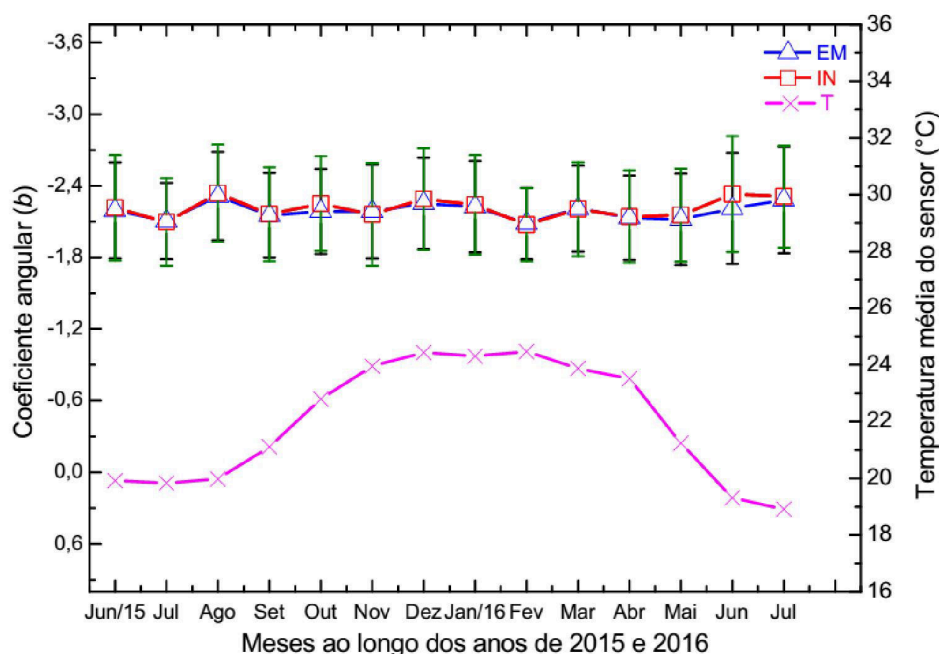
Fonte: Produção do autor.

Adicionalmente, uma vez que a temperatura demonstrada na Figura 4.4 está obviamente variando ao longo do mês, podemos assumir que nosso resultado independe da temperatura.

Subsequentemente e similarmente à análise ao longo dos dias de um mês magneticamente calmo, realizamos uma análise para verificar a evolução mês-a-mês dos mesmos parâmetros apresentados na Figura 4.4. Os resultados desta análise podem ser observados na Figura 4.6, onde apresentamos a relação entre as evoluções temporais

dos coeficientes angulares, do ajuste linear do estudo do espectro de potência, para altas frequências (períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas) ao decorrer dos meses, para o período de Junho de 2015 a Julho de 2016 no Observatório Magnético de Vassouras. Superposto a estas variações apresentamos a variação da temperatura média mensal do sensor.

Figura 4.6 – Variação mês-a-mês dos coeficientes angulares dos espectros de potência calculado para os dados magnéticos da Rede Embrace (linha azul) e da Rede Intermagnet (linha vermelha), superposto pela variação da temperatura média mensal no sensor do magnetômetro, obtidos ao longo dos meses de Junho de 2015 a Julho de 2016 no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).

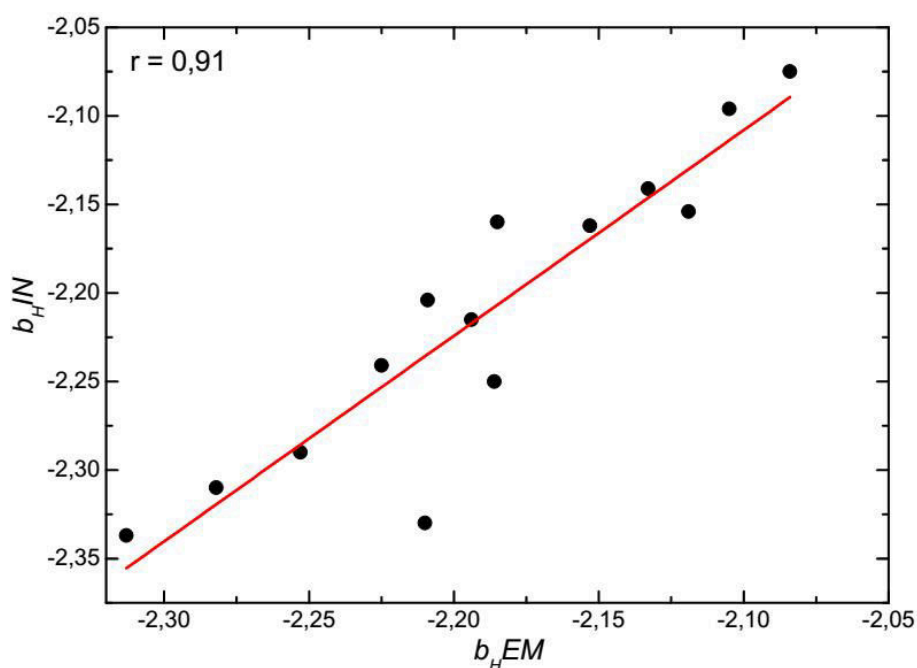


Fonte: Produção do autor.

Como podemos ver na Figura 4.6 as curvas em vermelho e em azul parecem estar muito bem correlacionadas, mas não tanto quanto aquelas apresentadas na Figura 4.4. O significado desta equivalência pode ser observado na correlação linear apresentada na Figura 4.7, em que apresentamos o resultado observado da correlação linear entre os coeficientes angulares obtidos dos ajustes lineares aos espectros de potência dos dados magnéticos da Rede Embrace (b_{HEM}), e dos dados

magnéticos da Rede Intermagnet (b_{HIN}), para o período ao longo dos meses de Junho de 2015 a Julho de 2016.

Figura 4.7 – Correlação linear das mesmas grandezas apresentadas na Figura 4.5, mas agora utilizando os dados magnéticos da Rede Embrace (b_{HEM}) e dos dados magnéticos da Rede Intermagnet (b_{HIN}), obtidos ao longo dos meses de Junho de 2015 a Julho de 2016, no Observatório Magnético de Vassouras (VSS).



Fonte: Produção do autor.

Percebemos que a correlação linear realizada aqui nesta Figura e para este período, apesar de forte (acima de 0,9), de fato não é tão boa quanto no ajuste anterior (dia-a-dia). Neste ponto, tornou-se relevante realizarmos uma análise da resposta dos equipamentos a variabilidade térmica. Assim, para ratificarmos esta correlação, calculamos a razão entre a excursão máxima (diferença entre o máximo e o mínimo da curva azul) dos coeficientes angulares obtidos dos ajustes lineares aos espectros de potência dos dados magnéticos da Rede Embrace e a excursão máxima (diferença entre o máximo e o mínimo da curva rosa) da temperatura média diária no sensor do magnetômetro ao longo do período da análise. Esta relação é apresentada na Equação 4.28 a seguir:

$$\text{Razão da Influência Térmica} = \frac{\Delta bh}{\Delta T} = \frac{|-2,3| - |-2,0|}{|24,4| - |19,0|^{\circ}\text{C}} = 0,05. \quad (4.28)$$

De forma equivalente, calculamos a mesma relação da equação acima para os coeficientes dos ajustes lineares aos espectros de potência dos dados magnéticos da Rede Intermagnet, cujo resultado apresentamos na Equação 4.29 abaixo:

$$\text{Razão da Influência Térmica} = \frac{\Delta bh}{\Delta T} = \frac{|-2,3| - |-1,95|}{|24,4| - |19,0|^{\circ}\text{C}} = 0,06 \quad (4.29)$$

Observamos que em ambos os casos as variações dos coeficientes angulares com a temperatura (n.b.: a temperatura usada nestes cálculos foi medida com equipamentos da Rede Embrace de Magnetômetros) são similares. A diferença entre estas razões é muito pequena, apesar de ser 1% em valores relativos. Portanto, podemos concluir que a variação térmica a qual os sensores magnéticos estão submetidos atua de forma equivalente em ambos os sensores das redes distintas. Com isso, fica evidenciado que os dados coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros, não só são equivalentes aos dados da Rede Intermagnet, como apresentam a mesma variabilidade com a temperatura. Uma vez que os valores do índice Kp , o qual tencionamos comparar com os valores do índice Ksa , são obtidos com dados da Rede Intermagnet, podemos afirmar que eventuais diferenças entre os índices não advém dos dados magnéticos e nem da forma como são coletados.

Finalmente, há evidências de pequenas variabilidades de longo prazo entre os dados coletados pelas redes de magnetômetros. Contudo, esta variabilidade não apresenta relevância aparente a curto prazo (período de um mês de dados) e não inviabiliza o resultado deste trabalho. Essa pressuposição pode se estender para períodos de até um ano, dada a forte correlação (0,91) e baixa diferença entre as resposta à variabilidade térmica (1%). Contudo, é importante ressaltar que as variações térmicas podem se tornar um aspecto relevante para estudos climatológicos de longo prazo, tais como análises da ordem de um ou mais ciclos solares.

4.2. Análise do método de construção do K_{sa}

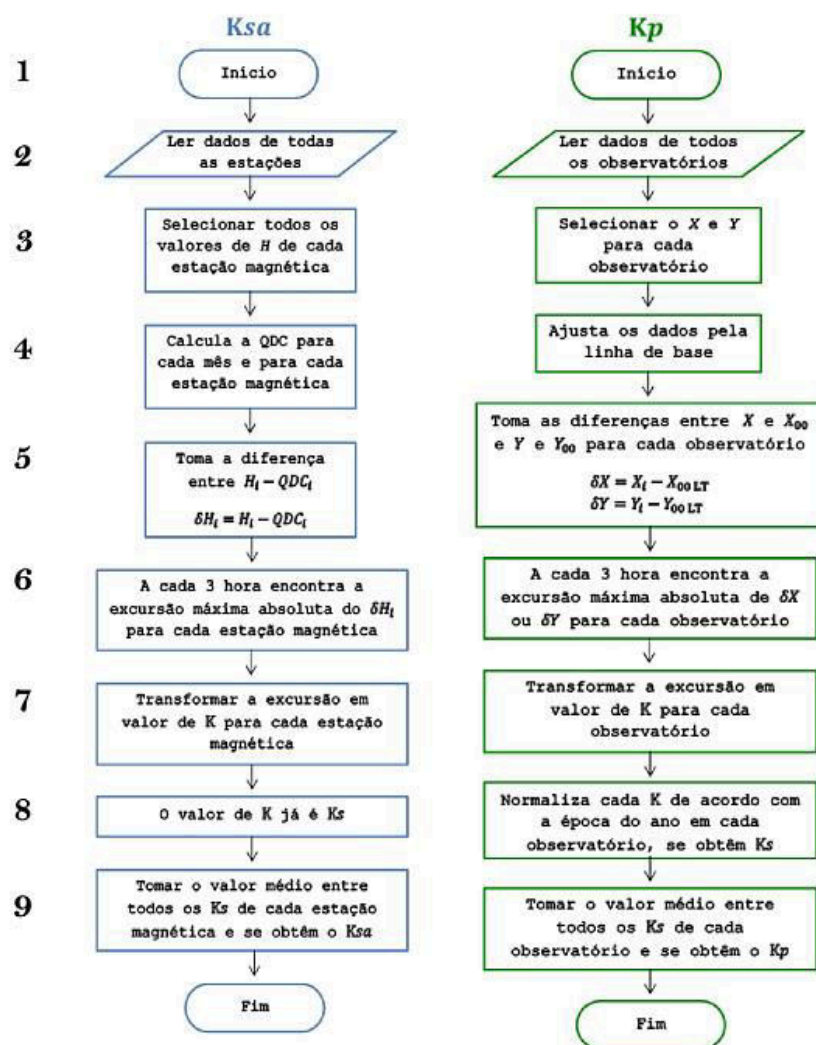
Nesta sessão discutiremos as diferenças e semelhanças nos processos de construção dos índices K_{sa} e K_p a fim de verificarmos se há alguma influência do método de construção na determinação do valor final do índice. Inicialmente, relembremos o processo de desenvolvimento do índice K_p apresentado no Capítulo 3.

O índice K_p é obtido pela média aritmética dos diversos índices K_s que são obtidos em cada um dos observatórios magnéticos. Por sua vez, estes índices K_s são uma padronização dos índices K obtidos dos observatórios magnéticos em função da conversão da variação da componente H do campo geomagnético terrestre a cada 3 horas. Dado que cada observatório tem sua própria tabela pseudo-logarítmica para converter variação da componente H em um correspondente K e que a componente H têm dependências sazonais, há também tabelas de correções sazonais para cada observatório magnético. Neste procedimento de cálculo do índice K_p são eliminadas as variações sazonais e as variações diurnas das estações magnéticas. Este processo é exemplificado pelo fluxograma localizado à direita na Figura 4.8.

Em contraposição a este processo, no método pelo qual o índice K_{sa} é construído o processo de eliminação das variações sazonais e diurnas no processo de obtenção da QDC (painel 4). Em síntese, o K_{sa} se inicia com a medição das componentes H de cada estação magnética, assim como mostra o painel 3. Depois realiza o processo do painel 4, assim como observamos na Figura 4.8. No próximo passo, tira-se a diferença de H_i com a QDC (painel 5) e a seguir obtêm-se a excursão máxima de δH_i para cada 3 horas (painel 6). No painel 7 transforma-se a excursão máxima para a escala K . Logo, ele é uma escala padronizada para as demais estações, pois com a realização da QDC elimina-se a sazonalidade. Portanto, na construção do índice K_{sa} , o algoritmo realiza implicitamente a transformação de K para K_s (painel 8), pois o K já é K_s . Assim, basta efetuar a média de todos os K_s de todas as estações magnéticas e obtêm-se o índice K_{sa} .

Na Figura 4.8 mostramos os dois fluxogramas com as atividades correspondentes aos processos de construção dos índices de atividade magnética K_{sa} e K_p para identificar as similaridades e as diferenças quanto à metodologia de construção destes.

Figura 4.8 – Fluxograma de comparação da metodologia de construção dos índices de atividade magnética K_{sa} e K_p .



Fonte: Produção do autor.

Para verificar se estas diferenças nos métodos de construção não afetam o valor final do K_{sa} , nós calculamos um índice que denominamos K_p^* que é obtido usando o algoritmo usado na construção do K_{sa} , mas alimentado com os mesmos dados (temporais e espaciais) usados no cálculo oficial

do K_p , fornecidos pelos observatórios magnéticos apresentados na Tabela 4.1, que utiliza o algoritmo da IAGA e que, pode ser mais bem entendido com as informações fornecidas pelo Centro Alemão de Pesquisa de Geociências (*German Research Centre for Geosciences*² - *GFZ*). Com isso, comparamos os três índices de atividade magnética, K_p , K_{sa} e K_p^* no qual apresentamos na Figura 4.9.

Tabela 4.1 – Tabela com a lista de observatórios magnéticos que contribuem com os dados magnéticos para a construção do índice de atividade magnética K_p .

#	IAGA Código	Nome da estação magnética	País	Geográfica		K9 (nT)
				Lat.	Lon.	
1	LER	Lerwick	Escócia	60°08'	358°49'	1000
2	MEA	Meanook	Canada	54°37'	246°40'	1500
3	SIT	Sitka	Alasca	57°03'	224°40'	1000
4	ESK	Eskdalemuir	Escócia	55°19'	356°48'	750
5	LOV	Lovö	Suécia	59°21'	17°50'	600
	UPS	Uppsala	Suécia	59°54'	17°21'	600
6	AGN	Agincourt	Canada	43°47'	280°44'	600
	OTT	Ottawa	Canada	45°24'	284°27'	750
7	RSV	Rude Skov	Dinamarca	55°51'	12°27'	600
	BFE	Brorfelde	Dinamarca	55°37'	11°40'	600
8	ABN	Abinger	Inglaterra	51°11'	359°37'	500
	HAD	Hartland	Inglaterra	50°58'	355°31'	500
9	WNG	Wingst	Alemanha	53°45'	9°04'	500
10	WIT	Witteveen	Holanda	52°49'	6°40'	500
	NGK	Niemegk	Alemanha	52°04'	12°41'	500
11	CLH	Cheltenham	Estados Unidos	38°42'	283°12'	500
	FRD	Fredericksburg	Estados Unidos	38°12'	282°38'	500
12	TOO	Toolangi	Austrália	-37°32'	145°28'	500
	CNB	Canberra	Austrália	-35°18'	149°00'	450
13	AML	Amberley	Nova Zelândia	-43°09'	172°43'	500
	EYR	Eyrewell	Nova Zelândia	-43°25'	172°21'	500

Contagem de observatórios magnéticos

Fonte: Modificada de www.gfz-potsdam.de, acessado em 20/11/2016.

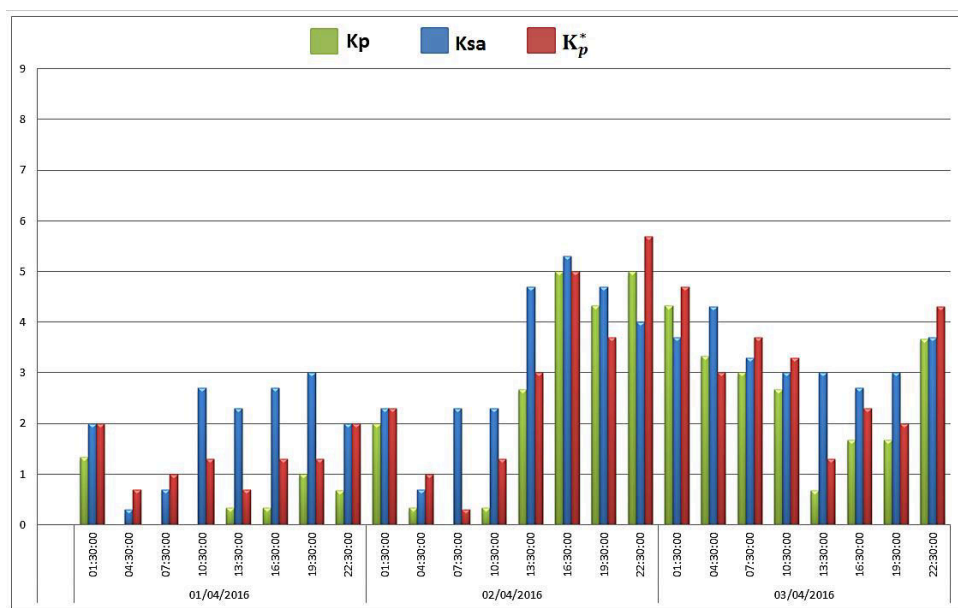
Para esta análise construímos o gráfico mostrado na Figura 4.9 onde apresentamos os três índices de atividade magnética K_p , K_{sa} e K_p^* ao longo de três dias, e outro gráfico na Figura 4.10 dado pelo conjunto de dados magnéticos, gerado pela construção dos índices a cada 3 horas onde mostramos a correlação linear. Esse mostra a relação do índice K_p com o índice K_p^* obtido pelo mesmo método que utilizamos para obter o

² *Helmholtz-Zentrum Potsdam* (GFZ). Disponível em: <<http://www.gfz-potsdam.de/kp-index>>. Último acesso em 23 de maio de 2016.

K_{sa} . Lembrando que tanto o índice K_p quanto o K_{sa} , são obtidos a cada 3 horas por um conjunto de observatório ou de estações magnéticas, portanto os resultados dos índices K_p, K_{sa} e K_p^* apresentados nas próximas figuras, são elaborados com a contribuição de todos os observatórios e estações magnéticas com dados disponíveis para a construção desses índices. Estas estações e observatórios são apresentados nas Tabelas 3.1 e 4.1, respectivamente para o índice K_{sa} e K_p .

A Figura 4.9 apresenta os valores dos índices de atividade magnética para o período de 01 a 03 de abril de 2016. Esta figura mostra um gráfico em barras coloridas onde às barras verdes representam o índice de atividade magnética K_p e, respectivamente as barras azuis e vermelhas, representam os índices K_{sa} e K_p^* . Onde o nível de atividade magnética é apresentado pelo índice K , que varia de 0 a 9 no eixo “y” e, no eixo “x”, temos o período em horas ao longo de três dias do mês de abril de 2016.

Figura 4.9 – Valores dos Índices de atividade magnética K_p , K_{sa} e K_p^* para o período de 01 a 03 de abril de 2016.



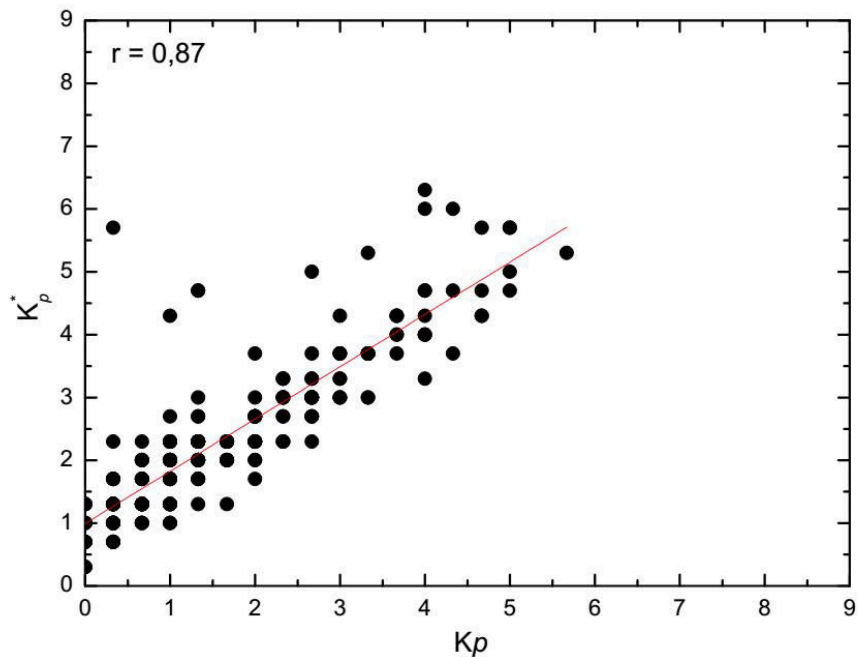
Fonte: Produção do autor.

Observamos que os três índices apresentam diferenças e semelhanças em distintas partes. Apesar de desejarmos que o índice K_p^* se igualasse ou fosse muito parecido com o índice de atividade magnética K_p , uma vez que os dois índices foram gerados com os mesmos dados magnéticos disponíveis na internet, no site da Intermagnet³, mas percebemos que existe uma pequena diferença entre os três índices apresentados na figura acima.

Portanto, para termos uma maior certeza quanto à relação entre os índices K_p e K_p^* , realizamos uma correlação linear entre eles. O resultado é apresentado na forma da Figura 4.10. Essa figura apresenta o nível de correlação entre os dois índices, através do coeficiente de correlação linear de Pearson “r”, onde $r = 0,87$, ou seja, há uma forte correlação entre os dois índices. Portanto, temos no eixo “x” o índice K_p , versus K_p^* no eixo “y”, na escala de 0 a 9.

³ International Real-time Magnetic Observatory Network (Intermagnet). Disponível em: <<http://www.intermagnet.org/index-eng.php>>. Último acesso em 12 de dezembro de 2016.

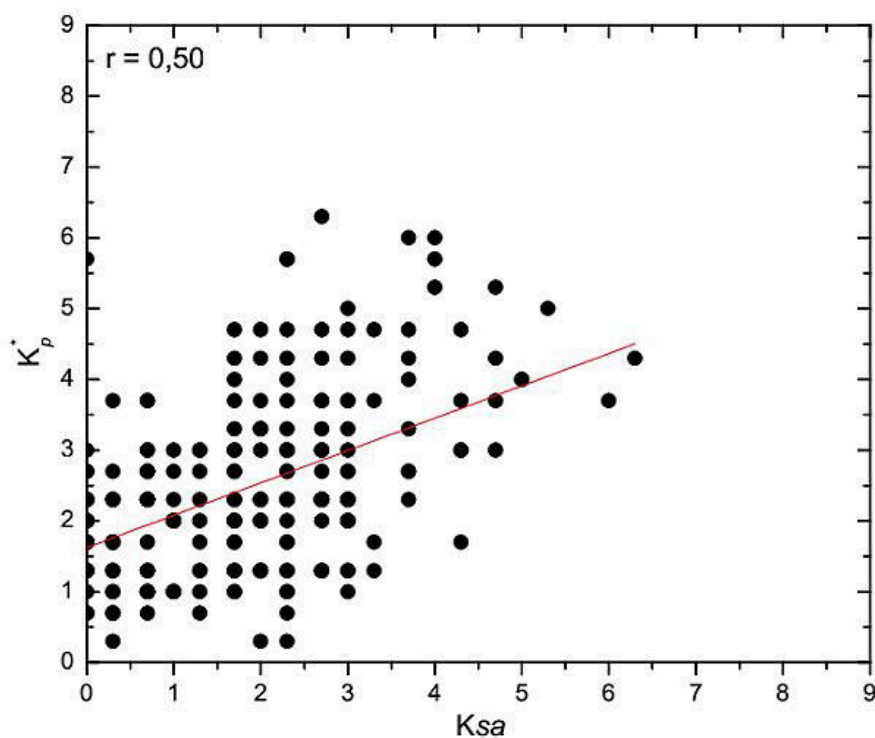
Figura 4.10 – Dispersão entre os valores dos índices de atividade magnética K_p^* e K_p , obtidos a cada 3 horas para todos os dias do mês de Abril de 2016, perfazendo 240 valores para cada índice, sobreposto pela correlação linear entre eles.



Fonte: Produção do autor.

Percebemos que os índices se correlacionam muito bem, mas não completamente, o que é atribuído à metodologia de cálculo. Para tirarmos dúvidas em relação ao método utilizado para a construção do Ksa e o K_p^* , verificaremos se existe alguma interferência ou problema na elaboração destes índices, realizando uma correlação linear entre os índices Ksa versus K_p^* . O resultado é observado na Figura 4.11. Essa figura apresenta um nível de correlação entre os índices K_p^* e Ksa de $r = 0,50$, ou seja, uma correlação linear fraca. Temos respectivamente no eixo “x” e no eixo “y”, Ksa e K_p^* na escala de 0 a 9, para o período do mês de Abril de 2016.

Figura 4.11 – Correlação Linear com as mesmas grandezas e período que foi apresentado na Figura 4.10. Mas esta Figura apresenta a correlação dos Índices de atividade magnética Ksa versus K_p^* ao longo dos dias, para o período de todo o mês de Abril de 2016.



Fonte: Produção do autor.

Essa correlação nos mostra que o método utilizado não tem relação na discrepância entre os índices K_p^* e o K_p que é vista nos resultados, ou melhor, o método não interfere significativamente na elaboração da computação do índice de atividade magnética, pois o resultado encontrado para o índice K_p^* se assemelha ao K_p original e não ao Ksa . O que era esperado, pois K_p e K_p^* são construídos com os mesmos dados magnéticos fornecidos pelas estações descritas na Tabela 4.1, enquanto o Ksa é construído somente com estações magnéticas (Tabela 3.1) localizadas na América do Sul.

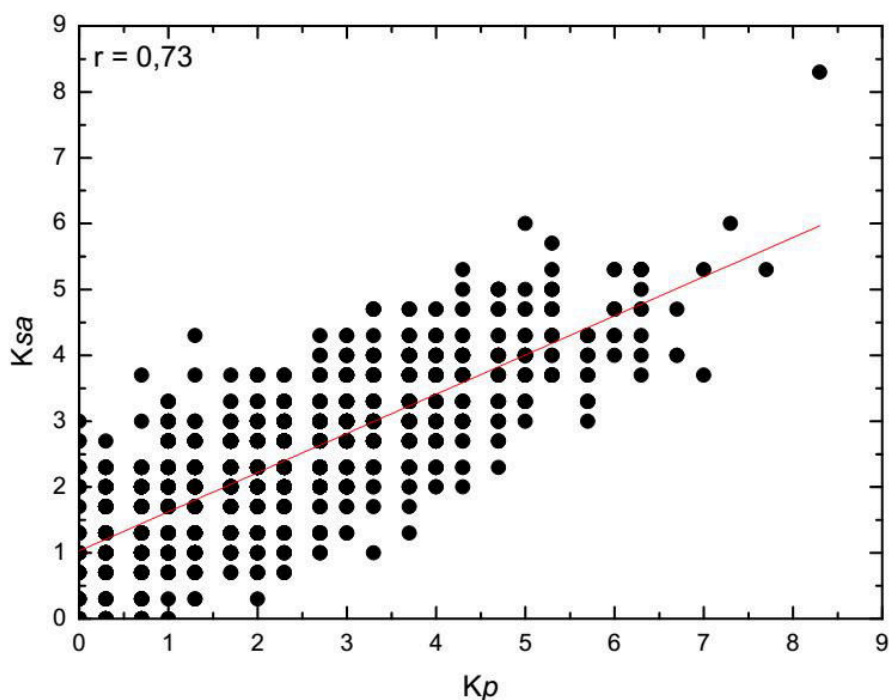
4.3. Metodologia para a comparação estatística do Ksa com o K_p

Com base nestas análises preliminares, cremos ter estabelecido uma metodologia para garantir que tanto os dados quanto a método de cálculo

do K_{sa} não estão influenciando significativamente nas análises e resultados que apresentaremos a seguir. Conseqüentemente, resta apresentar a metodologia aplicada para a comparação estatística das variações do índice K_{sa} frente às mesmas variações observadas no índice K_p .

Para tanto, utilizamos uma correlação linear do índice K_{sa} versus K_p como esta apresentada na Figura 4.12, no qual os índices são gerados a cada 3 horas ao longo dos dias, para o período de dados utilizados de 01 de junho a 31 de dezembro de 2015, fornecidos pelas estações magnéticas com dados disponíveis, apresentadas nas Tabelas 3.1 e 4.1.

Figura 4.12 – Correlação linear para 7 meses do índice K_{sa} versus K_p , gerados a cada 3 horas ao longo dos dias, para o período de dados magnéticos de 01 de junho a 31 de dezembro de 2015, fornecidos pelas estações magnéticas apresentadas nas Tabelas 3.1 e 4.1, com dados magnéticos disponíveis.



Fonte: Produção do autor.

Estas correlações foram realizadas para todos os dados selecionados neste estudo e a seleção dos dados magnéticos coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros foi feita através da verificação das estações

disponíveis de forma online ao longo de todos os dias do ano de 2010 até 2016. Definiu-se como prioridade, utilizarmos somente as estações magnéticas com mais dados ao longo de todos os anos, para fazer análises que serão apresentadas no capítulo a seguir. Isso foi feito para avaliarmos a metodologia proposta neste trabalho.

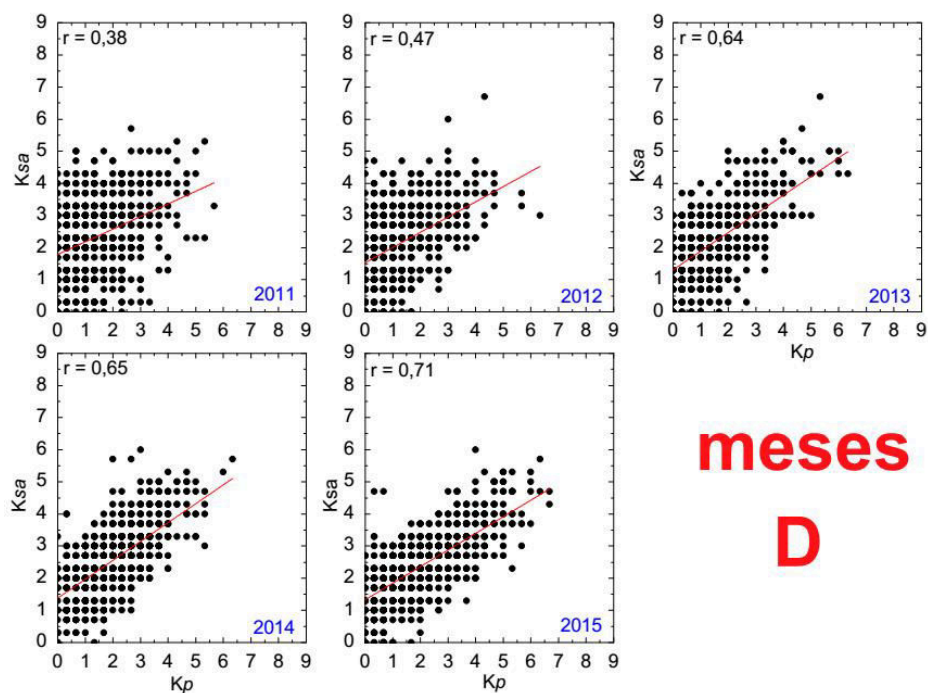
A metodologia de estudo para a qualificação do índice magnético regional Sul-Americano consiste em calcular-se o índice Ksa a cada 3 horas, para os dias selecionados e compará-los com os valores de Kp a cada 3 horas, obtidos para os mesmo horários e datas correspondentes. A comparação é feita através de análise de correção entre os valores destes índices. A apresentação dos resultados se dá na forma gráfica, onde apresentamos a distribuição dos valores de Ksa , contra a mesma distribuição do Kp , sobreposta pela curva do ajuste linear. Adicionalmente, apresentamos resultados gráficos de um índice de atividade magnética K_p^* , que correlacionamos com os índices Kp e Ksa , a fim de avaliar o método utilizado para obter o Ksa .

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A correlação linear dada por valores de 3-a-3 horas dos índices Ksa versus Kp para o período de dados utilizados, 01 de janeiro de 2011 a 31 de dezembro de 2015, são apresentadas nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, nos quais mostramos uma análise de sazonalidade. Além disso, apresentamos uma análise caracterizada pelo nível de atividade magnética durante o período de 1 de junho a 31 de dezembro de 2015, na forma da Figura 5.4. Para realizarmos a análise de sazonalidade separamos os índices Ksa e Kp , obtidos a partir dos dados magnéticos fornecidos pelos equipamentos da Rede Embrace de Magnetômetros e da Rede Intermagnet, em três períodos definidos de: “meses D” (novembro, dezembro, janeiro e fevereiro), “meses J” (maio, junho, julho e agosto) e “meses E” (março, abril, setembro e outubro).

Na Figura 5.1 apresentamos a correlação linear entre os índices Ksa e Kp dada por valores de 3-a-3 horas para o período de solstício de verão, obtido com dados magnéticos ao longo dos anos de 2011 até 2015, no qual denominamos o período em torno do solstício de verão de “meses D”.

Figura 5.1 – Correlação linear ano-a-ano entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , dada por valores de 3-a-3 horas, obtido a partir dos dados magnéticos dos magnetômetros da Rede Embrace e Intermagnet, para os meses D, para o período de 2011 a 2015.



Fonte: Produção do autor.

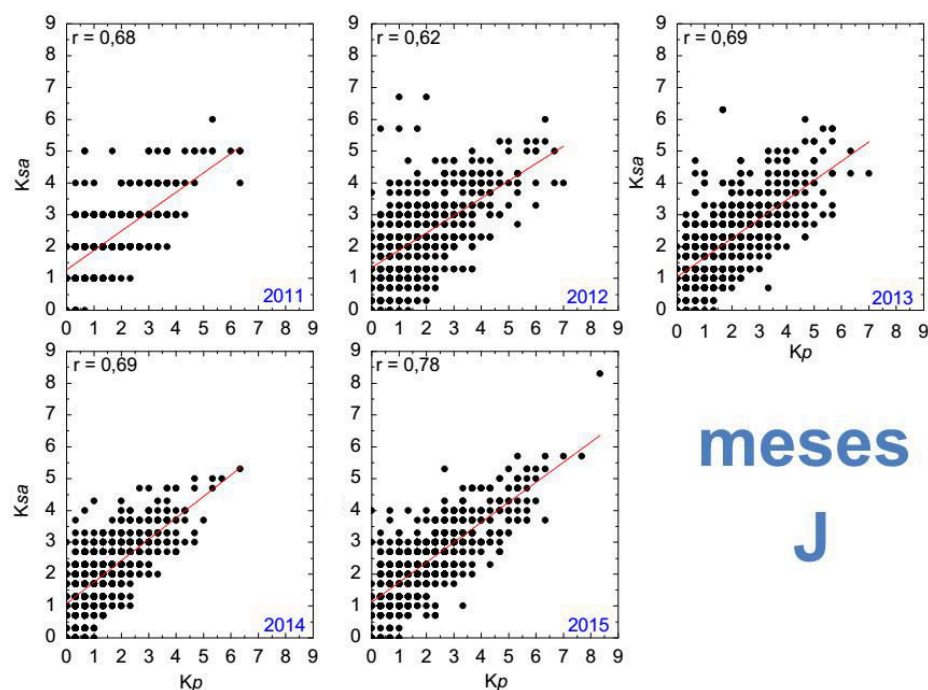
Conseguimos perceber com a Figura 5.1 que, para os meses D, houve uma evolução no nível da correlação entre os índices K_{sa} e K_p ao longo dos anos. Neste ponto, cabe ressaltar que o número de equipamentos que compõem a Rede Embrace de Magnetômetros tem sido incrementando ano após ano, tendo início em 01 de outubro de 2010 com a estação magnética de Cachoeira Paulista (CXP) - SP. No ano de 2011, apenas três equipamentos estavam operando. No seguinte ano, a partir do mês de novembro a rede já contava com seis equipamentos. Já em 2013, o número de equipamentos foi aumentado para sete. Nos anos de 2014 e 2015, foram instalados mais dois e um respectivamente, e atualmente estamos com doze equipamentos.

Portanto, parece evidente que a partir 2015 (n.b.: forte correlação é definida para valores de r acima de 0,7), quando a rede operou com dez equipamentos a correlação entre os índices passou a ser significativa.

Desta forma, para esta análise de longo prazo creditamos que a evolução na correlação ocorreu pelo aprimoramento e melhoria da Rede Embrace de Magnetômetros.

Apresentamos, na Figura 5.2, a correlação linear dos índices K_{sa} e K_p dada por valores de 3-a-3 horas, para o período de solstício de inverno, no qual denominamos de “meses J”.

Figura 5.2 – Correlação linear ano-a-ano entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , dada por valores de 3-a-3 horas, obtido a partir dos dados magnéticos dos magnetômetros da Rede Embrace e Intermagnet, para os meses J, para o período de 2011 a 2015.



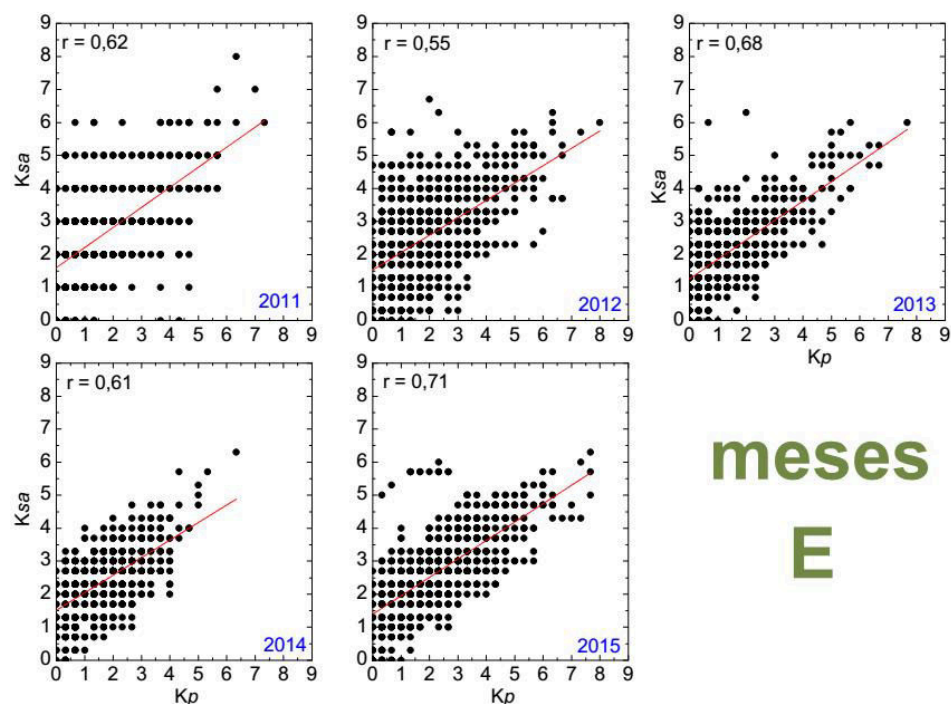
Fonte: Produção do autor.

É possível observar pela Figura 5.2 que o mesmo aumento da correlação linear ao longo dos anos observado anteriormente se repete para o período dos meses J. Ou seja, a melhoria da Rede Embrace de Magnetômetros impactou positivamente na correlação linear ao longo dos anos, assim como pudemos observamos na Figura 5.1. Contudo, o aumento da correlação para os meses J ($r = 0,68 \rightarrow 0,78$) não foi tão significativo quanto àquele observado no caso dos meses D

($r = 0,38 \rightarrow 0,71$). Esta característica é atribuída a maior amplitude das variações diárias da componente horizontal do campo magnético observadas nos meses D, em comparação com as mesmas variações observadas nos meses J. Contudo, não demonstraremos explicitamente esta argumentação, por ser parte integrante de um trabalho de mestrado em separado.

Finalmente, completando essa análise de sazonalidade, apresentamos na Figura 5.3 a correlação linear entre os índices para os períodos dos equinócios de outono e primavera, no qual denominamos de “meses E”.

Figura 5.3 – Correlação linear ano-a-ano entre os índices magnéticos Ksa e Kp , dada por valores de 3-a-3 horas, obtido a partir dos dados magnéticos dos magnetômetros da Rede Embrace e Intermagnet, para os meses E, para o período de 2011 a 2015.



Fonte: Produção do autor.

Assim como vimos na Figura 5.2, o comportamento da correlação entre os índices Ksa e Kp apresentada nesta Figura 5.3, não foi muito diferente do que aconteceu na Figura 5.2. Notamos que não houve modificação significativa no coeficiente de correlação para os dados analisados ao

longo dos anos ($r = 0,62 \rightarrow 0,71$), quando comparado com os meses D ($r = 0,38 \rightarrow 0,71$). Fica caracterizada uma melhora praticamente igual aquela dos meses J ($r = 0,68 \rightarrow 0,78$).

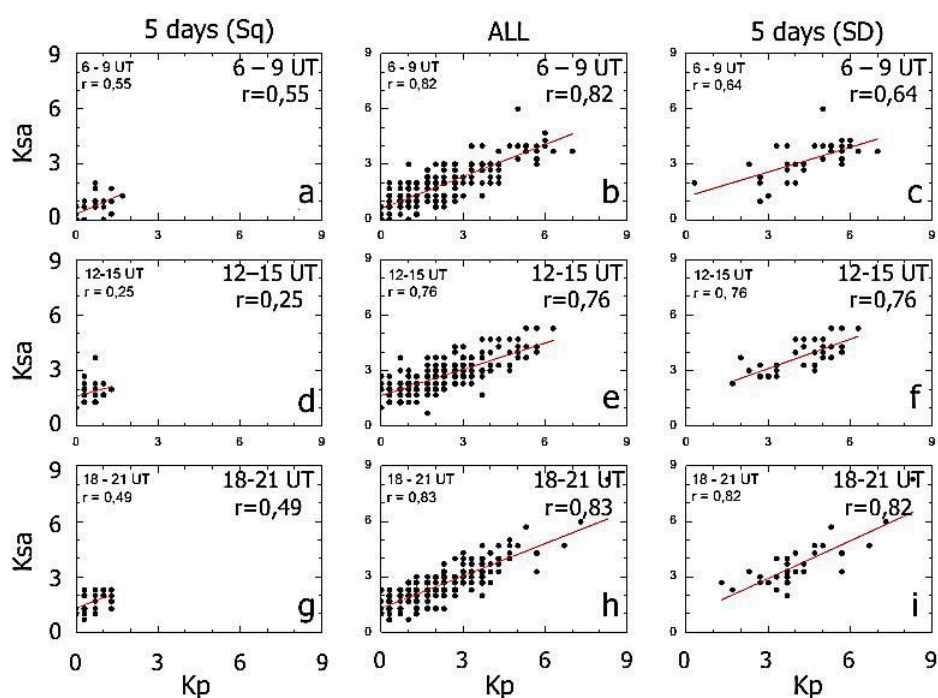
Vale lembrar que, como vimos anteriormente, essa diferença entre as correlações observadas nas Figuras 5.1, 5.2 e 5.3, não advém das medidas dos equipamentos (atualmente) e nem pela metodologia adotada para a construção do Ksa , como podemos observar nos resultados que foram apresentados nas Figuras 4.5 e 4.7. Portanto, nossa conclusão com relação à melhora na correlação é no sentido da maior excursão das componentes H do campo magnético (exemplificada pelas variações das QDCs) nos meses D, em comparação com as demais estações do ano.

Resta ainda a questão da correlação entre o Ksa e Kp aparentemente saturado no valor em torno de 0,73 (média das correlações dos gráficos das três estações do ano para 2015). Para elucidar estes resultados que encontramos na análise de sazonalidade do índice Ksa , realizamos uma análise para 3 intervalos de horas diferentes e, uma separação pelo período de atividade magnética caracterizada como: calma, normal ou perturbada. Foram selecionados os 5 dias considerados magneticamente mais quietos de cada mês (Sq), para o período de análise deste trabalho e, os 5 dias considerados magneticamente mais perturbados (SD) para o mesmo período. A seleção destes dias se deu pela classificação magnética disponível *online*, no site do World data Center, hospedado na Universidade de Kyoto (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>). Desta maneira os dados de Ksa e Kp foram separados segundo esta classificação e, uma análise de correlação foi efetuada em cada subgrupo, que foi comparada com a mesma análise incluindo todos os dias (inclusive os quietos e perturbados) que doravante denominamos grupo ALL.

Os resultados destas correlações são apresentados na Figura 5.4, na qual é observado que, para o período Sq a correlação não foi muito grande (veja as letras “a”, “d” e “g” que o coeficiente r foi baixo). Ou seja, identificamos na Figura 5.4 que em períodos de atividade magnética mais baixa (Sq), os índices Ksa e Kp não se correlacionam muito. Enquanto

que para os períodos de atividade magnética alta (SD) e para todos os dias (ALL), as correlações são consideradas fortes. Portanto, podemos notar que existe algum fator que contribui para o índice K_{sa} se diferenciar do índice K_p em períodos de atividade magnética baixa.

Figura 5.4 – Correlação linear para intervalos com valores de 3 horas distintas do índice K_{sa} versus K_p para períodos calmos, normais e perturbados, para o período de dados magnéticos de 01 de junho a 31 de dezembro de 2015.



Fonte: Produção do autor.

Neste ponto do trabalho, não podemos afirmar definitivamente qual a explicação definitiva para esse fato. Explicações alternativas podem ser pensadas em termos da quantidade de dados utilizados para fazer esta análise e/ou, em termos da presença da AMAS na região de observação da Rede Embrace de Magnetômetros. Deste modo, para averiguarmos os resultados apresentados acima, também foi realizado um estudo estatístico, através da observação do comportamento dos valores dos coeficientes lineares e angulares, por meio das correlações obtidas entre os dois índices, em estudo para cada mês ao longo dos anos de operação da Rede Embrace de Magnetômetro. Esta análise foi realizada para o

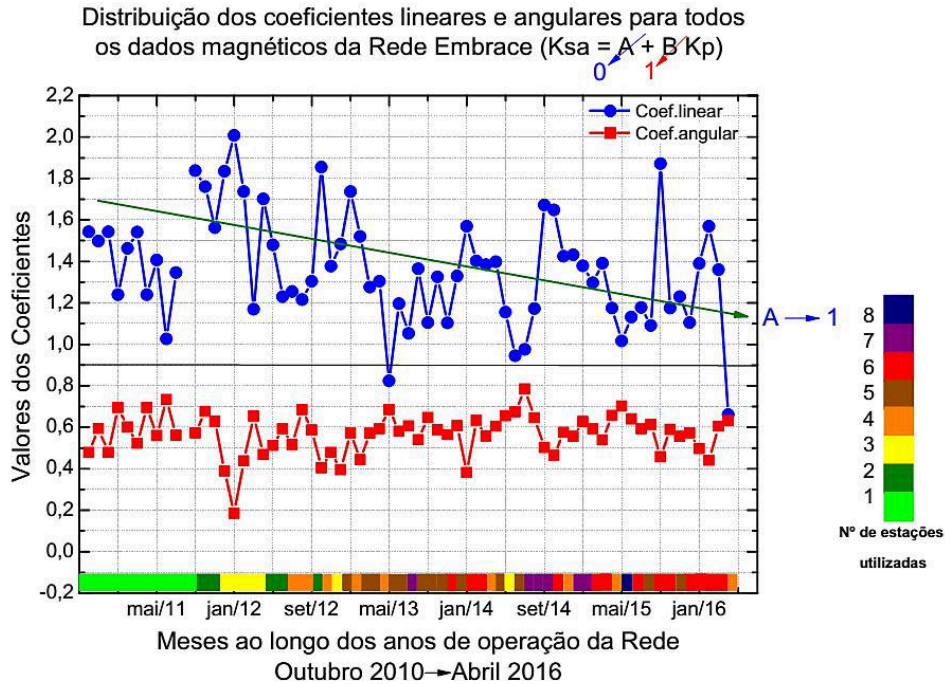
período de outubro de 2010 até abril de 2016, ou seja, desde quando a Rede Embrace de Magnetômetros começou a operar até os dias mais atuais com a disponibilidade dos dados.

Sabemos que o índice de atividade magnética K_{sa} também indica o nível de atividade magnética, assim como o K_p . Com isso, correlacionando estes índices temos:

$$K_{sa} = A + B \cdot K_p, \quad (5.1)$$

ou seja, tenciona-se que o índice K_{sa} seja equivalente ao índice K_p . Para isso ser satisfeito, precisamos que o coeficiente linear (A) da reta seja $A = 0$ e o coeficiente angular (B) seja $B = 1$. A Figura 5.5 a seguir, nos mostra justamente o comportamento desses coeficientes da reta de ajuste linear entre os índices K_{sa} versus K_p , ao longo do período de operação das estações da Rede Embrace de Magnetômetro, com a quantidade de estações utilizadas disponíveis com dados magnéticos para fazer a análise.

Figura 5.5 – Distribuição dos coeficientes lineares (curva azul) e angulares (curva vermelha) das retas dos ajustes lineares, obtidas das correlações lineares entre os índices magnéticos K_{sa} e K_p , ao longo dos meses de funcionamento da Rede Embrace, para todas as estações magnéticas em funcionamento e dados magnéticos disponíveis, ou seja, de outubro de 2010 a abril de 2016.



Nesta análise, observamos que o coeficiente linear descrito pela curva azul estava relativamente elevado no início da operação da Rede Embrace de Magnetômetros e ao longo dos anos de operação desta rede ele vem melhorando. Ele vem apresentando uma tendência à 1, como pode ser observada pela curva verde traçada sobre o gráfico superior na Figura 5.5. Já o coeficiente angular descrito pela curva vermelha, sofreu pouca alteração. Mas é possível perceber uma pequena melhoria, aonde ele vem apresentando uma maior estabilidade e tendendo a 0,7.

Com base na evolução do coeficiente linear, esta última análise reforça nossas afirmações anteriores de que, os dados magnéticos fornecidos pelos equipamentos da Rede Embrace de Magnetômetros vêm melhorando a medida que o número de equipamentos vem aumentando. Adicionalmente, como mostra a tendência temporal do coeficiente de

correlação linear, um menor número de dados de dias calmos (número de dias calmos foi de 35) pode, de fato, ter causada baixa correlação observada nos gráficos da Figura 5.4. Contudo, não podemos descartar a presença da AMAS como causadora desta interferência. Uma resposta talvez fosse encontrada, analisando as ocorrências de feixes rápidos solares juntamente com mudanças de setor da Terra com relação ao campo heliosférico em comparação com a ocorrência de atividade magnética na América do Sul.

Em adição a esta discussão, é importante lembrar que, apesar de verificarmos na Figura 4.10 que o método de construção do K_{sa} não interferir substancialmente em seu valor frente ao K_p , ainda existe uma discrepância na correlação entre os índices, neste caso, entre K_p^* e K_p . Enquanto o nível de atividade magnética mostrada pelo K_p^* é ≈ 1 , o K_p apresenta um nível de ≈ 0 (zero), ou seja, o K_p^* possui uma amplitude maior no nível de atividade magnética para períodos calmos. Ou seja, apesar da extensiva análise realizada com o método de construção do índice sul-americano, ainda há espaço para que este seja aprimorado.

Ainda neste contexto, temos que relembrar que o índice K_{sa} é formulado somente com estações magnéticas localizadas na região da América do Sul, enquanto o K_p é composto por estações e observatórios magnéticos que estão distribuídos em vários países pelo mundo todo (concentrado principalmente no hemisfério norte), mas com a exceção da região da América do Sul. Portanto, em oposição a afirmação final do parágrafo anterior, a presença da AMAS não pode ser definitivamente descartada.

Sabemos também, que uma das grandes dificuldades na interpretação dos índices geomagnéticos é devida à distribuição inadequada dos observatórios magnéticos. De acordo com [Rostoker \(1972\)](#) para se obter um índice seria necessário ter uma distribuição uniforme de observatórios magnéticos espalhados pelo mundo, mais na realidade não é isso o que se tem atualmente. No caso dos observatórios que se referem ao índice K_p , enquanto existe uma grande concentração de observatórios no oeste

da Europa, não há boa cobertura no setor soviético e no Oceano Atlântico.

Outra dificuldade que se encontra ao calcular o índice K_p surge devido ao movimento dinâmico da oval auroral, que tende a se expandir para a região equatorial durante a ocorrência de uma tempestade magnética (AKASOFU; CHAPMAN, 1963). Nessa situação, o aumento do índice K_p pode ser devido a alguns fatores, tais como: o aumento da corrente que flui no eletrojato auroral, o movimento do eletrojato auroral próximo aos observatórios do K_p e também a combinação desses dois fatores.

6 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, concluímos nesse Trabalho de Pesquisa, que a qualidade dos dados magnéticos medidos pelos magnetômetros da Rede Embrace são tão bons quanto os dados magnéticos fornecidos pelos magnetômetros que compõem a Rede Intermagnet. E ainda, de acordo com os resultados que encontramos o índice K_{sa} tem uma pequena diferença para períodos calmos de atividade magnética em relação ao índice de atividade magnética K_p . No entanto, em períodos de atividade magnética alta, eles se assemelham bastante. Portanto através do que encontramos, descartamos que essa diferença seja ocasionada por problemas de dados ou medidas do nosso equipamento, ou seja, os magnetômetros do tipo *fluxgate*. Isso pode ser confirmado com os resultados listados abaixo:

- As distribuições espectrais dos dados coletados pelas redes Embrace e Intermagnet de magnetômetros, são similares para os dados magnéticos da mesma época, com períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas;
- Podemos afirmar que eventuais diferenças entre os índices K_{sa} e K_p não advém dos dados magnéticos e nem da forma como são coletados pela Rede Embrace de Magnetômetros. Esta conclusão é sustentada pelos fatos de que: (a) a correlação entre as evoluções temporais dia-a-dia dos coeficientes angulares dos ajustes lineares do estudo dos espectros de potência para altas frequências (períodos inferiores a $\approx 2,77$ horas) de ambas as redes de dados magnéticos foi de 98%; (b) a mesma correlação para as evoluções temporais mês-a-mês dos mesmos coeficientes angulares foi de 91%; (c) a variação térmica à qual os sensores magnéticos estão submetidos atua de forma equivalente, em ambos sensores das redes distintas, pois a diferença entre as respostas das redes à variação térmica dentro de período de um ano foi de 1%;

- Cabe ressaltar porém que, há evidências de pequenas variabilidade de longo prazo, entre os dados coletados pelas redes de magnetômetros. Contudo, esta variabilidade não apresenta relevância aparente a curto prazo (período de um mês de dados) e não inviabiliza o resultado deste trabalho. Essa pressuposição pode ser estendida para períodos de até um ano, dada a forte correlação (0,91) e, baixa diferença entre as resposta à variabilidade térmica (1%). Contudo, é importante ressaltar que as variações térmicas podem se tornar um aspecto relevante para estudos climatológicos de longo prazo, tais como análises da ordem de um ou mais ciclos solares;
- A discrepância (por exemplo, a Figura 4.12) entre os índices K_{sa} e K_p , não são advindas da metodologia utilizada na elaboração da computação do índice K_{sa} , como podemos observar na comparação dos índices K_p , K_{sa} e K_p^* , apresentada na Figura 4.9. Pois apesar da diferença entre eles, verificou-se, na Figura 4.10, que o índice K_p^* é correlacionado em 87% com o índice K_p e na Figura 4.11, que o índice K_p^* é correlacionado em 50% com o K_{sa} , os quais possui a mesma metodologia de elaboração;
- Percebemos um aumento significativo de 33% na correlação linear, apresentada na Figura 5.1, entre os índices K_{sa} e K_p , onde ao decorrer dos anos que a Rede Embrace de Magnetômetros foi aumentando o seu número de equipamentos de medida, adicionalmente foi melhorando os dados magnéticos que são fornecidos. Enquanto nas correlações apresentadas, nas Figuras 5.2. e 5.3, não tivemos um aumento tão significativo assim, comparando os resultados com o dos meses D. Pois percebemos um aumento de mais ou menos 10% para os meses J e E respectivamente, para o mesmo período de 2011 a 2015 de dados magnéticos analisados. Isso por que é atribuída uma maior amplitude das variações diárias da componente horizontal do

campo magnético observadas nos meses D, em comparação com as mesmas variações observadas nos meses J e E.

- Foi observado pelos resultados apresentados, na Figura 5.4, que classificamos pelo nível de atividade magnética, que existe algum fator intrínseco para o índice Ksa possuir uma média ao longo das horas do dia de 43% de correlação linear, em períodos calmos (Sq), com o Kp , ou seja, uma correlação linear fraca. Já em períodos perturbados (SD), o Ksa possui uma média ao longo das horas do dia de 74% de correlação linear com o Kp . E ainda, vimos que para períodos geomagneticamente mais perturbados, o índice Ksa se compara mais com o Kp . Se levarmos em consideração todos os dados magnéticos ao longo do período utilizado para realizarmos essa análise, observamos que a média de correlação linear ao longo das horas do dia é de 80%, ou seja, os índices Ksa e Kp possuem uma boa correlação, mas não o suficiente para dizermos que eles são equivalentes. Contudo, não podemos deixar de considerar que a pequena quantidade de dados magnéticos utilizados pode ter levado a uma correlação linear fraca, no qual utilizamos somente 35 dias calmos e 35 dias perturbados para essa análise. Entretanto, não podemos descartar a presença da AMAS como causadora desta interferência.
- Podemos afirmar pela Figura 5.5, que os dados magnéticos fornecidos pela Rede Embrace de Magnetômetros vem melhorando ao decorrer dos anos. Pois como observamos na figura, o coeficiente linear vem tendendo a $A = 1$ e o coeficiente angular a $B = 0,7$, o que aumenta a qualidade dos dados magnéticos e a correlação linear ao compararmos com o índice de atividade magnética Kp ; e
- Concluimos que essa pré-qualificação do índice Ksa foi de bastante relevância, pelos resultados encontrados. Mas requer mais trabalhos futuros para ter certeza da qualificação deste índice.

6.1. Trabalhos futuros

Como sugestões de trabalhos futuros, pretende-se investigar a origem da discrepância apresentada nos resultados. Visto que, com as características apresentadas por eles, achamos que o fator propulsor desse fato seja físico. Por exemplo, devido as características regionais, tais como, a Anomalia Magnética da América do Sul (AMAS). Dessa forma pretendemos:

- Identificar se esta diferença é realmente provocada por fatores físicos ou pelo método utilizado para a construção do índice K_{sa} , caso que inicialmente descartamos, por causa dos resultados que são apresentados nesta Dissertação;
- Estudar o comportamento físico-químico da região da Anomalia Magnética da América do Sul;
- Estudar a dinâmica e os possíveis tipos de precipitações de partículas no nosso campo magnético;
- Fazer um estudo com o índice K_p , elaborando ele com a contribuição de dados magnéticos de uma ou mais estações magnéticas da Rede Embrace de Magnetômetros que estão na região da América do Sul, com estações localizadas em latitudes mais próximas possíveis das estações que compõem o K_p .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIGHETTO, A. Estudos experimentais visando o desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas – magnetômetro de núcleo saturado. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DO INPE (SICINPE)., 2005, São José dos Campos. **Anais eletrônicos...** 2005. p. 1-97. Papel, On-line. (INPE-12985-PRE/8262). Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1916/2005/09.30.13.04>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

AKASOFU, S.I.; CHAPMAN, S. The lower limit of latitude (U.S. sector of northern quiet auroral arcs, and its relation to Dst (H)). **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 25, n. 9, 1963.

AKASOFU, S. – I.; CHAPMAN, S. **Solar terrestrial physics**. Oxford: University Press, 1972.

BOWMAN, K. P. **An introduction to programming with IDL**: interactive data language. Department in Oxford, UK. 2006. ISBN 13: 978-0-12-088559-6. Available in: <https://books.google.com.br/books?id=kHXr4B-fswcC&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false>. Accessed May 16, 2016.

CAMPBELL, W. H. **Introduction to geomagnetic fields**. Cambridge: University Press, 1997.

AKASOFU, S.I.; CHAPMAN, S. The lower limit of latitude (U.S. sector of northern quiet auroral arcs, and its relation to Dst (H)). **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 25, p. 9-12, 1963.

AKASOFU, S. – I.; CHAPMAN, S. **Solar terrestrial physics**. Oxford: University Press, 1972.

COOK, D. M. **The theory of the electromagnetic field**. 1. ed. Dover Publications, 1975.

CHAPMAN, S.; BARTELS, J. **Geomagnetism**. Oxford: Oxford University Press, 1962. v. 1.

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.**, v. 27, p. 1593-1603, 2009. doi:10.5194/angeo-27-1593-2009.

DENARDINI, C.M.; DASSO, S.; AMERICO GONZALEZ-ESPARZA, J. Review on Space Weather in Latin America. 1. The beginning from Space Science Research. **Advances in Space Research**, v. 58, n. 10, p. 1916-1939, Nov. 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2016.03.012>.

FERREE, T. C. **Inferring signal amplitudes from discrete (FFT) power values**. Electrical Geodesics Inc. (EGI), 2000. Technical Note.

FORBES, J. M. The equatorial electrojet. **Rev. Geophys.**, v.19, p. 469 – 504, 1981. DOI: 10.1029/RG019i003p00469. Gupta, J. (1973), Movement of the Sq foci in 1958, *Pure Appl. Geophys.*, 110, 2076 – 2084.

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, J. A.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm?, **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. A4, p, 5771–5792, 1994. doi:10.1029/93JA02867.

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment**: an introduction to geospace - the science of the upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. New York: Cambridge University Press, 1992.

HEIKKILA, W. J. **Earth's magnetosphere** - formed by the low-latitude boundary layer. Dallas: University of Texas, 2011. ISBN :97804444528643.

HEIRTZLER, J. R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, n. p. 1701-1708, 16, Nov. 2002. ISSN:

1364-6826. [http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00120-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00120-7). Available in:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682602001207>>.

Accessed December 13, 2016.

JANKOWSKI, J.; SUCSDORFF, C. **Guide for magnetic measurements and observatory practice**. Warsaw: International Association of Geomagnetism and Aeronomy, 1996.

KABATA, W. **Magnetômetro fluxgate para satélites científicos**. ITA: São José dos Campos, SP, 2000.

KAMIDE, Y.; CHIAN, A. C. L. **Handbook of the solar-terrestrial environment**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. DOI: 10.1007/b104478. ISBN 978-3-540-46314-6.

KAMIDE, Y.; ROSTOKER, G. What is the physical meaning of the AE index? **Eos Trans. AGU**, v. 85, n. 19, p. 188–192, 2004. DOI:10.1029/2004EO190010.

KIRCHHOFF, V. W. J. H. **Introdução a geofísica espacial**. São Paulo: Nova Stella. Ed. USP, FAPESP, 1991.

MACHADO, K. D. **Teoria do eletromagnetismo**. Ponta Grossa: UEPG, 2000. v. 1. ISBN 85-86941-07-7.

MAYAUD, P. N. **Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 1980. ISBN 0-87590-022-4.

MUGGLER, C. C.; CARDOSO, I. M.; RESENDE, M.; FONTES, M. P. F.; ABRAHÃO, W. A. P.; CARVALHO, A. F. **Conteúdos básicos de Geologia e pedologia, para disciplinas de SOL 213, SOL 215 e SOL 220**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Solos, 2005.

MERRIL, R. T.; McELHINNY, M. W. **The Earth's magnetic field: its history, origin and planetary perspective**. London: Academic Press, 1983.

MOLDWIN, M. **An introduction to space weather**. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research. **Malawi Medical Journal**, v24, n. 3, p. 69-71, 2012. Available in: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3576830/>>. DOI: [PMC3576830](https://doi.org/10.1186/1745-2975-3-69). Accessed In: May 12, 2016.

PARKER, E.N. Dynamics of the interplanetary gas and magnetic fields, **Astrophys. J.**, v. 128, p. 664-676, 1958. DOI: 10.1086/146579.

RILEY, K. F.; HOBSON, M. P.; BENICE, S. J. **Mathematical methods for physics and engineering**. 3. ed. Cambridge University Press, 2006. ISBN-13: 978-0-521-67971-8.

ROSTOKER, G. Geomagnetic Indices. **Rev. Geophys. Space. Phys.**, v. 10, p, 935-970, 1972.

PUPIN, J. R. **Introdução às séries e Transformadas de Fourier e aplicações no processamento de sinais e imagens**. 2011. Trabalho de Pesquisa de conclusão de curso da Universidade Federal de São Carlos. 2011. Disponível em <<http://www.dm.ufscar.br/dm/attachments/article/6/TCCJosiana.pdf>>. Acessado em: 29 de abril de 2016.

SIQUEIRA, J. **Desenvolvimento de instrumentação para medidas geomagnéticas de baixo ruído abordo de satélites científicos – magnetômetro de núcleo saturado**. Relatório Final de Atividades de Iniciação Científica PIBIC/INPE – CNPq/MCTI. Santa Maria, junho de 2006.

TERRA-NOVA, F.; HARTMANN, G. A.; TRINDADE, I. F. **Evolução temporal da anomalia magnética do Atlântico Sul através de modelos do campo geomagnético**. São Paulo: Departamento de Geofísica, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Brasil. 2011. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/283091080_evolucao_tem>

[poral da anomalia magnetica do atlantico sul atraves de modelos do campo geomagnetico](#)>. Acessado em: 18 de maio de 2016.

TAKAHASHI, K.; TOTH, B. A.; OLSON, J. V. An automated procedure for near-real-time Kp estimates. **J. Geophys. Res.**, v. 106, n. A10, p. 21017–21032, 2001. doi:10.1029/2000JA000218.

THÉBAULT et al. International geomagnetic reference field: the 12th generation. **Earth, Planets and Space**, v. 67, n. 1, p. 1-19, 2015. DOI: 10.1186/s40623-015-0228-9.

TRIVEDI, N.B.; OGURA, F.X.K.; DE ANDRADE, J.C.; DA COSTA, J.M.; BARRETO, L.M. A ring core fluxgate magnetometer for IEEY program in Brazil. **Rev. Bras. Geof.**, v.13, p. 37-43, 1995.

VELIZ, O. **Manual operación: JRO-ML-103 triaxial magnetometer**. Lima, Peru, Jicamarca Radio Observatory, 2010. (in English: Operation Manual: JRO-ML-103 Triaxial Magnetometer).

WALT, M. **Introduction to geomagnetically trapped radiation**. Lockheed and Space Company and Stanford Univesity. Cambridge University Press, 1994. Cambridge Atmospheric and Space Science Series.

WILEY, J. L. **Digital signal processing using MATLAB for students and researchers**. Published simultaneously in Canada, 2011. Available in: <https://books.google.com.br/books?id=Qtd-e1NtZVkc&pg=PA82&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>. Accessed May 01, 2016. ISBN 978-0-470-88091-3.

YAMASHITA, C. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. 2000. 75 p. (INPE-7516-TDI/729). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao Jose dos Campos, 2000. Disponível em: <<http://urlib.net/6gtX3pFwXQZ4PKzA/mNUh4>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

