



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.06.16.03-TDI

**IDENTIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS EM
MAGNETOGRAMAS ASSOCIADOS ÀS TEMPESTADES
GEOMAGNÉTICAS UTILIZANDO TÉCNICAS
WAVELETS**

Marize Corrêa Simões

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Margarete Oliveira Domingues, e Odim Mendes Júnior,
aprovada em 20 de abril de 2011.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39F72Q2>>

INPE
São José dos Campos
2011

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@sid.inpe.br

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

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr^a Regina Célia dos Santos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr. Horácio Hideki Yanasse - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Deicy Farabello - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Vivéca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.06.16.03-TDI

**IDENTIFICAÇÃO DE DISTÚRBIOS EM
MAGNETOGRAMAS ASSOCIADOS ÀS TEMPESTADES
GEOMAGNÉTICAS UTILIZANDO TÉCNICAS
WAVELETS**

Marize Corrêa Simões

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada,
orientada pelos Drs. Margarete Oliveira Domingues, e Odim Mendes Júnior,
aprovada em 20 de abril de 2011.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39F72Q2>

INPE
São José dos Campos
2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Si51i Simões, Marize Corrêa.
Identificação de distúrbios em magnetogramas associados às tempestades geomagnéticas utilizando técnicas wavelets / Marize Corrêa Simões. – São José dos Campos : INPE, 2011.
xxvi+121 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/04.06.16.03-TDI)

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

Orientadores : Drs. Margarete Oliveira Domingues, e Odim Mendes Júnior.

1. Distúrbios geomagnéticos. 2. Wavelets. 3. Identificação de distúrbios. I.Título.

CDU 004.421.2

Copyright © 2011 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 © 2011 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.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Computação Aplicada

Dr. Edson Luiz França Senne



Presidente / UNESP/GUARA / Guaratinguetá - SP

Dra. Margarete Oliveira Domingues



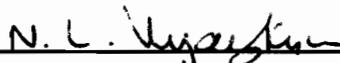
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Odim Mendes Júnior



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Nandamudi Lankalapalli Vijaykumar



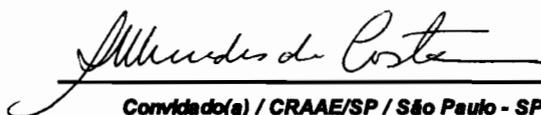
Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Aylton Pagamisse



Convidado(a) / UNESP/PP / Presidente Prudente - SP

Dra. Aracy Mendes da Costa



Convidado(a) / CRAAE/SP / São Paulo - SP

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

Aluno (a): **Martze Corrêa Simões**

São José dos Campos, 20 de abril de 2011

“Perguntaram ao Dalai Lama”.

- O que mais te surpreende na Humanidade?

E ele respondeu:

- Os homens... Porque perdem a saúde para juntar dinheiro,
depois perdem dinheiro para recuperar a saúde.

E por pensarem ansiosamente no futuro, esquecem do presente de tal
forma que acabam por não viver nem o presente nem o futuro.

E vivem como se nunca fossem morrer...e morrem como se nunca
tivessem vivido.

DALAI LAMA

Antônio Corrêa Simões e Glória dos Reis Corrêa Simões

Esses são:

Meus amigos, meus amores, minha essência, minha vida.

Ensinaram-me a falar, a caminhar, a sorrir e a viver.

Utopia, eles são únicos e dividem essa minha história.

Se permitiram viver essa minha realidade.

Protegeram-me dos perigos da vida.

Amam-me incondicionalmente.

Insistiram! Sacrificaram seus sonhos em favor dos meus.

Se há mérito nessa conquista, tenho a certeza que é de vocês.

Obrigada.

AGRADECIMENTOS

A Deus o dom da vida, pois sem Ele nenhuma conquista seria possível.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, e ao curso de pós-graduação da Computação Aplicada - CAP/INPE a oportunidade de realizar o Mestrado de qualidade e relevância aos estudos das ciências espaciais e também sinceros agradecimentos à PROAP/CAPEs o suporte financeiro oferecido para congressos.

Agradeço às secretárias do curso de pos-graduação, representadas por Claudia Carraro, serem tão eficientes e prestativos na colaboração.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq (309017/2007-6, 486165/2006-0, 308680/2007-3, 478707/2003, 477819/2003-6 e 382465/01-6) e FAPESP (2007/07723-7 e 2008/09736-1) os auxílios recebidos.

Agradeço ao *WDC for geomagnetism*, Kyoto, e a *International Real-Time Magnetic Observatory Network (INTERMAGNET)* os dados utilizados nesta dissertação.

Agradeço aos orientadores, Dra. Margarete Oliveira Domingues e Dr. Odim Mendes Jr., a oportunidade de crescimento e desenvolvimento.

Aos professores, pois, quem quiser ser professor, deve começar ensinando a si mesmo antes de ensinar aos outros, e ensinar pelos exemplos antes de ensinar com palavras. De fato, quem ensina e se corrige merece mais respeito e reverência do que quem ensina e corrige aos outros. Meu carinho e minha gratidão aos verdadeiros, que souberam, além de transmitir seus conhecimentos, transmitir também a sua experiência e ajudaram nas minhas dificuldades.

A meus pais, Antônio Corrêa Simões e Glória dos Reis Corrêa Simões, serem incansáveis na persistência e na motivação para o sucesso desse trabalho, nos momentos em que fraquejei, e por serem meus primeiros mestres por me apoiarem e confiarem em mim.

Agradeço aos meus irmãos Leandro e Juliane e aos demais familiares, que sempre estão torcendo por mim.

Agradeço ao Fábio Vargas as exaustivas leituras dos capítulos desta dissertação por

insistir, persistir e por não me deixar desistir.

Agradeço a Lilian Moor, amiga de apartamento, o incentivo e a força para que esta dissertação chegasse ao seu êxito.

Agradeço aos amigos da sala-42 do satélite/INPE a paciência e por estarem comigo nos bons e maus momentos.

Agradeço às amigas, para todas as horas, Flávia Toledo, Flávia Cardoso e Aline de Lucas o carinho, a paciência, a cooperação que, mesmo com todas suas atividades, reservaram um momento para ler e emitir sua opinião sobre a minha dissertação.

Agradeço ao Eloy Martins e a Virgínia Klausner a contribuição muito significativa nesta dissertação.

Agradeço ao Guy Nason criador da toolbox Wavethresh do software estatístico R, que me auxiliou e solucionou alguns problemas durante o desenvolvimento da aplicação da DWT.

Muito, muito e muito obrigado ao Etienne Grossman a ajuda que muito paciente-mente me auxiliou e sanou várias dúvidas com o Octave. Sei que devo muito a essa pessoa que resolveu me ajudar sem ao menos me conhecer.

Aos amigos, pois a amizade não se força, não se compra e não se vende; a amizade acontece, lentamente e em silêncio.

À medida que o tempo passa, a face envelhece, cala-se a voz e intimida o sorriso, mas não intimida as lembranças, momentos que se tornam especiais por serem únicos. Impossível esquecer de pessoas que passaram por esses momentos. Pessoas que compartilharam do sorriso, que choraram e que se emocionaram com a minha emoção.

Obrigada a essas pessoas que estiveram presentes e mesmo aquelas que se ausentaram, resta somente em meu coração um eterno *obrigado*.

RESUMO

Um dos desafios das pesquisas relacionadas ao Clima Espacial é o entendimento das formas de acoplamento eletrodinâmico entre o plasma solar e a magnetosfera da Terra. Durante esse acoplamento há transferência de energia, momento e partículas, ao mesmo tempo em que perturbações geomagnéticas podem ser registradas na superfície terrestre. Neste trabalho, implementa-se uma ferramenta de diagnóstico de distúrbios geomagnéticos, por meio de técnicas wavelets, para análise dos dados de magnetômetros de superfície. Os conjuntos de dados foram obtidos da estação geomagnética de Kakioka, Japão, utilizada normalmente em estudos globais, e da estação de Vassouras, RJ, Brasil, que está sob os efeitos do eletrojato equatorial e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul. Na metodologia de análise, utilizam-se a transformada contínua com uma função analisadora de Morlet e a transformada discreta ortogonal com quatro diferentes funções analisadoras de Daubechies. Considerando a regularidade local representada pelos coeficientes wavelets, a função analisadora wavelet de ordem 2 mostrou-se a mais adequada para a identificação dos períodos de distúrbios relacionados às tempestades geomagnéticas moderadas e de maior intensidade, *i.e.* (≤ -50 nT). A wavelet Daubechies de primeira ordem foi mais sensível a tempestades mais fracas. Buscando uma melhor caracterização desses intervalos de distúrbios, investigam-se diferentes valores de limiar mínimo dos coeficientes wavelets para uma possível identificação automática de ocorrência desses distúrbios. Como resultado, validou-se assim uma metodologia de análise útil para aplicações em Geofísica Espacial, com o propósito de identificar o intervalo temporal em que a interação eletrodinâmica entre o plasma solar e a magnetosfera está ativa.

IDENTIFICATION OF DISTURBANCES IN MAGNETROGRAMS DUE TO GEOMAGNETIC STORMS USING WAVELETS

ABSTRACT

One of the challenges on Space Weather research is the comprehension of the electrodynamics coupling mechanisms between solar wind and magnetosphere. During this coupling process, energy, momentum, and particles are transferred to the magnetosphere and simultaneously geomagnetic disturbances are registered at the earth surface. The aim of this current master's work is to implement a computational diagnosis tool for magnetospheric perturbations using wavelet techniques on ground-based magnetic field data. The datasets were obtained from the geomagnetic station in the Kakioka, Japan, used normally in the global studies and from one in Vassouras, RJ, Brasil, under the effects of the equatorial electrojet and the South Atlantic Magnetic Anomaly. In the analysis methodology we used continuous transform with a Morlet's analyzing function and an orthogonal discrete transform with four different Daubechies's analyzing functions. Considering the local regularity presented by the wavelet coefficients, the second-order Daubechies wavelet analyzing function was found the most adequate on the identification of disturbed intervals related to moderate and higher-intensity geomagnetic storms, *i.e.* (≤ -50 nT). The first-order Daubechies wavelet was very sensitive to the weaker storms. Pursuing better disturbed intervals characterization, we investigated different minimum threshold values of the wavelet coefficients in order to obtain a possible automatic identification of these disturbance occurrences. As a result, we validated an analysis methodology which yields foundation for a useful tool in Space Geophysics, in order to identify the time interval in which the electrodynamic interaction between the solar plasma and the magnetosphere is active.

LISTA DE FIGURAS

| | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| 1.1 Magnetosfera e suas regiões | 2 |
| 2.1 Pulsações | 13 |
| 3.1 Componentes do Campo Magnético | 16 |
| 3.2 Dst de setembro de 2000 | 16 |
| 3.3 Estações Global | 17 |
| 3.4 Setembro H 2000 | 19 |
| 4.1 Wavelet de Morlet - Parte real (à esquerda) e parte imaginária (à direita). | 24 |
| 4.2 Wavelet de Morlet Dilatada. Exemplo de contração e dilatação de uma função wavelet. | 24 |
| 4.3 Arquitetura piramidal adaptado para a transformada wavelet ortogonal. . | 27 |
| 4.4 Grafico da função escala (à esquerda) e função wavelet (à direita) em seu suporte não zero. De cima para baixo são representadas as ordens de um a quatro. | 30 |
| 5.1 Identificação de distúrbios geomagnéticos por meio das amplitudes dos coeficientes wavelets | 35 |
| 5.2 Esquema de diferentes formas de aplicação do thresholding. | 36 |
| 6.1 Escalograma calculado a partir da Transformada wavelet contínua para os dados de ΔH de março de 1989. Para facilitar as comparações, os valores de energia estão representado em \log_2 | 42 |
| 6.2 Escalograma calculado a partir da Transformada wavelet contínua para os dados de ΔH de março de 2000. Os valores de escala e de energia estão representado em \log_2 | 43 |
| 6.3 Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para junho de 2005 | 46 |
| 6.4 Junho 2005 estação de Vassouras | 47 |
| 6.5 Thesholding Probabilistico | 51 |
| 6.6 Thesholding Universal | 52 |
| C.1 Atividade geomagnética em março de 1989 | 65 |
| C.2 Atividade geomagnética em março de 2000 | 66 |

| | | |
|------|--|----|
| C.3 | Atividade geomagnética em junho de 2000 | 67 |
| C.4 | Atividade geomagnética em setembro de 2000 | 68 |
| C.5 | Atividade geomagnética em dezembro de 2000 | 69 |
| C.6 | Atividade geomagnética em março de 2005 | 70 |
| C.7 | Atividade geomagnética em junho de 2005 | 71 |
| C.8 | Atividade geomagnética em setembro de 2005 | 72 |
| C.9 | Atividade geomagnética em dezembro de 2005 | 73 |
| | | |
| D.1 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para março de 1989 | 76 |
| D.2 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para março de 2000 | 78 |
| D.3 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para março de 2000 | 79 |
| D.4 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para junho de 2000 | 81 |
| D.5 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para junho de 2000 | 82 |
| D.6 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para setembro de 2000 | 84 |
| D.7 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para setembro de 2000 | 85 |
| D.8 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para dezembro de 2000 | 87 |
| D.9 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para dezembro de 2000 | 88 |
| D.10 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para março de 2005 | 90 |
| D.11 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para março de 2005 | 91 |
| D.12 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para junho de 2005 | 93 |
| D.13 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para junho de 2005 | 94 |
| D.14 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para setembro de 2005 | 96 |

| | | |
|------|---|-----|
| D.15 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para setembro de 2005 | 97 |
| D.16 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para dezembro de 2005 | 99 |
| D.17 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para dezembro de 2005 | 100 |
| E.1 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para março de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 106 |
| E.2 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para junho de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 107 |
| E.3 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para setembro de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 108 |
| E.4 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para dezembro de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 109 |
| E.5 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para março de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 110 |
| E.6 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para junho de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 111 |
| E.7 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para setembro de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 112 |
| E.8 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para dezembro de 2000 com thresholding Probabilístico e Universal | 113 |
| E.9 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para março de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 114 |
| E.10 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para junho de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 115 |
| E.11 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para setembro de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 116 |
| E.12 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Kakioka para dezembro de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 117 |
| E.13 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para março de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 118 |
| E.14 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para junho de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 119 |
| E.15 | Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para setembro de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 120 |

| | |
|--|-----|
| E.16 Decomposição wavelet ortogonal para o magnetograma de Vassouras para dezembro de 2005 com thresholding Probabilístico e Universal | 121 |
|--|-----|

LISTA DE TABELAS

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 2.1 Classificação das Tempestades Geomagnéticas por intensidade | 8 |
| 4.1 Valores não zeros do filtro escala $h(k)$ das wavelets ortogonais de Daubechies | 29 |
| 4.2 Pseudo-período (minutos) referente ás funções wavelets ortogonais de Daubechies. | 31 |
| 6.1 Tabulação das Tempestades geomagnéticas - Geral | 41 |
| 6.2 Thresholding manual para os coeficientes wavelets ao quadrado | 48 |
| 6.3 Identificação das Tempestades geomagnéticas - Kakioka | 50 |
| A.1 Exemplo de Cabeçalho da Base de Dados de Magnetograma da Estação de Kakioka | 61 |
| A.2 Exemplo da Base de Dados de Magnetograma da Estação de Kakioka | 62 |
| C.1 Março 1989, DstMin (> 500 nT) | 65 |
| C.2 Março 2000, DstMin (-60 nT) | 66 |
| C.3 Junho 2000, DstMin (-90 nT) | 67 |
| C.4 Setembro 2000, DstMin (-201 nT) | 68 |
| C.5 Dezembro 2000, DstMin (-62 nT) | 69 |
| C.6 Março 2005, DstMin (-65 nT) | 70 |
| C.7 Junho 2005, DstMin (-106 nT) | 71 |
| C.8 Setembro 2005, DstMin (-147 nT) | 72 |
| C.9 Dezembro 2005, DstMin (-54 nT) | 73 |
| C.10 Tabulação das Tempestades geomagnéticas - Geral | 73 |
| D.1 Identificação de Tempestades: Kakioka Março 1989, DstMin (> -500 nT) | 77 |
| D.2 Identificação de Tempestades: Kakioka Março 2000, DstMin (-50 nT) | 80 |
| D.3 Identificação de Tempestades: Vassouras Março 2000, DstMin (-50 nT) | 80 |
| D.4 Identificação de Tempestades: Kakioka Junho 2000, DstMin (-90 nT) | 83 |
| D.5 Identificação de Tempestades: Vassouras Junho 2000, DstMin (-90 nT) | 83 |
| D.6 Identificação de Tempestades: Kakioka Setembro 2000, DstMin (-201 nT) | 86 |
| D.7 Identificação de Tempestades: Vassouras Setembro 2000, DstMin (-201 nT) | 86 |
| D.8 Identificação de Tempestades: Kakioka Dezembro 2000, DstMin (-62 nT) | 89 |
| D.9 Identificação de Tempestades: Vassouras Dezembro 2000, DstMin (-62 nT) | 89 |
| D.10 Identificação de Tempestades: Kakioka Março 2005, DstMin (-65 nT) | 92 |

| | |
|--|-----|
| D.11 Identificação de Tempestades: Vassouras Março 2005, DstMin (-65 nT) . . . | 92 |
| D.12 Identificação de Tempestades: Kakioka Junho 2005, DstMin (-106 nT) . . . | 95 |
| D.13 Identificação de Tempestades: Vassouras Junho 2005, DstMin (-106 nT) . . . | 95 |
| D.14 Identificação de Tempestades: Kakioka Setembro 2005, DstMin (-147 nT) . . . | 98 |
| D.15 Identificação de Tempestades: Vassouras Setembro 2005, DstMin (-147 nT) . . . | 98 |
| D.16 Identificação de Tempestades: Kakioka Dezembro 2005, DstMin (-54 nT) . . . | 101 |
| D.17 Identificação de Tempestades: Vassouras Dezembro 2005, DstMin (-54 nT) . . . | 101 |
| D.18 Tabulação das Tempestades geomagnéticas - Kakioka | 102 |
| D.19 Coeficientes Wavelets da Estação de Kakioka | 103 |
| D.20 Coeficientes Wavelets da Estação de Vassouras | 104 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-------|---|---|
| ACE | – | Satélite <i>Advanced Composition Explorer</i> |
| AE | – | Índice geomagnético auroral AE |
| AL | – | Índice geomagnético auroral AL |
| AU | – | Índice geomagnético auroral AU |
| BOU | – | Estação de dados magnetométricos de Boulder (Estados Unidos) |
| DAUB1 | – | Função wavelet de Haar |
| DAUB2 | – | Função wavelet de Daubechies de ordem 2 |
| DAUB3 | – | Função wavelet de Daubechies de ordem 3 |
| DAUB4 | – | Função wavelet de Daubechies de ordem 4 |
| DOY | – | Dia do ano, do inglês <i>Day of Year</i> |
| DST | – | Índice geomagnético, do inglês, <i>Disturbance Storm Time</i> |
| DWT | – | Transformada wavelet discreta, do inglês, <i>Discrete Wavelet Transform</i> |
| EQM | – | Erro quadrático médio |
| FT | – | Transformada de Fourier, do inglês, <i>Fourier Transform</i> |
| KAK | – | Estação de dados magnetométricos de Kakioka (Japão) |
| KP | – | Índice planetário |
| ON | – | Observatório Nacional |
| PC | – | Pulsações contínuas |
| PI | – | Pulsações irregulares |
| REBOM | – | Rede Brasileira de Observatórios Magnéticos |
| SYM | – | Índice Simétrico |
| VSS | – | Estação de dados magnetométricos de Vassouras (Brasil) |

LISTA DE SÍMBOLOS

- a – Parâmetro de escala da função wavelet.
- b – Parâmetro de translação da função wavelet.
- \mathbb{Z} – Conjunto dos números inteiros.
- \mathbb{R} – Conjunto dos números reais.
- C^k – Classe das funções com derivadas contínuas até a ordem k .
- $L^2(\mathbb{R})$ – Espaço das funções de quadrado integrável.
- V^j – Espaço das funções escala, no nível j .
- W^j – Espaços Complementares das funções wavelets, no nível j .
- ϕ – Função escala.
- ψ – Função wavelet.
- ξ – Frequência.
- d_k^j – Coeficiente wavelet na posição k no nível j .
- $h(k)$ – Coeficiente do filtro-escala, na posição k (filtro passa-baixa).
- $g(k)$ – Coeficiente do filtro-wavelet, na posição k (filtro passa-banda).
- σ – Estimativa do ruído.

SUMÁRIO

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 O FENÔMENO ELETRODINÂMICO | 7 |
| 2.1 Acoplamento eletrodinâmico | 7 |
| 2.2 Distúrbios Geomagnéticos | 7 |
| 2.3 Pulsações Geomagnéticas | 11 |
| 3 DADOS | 15 |
| 3.1 Magnetômetros | 15 |
| 3.2 Identificação das tempestades geomagnéticas | 15 |
| 3.3 As estações | 18 |
| 4 ANÁLISE WAVELET | 21 |
| 4.1 Transformada Wavelet Contínua | 22 |
| 4.2 Transformada Wavelet Discreta Ortogonal | 24 |
| 5 METODOLOGIA | 33 |
| 5.1 Identificação de Distúrbios Geomagnéticos | 33 |
| 5.1.1 Outros Métodos de Thresholding | 34 |
| 5.2 Determinação do Thresholding | 36 |
| 6 RESULTADOS | 39 |
| 6.1 Procedimento de análise e interpretação | 39 |
| 6.2 Identificação do padrão de tempestades geomagnéticas | 41 |
| 6.3 Avaliação das características multiescala dos distúrbios | 41 |
| 6.4 Avaliação da regularidade local | 44 |
| 7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS | 53 |
| 7.1 Conclusão | 53 |
| 7.2 Trabalhos Futuros | 55 |

| | |
|---|-----|
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 57 |
| APÊNDICE A: FORMATO DOS DADOS DE MAGNETÔMETRO | 61 |
| APÊNDICE B: FERRAMENTAS UTILIZADAS. | 63 |
| APÊNDICE C: ATIVIDADES GEOMAGNÉTICAS. | 65 |
| APÊNDICE D: MAGNETOGRAMAS ANALISADOS PELA TÉCNICA WAVELET COM THRESHOLDING MANUAL | 75 |
| APÊNDICE E: OUTROS TIPOS DE THRESHOLDING | 105 |

1 INTRODUÇÃO

Os eventos que ocorrem na superfície do Sol, como as explosões solares, juntamente com estruturas de plasma magnetizado propagantes no meio interplanetário, como as ejeções coronais de matéria interplanetárias, e os distúrbios magnéticos na Terra, como as tempestades geomagnéticas, constituem alguns aspectos de uma cadeia complexa de eventos da área da Física da Interação Sol-Terra. (MENDES et al., 2005; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

Os estudos nessa área da física estão levando à consolidação de um novo domínio de investigação científica, de terminologias próprias e de inúmeras aplicações. No final do último século, os interesses e os estudos voltados para a questão de clima e tempo espaciais têm crescido significativamente. Entende-se por *ambiente espacial* o meio em que um conjunto de condições ou circunstâncias de processos físicos ou fenômenos espaciais ocorrem. O *clima espacial* diz respeito às variabilidades de comportamento recorrente desse meio consideradas em uma maior escala de tempo, claramente da ordem de, no mínimo, algumas rotações solares. Enquanto eventos ou transientes nesse meio podem ser considerados como referentes a um *tempo espacial* (MENDES et al., 2010).

Existem várias razões importantes para monitorar os eventos e, principalmente, estudar, entender e tentar prever o clima espacial. O desenvolvimento de aplicações, que podem ser entendido como transpor os conhecimentos para alguma forma de utilização prática, está atualmente bastante encorajado pela constatação de que efeitos do Sol e do vento solar sobre a magnetosfera e atmosfera terrestres podem afetar as tecnologias humanas (quer no espaço, quer na superfície da Terra), pôr em risco a saúde humana ou mesmo a vida em nosso planeta e mesmo transformar o ambiente em que a vida se desenvolve (MENDES et al., 2009.; MURALIKRISHNA, 2009).

A partir das motivações acima para desenvolvimentos de aplicações, apresenta-se a seguir, resumidamente, o contexto físico que remete ao desafio metodológico considerado neste projeto e que será explicitado adiante.

A ação do sol influencia o meio interplanetário causando efeitos, tais como a incidência de matéria ou energia, sobre a atmosfera da Terra.

A Terra possui um campo magnético que interage com o vento solar estabelecendo

uma região espacial dinâmica que a envolve, denominada Magnetosfera (MENDES, 1992). Na Figura 1.1, apresentam-se a magnetosfera e suas principais regiões sob a ação do vento solar. Nesta figura, o vento solar à esquerda incide sobre a região dominada pelo campo geomagnético, criando uma frente de choque e, após, a magnetosfera.

No interior da magnetosfera, há as linhas fechadas do campo geomagnético e linhas que se distendem permitindo a penetração de partículas e campos elétricos. Várias regiões dinâmicas são criadas, tais como a bainha magnética, que fica entre a frente de choque e a magnetopausa, sendo esta a fronteira externa da magnetosfera; a cauda magnetosférica, prolongamento da magnetosfera em sentido oposto ao Sol; uma lâmina de plasmas; e a plasmasfera, região de plasmas corrotantes. Outros detalhes mais complexos não serão tratados fogem do escopo desse trabalho.

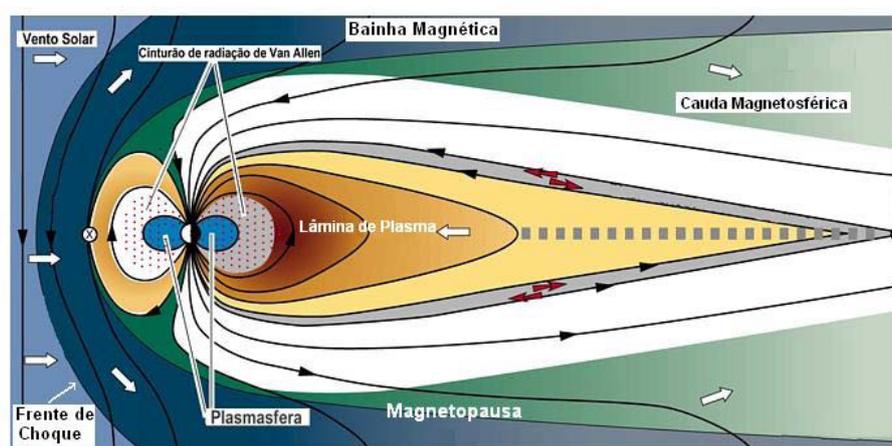


Figura 1.1 - Regiões da Magnetosfera formadas a partir da interação com o vento solar.

Fonte: Adaptado de <http://space.rice.edu/IMAGE/livefrom/magnetosphere.jpg>

Acesso em 10 de agosto de 2009.

Um exemplo significativo de região física mais próxima à superfície terrestre e de larga escala sujeita ao clima espacial é a ionosfera, porção altamente ionizada da atmosfera, localizada em baixas latitudes entre 70 e 2000 km de altitude. Sabe-se que o plasma ionosférico é fortemente afetado pelas alterações nos níveis de radiação solar, principalmente os raios ultravioleta e raios-X, como também pelos períodos de distúrbios geomagnéticos. Essa região tem importância para as telecomunicações e os serviços na superfície da Terra, como, por exemplo, tv, telefone, GPS, energia

elétrica, internet, dutos de transporte de fluidos ou gases, entre outros. (HARGREAVES, 1993).

Para diagnosticar e conhecer o ambiente espacial da Terra existem vários equipamentos para medir as variações do campo geomagnético que podem ser instalados tanto na Terra como estar a bordo de satélites no espaço. O monitoramento do comportamento do ambiente e as transmissões de alertas geofísicos são muito importantes para que providências possam ser tomadas com antecedência contra os efeitos nocivos das perturbações geomagnéticas. Por exemplo, um aviso antecipado de uma iminente tempestade geomagnética permite que, em altas latitudes, distribuidoras de energia elétrica evitem danos em suas redes e que, no espaço, satélites, naves espaciais e astronautas possam ser protegidos. Há também sensores na Terra e no espaço que observam, continuamente, porções específicas do espectro de energia do Sol para monitorar os seus níveis e indicações de eventos significativos. Do ponto de vista da previsão, por exemplo, uma importante ferramenta de monitoramento é o satélite SOHO, que localiza-se no ponto Lagrangeano L1 – ponto de equilíbrio gravitacional entre Sol e Terra, situado a aproximadamente 240 raios terrestres do nosso planeta – e detecta as explosões e injeções na superfície solar, permitindo detectar, com antecedência, a possibilidade da chegada à Terra de agentes solares ou gerados no meio interplanetário (KIVELSON; RUSSELL, 1995).

Nesse conjunto de recursos, os magnetômetros são instrumentos práticos e versáteis de medidas de campos magnéticos, podendo tanto medir campos magnéticos de intensidade mínima quanto monitorar suas variações. Com base nessa tecnologia, uma das maneiras de quantificar o grau de perturbação do campo magnético na superfície da Terra é a utilização do índice geomagnético *Disturbance of Storm Time* (Dst). Esse índice monitora a atividade geomagnética relacionada essencialmente à corrente elétrica na região do equador magnético terrestre, em formato anelar. Existem outros índices geomagnéticos; mas, para os propósitos deste trabalho, adotou-se um índice mais clássico com o propósito de evidenciar os momentos sob perturbação geomagnética.

A medida obtida pelo índice Dst indica que quanto mais negativo ele for mais intensa é a tempestade geomagnética devida às variações na corrente anelar. Tal corrente surge devido à diferença de deriva entre íons (sentido leste-oeste) e elétrons (sentido oeste-leste), que gera uma corrente resultante com sentido leste-oeste. Esses efeitos são fortemente intensificados por aumento da população das partículas aprí-

sionadas em regiões de órbitas geossíncronas (36000km) durante as tempestades geomagnéticas. Os magnetômetros registram os efeitos dessas correntes magnetosféricas (CAMPBELL, 2003).

O objetivo deste trabalho é dispor de uma metodologia computacional de identificação de distúrbios geomagnéticos relacionados à fase principal das tempestades, por meio da análise por transformada wavelet discreta aplicada diretamente a dados de magnetômetro, validando e estabelecendo potencialmente bases a um produto útil às investigações da eletrodinâmica espacial e ao programa de Clima Espacial.

Neste tipo de aplicação, a técnica wavelet foi utilizada com diferentes técnicas de *thresholding*. A primeira é o *thresholding* manual ou o limiar manual, em que é definido a priori a energia conservada da série temporal. A segunda é o uso do *threshold* universal, quando o mesmo valor de *threshold* é praticado para todos os níveis. A terceira é o *threshold* probabilístico, quando se aplica uma perturbação no sinal original para uma recuperação inequívoca. O intuito é utilizar diferentes métodos de *thresholding* que possibilitem encontrar com os coeficientes os períodos ou intervalos correspondentes às pulsações contínuas tipo 5, PC5, caracterizando os distúrbios geomagnéticos associados ao acoplamento eletrodinâmico entre o plasma solar e a magnetosfera. Para fazer uma análise precisa, o índice Dst é usado como o parâmetro de análise na identificação dos distúrbios pelos coeficientes wavelets. Outros índices, como o índice simétrico (SYM-H) relacionado também à corrente anelar, poderiam igualmente ser utilizados neste estudo, propiciando uma comparação análoga à obtida com o Dst.

A contribuição geral deste trabalho, ao lidar com uma ferramenta original de análise, é validar essa capacidade de identificação e testar o melhor método. As contribuições específicas podem ser evidenciadas como a caracterização da função wavelet Daubechies 2 como a melhor wavelet para essa identificação, a conclusão de um comportamento equivalente após comparar várias técnicas de limiar para os coeficientes wavelets, e a constatação, por comparação com uma estação geomagnética internacional, da possibilidade de utilizar diretamente a análise do comportamento dos dados de uma estação no Brasil, que doravante pode ser utilizada para referência nacional neste aspecto.

Esta dissertação está assim estruturada:

No Capítulo 2, resume-se o fenômeno eletrodinâmico dentro do contexto da relação interação Sol-Terra, em que se descrevem sucintamente o acoplamento eletrodinâmico e os efeitos sentidos desde a modulação da magnetosfera até a perturbação do campo geomagnético na superfície.

No Capítulo 3, apresentam-se os dados utilizados neste trabalho.

No Capítulo 4, apresentam-se as transformada wavelet contínua e a transformada wavelet discreta.

No Capítulo 5, apresentam-se a metodologia de análise wavelet e suas aplicações a séries temporais no contexto utilizado nesta dissertação, contribuindo para uma abordagem inovadora de identificação de distúrbios geomagnéticos durante a etapa de injeção de energia do plasma solar para o interior da magnetosfera.

No Capítulo 6, discutem-se os resultados obtidos com a aplicação da metodologia e a sua validação.

No Capítulo 7, apresentam-se as conclusões desta dissertação e perspectivas futuras de trabalho.

2 O FENÔMENO ELETRODINÂMICO

Na atualidade, o Clima Espacial revela-se praticamente como uma área emergente nas Ciências Espaciais, que estuda os processos físicos, causas e consequências da interação Sol-Terra no sentido de propiciar aplicações espaciais, seja no sentido de desenvolvimentos, produtos ou serviços eletro-eletronicamente sensíveis em atendimento a necessidades crescentes da sociedade. Neste capítulo, apresentam-se o contexto do fenômeno eletrodinâmico em estudo e as bases para a metodologia de detecção em desenvolvimento.

2.1 Acoplamento eletrodinâmico

A magnetosfera, apresentada na Seção 1, pode ser entendida como uma camada protetora formada pelo campo magnético da Terra, desviando em princípio as partículas eletricamente carregadas provenientes do plasma solar.

No entanto, há um processo eletrodinâmico importante que contribui para a entrada de matéria e energia para dentro da magnetosfera, a chamada reconexão magnética (DUNGEY, 1961), que ocorre pela união entre linhas do campo magnético interplanetário e o campo geomagnético. A reconexão ocorre quando as linhas dos campos estão com orientações opostas ou quase opostas e implica a transferência da matéria e energia de um meio para outro. Essa é a causa principal do acoplamento eletrodinâmico entre o plasma solar e a magnetosfera, que afeta a distribuição de plasmas no interior da magnetosfera e altera tanto a intensidade quanto os regimes de correntes elétricas nessa região. Essa é a ação desencadeadora de distúrbios geomagnéticos (MENDES, 1992; RUSSELL, 1987).

2.2 Distúrbios Geomagnéticos

Os distúrbios geomagnéticos são decorrentes das variações das correntes elétricas na magnetosfera que ocorrem em conjunto com perturbações ionosféricas, que por sua vez produzem também correntes elétricas na ionosfera. Os campos magnéticos gerados por essas correntes superpõem-se ao campo magnético do interior da Terra, que é muito mais lento nas variações. Dentre as causas das variações magnéticas de origem externa à Terra estão por exemplo as explosões solares, que ocorrem em regiões ativas do Sol, que causam um aumento na ionização nas regiões da ionosfera (CAMPBELL, 2003; KIVELSON; RUSSELL, 1995). Essa superposição de efeitos permite perceber a complexidade da investigação dos distúrbios geomagnéticos.

Ocorrências de intensas flutuações do campo magnético terrestre foram denominados "Tempestades Magnéticas" ou "Tempestades Geomagnéticas" na metade do século XIX (GONZALEZ et al., 1994). Em médias e baixas latitudes, sua característica é um decréscimo na componente horizontal (H) do campo magnético terrestre, durando cerca de algumas horas (KAMIDE et al., 1998). Atribui-se este decréscimo a um aumento da população de partículas aprisionadas na magnetosfera. Devido ao gradiente do campo magnético e a sua curvatura, partículas ionizadas em movimento para a Terra produzem a chamada "corrente de anel", que é o resultado do movimento destas partículas: íons de leste para oeste; elétrons de oeste para leste. Para estimar a intensidade desta corrente, utilizam-se valores horários da variação global da componente H em baixas latitudes (GONZALEZ et al., 1994; MENDES, 1992). Escolheu-se a tempestade geomagnética por ela estar relacionada de forma direta ao processo de injeção de energia no interior da magnetosfera.

Uma Tempestade Geomagnética pode ser caracterizada tipicamente por três fases: fase inicial de decréscimo precedida ou não de início súbito, este último caracterizado por um aumento do campo magnético; fase principal, que é o intervalo de alto decréscimo do índice Dst; e fase de recuperação, onde o campo magnético tende a restaurar sua intensidade normal. As tempestades geomagnéticas podem ser classificadas de acordo com sua intensidade em função do índice Dst (MATSUOKA; SALOMON, 2007; GONZALEZ et al., 1994; MENDES, 1992). Essa classificação está dada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classificação das Tempestades Geomagnéticas por intensidade

| | |
|------------------|-----------------------------------|
| Fraca | $-50 < Dst \leq -30 \text{ nT}$ |
| Moderada | $-100 < Dst \leq -50 \text{ nT}$ |
| Intensa | $-150 < Dst \leq -100 \text{ nT}$ |
| Muito intensa I | $-300 < Dst \leq -150 \text{ nT}$ |
| Muito intensa II | $Dst \leq -300 \text{ nT}$ |

As perturbações magnéticas são quantificadas por valores médios obtidos do processamento de dados magnéticos de várias estações adequadamente escolhidas, resultando índices geomagnéticos, que são valores pré-processados e que podem demorar para serem calculados atrasando a sua disponibilidade.

Índices de Atividade Geomagnética

Para o estudo da relação das atividades geomagnéticas com as variações ocorridas no Sol utilizam-se medidas do campo magnético da Terra obtidas por meio de magnetômetros. Medidas magnéticas de várias localizações distribuídas sobre o globo terrestre são complexas e volumosas para serem manipuladas facilmente. Índices magnéticos foram desenvolvidos para substituir tais dados e caracterizar os aspectos fundamentais dos fenômenos de interesse (KIVELSON; RUSSELL, 1995). Para uma melhor compreensão da importância e do uso desses índices, apresenta-se a seguir uma sucinta revisão dos índices mais utilizados, que são: AE, relacionado a efeitos em altas latitudes; Dst, a efeitos em médias e baixas latitudes; e Kp, a efeitos gerais (CAMPBELL, 2003).

O objetivo de um índice é fornecer informações de uma maneira contínua a respeito de fenômenos complexos que variam com o tempo. Isto significa que um índice é constituído por um conjunto de valores discretos e, cada um deles, caracteriza o fenômeno sob consideração para um intervalo de tempo constante. Um determinado índice pode ser utilizado para duas finalidades: para estudar o próprio fenômeno, ou como referência para o estudo de um fenômeno associado. E ainda, se a série de índices for homogênea no tempo e representar significativamente o fenômeno, ela pode tornar-se uma ferramenta para estudos estatísticos com respeito às variações temporais do fenômeno ou suas relações com outros fenômenos (MAYAUD, 1980).

O índice Kp é obtido a cada período de 3 horas (3h) e é derivado de 13 observatórios em latitudes subaurorais, entre 44°e 60°de latitude, principalmente no hemisfério norte. Níveis de perturbação em cada um destes observatórios são determinados pela medida da diferença entre o maior e menor valor absoluto, durante o intervalo de 3h, para a componente do campo magnético mais perturbado. A variação máxima é, então, convertida em um índice K local tomando valores de 0 a 9 de acordo com uma escala quase-logarítmica, que é específica de cada estação. Isto é feito como uma tentativa de normalizar a frequência de ocorrência de diferentes intensidades de perturbação (CAMPBELL, 2003).

O índice do Eletrojato Auroral (AE) é designado para fornecer uma medida quantitativa da atividade magnética na zona auroral, produzida pelo aumento das correntes ionosféricas fluindo abaixo e dentro da oval auroral. Definido e desenvolvido por Davis e Sugiura, em 1996, o índice AE tem sido utilizado tanto qualitativamente

quanto quantitativamente no estudo da morfologia das subtempestades, através do comportamento dos satélites de comunicação, na propagação de rádio e no acoplamento entre o campo magnético interplanetário e a magnetosfera da Terra. O índice AE é derivado das variações geomagnéticas da componente horizontal, obtida em observatórios selecionados ao longo da zona auroral, no hemisfério norte. O índice AE é obtido por meio da superposição em mesma escala de amplitude e tempo dos vários magnetogramas obtidos nos diferentes observatórios. As variações são medidas de uma linha de base determinada para os dados de cada observatório. O nível de campo magnético de tempo calmo deve ser determinado para cada um deles e subtraído dos valores medidos, deixando assim somente o valor da perturbação. O índice AE é definido por $AU-AL$, onde os índices AU e AL representam o envelope superior e inferior da superposição dos valores de um minuto de H de todos os observatórios, respectivamente, e o valor AE dá a separação destes envelopes. Os índices AU e AL representam uma medida da densidade máxima de corrente dos eletrojetos aurorais na direção leste e na direção oeste, respectivamente. O índice AE representa uma medida da atividade do eletrojato auroral global e está disponível desde 1957 (ROSTOKER, 1972; MAYAUD, 1980; RANGARAJAN, 1989; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

O índice Dst monitora a variação da corrente anelar, que flui no cinturão de radiação de Van Allen na magnetosfera (WILLIAMS, 1983; DAGLIS, 1999; PRESTES, 2009). Entre todos os índices, o Dst é provavelmente aquele que melhor monitora e registra o fenômeno para o qual foi designado. Isto se deve à grande simplicidade das variações magnéticas causadas pela corrente anelar: elas são axialmente simétricas em seu regime estacionário e, não dependem da longitude ou da hora local.

O índice Dst é derivado usando dados de quatro observatórios magnéticos, que são: Honolulu (Hawaii), San Juan (Porto Rico), Hermanus (África do Sul) e Kakioka (Japão). Estes observatórios foram escolhidos com base na qualidade da observação e por que suas localização está suficientemente distantes dos eletrojetos aurorais e equatorial para minimizar seus efeitos, sendo eles distribuídos em intervalos de longitude aproximadamente equidistantes. Mais especificamente, o índice Dst é formado pela média horária da componente horizontal do campo geomagnético das quatro estações, após as subtrações da variação diurna média em tempo magneticamente calmo e do campo geomagnético local permanente (SUGIURA, 1964; MENDES et al., 2006). No entanto, detalhes específicos de sua obtenção não estão apresentados nos centros de divulgação desse índice, como discutido em (MURSULA et al., 2011). O

que dificulta a análise de dados reais baseando-se no índice Dst é que esse índice, muitas vezes, fica disponível aproximadamente seis meses após a coleta de dados nas estações da superfície terrestre, com versões provisórias antes desse tempo.

Contudo, com o uso dos índices, variações transitórias regulares ou irregulares são eliminadas nos cálculos. Dessa forma, para os interesses de investigações da Geofísica Espacial e de desenvolvimento de aplicações (ferramentas) úteis ao programa de Clima Espacial do INPE ([INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS \(INPE\), 2007](#)), convém a utilização de dados sem tratamentos prévios, coletados preferencialmente em estação localizada no Brasil, como do magnetômetro da estação de Vassouras no Rio de Janeiro utilizado neste trabalho.

2.3 Pulsações Geomagnéticas

Dentro dos distúrbios magnéticos, ocorrem flutuações do campo magnético na superfície da Terra no intervalo de frequência de poucos milihertz a poucos Hertz ([BAUMJOHAN; TREUMAN, 2004](#)). Neste intervalo de frequências muito baixas (*Ultra Low Frequency*, ULF), ocorrem as pulsações contínuas divididas em 5 intervalos, de PC_1 à PC_5 , e as pulsações irregulares, divididas em Pi_1 e Pi_2 .

As pulsações contínuas abrangem oscilações quasi-sinusoidais de largura de banda de espectro estreita constituindo uma mistura de oscilações polodais e toroidais. Perduram de vários minutos a horas. Observadas sobre um amplo intervalo longitudinal e latitudinal. Mas suas frequências e amplitudes frequentemente exibem uma variação latitudinal

As pulsações irregulares são comparativamente mais curtas em duração, compostas em geral de poucas oscilações decaindo no tempo e nem apresentando forma senoidal ou pico espectral bem definido. Em geral mais localizadas, tanto em latitude, e tendo um espectro similar sobre a região de ocorrência.

Como fontes das pulsações entendem-se as modulações ou perturbações das linhas de campo geomagnético, que são excitadas perto da magnetosfera, constituindo as pulsações contínuas. Durante a reconexão magnética, em que há injeção de energia na magnetosfera, (a) ondas excitadas por instabilidades Kelvin-Helmholtz pelo fluxo solar ao longo da magnetosfera ou (b) ondas compressionais que penetram pelo nariz da magnetosfera ou turbulências na bainha magnética que pode penetrar diretamente nas aberturas polares e conectar com a magnetosfera, são as causas das

pulsações contínuas. Já as pulsações irregulares estão associadas com o desenvolvimento da injeção de corrente elétrica para as altas latitudes, caracterizando o início das sub-tempestades geomagnéticas entendidas como fenômenos de altas latitudes.

A Figura 2.1 ilustra os intervalos de frequência, em ciclos por segundo, (ou períodos, em segundos) e da intensidade magnética, em nanoteslas, dessas pulsações (CAMPBELL, 2003).

O domínio geomagnético é considerado estar em frequências mais baixas que 3 Hz. Uma banda mais larga de sinais bem acima dessa frequência, entre 10 e 1000 Hz é proveniente da atividade de relâmpagos (chamados de atmosféricos ou esféricos, (MACGORMAN; RUST, 1998)). Amplitudes representadas nessa figura são valores típicos que podem ser esperados para atividades moderadas em latitudes médias. As pulsações contínuas, PC1 a PC5, são nomenclaturas das posições atribuídas ao período indicado no pico das amplitudes. A nomenclatura de pulsações irregulares, Pi1 e Pi2, é identificada com faixas de seu período na parte inferior da curva de intensidade.

Em geral as pulsações são transportadas para as latitudes aurorais ao longo das linhas de campo da magnetosfera e, portanto, têm um comportamento equivalente em regiões magneticamente conjugadas. Oscilações de períodos mais longos têm sido interpretadas como oscilações ressonantes no campo magnético da magnetosfera. O comportamento desses sinais são percebidos de forma algo modificado tanto em termos de latitude quanto de longitude, revelando uma complexidade de processos e da morfologia das fontes de sinal (CAMPBELL, 2003).

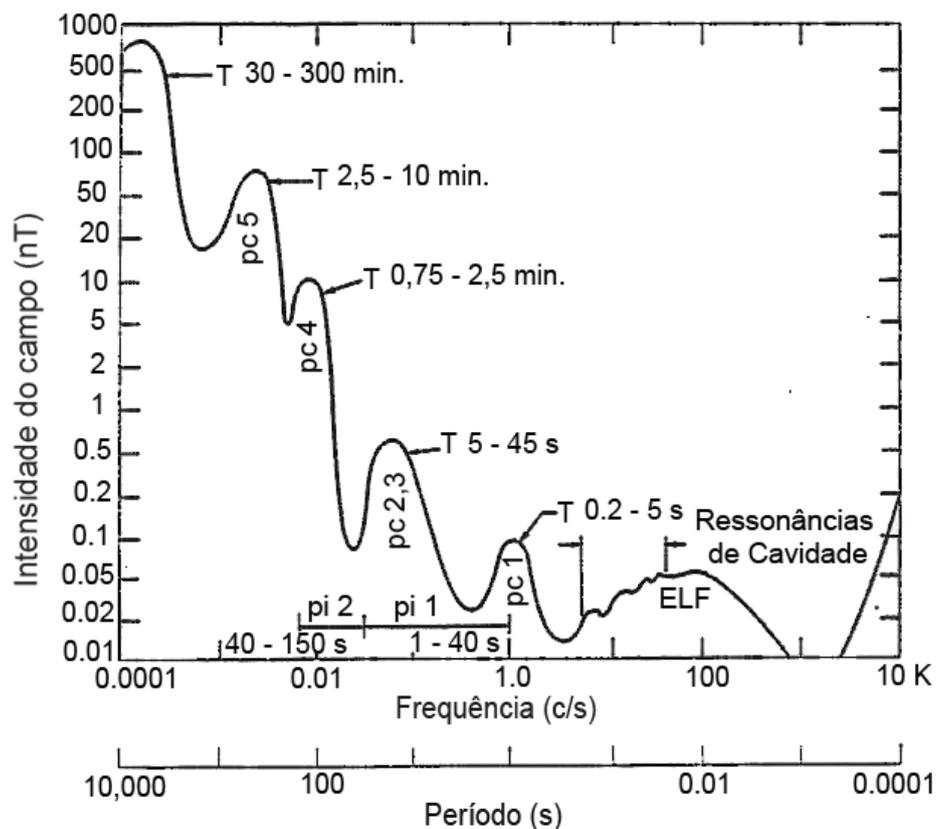


Figura 2.1 - Valores característicos da intensidade do campo magnético para pulsações geomagnéticas representado contra a frequência ou o período do sinal.

Fonte: Adaptado de (CAMPBELL, 2003).

Assim, a base técnica para a metodologia de detecção de distúrbios deste trabalho fundamenta-se na ocorrência de flutuações naturais geomagnéticas, no intervalo de frequências ultra lentas. Essa identificação relaciona-se a períodos de injeções de energia do plasma solar para a magnetosfera, ou seja, durante a fase inicial e principal das tempestades geomagnéticas. A detecção desenvolvida pelo método e aprimorada neste trabalho caracteriza intervalos de alteração da magnetosfera pela interação com o plasma solar incidente, constituindo a base de uma ferramenta bastante útil para investigação de processos exatamente durante o ativamento dessas interações.

3 DADOS

Este capítulo descreve os dados utilizados neste trabalho, que são medidas do campo geomagnético e o índice Dst para o mesmo período. Apresentam-se as fontes dos dados, a forma com que os dados estão disponibilizados e sua resolução temporal.

3.1 Magnetômetros

Os dados dos magnetômetros são obtidos nas bases de dados do *International Real-Time Magnetic Observatory Network* - (INTERMAGNET¹), que é uma rede global de observatórios. O Brasil faz parte dessa parceria como país colaborador por meio do Observatório Nacional (ON), situado na cidade do Rio de Janeiro.

Neste trabalho são utilizados os dados magnéticos na superfície obtidos pelas estações de Vassouras(VSS), Rio de Janeiro, Brasil, e Kakioka (KAK), Japão. Esses dados consistem do tempo em que as medidas foram feitas, está representado por vetores na Figura 3.1 as componentes do campo magnético, sendo a componente horizontal do campo geomagnético (H), a declinação magnética (D), a componente vertical (Z) e a intensidade do campo (F). Para o escopo desta dissertação é utilizada apenas a componente H, que retrata o comportamento do campo geomagnético e as variações principais do processo físico.

Neste trabalho é estudado uma base de dados históricos relativos aos anos de 2000 e 2005. No ano de 2000 corresponde um período calmo de atividade na superfície solar e o ano de 2005 a um período ativo. Além disso, estuda-se também o mês de março de 1989, selecionado devido a ocorrência de uma tempestade solar bastante intensa nesse período. Com isso pode-se fazer uma análise de identificação mais ampla dos intervalos com perturbação, para servir de base para a implementação de uma potencial aplicação futura para análise em tempo real. Os detalhes sobre a formatação dos dados encontram-se no Apêndice A.

3.2 Identificação das tempestades geomagnéticas

O índice Dst é formado pela média de 4 estações, conforme já foi descrito na Seção 2. A variação temporal do sinal do índice Dst, representado na Figura 3.2, é utilizada para o entendimento da localização da tempestade geomagnética e, portanto, permitindo comparar com o intervalo de identificação dos distúrbios geomagnéticos

¹<http://www.intermagnet.org>

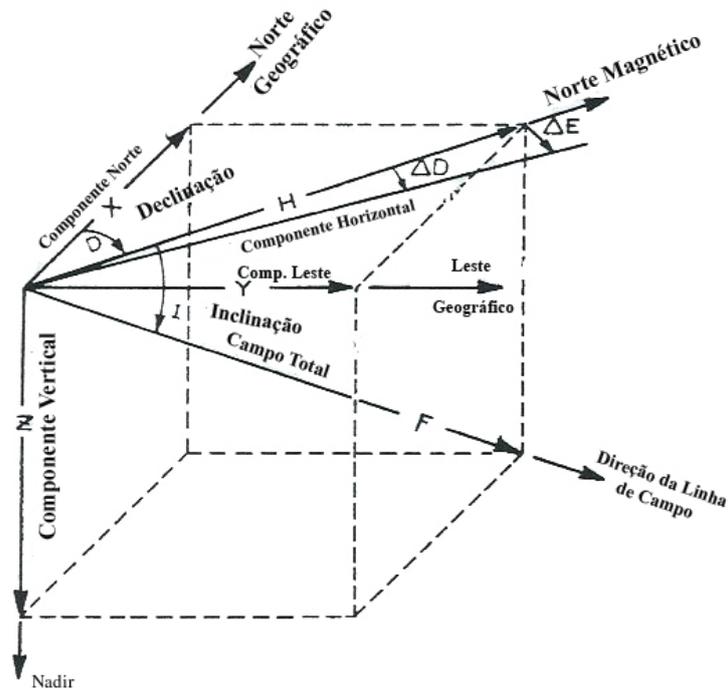


Figura 3.1 - Componentes do Campo Magnético
Fonte: Adaptado de (CAMPBELL, 2003).

de interesse. O índice Dst, relacionado a variação da corrente anelar dentro da magnetosfera, é mostrado, permitindo identificar a localização das tempestades geomagnéticas, identificadas pelas marcações em vermelho. Nessa figura, onde está ressaltado, tem-se um exemplo típico de uma tempestade intensa e outras duas moderadas, de menor intensidade, conforme Tabela 2.1.

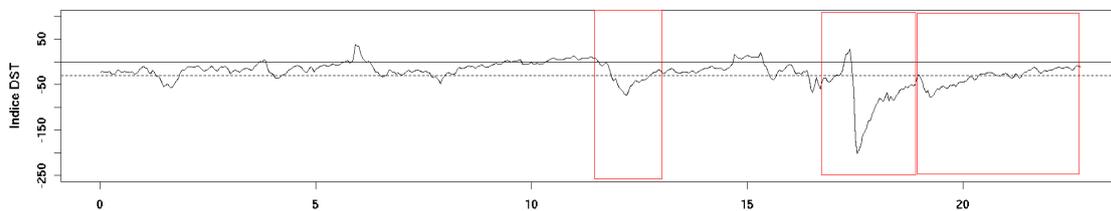


Figura 3.2 - O índice Dst, relacionado a variação da corrente anelar dentro da magnetosfera, é mostrado, permitindo identificar a localização das tempestades geomagnéticas, identificadas pelas marcações em vermelho.

A Figura 3.3 apresenta a localização das estações de magnetômetros utilizadas para a elaboração do índice Dst. A utilização do índice Dst apresenta algumas dificuldades para monitoramento em tempo real porque ele é pré-processado, perdendo as características de um sinal completo, e disponibilizado muitas vezes com atraso em torno de seis meses depois dos dados serem coletados (MENDES et al., 2006). Deve-se ressaltar que os dados do Dst de 2000 já estão validados e os dados de 2005 são provisórios como pode ser visto no Apêndice C.

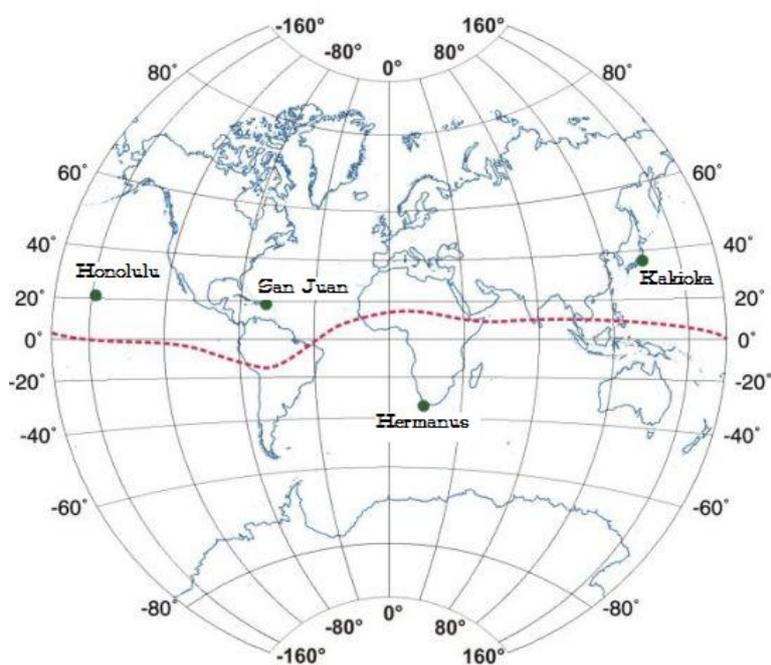


Figura 3.3 - Estações de medições geomagnéticas cujos dados compõem o índice Dst.

3.3 As estações

A base de dados utilizada neste trabalho é a da estação de Kakioka (KAK, localização geográfica: 36.23° N 140.18° E, geomagnética: 27.46° N –150.78° E) e a da estação de Vassouras (VSS, localização geográfica: –22.40° N –43.65° E, geomagnética: –13.43° N 27.06° E), constituindo assim estações situadas em médias e baixas latitudes geográficas. Os arquivos com as medições contêm, para cada medida, o registro do ano, dia, hora, minuto e dos segundos em que foi realizada a coleta (CAMPBELL, 2003).

Assim como se selecionou os eventos quanto aos anos, os meses escolhidos foram baseados nos fenômenos conhecidos como solstício e equinócio, para dar maior abrangência de período do ano e representatividade às análises feitas, por tomar todo o período de translação da Terra. O solstício de verão quando o Sol atinge o ponto mais baixo no céu em relação à Terra, que marca a chegada dessa estação e também verifica-se o dia mais longo e a noite mais curta do ano. Outro fenômeno escolhido é o equinócio que ocorre quando os raios solares atingem a Terra perpendicularmente sobre a linha do Equador. Em 21 de março, no hemisfério Norte, ocorre o equinócio de primavera, e, no dia 23 de setembro, ocorre o equinócio de outono. Durante o equinócio, o dia e a noite tem a mesma duração na maior parte dos lugares da Terra ². Dentro da idéia de representatividade dos períodos, o ano de 2000 corresponde a um período de baixa atividade solar e o de 2005 a alta atividade solar.

Os dados que permitem caracterizar o acoplamento eletrodinâmico de uma forma mais completa são os do plasma solar de satélites no meio interplanetário, e os dos índices geomagnéticos (Kp, Dst e AE), os dados de magnetômetros na base de dados do Observatório Nacional (ON) ³ e do *World Data Center for Geomagnetism, Kyoto* ⁴. Neste trabalho só estão considerados os dados referentes aos efeitos na superfície da Terra, i.e., os dados de magnetômetro e o índice Dst.

Para ilustração de uma série temporal da componente H de um magnetômetro, representa-se a variação ΔH para a estação de Kakioka, no mês de setembro de 2000, na Figura 3.4. Essa variação ΔH é calculada como desvio da média da amplitude da componente H do campo magnético dos primeiros 22 dias do mês em questão (32768

²<http://proffranciscogeo.blogspot.com/2010/05/o-planeta-terra.html>

³<http://www.on.br/>

⁴<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

primeiros minutos). O intervalo estabelecido para esta variação é de $[-300 \text{ nT} : 300 \text{ nT}]$.

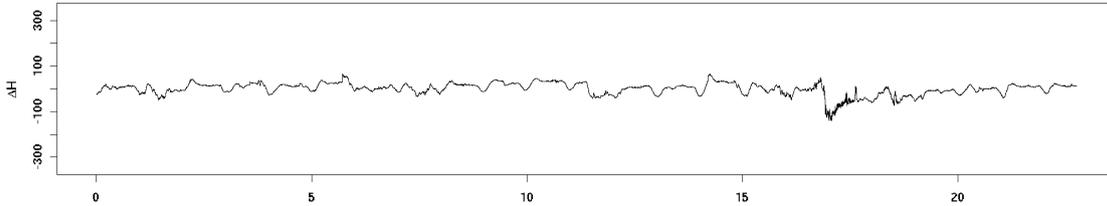


Figura 3.4 - Magnetograma da estação de Kakioka do mês de setembro de 2000, considerando a variação em torno da média no intervalo.

Desta forma, a análise com o uso direto de magnetogramas de uma estação geomagnética deve permitir uma pronta identificação dos distúrbios geomagnéticos de interesse relacionados com as tempestades geomagnéticas e, portanto, dos intervalos de condição ativa da interação do plasma solar com a magnetosfera terrestre, condição a ser testada e validada.

4 ANÁLISE WAVELET

A transformada wavelet surgiu formalmente com esse nome na década de 80 com Jean Morlet e Alex Grossmann, pesquisadores franceses que analisavam dados sísmicos e uma formulação matemática para isso, respectivamente (MORLET, 1983). A partir daí, a teoria contou com a contribuição de pesquisadores como Ives Meyer, Ingrid Daubechies, Stéphane Mallat, entre muitos outros. Observa-se que a teoria wavelet apresenta similaridade com vários métodos, pois foi desenvolvida independentemente em diferentes campos, desde análise funcional a processamento de sinais. (HUBBARD, 1996).

Em 1987, Meyer e Mallat introduziram o conceito de análise multirresolução, o que permite a construção de bases de wavelets ortogonais com a regularidade desejada e associada a algoritmos rápidos. Trata-se de uma transformada linear com propriedades de admissibilidade, similaridade, inversibilidade, regularidade e reprodução local de polinômios.

Para satisfazer a condição de admissibilidade, a wavelet deve ser uma função integrável com média zero. A condição de similaridade está relacionada à decomposição em multiescala associada a translação e dilatação da wavelet analisadora. A inversibilidade garante que é possível reconstruir exatamente o sinal original dos coeficientes wavelet. A condição de regularidade diz respeito as funções analisadoras devem ser suficientemente regulares, excluindo funções descontínuas. Enquanto, a condição de reprodução local de polinômios, permite o estudo de flutuações locais no sinal, além de possíveis singularidades e descontinuidades locais no sinal ou em suas derivadas.

Fazendo um paralelo com a transformada de Fourier, as funções base são as funções trigonométricas que constituem uma base ortogonal de classe $L^2(0, 2\pi)$, o que permite a decomposição de qualquer função desta classe, em uma combinação linear dos vetores definidos pelos coeficientes de Fourier. Essas funções trigonométricas possuem suporte global, desta forma, a informação contida na função analisadora com aspectos locais no domínio temporal se espalha por todo o espectro, valor absoluto dos coeficientes de Fourier ao quadrado, não apresentando uma localização específica.

Em complementação à Fourier, na transformada wavelet as bases são localizadas

tanto no domínio da frequência, quanto no domínio temporal. Devido a esta propriedade de dupla localização, há um equilíbrio nas resoluções em cada um dos domínios conhecidos. Existe uma relação entre o comportamento local do sinal e o comportamento local de seus coeficientes wavelet. Por exemplo, se uma função é localmente suave, os correspondentes coeficientes wavelet serão pequenos; mas se a função possui estruturas, então os valores assumidos pelos seus correspondentes coeficientes em uma vizinhança dessas estruturas serão muito grandes. Os coeficientes wavelets são medidas locais; enquanto que os coeficientes de Fourier são medidas globais.

4.1 Transformada Wavelet Contínua

A CWT (do inglês, *Continuous Wavelet Transform*) é uma transformada linear que calcula os seus coeficientes a partir de funções transladadas e dilatadas da função wavelet-mãe analisadora. Matematicamente, a CWT de uma série temporal $f(t)$ é definida por:

$$W_f^\psi(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\bar{\psi}_{a,b}(t)dt \quad a > 0, \quad (4.1)$$

em que

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4.2)$$

representa a família de wavelets a partir da *wavelet-mãe* analisadora escolhida. O parâmetro a se refere à escala; b , à localização e $\bar{\psi}_{a,b}(t)$ é o conjugado complexo de $\psi_{a,b}(t)$. Nesse tipo de transformada a e b variam continuamente, com isso essa transformada possui redundância na sua representação.

As principais propriedades da CWT são: linearidade (pois é um produto interno entre o sinal f e a wavelet ψ), covariância pela translação e dilatação, diferenciação, conservação de energia (não existe perda de informação na transformação do sinal original em seus coeficientes wavelet), localização espaço-escala, análise de regularidade local e reprodução do núcleo.

A escolha da transformada wavelet apropriada depende do tipo de informação que se deseja extrair do sinal. Para uma análise exploratória, a CWT é indicada devido a sua redundância que permite uma caracterização completa das informações do sinal. Entretanto, o custo computacional da CWT é da ordem de operações do quadrado

do número de pontos da série analisada e essa ferramenta transforma o sinal original com função analisadora wavelet ψ de dimensões n em um espaço wavelet de dimensão $n + 1$. Ou seja, um sinal $f(t) \in \mathfrak{R}$ fornece coeficientes no \mathfrak{R}^2 ou C^2 , respectivamente, se $\psi \in \mathfrak{R}$ ou C . Portanto, essa transformada não é recomendada na compressão de dados ou modelagem de séries temporais longas. Para compressão ou modelagem, transformadas ortogonais são mais indicadas. Neste trabalho é usada wavelet de Morlet na CWT, mais detalhes dessa função são apresentados a seguir.

Wavelet de Morlet

A família de wavelet de Morlet é modelada por um chirp Gaussiano, i.e., por uma onda plana modulada pela função Gaussiana expressa por (MORLET et al., 1982):

$$\psi(t) = \pi^{-\frac{1}{4}} \left(e^{i\nu t} - e^{-\frac{\nu^2}{2}} \right) e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (4.3)$$

em que ν é um valor não-dimensional e, geralmente, igual a 6, o que satisfaz a condição de admissibilidade, garantindo um equilíbrio no plano escala-tempo, e $i = \sqrt{-1}$. Essa wavelet tem suporte infinito, entretanto tem seu suporte efetivo contido no intervalo $[-4, 4]$. As Figuras 4.1 referem-se a função wavelet de Morlet da parte real e imaginária, enquanto que a Figura 4.2 ilustra a função wavelet de Morlet dilatada.

Por ser uma wavelet complexa, ela permite a análise de mudanças de amplitude e fase do sinal estudado. Normalmente estuda-se a energia do sinal transformado no plano escala-tempo, conhecido como escalograma, e também quando esses coeficientes são complexos, a sua fase. No caso tradicional quando $\nu = 6$, o escalograma não indica tão bem a localização temporal e, então, é necessário o gráfico da fase para auxiliar nessa localização caso necessário. A integração em tempo dessa representação do escalograma é o espectro global wavelet, que pode ser interpretado como uma versão suavizada do espectro de Fourier. Nesse trabalho, a energia no escalograma é representada pelo \log_2 da amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado e não é apresentada a fase.

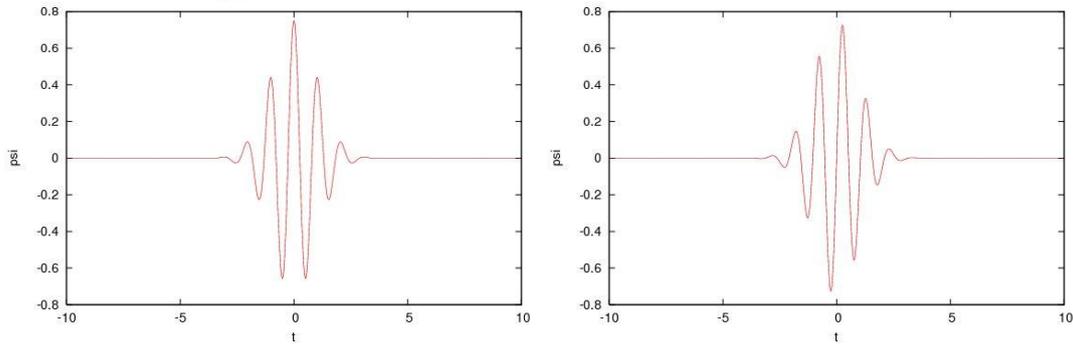


Figura 4.1 - Wavelet de Morlet - Parte real (à esquerda) e parte imaginária (à direita).

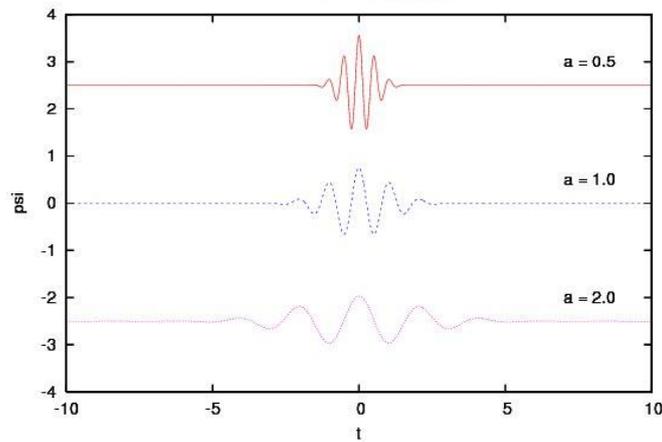


Figura 4.2 - Wavelet de Morlet Dilatada. Exemplo de contração e dilatação de uma função wavelet.

4.2 Transformada Wavelet Discreta Ortogonal

Na transformada discreta os parâmetros de escala e translação recebem valores discretos, i.e., $a = 2^j$ e $b = 2^j k$. Dessa forma a transformada discreta é expressa em termos dos coeficientes wavelets d_k^j como:

$$d_k^j = 2^j \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^j t - k) dt. \quad (4.4)$$

Os coeficientes wavelets são conhecidos como “detalhes” (detalhes de alta frequência ou erros de aproximação), pois representam a diferença do sinal em dois níveis

consecutivos de aproximação.

Essa transformada discreta ortogonal é construída a partir de uma ferramenta matemática conhecida como análise multirresolução (MR). Uma MR é formada pelo par $\{V^j, \phi^j\}$, em que V^j é um subespaço fechado de $L^2(\mathfrak{R})$, formado pelas funções ϕ_k^j , que constituem uma base de Riesz desse espaço. As funções $\phi(x)$ são obtidas da relação de escala

$$\phi(x) = 2 \sum_{k \in \mathbb{Z}} h(k) \phi(2x - k), \quad (4.5)$$

em que $h(k)$ são chamados de coeficientes do filtro-escala, mais detalhes sobre a MR pode ser obtidos em (DAUBECHIES, 1992; MALLAT, 1991; DOMINGUES, 2002). Na Tabela 4.1 esse filtro é apresentado para a família de Daubechies de ordem 1 – 4.

A grande contribuição da teoria wavelet nesse contexto é a caracterização de espaços complementares W^{j+1} entre dois espaços encaixados, V^j e V^{j+1} . As funções wavelets ψ_k^j formam uma base de Riesz para W^j , em $L^2(\mathfrak{R})$. Nesta ferramenta, a função wavelet ψ é gerada pela função escala ϕ , que obedece a relação de escala:

$$\psi(x) = \sum_k g(k) \phi(2x - k), \quad (4.6)$$

em que $g(k) = (-1)^{k+1} h(-k + 1)$ refere-se a um filtro passa-banda.

A seguir é apresentado um resumo sobre estudos de funções do $f \in L^2(\mathfrak{R})$ por meio da ferramenta análise multirresolução baseado no trabalho de Domingues 2001 (DOMINGUES, 2002).

Estudo de funções usando uma análise MR

Funções $f \in L^2(\mathfrak{R})$ podem ser aproximadas pelas suas projeções em V^j

$$\mathcal{P}^j f(x) = \sum_k \langle f, \phi_k^j \rangle \phi_k^j(x).$$

As projeções em W^j ,

$$\mathcal{Q}^j f(x) = \sum_k \langle f, \psi_k^j \rangle \psi_k^j(x),$$

contêm a diferença de informação entre os níveis j e $j+1$, que corresponde à decomposição,

$$V^j = V^{j+1} + W^{j+1}.$$

Em multinível para $j_0 > j + 1$, têm-se à decomposição

$$V^{j+1} = V^{j_0} + W^{j_0} + \dots + W^{j+1}.$$

Definindo

$$c_k^j = \langle f, \phi_k^j \rangle, \quad d_k^j = \langle f, \psi_k^j \rangle, \quad (4.7)$$

a Equação 4.7 pode ser escrita como

$$\sum_k c_k^j \phi_k^j(x) = \sum_k c_k^{j+1} \phi_k^{j+1}(x) + \sum_k d_k^{j+1} \psi_k^{j+1}(x). \quad (4.8)$$

Em multinível passa-se a ter a seguinte fórmula

$$\sum_k c_k^j \phi_k^j(x) = \sum_k c_k^{j_0} \phi_k^{j_0}(x) + \sum_{m=j_0}^{j+1} \sum_k d_k^m \psi_k^m(x), \quad (4.9)$$

que corresponde à mudança de base

$$\{\phi_k^j\} \leftrightarrow \{\phi_k^{j_0}\} \cup \{\psi_k^{j_0}\} \dots \cup \{\psi_k^{j+1}\}.$$

Para efetuar essas operações, têm-se a transformada wavelet discreta $dwt = dwt_{j_0}^j$ e sua inversa $idwt = idwt_{j_0}^{j+1}$, *i.e.*,

$$\{c^j\} \Leftrightarrow \{c^{j_0}, d^{j_0}, \dots, d^{j+1}\}$$

No processo de decomposição da transformada wavelet discreta, os coeficientes c_k^{j+1} e d_k^{j+1} são obtidos dos coeficientes c_k^j por meio de algumas manipulações das Equações 4.7 e das relações de escala de ϕ e ψ de tal forma que

$$c_k^{j+1} = \sqrt{2} \sum_m h(m - 2k) c_m^j \quad (4.10)$$

e

$$d_k^{j+1} = \sqrt{2} \sum_m g(m - 2k) c_m^j. \quad (4.11)$$

Essas fórmulas compõem o algoritmo é esquematizado pela estrutura de bancos de filtros apresentada na Figura 4.3. Nessa figura, o quadrado indica convolução com um filtro. O nome do filtro está indicado no interior do quadrado. O símbolo $2 \downarrow$ indica um *downsampling* ou decimação, i.e., são eliminados os elementos de índice ímpar. O símbolo $2 \uparrow$ indica um *upsampling*, i.e., são acrescentados componentes com valor zero entre as componentes do vetor original. Assim, dado um vetor $c^j = (c_k^j)$, obtém-se um novo vetor c^{j+1} pela aplicação de uma convolução entre c^j e o filtro h seguida de decimação. A diferença de informação entre c^j e c^{j+1} , ou seja, os detalhes de alta frequência, ficam contidos no vetor d^{j+1} obtido pela convolução entre c^{j+1} e o filtro g seguida de uma decimação. Os d_k^{j+1} correspondem aos coeficientes das expansões nas bases wavelet. Esse processo pode ser repetido outras vezes para se obter os coeficientes $d_k^{j+1}, d_k^{j+2}, d_k^{j+3}, \dots$.

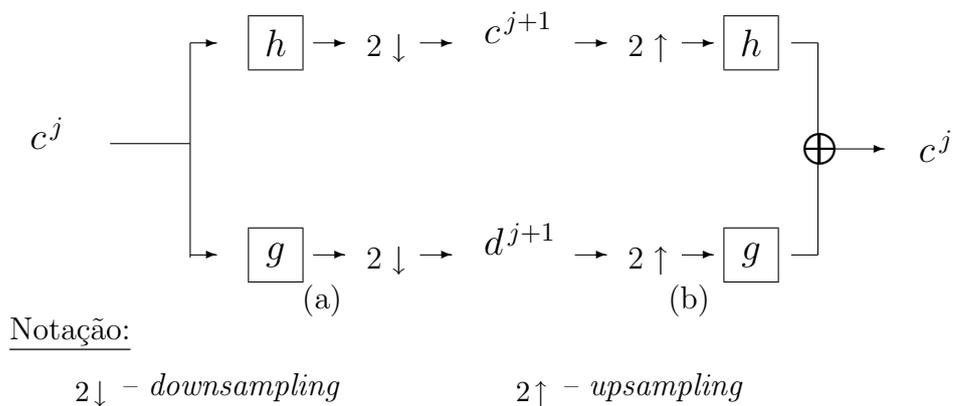


Figura 4.3 - Arquitetura piramidal para a transformada wavelet ortogonal unidimensional: (a) decomposição em um nível e (b) um nível de reconstrução.

Fonte: Adaptado de (DOMINGUES, 2002).

O processo de recuperação do sinal, a partir de sua análise MR, é semelhante ao descrito anteriormente. Neste caso, o cálculo dos coeficientes c_k^j em termos de c_k^{j+1} ,

d_k^{j+1} é dado por

$$c_{k,l}^j = \sqrt{2} \left\{ \sum_{k'} h(k - 2k') c_{k'}^{j+1} + \sum_{k'} g(k - 2k') d_{k'}^{j+1} \right\}. \quad (4.12)$$

Esse algoritmo também pode ser representado pela estrutura de bancos de filtros da Figura 4.3. Primeiro aplica-se um *upsampling* nos vetores c^{j+1} e d^{j+1} , seguido da convolução com o filtro h e g , respectivamente. A seguir, somam-se os resultados obtidos e encontra-se o vetor c^j . Esses algoritmos de decomposição e reconstrução são conhecidos atualmente como algoritmos de Mallat, referente ao trabalho desenvolvido por Mallat em 1989 (MALLAT, 1989), porém os filtros descritos nesse trabalho são os apresentados em Daubechies 1992 (DAUBECHIES, 1992). Ao final do processo de decomposição, o armazenamento dos coeficientes wavelet e da escala é feito no mesmo vetor de dados inicial e, dessa forma, não há necessidade de área física extra de armazenamento.

Wavelets ortogonais de Daubechies

Uma transformada wavelet discreta ortogonal clássica é a que utiliza as famílias wavelets ortogonais de Daubechies. Essa transformada é real e evita redundância no armazenamento dos dados transformados. Essas famílias de funções ortogonais não têm expressão analítica e não são simétricas, mas são conhecidos os seus filtros-escala $h(k)$ o que facilita a aplicação da transformada. Pode-se mostrar que, quanto maior for a suavidade da função wavelet, maior é sua ordem de aproximação local, i.e., maior a ordem de reprodução polinomial local.

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores não nulos dos filtros escalas $h(k)$ para as famílias ortogonais de Daubechies de ordem um a quatro. Observam-se que os valores não nulos dos filtros $h(k)$ e $g(k)$ aumentam à medida que a ordem aumenta e assim aumentam o suporte das funções escalas e funções wavelets de Daubechies, sua suavidade e a reprodução local de polinômios. Na Figura 4.4, são apresentados os gráficos das famílias das funções escala e das funções wavelets ortogonais de Daubechies de ordem um a quatro. Observa-se diretamente que a regularidade e o suporte das funções aumenta com a sua ordem de aproximação.

O nível de decomposição associado a escala (a) está relacionado com uma pseudo-frequência pela relação apresentada a seguir (ABRY, 1997):

Tabela 4.1 - Valores não zeros do filtro escala $h(k)$ das wavelets ortogonais de Daubechies

| k | Ordem | | | |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0.7071067811865475 | 0.4829629131445341 | 0.3326705529500825 | 0.2303778133088964 |
| 2 | 0.7071067811865475 | 0.8365163037378077 | 0.8068915093110924 | 0.7148465705529154 |
| 3 | | 0.2241438680420134 | 0.4598775021184914 | 0.6308807679398587 |
| 4 | | -0.1294095225512603 | -0.1350110200102546 | -0.0279837694168599 |
| 5 | | | -0.0854412738820267 | -0.1870348117190931 |
| 6 | | | 0.0352262918857095 | 0.0308413818355607 |
| 7 | | | | 0.0328830116668852 |
| 8 | | | | -0.0105974017850690 |

Fonte: Adaptado de (DAUBECHIES, 1992, p.195). Para a normalização desse filtro h como a utilizada na Relação Escala, dada na Equação 4.5 deste trabalho, esses valores do filtro precisam ser multiplicados pelo fator $2^{-\frac{3}{2}}$.

$$F_a = \frac{\Delta F_c}{a} \quad (4.13)$$

em que Δ é o intervalo de amostragem do sinal analisado, nos casos deste trabalho Δ é igual a um minuto, F_c é a frequência central da wavelet analisadora, e F_a é a pseudo-frequência correspondente à escala a . As frequências centrais das wavelet ortogonais de Daubechies de ordem um a quatro são respectivamente (0.9961; 0.6667; 0.8000; 0.7143) de acordo com metodologia proposta por (ABRY, 1997). A Tabela 4.2 relaciona os pseudos-períodos que são o inverso das pseudo-frequência para as funções de Daubechies de ordem um a quatro.

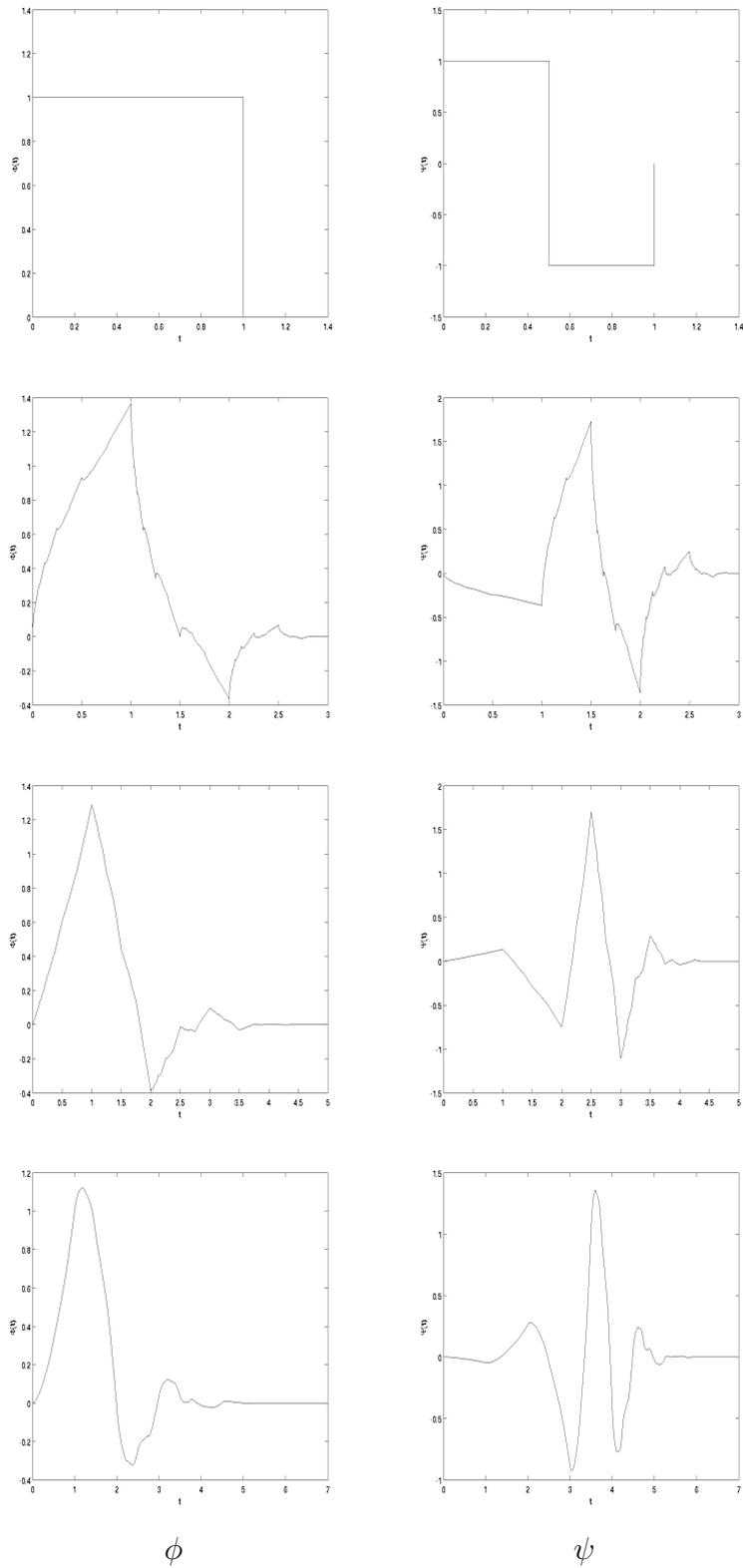


Figura 4.4 - Grafico da função escala (á esquerda) e função wavelet (á direita) em seu suporte não zero. De cima para baixo são representadas as ordens de um a quatro.

Tabela 4.2 - Pseudo-período (minutos) referente ás funções wavelets ortogonais de Daubechies.

| Nível | Ordem | | | |
|-------|-------|------|------|-------|
| j | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 2.0 | 3.0 | 2.5 | 2.79 |
| 2 | 4.0 | 6.0 | 5.0 | 5.59 |
| 3 | 8.0 | 12.0 | 10.0 | 11.19 |
| 4 | 16.0 | 24.0 | 20.0 | 22.39 |
| 5 | 32.1 | 48.0 | 40.0 | 44.79 |

Nota: $\Delta = 1$ minuto, $F_c = (0.9961; 0.6667; 0.8000; 0.7143)$, respectivamente para wavelets ortogonais de Daubechies de ordem um a quatro.

5 METODOLOGIA

Neste capítulo utiliza-se a ferramenta multiescala descrita no Capítulo 4 de forma a localizar transientes no sinal dos magnetômetros relacionados ao período de ocorrência da fase principal das tempestades geomagnéticas, permitindo a identificação de períodos que estão associados a interação do plasma solar com a magnetosfera terrestre na fase de injeção de energia.

Inicialmente faz-se uso da transformada wavelet contínua com a função wavelet de Morlet para a identificação dos distúrbios em todo o período-tempo. A seguir, é apresentada uma ferramenta utilizando a transformada wavelet discreta ortogonal para a identificação de distúrbios geomagnéticos por meio dos coeficientes wavelet. No intuito de validação, propõem-se o exame da família da wavelet Daubechies e comparação de resultados testando algumas técnicas de (*thresholdings*) (limitação ou eliminação de coeficientes) para validar o uso deste método de identificação de distúrbios geomagnéticos.

5.1 Identificação de Distúrbios Geomagnéticos

Utiliza-se a metodologia proposta por (MENDES et al., 2005) para processar as componentes geomagnéticas e identificar distúrbios geomagnéticos por meio dos coeficientes wavelet, deve-se seguir os seguintes passos:

- a) Calcula-se a transformada wavelet discreta ortogonal dos sinais geomagnéticos utilizando as famílias das wavelet de Daubechie de ordem 1 – 4, i.e., com reprodução local de constantes a polinômios de ordem cúbica.
- b) Estuda-se o comportamento (amplitude) dos coeficientes wavelets em vários níveis de decomposição.
- c) Analisa-se a linha de base e o destaque dos coeficiente wavelet de forma a detectar os distúrbios magnéticos de interesse. Considera-se um *threshold* para isso. Quando os três primeiros níveis identificaram localmente coeficientes wavelets com uma amplitude mais acentuada essa região como uma perturbação magnética associadas a PC5.

Esse procedimento justifica-se pela reprodução local de polinômios, de modo que, onde o sinal é suave ele é representado localmente por coeficientes wavelet de menor

amplitude, que muitas vezes podem ser desprezados, de forma que, os coeficientes de maior amplitude encontram-se em regiões menos regulares do sinal.

O desenvolvimento dessa metodologia exige uma atenção aos detalhes do processo físico e computacional como um todo: desde o acesso aos dados, o tratamento, o processamento e vários outros requisitos são necessários para atender a qualidade satisfatória e a eficiência na análise dos dados. Um exemplo desse estudo para distúrbios moderados encontra-se na Figura 5.1. Nessa figura de cima para baixo encontram-se as seguintes séries temporais: o índice Dst para comparação do período da fase principal da tempestade, a componente H do campo geomagnético e os coeficientes wavelets em 3 níveis de decomposição. Os coeficientes estão relacionados à variabilidade de energia do sinal, ou seja, aos transientes relacionados à ocorrência das tempestades geomagnéticas, referente à fase principal.

Esse período analisado também serviu para exemplificar a importância do método de análises por wavelet. Nesse período, ocorreram lacunas nos dias 4, 7 e 20 por alguns minutos. A forma de análise por wavelet, diferente de outro método mais clássico (Fourier), permite evoluir o cálculo por todo o intervalo dos dados, sem ser afetado por lacunas presentes em pontos distantes do intervalo de análise, onde o cálculo wavelet está sendo feito.

Outros trabalhos aplicando essa técnica também foram realizados, por exemplo (SIMOES et al., 2009; KLAUSNER et al., 2009; COSTA et al., 2007; COSTA et al., 2011). Nesses trabalhos estuda-se diretamente o efeito de distúrbios específicos nas amplitudes dos coeficientes wavelet utilizando a família de Daubechies de ordem 2. Neste trabalho estuda-se períodos de variação geomagnética sem uma pré-seleção de distúrbios e faz-se a análise de algumas famílias de Daubechies. Com isso busca-se validar essa metodologia. O *threshold* manual encontrado, *i.e.*, o limiar acima da linha base que identifica os distúrbios, é uma etapa importante nessas análises, pois auxilia a identificar os distúrbios de uma forma mais automática para futuros estudos nessas estações .

5.1.1 Outros Métodos de Thresholding

A transformada wavelet ortogonal permite a identificação de estruturas localizadas em tempo-frequência. Isso faz com que seja possível obter representações compactas das funções analisadas. Essa é a grande chave do sucesso desta técnica para a com-

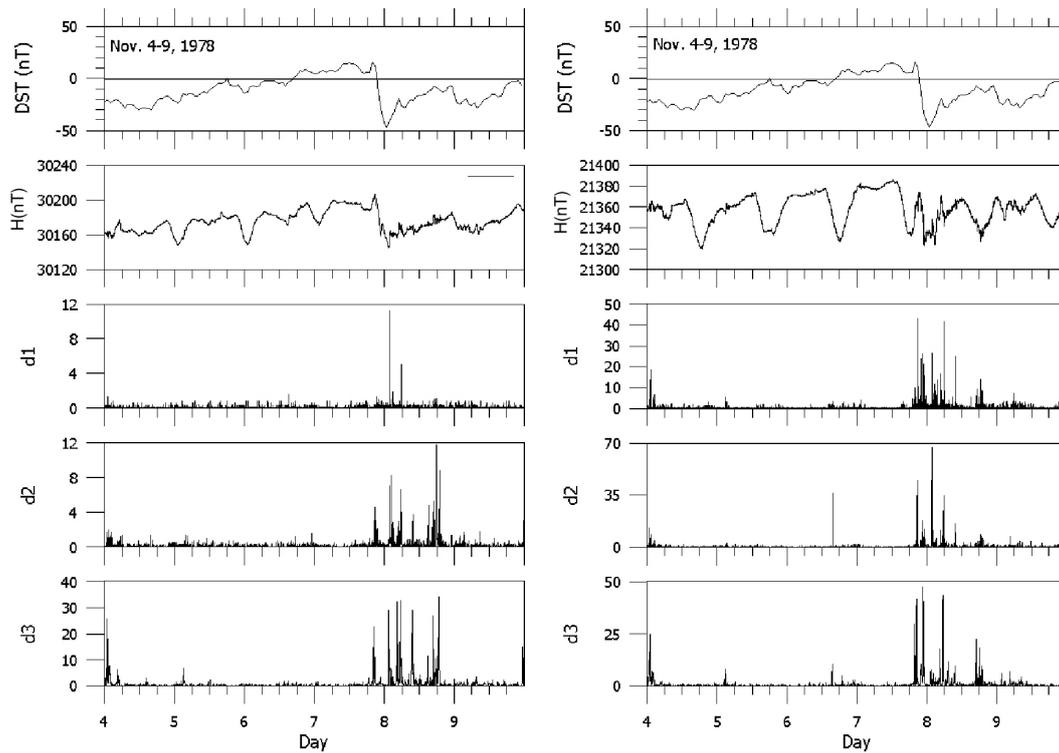


Figura 5.1 - Identificação de distúrbios geomagnéticos por meio das amplitudes dos coeficientes wavelets. Dados geomagnéticos para a Estação Kakioka (à direita) e a Estação de Boulder (à esquerda), em novembro de 1978. De cima para baixo, o índice Dst indica as tempestades para comparação, a componente horizontal do campo geomagnético e os coeficientes wavelets em 3 níveis de decomposição, em que os coeficientes de maior amplitude relacionam-se à fase principal das tempestades geomagnéticas.

pressão de dados. Na compressão de informação ou na remoção de certos tipos de ruídos é muito importante a escolha de um limiar em que os coeficientes wavelets possam ser eliminados e depois os dados possam ser reconstruídos pela transformada inversa sem a perda das características fundamentais dos dados. Nesse contexto esse limiar de corte (do inglês, *thresholding*) pode ser escolhido de diversas formas não havendo uma forma única ou padrão para isso. A seguir são apresentadas algumas formas possíveis para essas escolhas de *thresholding*.

Quando informações discretas são obtidas por meio de medições ou manipuladas por aplicativos computacionais e então armazenadas digitalmente, em alguma etapa deste processo as informações podem ser alteradas por diversas formas de interferência, denominadas de ruídos. Neste trabalho considera-se eliminar às coeficientes wavelets menos significativos, destacando assim os coeficientes associados aos distúr-

bios de interesse. As técnicas de *thresholding* dos coeficientes wavelet tem como objetivo a redução, ou mesmo eliminação, das regiões de reprodução local de polinômios presente em um sinal. Estas técnicas estão baseadas na manipulação dos coeficientes wavelet, que podem ter seus valores diminuídos ou anulados nos vários níveis da transformada, apenas quando os sinais são regulares nessas regiões. Após esse processo, é aplicada a transformada inversa nos coeficientes wavelets, i.e., o sinal reconstruído será uma aproximação do sinal original. A Figura 5.2 representa os *thresholding* usados na aplicação desta dissertação.

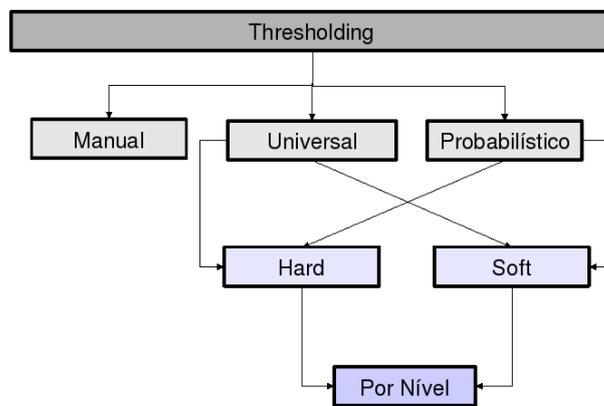


Figura 5.2 - Esquema de diferentes formas de aplicação do thresholding.

5.2 Determinação do Thresholding

O *thresholding* λ depende de um parâmetro de dispersão σ , estimado por duas abordagens: a primeira, global, assume que existe um único parâmetro σ para todos os coeficientes wavelet nos diferentes níveis da transformação; a segunda abordagem, por nível, considera que existe um parâmetro σ_j para cada nível de resolução j , implicando em um *thresholding* de corte λ_j diferente a cada escala j . Esses métodos são comumente usados na literatura de wavelets, em especial o *hard-thresholding* e *soft-thresholding*.

O método *hard-thresholding* é o método mais simples. Neste método, os coeficientes menores que o valor crítico são simplesmente anulados, i.e., substituídos por zero. Assim, os coeficientes wavelet d_k^j de detalhe provenientes da transformada do sinal,

são simplificados da seguinte forma:

$$\widehat{d}_k^j = \begin{cases} \widehat{d}_k^j & \text{se } |\widehat{d}_k^j| > \lambda \\ 0 & \text{se } |\widehat{d}_k^j| \leq \lambda, \end{cases} \quad (5.1)$$

sendo \widehat{d}_k^j o coeficiente wavelet e o λ *threshold*. O *threshold* λ é sempre positivo.

O *hard-thresholding* é um método simples, contudo ele pode se tornar inconsistente, pois as descontinuidades geradas ao longo da série podem gerar um aumento da variância, para contornar essa situação, o método de *soft-thresholding* propõe uma redução dos coeficientes da transformada, porém não a zero, a fim de que, assim, possa inibir o surgimento de alguma descontinuidade ao longo da série, os coeficientes reduzidos são estimados a partir da equação:

$$\widehat{d}_k^j = \begin{cases} \text{sgn}(\widehat{d}_k^j)(|\widehat{d}_k^j| - \lambda) & \text{se } |\widehat{d}_k^j| > \lambda \\ 0 & \text{se } |\widehat{d}_k^j| \leq \lambda \end{cases} \quad (5.2)$$

Apresentam-se a seguir as principais formulações para determinação do *thresholding* de corte λ .

Thresholding Universal

Para os métodos de *thresholding* universal considera-se a variância do ruído e a dimensão do sinal, conforme a equação a seguir:

$$\lambda = \sigma \sqrt{2 \log_{10}(N)}, \quad (5.3)$$

sendo que neste trabalho utiliza-se o desvio padrão amostral dos coeficientes como estimativa de σ , que é o desvio padrão associado ao ruído da série temporal, e N o tamanho do sinal a ser analisado. Uma estimativa para σ pode ser obtido a partir de uma série temporal perturbada da série original. Mais detalhes sobre essa estimativa podem ser encontradas em (DONOHO; JOHNSTONE, 1995).

Para aplicações deste trabalho, o nível do *threshold* é determinado de forma empírica, utilizando-se um percentual do maior coeficiente wavelet ao quadrado, que controla progressivamente a quantidade dos coeficientes considerados significativos.

O *threshold*, independentemente do nível, é calculado por meio da observação dos

coeficientes no maior nível de resolução da transformada wavelet e é, geralmente usado para remover o ruído.

Thresholding Probabilístico

Considera-se a série temporal f adicionada de ruído Gaussiano ϵ , cujas as componentes são variáveis aleatórias independentes e com distribuição normal de média zero e variância σ^2 , para compor um novo série de estudo.

Na prática, a única informação conhecida é essa nova série de estudo então é, a partir de dela, obtem-se uma estimativa para a série temporal f , de tal modo, que se tenha um risco mínimo. Esse risco é definido como o valor esperado de uma determinada função de perda. Neste trabalho, assim como em (DONOHO; JOHNSTONE, 1994), o erro quadrático médio (EQM) é considerado como função perda. Portanto, procura-se uma estimativa $\mathbf{f}' = (f'_k, f'_{k+1}, \dots, f'_N)$ de forma que \mathbf{f} decresça.

$$EQM = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N (f'_i - f_i)^2. \quad (5.4)$$

A estimativa f' é obtida por meio do *threshold* dos coeficientes wavelet da série de f . Além desse método, outros métodos para determinação de *thresholding* foram propostos por (DONOHO; JOHNSTONE, 1994), baseados na significância dos coeficientes wavelets.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados dos experimentos descritos no capítulo anterior. As análises são realizadas para eventos típicos escolhidos com os gráficos pertinentes de forma a caracterizar os resultados e conclusões inferidas; contudo todos os resultados e gráficos constam dos apêndices (Apêndices C, D e E).

6.1 Procedimento de análise e interpretação

Procedeu-se a análise do índice Dst para os períodos selecionados identificando as ocorrências de tempestades geomagnéticas, que relacionam-se aos momentos de perturbação da magnetosfera com injeção de energia em seu interior (Apêndice C). O critério de identificação utilizado foi o de indicar tempestades com ocorrências não ambíguas, com as três fases da tempestade bem percebidas. Surgem dificuldades de identificação quando a perturbação indicada pelo Dst é fraca ou a fase de recuperação mostra comportamento complexo. Dessa forma muitas vezes não é óbvio a identificação de períodos de injeção de energia do distúrbio, procedimento que pode ser aprimorado com uso de uma metodologia mais objetiva de análise, fundamentada na ocorrência de distúrbios geomagnéticos característicos dos efeitos da injeção.

Fez-se a decomposição pela transformada wavelet discreta ortogonal para os magnetogramas das estações de Kakioka e Vassouras nos meses de março, junho, setembro e dezembro dos anos de 2000 e 2005 com a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias. Nas Figuras D.1-D.17 do Apêndice D de cima para baixo nos gráficos, apresentam-se o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação em torno da média da componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição. As wavelets consideradas são respectivamente na sequência a wavelet de Daubechies de ordem 1, de ordem 2, de ordem 3 e de ordem 4.

A sequência de resultados consiste dos gráficos da análise wavelet de Daubechies, da ordem 1 até 4. Em que se assinala apenas o início dos períodos de distúrbios geomagnéticos identificados na Daubechies de ordem 1, embora o procedimento de análise seja o mesmo para as demais. As Tabelas D.1-D.17 do Apêndice D tabulam essa identificação, permitindo comparar imediatamente os resultados de identificação pela inspeção visual do índice Dst e pelos coeficientes wavelets.

Os dados dessa análise foram tabulados para a estação de Kakioka. O período de

março de 1989, contendo o caso de uma tempestade intensa, só pode ser analisado para dados da estação de Kakioka; pois, por problemas técnicos, a estação de Vassouras não dispunha desses dados. Existem também lacunas nos dados da estação de Vassouras em março, junho e setembro de 2000, o que atrapalha a análise. Nos outros intervalos, os dados estão tabulados para as duas estações.

Para interpretação, os intervalos dos coeficientes se destacando de um sinal de fundo, que para efeitos práticos pode ser considerado ruído, permitem identificar as ocorrências de distúrbios magnéticos de características tipo PC5 ou de ordem superior e, desta forma, identificar os instantes ativos de interação do plasma solar incidente com a magnetosfera, i.e., de injeção de energia em seu interior. Não é do escopo deste trabalho fazer interpretação física dos mecanismos físicos envolvidos.

Para exemplo de análise e identificação, apresenta-se o período de março de 2000. Nas Figuras D.1 (a) foram destacados a ocorrência dos distúrbios com uma marcação vertical, para a wavelet Daubechies de ordem 1, os intervalos com os coeficientes wavelets ressaltados usando todos os três níveis, i.e., coeficientes relacionados a distúrbios geomagnéticos. De forma a facilitar a interpretação, a classificação da tempestade pertinente está feita com a respectiva letra. Nota-se que os períodos foram adequadamente identificados pela Daubechies 2, sendo a Daubechies 2 mais sensível a distúrbios mais fracos. Verifica-se que a Daubechies 2 é útil para identificar períodos relacionados a tempestades moderadas ou mais intensas e a Daubechies 1 é auxiliar para caracterizar tempestades fracas ou situações ambíguas que não se classificariam usualmente como tempestade, mas apresentando alguma interação do plasma solar e magnetosfera. Os resultados para wavelets superiores a ordem 2 não acrescentaram mais informações, podendo ser desconsideradas.

Da análise de todos os períodos analisados, nota-se que a wavelet Daubechies de ordem 2, comparada as demais ordens, em geral, destaca melhor os períodos com ocorrência dos distúrbios geomagnéticos relativos a tempestades moderadas ou mais intensas. As ocorrências relacionadas as tempestades fracas podem não ser bem percebidas por resultarem em coeficientes pequenos. No entanto, a wavelet de ordem 1, tende a destacar ocorrências relacionadas a tempestades fracas; mas ser igual ou “saturar-se” nas tempestades de intensidade maiores. Como o tratamento é feito sobre magnetogramas, sem recorrer ao índice Dst, o procedimento serve efetivamente de auxiliar na identificação de períodos de interação do plasma solar com a magnetosfera. Os resultados para ambas as estações, de Kakioka e Vassouras, são

equivalentes.

6.2 Identificação do padrão de tempestades geomagnéticas

Foram encontrados para todo o período disponível de dados por inspeção do índice Dst, 36 eventos de tempestades geomagnéticas. Essas tempestades foram identificadas, de acordo com o critério apresentado na Tabela 2.1, como: 18 fracas, 12 moderadas, 3 intensas, 2 intensas tipo I e 1 intensa tipo II ou superintensa. Esse evento superintenso foi avaliado por ser um caso extremo que ocorreu no ano de 1989, completando a abrangência das tempestades analisadas. O intervalo de dados analisado refere-se aos 22 primeiros dias. A Tabela 6.1 mostra a quantificação dos eventos segundo sua intensidade.

Tabela 6.1 - Tabulação das Tempestades geomagnéticas - Geral

| Intensidade (nT) | Número de Tempestades | | |
|------------------|-----------------------|-------|---------|
| | 1-22 | 23-31 | Eventos |
| Fraca | 13 | 5 | 18 |
| Moderada | 9 | 3 | 12 |
| Intensa | 2 | 1 | 3 |
| Muito Intensa I | 1 | 1 | 2 |
| Muito Intensa II | 1 | 0 | 1 |
| Total | 26 | 10 | 36 |

6.3 Avaliação das características multiescala dos distúrbios

Para uma visão global do comportamento dos distúrbios geomagnéticos dos magnetogramas da estação de Kakioka (Japão), apresentam-se nas Figuras 6.1 e 6.2 as séries temporais e o escalograma proveniente da transformada wavelet contínua utilizando a função wavelet de Morlet, expressa na Equação 4.1. Esses escalogramas identificam os distúrbios geomagnéticos por meio da energia das séries, representada pelo valor absoluto do quadrado dos seus coeficientes wavelets.

Nessas figuras, são apresentadas duas situações distintas: uma com um distúrbio acentuado (período de março de 1989, tempestade superintensa, Figura 6.1) e outra quase sem distúrbios (período março de 2000, considerado um período calmo, Figura 6.2). Observa-se na Figura 6.1, que entre os dias 12 e 14 de março de 1989,

há máximos de energia no escalograma em períodos aproximados da PC5 (centrados de 2,5-10 minutos) coincidentes com o período de tempestade. Verifica-se ainda, uma flutuação em períodos mais longos associada as componentes magnéticas da flutuação diurna, que possuem uma variabilidade temporal nítida de energia nessa situação perturbada. Por outro lado, Figura 6.2, em março de 2000, há variações diurnas com menos variabilidade temporal no escalograma e não há energia significativa associada às componentes PC5, o que é esperado no período calmo.

Cabe também observar nesses escalogramas das Figura 6.1 e Figura 6.2 que a energia do sinal associada às componentes harmônicas solares são ordens de grandeza superiores a dos distúrbios associados a PC5. Esse fato é um dos grandes problemas no caso do cálculo do índice Dst. Esse calculo necessita da existência de períodos calmos, isto é, sem distúrbios geomagnéticos significativos, para obtenção de um comportamento geomagnético padrão.

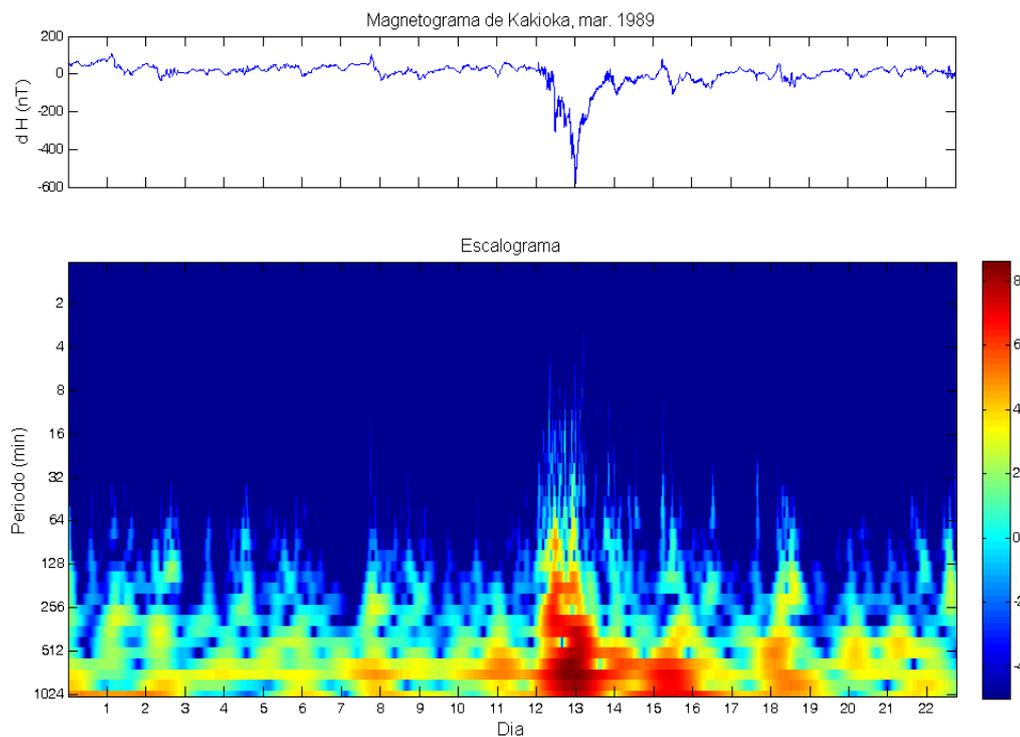


Figura 6.1 - Escalograma calculado a partir da Transformada wavelet contínua para os dados de ΔH de março de 1989. Para facilitar as comparações, os valores de energia estão representado em \log_2 .

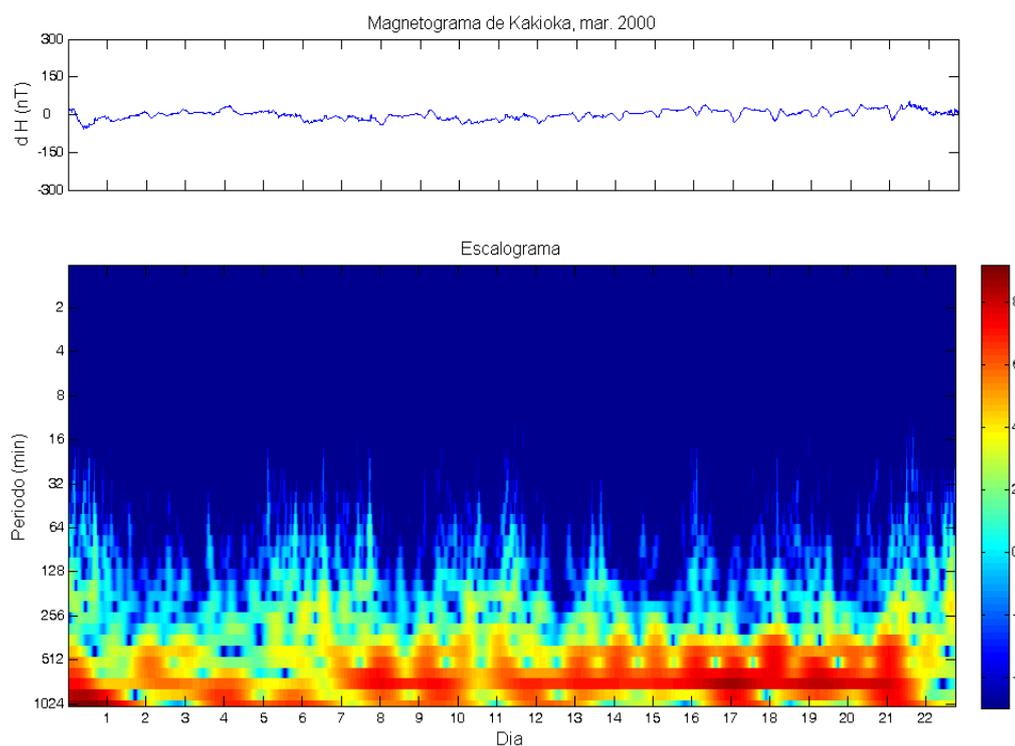


Figura 6.2 - Escalograma calculado a partir da Transformada wavelet contínua para os dados de ΔH de março de 2000. Os valores de escala e de energia estão representado em \log_2 .

Essa técnica wavelet possibilita uma melhor análise das informações contidas nessas séries geomagnéticas, auxiliando a localização temporal dos distúrbios tipo PC1-PC5 de interesse comparativamente a ferramentas como espectro de Fourier. Entretanto, esse escalograma apresenta um sobreposição de informação em escala/tempo, o que dificulta o desacoplamento das escalas nos eventos.

Além disso, para uma série temporal de N pontos, o custo computacional dessa transformada contínua é da ordem de N^2 operações. Este custo é superior ao da transformada wavelet discreta ortogonal que é da ordem de M vezes N operações, em que M é a ordem de aproximação desejada da wavelet. A transformada discreta ortogonal da família de Daubechies também tem outras vantagens para essa identificação, como por exemplo, a identificação da regularidade local do sinal por meio dos seus coeficientes wavelets em uma determinada escala pré-definida. Essa escala está associada a função wavelet escolhida e possui uma pseudo-frequência central que neste caso, auxilia na identificação da PC5. Esses são os ingredientes principais

que são analisados a seguir.

6.4 Avaliação da regularidade local

Quando a magnetosfera está em um período calmo, a componente horizontal do campo magnético é representada por uma função suave e assim, após a transformada wavelet os coeficientes wavelet possuem pequenas amplitudes. Também pode-se observar que, quando os coeficientes wavelet estão associados com distúrbios geomagnéticos a amplitude dos coeficientes wavelets são maiores. Nas análises a seguir apresenta-se um conjunto de famílias de wavelet de diferentes ordens de aproximação local para avaliar e localizar esses distúrbios intercalados com períodos calmos.

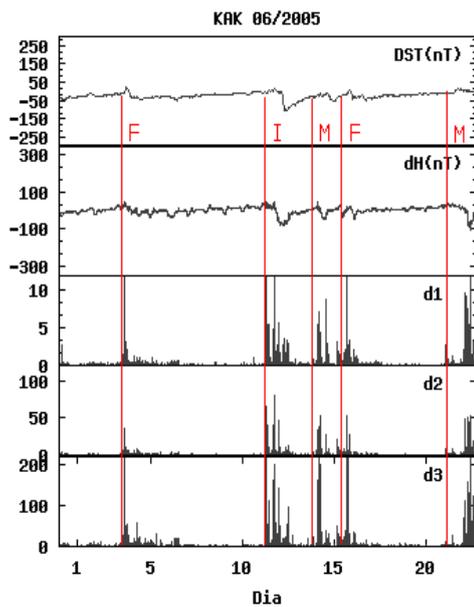
Para um analista observando a série do Dst muitas vezes pode passar despercebida a identificação de compressões nos dados e na análise das séries geomagnéticas as características dos distúrbios podem não ser facilmente identificados. A identificação dos coeficientes wavelets é feita baseada na série geomagnética da estação, *i.e.*, no magnetograma; e não na série temporal do Dst. As assinaturas dos coeficientes wavelets não indicam a intensidade dos distúrbios diretamente e sim uma assinatura onde há detecção deles. Essa assinatura pode ser bem localizada ou existir em um certo intervalo de tempo. Esses distúrbios associados a tempestades são identificados de acordo com a Tabela 2.1. É possível identificar também por essas assinaturas compressões, que também ocorrem nos 3 níveis de decomposição das transformada wavelet e possuem uma assinatura mais localizada que os distúrbios associados às tempestades em si. Tanto as compressões quanto os distúrbios, com respeito às causas físicas, estão relacionados as variações na corrente elétrica existem na magnetosfera.

Nas Figuras 6.3 (KAK) e 6.4 (VSS) são apresentados exemplos do comportamento dos coeficientes wavelets identificando várias intensidades de distúrbios geomagnéticos, no período de junho 2005. Nessas figuras, de cima para baixo, estão representadas as séries temporais do índice Dst, da variação do campo geomagnético (variação da componente H) e dos três primeiros níveis de decomposição dos coeficientes wavelet, obtidos pelas transformadas wavelet discreta ortogonal da família de Daubechies de ordem 1 a 4. Para os níveis $j = 1, 2, 3$ o quadrado dos coeficientes wavelet estão indicados como $d1$, $d2$ e $d3$.

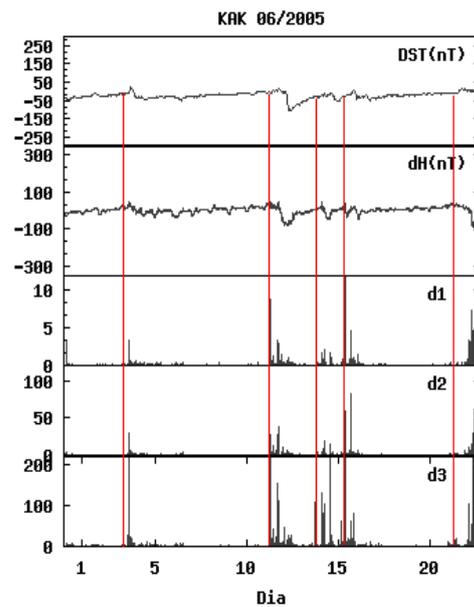
Esses níveis estão associados aos pseudo-períodos de acordo com a Tabela 4.2 que estão relacionados aos períodos de ocorrência da PC5 apresentados no esquema da

Figura 2.1. São apresentados os resultados para as análises das funções wavelets de ordem 1-4. Todos os distúrbios ocorridos foram identificados pelas assinaturas dos coeficientes wavelet associados às 4 famílias de Daubechies. Em torno do dia 4 ocorre uma compressão magnética que pode ocorrer em distúrbios associados a tempestades e há também interesse em sua identificação, pois diz respeito a alteração da magnetosfera e correntes em seu interior. Verifica-se que em todas essas famílias e nesses 3 níveis de decomposição, em torno dos dias 5, 12 a 16 e 21 são identificados distúrbios associados a tempestades de intensidade fraca, moderada e intensa.

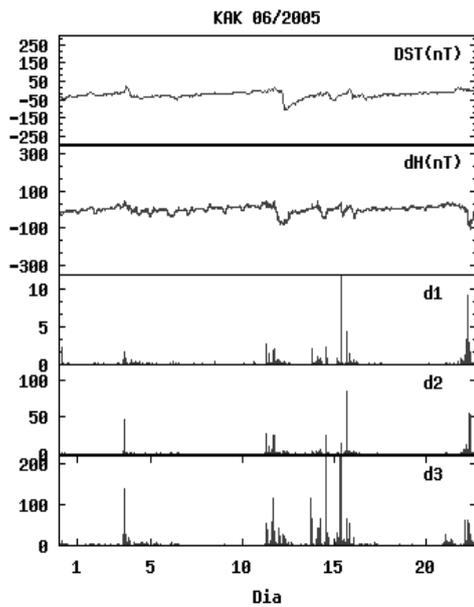
Conforme o esperado, devido à reprodução local de polinômios de ordem zero (constantes), observa-se nas Figuras 6.3 (KAK) e 6.4 (VSS) que os coeficientes wavelet associados a família de Daubechies de ordem 1 são mais sensíveis aos distúrbios geomagnéticos fracos que as demais famílias. Como o magnetograma da estação de Vassouras apresenta maior variabilidade de flutuações do campo geomagnético comparado a estação de Kakioka, os coeficientes wavelet dessa família, sensíveis a essa situação, apresentam maiores amplitudes em intervalos temporais mais amplos do que os detectados para Kakioka. A família de Daubechies de ordem 2 identifica bem todos os distúrbios com um bom compromisso entre todos os tipos de distúrbios. Desse exemplo e dos demais estudados neste trabalho, apresentados no Apêndice D, verifica-se que os coeficientes wavelets dessas famílias de ordem 3 e 4 identificam mais localmente os distúrbios, porém de forma equivalente ou às vezes com menos distinção destes, i.e., nem sempre a amplitude dos coeficientes wavelet é expressivamente destacada. O custo computacional dessa transformada aumenta ligeiramente à medida que a ordem de aproximação aumenta (é da ordem de MN , em que N é o número de dados e M é a ordem da função wavelet analisadora), entretanto isso não é significativo nesse estudo unidimensional. Assim, a família de Daubechies de ordem 2 é um bom compromisso entre a identificação dos distúrbios em que se tem mais interesse, que são os de maior intensidade e o custo computacional dessa metodologia.



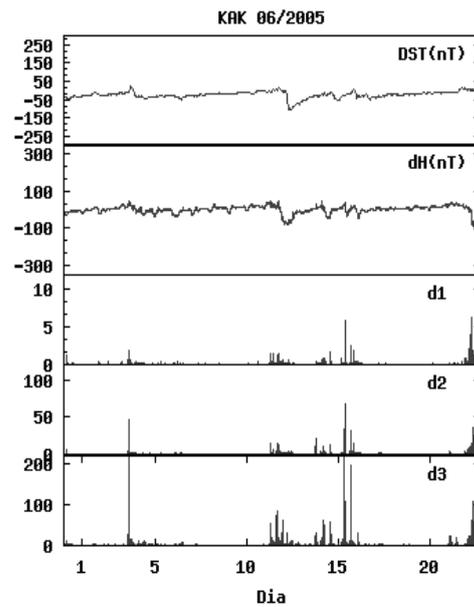
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

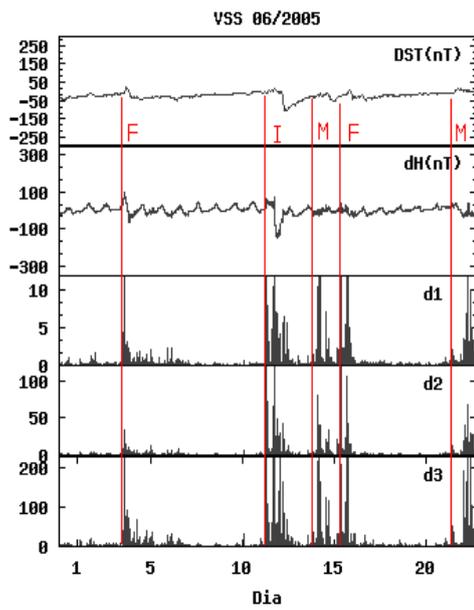


(a) Daubechies de ordem 3

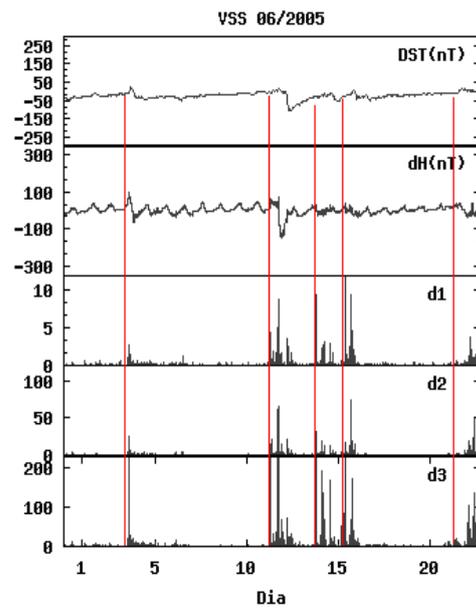


(b) Daubechies de ordem 4

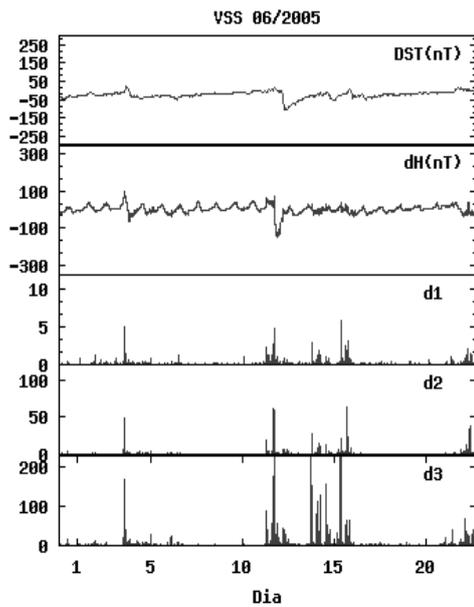
Figura 6.3 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês junho de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



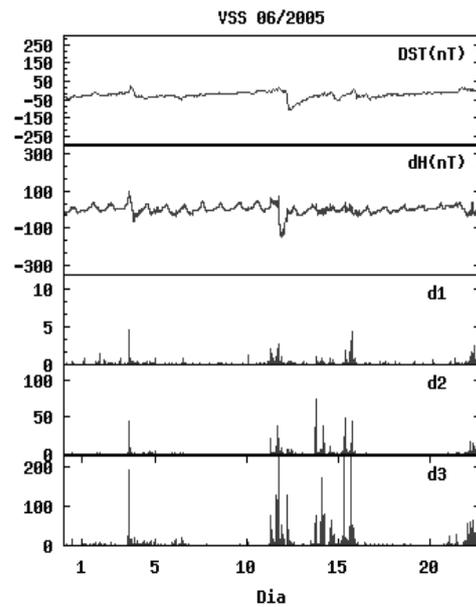
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(a) Daubechies de ordem 3



(b) Daubechies de ordem 4

Figura 6.4 - Magnetograma da estação de Vassouras e seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês junho de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a componente horizontal do campo geomagnético e os coeficientes wavelets ao quadrado nos 3 primeiros níveis de decomposição.

Na Tabela 6.3, referente a estação de Kakioka, está compilado as identificações dos distúrbios pelas assinaturas dos coeficientes wavelet, para as funções wavelets de ordem 1-4, para a estação de Kakioka nos períodos de 2000 e 2005, utilizando o thresholding manual. Nesta tabela, a primeira coluna traz as categorias atualmente usadas para a classificação quanto a intensidade das tempestades geomagnéticas, a segunda coluna tabula as ocorrências por categoria baseadas na inspeção visual do índice geomagnético pós-processado Dst e as demais colunas, pela ordem da wavelet utilizada, a tabulação obtida em decorrência da propriedade e sensibilidade da wavelet ao tipo de fenômeno. Foram identificados 24 distúrbios fracos de ordem 1, 17 de ordem 2, 16 de ordem 3, 16 de ordem 4.; 14 distúrbios moderados de ordem 1, 14 de ordem 2, 13 de ordem 3 e 13 de ordem 4; de ordem 1 a 4 foram encontrados os mesmos distúrbios, sendo 2 intensos, 1 muito intenso tipo I e um muito intenso tipo 2. Nota-se que a wavelet de ordem 2 é bem adequada para a identificação de tempestades mais significativas do ponto de vista de efeitos geofísicos ($Dst \leq -50$ nT); enquanto a de ordem 1 consegue resolver bem para as tempestades fracas, principalmente as ambíguas quanto a serem classificadas como tempestades na inspeção somente visual. Não se apresentou uma tabela sumário para a análise dos dados de Vassouras por essa estação apresentar muitas falhas nos dados, o que atrapalha a tabulação da ocorrência dos distúrbios. No entanto, apresenta-se no Apêndice D os gráficos e a tabulação respectiva por períodos.

Tabela 6.2 - Thresholding manual para os coeficientes wavelets ao quadrado

| Wavelet | Estação Kakioka | | | Estação Vassouras | | |
|---------|-----------------|---------|---------|-------------------|---------|---------|
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 7.2 | 18 | 87.6 | 14.6 | 49 | 143.6 |
| Ordem 2 | 2.5 | 9.1 | 40.1 | 7.9 | 23.8 | 148.6 |
| Ordem 3 | 3.3 | 9.2 | 47.1 | 7.0 | 13.5 | 120.1 |
| Ordem 4 | 3.4 | 12.7 | 32.1 | 7.1 | 14.9 | 47.0 |

Há variações nas amplitudes dos quadrados dos coeficientes wavelets e sua assinatura acima da linha de base na identificação dos distúrbios de acordo com a família da wavelet, o período do ano estudado e o máximo e mínimo do ciclo solar. Esses coeficientes ao quadrado têm valor mínimo acima da linha de base apresentado na Tabela 6.2 para as estações de Kakioka e Vassouras. Podendo esses valores ser considerados como candidatos naturais a *thresholds* manuais escolhidos para fu-

turas análises automáticas dessas estações. Observa-se que esses valores são sempre maiores na estação de Vassouras do que em Kakioka.

Acima desses valores de *threshold* não ocorreu a identificação simultânea nesses três níveis de nenhum outro tipo de perturbação que não fossem os distúrbios em questão. Os valores dos *thresholding* separados por ano/mês das estações de Kakioka e Vassouras encontram-se nas Tabelas D.19 e D.20. Esses testes permitiram concluir que a metodologia básica implementada é a adequada para a identificação dos distúrbios, tanto em termos de processos físicos quanto em termos de eficiência de tratamento e custo computacional.

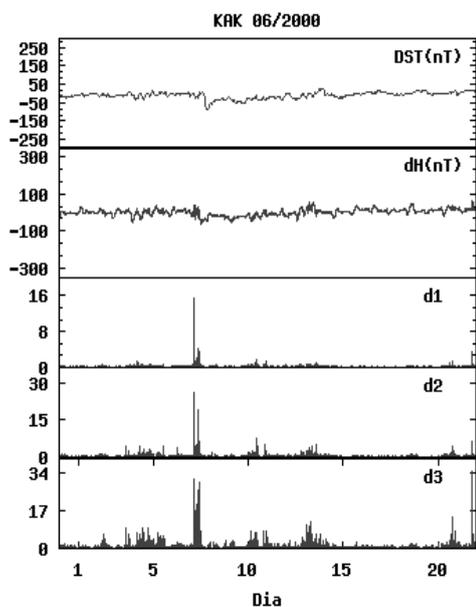
Os demais *thresholds* analisados avaliam a redução do ruído das séries geomagnética e não foram de grande auxílio a identificação dos distúrbios geomagnéticos em geral, como pode ser observado a seguir. Nas Figuras 6.5 e 6.6 apresentam-se gráficos similares aos das Figuras 6.3 e 6.4, calculados adicionalmente pela metodologia de obtenção dos *thresholds* probabilístico e universal. Os gráficos referem-se a análise dos dados da estação de Kakioka em junho e setembro de 2000, na parte superior, e da estação de Kakioka para o mesmo período, na parte inferior, para cada um das técnicas de *threshold*. Nenhuma informação adicional foi identificada nesses casos, nem nos casos por nível. Todos os *thresholds* probabilísticos ficaram menores que 1×10^{-5} , *i.e.*, praticamente zero. Isso indica um ruído de fundo baixo nas séries analisadas.

Os *thresholds* universais variaram de 0.4 – 2.8 em KAK e de 0.0 – 2.2 em VSS. No período da tempestade de março de 1989, o *threshold* universal chegou a 4 em KAK. Em todos os casos de variação do *threshold* universal por nível, os maiores valores de *threshold* ocorreram no terceiro nível de decomposição.

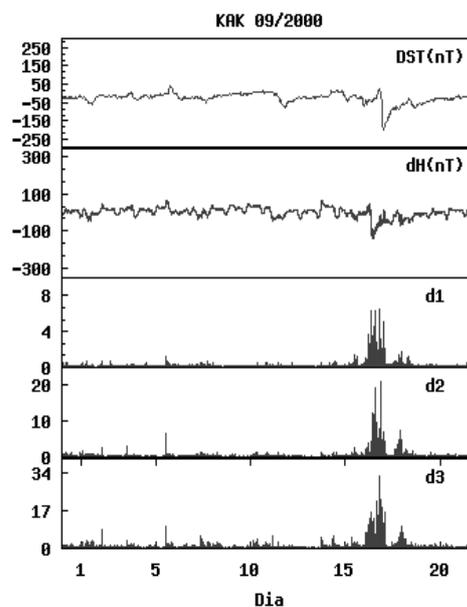
Dessa forma, por meio da metodologia praticada, pode-se obter a identificação das tempestades geomagnéticas a partir do uso apenas do magnetograma de alguma estação magnética selecionada, que no caso deste trabalho foram as estações Kakioka e Vassouras. Conforme descrito anteriormente, os períodos de atividade relacionados a fase inicial e a fase principal das tempestades geomagnéticas são identificados pelas assinaturas características dos coeficientes wavelets.

Tabela 6.3 - Identificação das Tempestades geomagnéticas - Kakioka

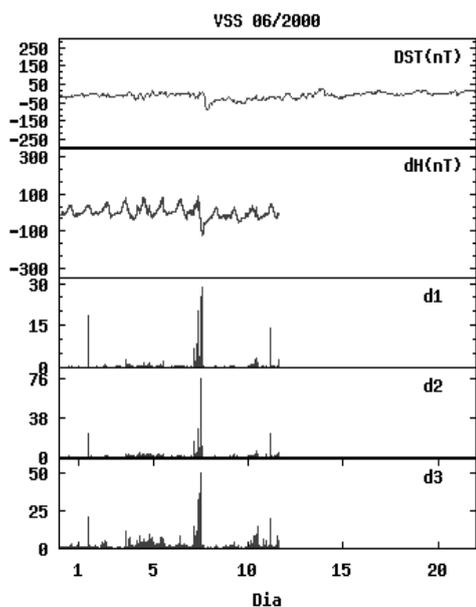
| Intensidade da tempestade | Tempestades | | | | |
|---------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 13 | 24 | 17 | 16 | 16 |
| Moderada | 9 | 14 | 14 | 13 | 13 |
| Intensa | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Muito Intensa I | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa II | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Total | 26 | 42 | 35 | 33 | 33 |



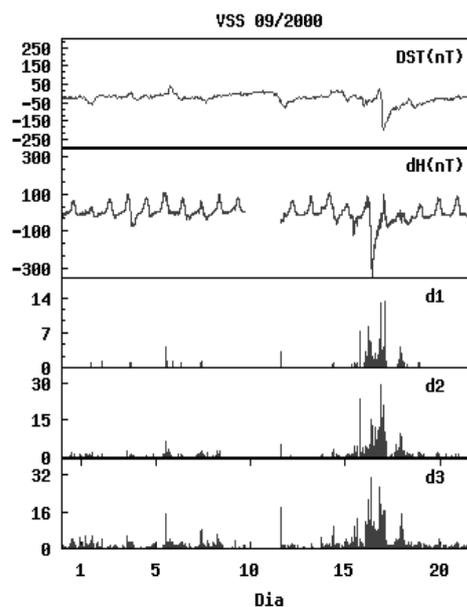
(a) Kakioka, junho



(b) Kakioka, setembro

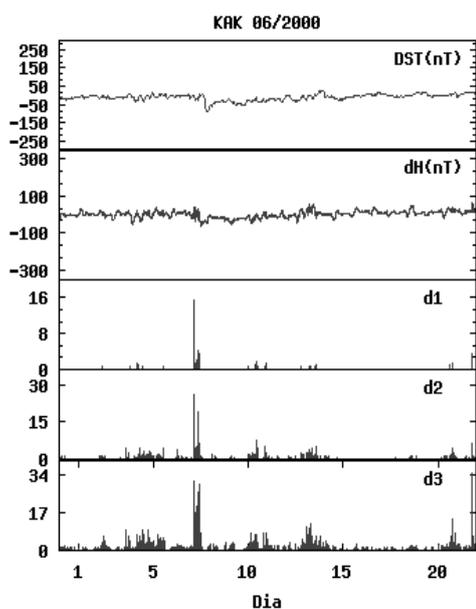


(c) Vassouras, junho

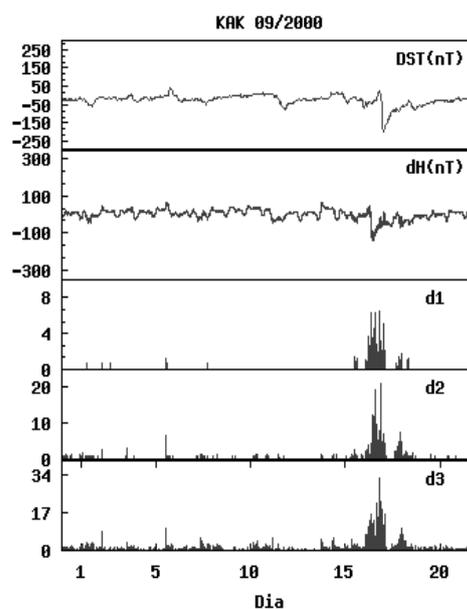


(d) Vassouras, setembro

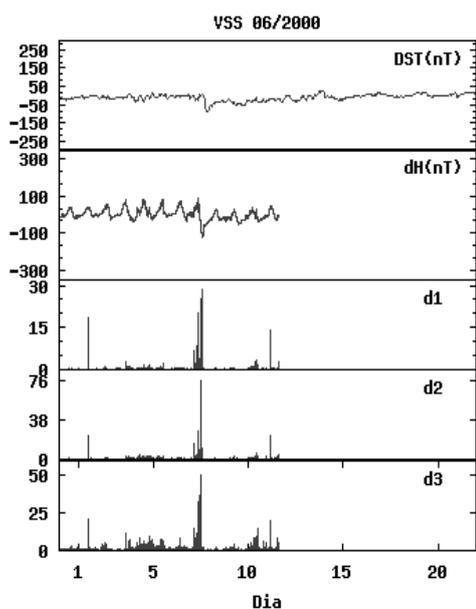
Figura 6.5 - Magnetograma da estação de Kakioka (a e b) e Vassouras (c e d) para os 22 primeiros dias dos meses de junho e setembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação da componente horizontal do campo geomagnético e os coeficientes wavelets ao quadrado nos 3 primeiros níveis de decomposição para a metodologia de obtenção do threshold probabilístico.



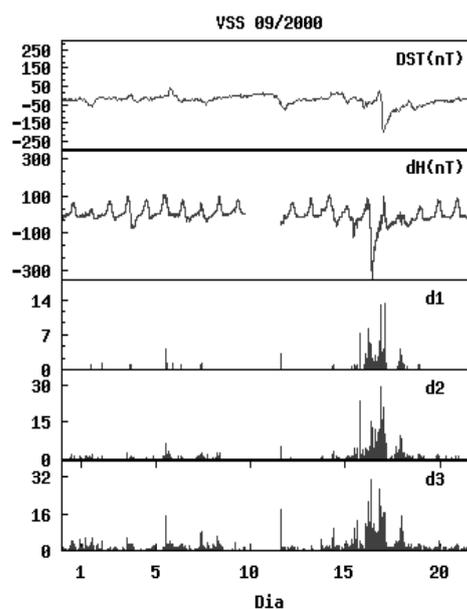
(a) Kakioka, junho



(b) Kakioka, setembro



(c) Vassouras, junho



(d) Vassouras, setembro

Figura 6.6 - Magnetograma da estação de Kakioka (a e b) e Vassouras (c e d) para os 22 primeiros dias dos meses de junho e setembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação da componente horizontal do campo geomagnético e os coeficientes wavelets ao quadrado nos 3 primeiros níveis de decomposição com a metodologia de obtenção do threshold universal.

7 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

7.1 Conclusão

Neste trabalho foram utilizadas as técnicas da transformada wavelet discreta ortogonal com diferentes funções wavelets e com diferentes *thresholding*. Os dados utilizados foram de medições da componente horizontal do campo geomagnético de duas estações, Kakioka, Japão, e Vassouras, Rio de Janeiro, Brasil. Todos os dados utilizados têm resolução temporal de minuto.

De início algumas regras foram estabelecidas:

- a) Escolher o período de dados a serem estudados;
- b) Classificar os distúrbios em todas os níveis de intensidade das quais variam de fraca a muito intensa II;
- c) Completar o período, fora dos padrões pré-definidos, para o estudo de uma tempestade muito intensa II (≤ -300 nT).

Para validar a ferramenta, aplicou-se então a metodologia a um conjunto mais extenso de dados, considerado adequado tanto na extensão temporal quanto de representatividade física, pois considerou-se um período abrangente de dados sobre posições distintas da órbita da Terra. Isso assegurou varrer situações sazonais possíveis da Terra como permitiu observar a ocorrência de eventos geofetivos do Sol, de características aleatórias, afetando a Terra. Considerou-se ainda, nesta representatividade, um intervalo dentro de um período de mínima atividade solar (2000), e de máxima (2005).

Essa metodologia consistiu em implementar uma ferramenta de diagnóstico de distúrbios geomagnéticos, por meio de técnicas wavelets, para análise dos dados de magnetômetros de superfície. Utilizaram-se a transformada contínua com uma função analisadora de Morlet e a transformada discreta ortogonal com quatro diferentes funções analisadoras de Daubechies. Buscando uma melhor caracterização desses intervalos de distúrbios, investigaram-se diferentes valores de limiar mínimo dos coeficientes wavelets para a identificação automática de ocorrência desses distúrbios com base em magnetogramas.

Assim dos resultados obtidos, constatou-se que as informações extraídas por meio da transformada wavelet permitem revelar distúrbios caracterizados pela presença de ondas com frequências características. De uma forma geral, a transformada wavelet demonstrou-se eficiente na caracterização das diversas situações e distúrbios geomagnéticos analisados em estações distintas, ou seja, na identificação das ocorrências associadas às tempestades geomagnéticas durante a injeção de energia. Contudo é importante salientar que as variações frequenciais apresentadas remetem a características de diferentes intensidades de distúrbios totalmente diferentes, ou seja, não são capazes de classificar essas ocorrências por intensidade.

As tempestades geomagnéticas de maior intensidade que atinjam valores de Dst inferiores a -50nT foram mais fáceis de se visualizar graficamente nos resultados com as decomposições por meio dos coeficientes wavelets, o que se tornou relevante, pois são distúrbios de magnitude que podem causar interferências ou danos. Considerando a regularidade local representada pelos coeficientes wavelets, a função analisadora wavelet de Daubechies de ordem 2 mostrou-se a mais adequada para a identificação desses distúrbios. A Daubechies de ordem 1 mostra-se mais sensível a períodos de mais fraca atividade, o que torna-se de utilidade para resolver algumas ambiguidades na distinção entre um período com uma tempestade fraca ($-50 \leq Dst \leq 0 \text{ nT}$) e um período que apresente apenas uma variação do campo magnético de fundo e não relacionado a interação direta plasma solar-magnetosfera.

Como parte da validação do método testado, os resultados para Kakioka e Vassouras revelaram-se consistentes entre si, o que também valida a estação brasileira para esse tipo estudos. Sobretudo para investigações dos efeitos do eletrojato equatorial e da Anomalia Magnética do Atlântico Sul, a que uma rede de magnetômetros no Brasil estará sujeita.

Em termos de resultados, este trabalho comprovou a visão promissora de desenvolvimento de uma abordagem capaz de detectar e classificar eventos transitórios utilizando a transformada wavelet discreta. Foi possível a demonstração da eficácia e da funcionalidade dessa ferramenta para a análise de sinais com eventos transitórios. Verificou-se que a metodologia dá bases para uma ferramenta de identificação de distúrbios geomagnéticos e, devido a origem física, de identificação de situações em que há alteração das correntes elétricas no interior da magnetosfera, ou seja, períodos em que a interação entre o plasma solar e a magnetosfera está ativa.

A respeito dos algoritmos desenvolvidos no módulo de caracterização dos momentos transitórios do distúrbio, sua versatilidade permite a adaptação desses algoritmos para entradas de dados automatizados e em tempo real.

7.2 Trabalhos Futuros

Como sugestão de futuros trabalhos, há a possibilidade de desenvolvimento de um recurso de análise de séries temporais de dados de magnetômetro com o processamento em tempo real, dispondo o resultado de diagnóstico diretamente a usuários interessados, e mesmo com uma interface para controles de aspectos específicos, para permitir acompanhar os instantes em que há uma atividade de injeção ou alteração de energia na magnetosfera devido a incidência do plasma solar, sendo essa uma informação que pode servir a diversas aplicações.

Outra possibilidade que merece ser estudada é a aplicação desse sistema de análise de séries temporais da componente horizontal do campo geomagnético em conjunto com a análise de parâmetros do plasma espacial, coletado por satélites, para avançar num diagnóstico mais completo da interação eletrodinâmica plasma solar-magnetosfera com efeitos na geofetividade. Isso constituiria uma ferramenta promissora no auxílio à previsão das tempestades geomagnéticas de interesse da Geofísica Espacial e, principalmente, da área emergente de Clima Espacial.

Compensa também estender as análises para dados com maior resolução temporal, por exemplo, da ordem de segundos, para evidenciar aspectos da fenomenologia até o momento que não foram possíveis com a resolução de minuto. Por outro lado, dados de outras estações brasileiras, como, por exemplo, de São Martinho da Serra, RS, poderão ser analisados, para permitir caracterizar comportamentos comuns entre as estações e peculiares a cada estação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRY, P. **Ondelettes et turbulence. Multirésolutions, algorithmes de décomposition, invariance échelle et signaux de pression.** Paris: Diderot, 1997. 28, 29

BAUMJOHAN, W.; TREUMAN, R. A. **Basic space plasma physics.** London: Imperial College, 2004. 11

CAMPBELL, W. H. **Introduction to geomagnetic fields.** 2. ed. United Kingdom: Syndicate of the University of Cambridge, 2003. 4-8 p. 4, 7, 9, 12, 13, 16, 18

COSTA, A. M.; DOMINGUES, M. O.; MENDES, O. How wavelet singularities can be used to characterize geomagnetic storms. In: INTERNATIONAL UNION OF GEODESY AND GEOPHISICS. **Proceedings...** Perugia, Italy, 2007. Disponível em: <<http://www.iuggperugia2007.it>>. 34

COSTA, A. M.; DOMINGUES, M. O.; MENDES, O.; BRUM, C. G. M. Interplanetary medium condition effects in the south atlantic magnetic anomaly: A case study. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 2011. 34

DAGLIS, I. The terrestrial ring current: origin, formation and decay. **Reviews of Geophysics**, v. 37, n. 4, p. 407–438, November 1999. 10

DAUBECHIES, I. **Ten lectures on wavelets.** Philadelphia: SIAM, 1992. (Applied Mathematics, v. 61). 25, 28, 29

DOMINGUES, M. O. **Análise wavelet na simulação numérica de equações diferenciais parciais com adaptabilidade espacial.** Tese (Doutorado) — Universidade de Campinas, Campinas, 2002. 25, 27

DONOHO, D. L.; JOHNSTONE, I. M. Ideal spatial adaptation via wavelet shrinkage. **BiométriKa**, v. 81, n. 3, p. 425–455, 1994. 38

_____. Adapting to unknown smoothing via wavelet shrinkage. **American Statistical Association**, v. 90, p. 1200–1224, 1995. 37

DUNGEY, J. W. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. **Reviews Letters**, v. 6, p. 47, 1961. 7

GONZALEZ, W. D.; JOSELYN, A. J.; KAMIDE, Y.; KREL, H. W.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B. T.; VASYLIUNAS, V. M. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, p. 5771–5792, 1994. 8

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere**. Cambridge: Cambridge University, 1993. 3

HUBBARD, B. B. **The world according wavelets: the story of a mathematical technique in the making**. 2. ed. Natick Massachusetts: CRC Press, 1996. ISBN-10: 1568810474. 21

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Plano Diretor do INPE 2007-2011**. São José dos Campos, São Paulo: INPE, 2007. 11

KAMIDE, Y.; YOKOYAMA, N.; GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; DAGLIS, I. A.; BREKKE, A.; MASUDA, S. Two steps development of geomagnetic storms. **Journal of Geophysical Research-Space Physics**, v. 103, p. 6917–6921, 1998. 8

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. Introduction to space physics. **Cambridge University Press**, 1995. 1, 3, 7, 9, 10

KLAUSNER, V.; SIMOES, M. C.; OJEDA, A. G.; DOMINGUES, M. O.; PAPA, A. R. R.; MENDES, O. Discrete wavelet decomposition parte 2: analysis os magnetogram data. In: . [S.l.: s.n.], 2009. Arquimedes 8. 34

MACGORMAN, D. R.; RUST, W. D. **The electrical nature of storms**. Oxford: Oxford University Press, 1998. 12

MALLAT, S. G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 11, n. 7, p. 674–693, 1989. 28

_____. Multiresolution approximations and wavelets orthonormal bases of $l^2(r)$. **Transaction of American Mathematical Society**, American Mathematics Society, v. 315, n. 1, p. 69–87, Sept 1991. 25

MATSUOKA, T. M.; SALOMON, S. C. Posicionamento relativo em dias perturbados por tempestades geomagnéticas: estudo de caso para 29 de outubro de

2003. In: SEMINÁRIO ANUAL DE PESQUISAS EM GEOFÍSICA NA UFRS. **Anais ...** Porto Alegre: UFRS, 2007. 8

MAYAUD, P. Derivation, meaning, and use of geomagnetic indices. **American Geophysical Union**, Geophysical Monograph 22, 1980. 9, 10

MENDES, O. **Origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das tempestades geomagnéticas moderadas (1978 - 1979)**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. 2, 7, 8

MENDES, O.; COSTA, A. M.; BERTONI, F. C. P. Effects of the number of stations and time resolution on dst derivation. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 18, p. 2127–2137, Dec. 2006. 10, 17

MENDES, O.; COSTA, A. M.; DOMINGUES, M. O. Introduction to planetary electrodynamic: a view of electric fields, currents and related magnetic fields. **Fundamentals of Space Environment Science**, Rio de Janeiro, v. 35, n. 5, p. 812–828, 2005. 1

MENDES, O.; DOMINGUES, M. .; TRIVEDI, N. B. Gic-occurrence analysis: a case study. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS CONTROL AND THEIR APPLICATIONS (DINCON), 10., 2010. **Anais ...** Serra Negra, 2010. (ISSN 2178-366). 1

MENDES, O.; DOMINGUES, M. O.; COSTA, A. M.; GONZALEZ, A. L. C. Wavelet analysis applied to magnetograms: singularity detections related to geomagnetic storms. **Jornal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** 67, p. 1827–1836, 2005. 33

MENDES, O.; DUTRA, S. L. G.; LAGO, A. D.; DUARTE, J. R. O ambiente espacial e a física solar-terrestre. 2009. 1

MORLET, J. **Sampling theory and wave propagation**. Acoustic signal/image processing and recognition. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 233-261 p. (NATO ASI, v. 1). 21

MORLET, J.; ARENS, G.; FOURGEAU, E.; GIARD, D. Wave propagation and sampling theory; part i, complex signal and scattering in multilayered media. **Geophysics**, v. 47, n. 2, p. 203–221, Fevereiro 1982. 23

MURALIKRISHNA, A. **Previsão do índice geomagnético dst utilizando redes neurais artificiais e árvore de decisão**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009-02-13 2009. 1

MURSULA, K.; HOLAPPA, L.; KARINEN, A. Uneven weighting of stations in the dst index. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, p. 316–322, Feb. 2011. Provided by the SAO/NASA Astrophysics Data System. 10

PRESTES, A. **Estudo estatístico da variabilidade dos índices geomagnéticos e sua relação com o ciclo solar**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002-09-02 2009. 10

RANGARAJAN, G. Indices of geomagnetic activity. **JACOBS, J.A.**, v. 3, p. 323–384, 1989. Academic Press. 10

ROSTOKER, G. Geomagnetic indices. In: **Reviews of Geophysics and Space Physics**. [S.l.: s.n.], 1972. v. 10, n. 4, p. 935–990. 10

RUSSELL, C. T. The magnetosphere. In: AKASOFU, S. I.; KAMIDE, Y. (Ed.). **The Solar Wind and the Earth**. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), 1987. p. pp 73–100. 7

SIMÕES, M. C.; DOMINGUES, M. O.; MENDES, O. Ferramenta multiescala para identificação de tempestades geomagnéticas: um estudo preliminar. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON DYNAMICS, CONTROL AND APPLICATIONS DINCON'09, 8.,2009, BAURU. **Anais ...** Bauru: UNESP, 2009. Arquimedes 8. 34

SUGIURA, M. Hourly values of equatorial dst for the igy. In: **Annual International Geophysical Year**. New York: Pergamon Press, 1964. v. 35. 10

WILLIAMS, D. J. The earths ring current: causes, generation, and decay. **Space Science Reviews**, v. 34, p. 223–234, 1983. 10

APÊNDICE A: FORMATO DOS DADOS DE MAGNETÔMETRO

A Tabela A.1 exemplifica como os arquivos de dados estão organizados, que neste caso é a base de dados da estação de Kakioka, situada no Japão, mantida pelo Observatório de Kakioka (*Kakioka Magnetic Observatory, Japan Meteorological Agency*).

Por ter resolução de 1 minuto, esse arquivo tem a extensão .min, vem com uma denominação padrão formada pela sigla da estação, ano, dia e mês, como por exemplo “kak20000301d.min”, lembrando que os arquivos são acessados dia - a - dia, i.e., para o mês de Janeiro obtem-se 31 arquivos com 1440 dados por cada dia.

O cabeçalho compõe-se das seguintes informações: o formato, a fonte dos dados, o nome da estação, código, latitude, longitude, as componentes do campo magnético, sensor de orientação, tempo de cada dado, período de dados enviados por arquivo, tipo de dado e a informação de onde os dados foram acessados.

Tabela A.1 - Exemplo de Cabeçalho da Base de Dados de Magnetograma da Estação de Kakioka

| | |
|---|-----------------------------------|
| Format | IAGA-2002 |
| Source of Data | JPN |
| Station Name | KAKIOKA |
| IAGA CODE | KAK |
| Geodetic Latitude | 36.233 |
| Geodetic Longitude | 140.183 |
| Elevation | 28 |
| Reported | HDZF |
| Sensor Orientation | HDZF |
| Digital Sampling | 1 minute |
| Data Interval Type | Filtered 1-minute (00:30 - 01:29) |
| Data Type | definitive |
| This file was converted from the INTERMAGNET CD-ROM binary data | |

Do arquivo acessado e representado pela Tabela A.2, nas colunas de dados têm-se: colunas referentes a data, tempo, dia do ano (DOY - *Day of Year*) que está relacionado ao dia juliano, componente horizontal do campo geomagnético H, declinação geomagnética D, componente vertical Z e intensidade do campo F. Para a aplicação dessa dissertação foi utilizado somente a coluna 4, a da componente H.

Tabela A.2 - Exemplo da Base de Dados de Magnetograma da Estação de Kakioka

| DATE | TIME | DOY | KAKH | KAKD | KAKZ | KAKF |
|------------|--------------|-----|----------|---------|----------|----------|
| 2000-03-01 | 00:00:00.000 | 061 | 30031.80 | -420.50 | 35376.90 | 46405.10 |
| 2000-03-01 | 00:01:00.000 | 061 | 30032.80 | -420.50 | 35377.30 | 46406.10 |
| 2000-03-01 | 00:02:00.000 | 061 | 30033.80 | -420.50 | 35377.90 | 46407.20 |
| 2000-03-01 | 00:03:00.000 | 061 | 30034.70 | -420.40 | 35378.30 | 46408.00 |
| 2000-03-01 | 00:04:00.000 | 061 | 30035.30 | -420.20 | 35378.60 | 46408.60 |
| 2000-03-01 | 00:05:00.000 | 061 | 30035.40 | -420.00 | 35378.60 | 46408.70 |
| 2000-03-01 | 00:06:00.000 | 061 | 30035.00 | -419.70 | 35378.10 | 46408.00 |
| 2000-03-01 | 00:07:00.000 | 061 | 30034.70 | -419.60 | 35377.50 | 46407.30 |
| 2000-03-01 | 00:08:00.000 | 061 | 30034.20 | -419.70 | 35377.10 | 46406.70 |
| 2000-03-01 | 00:09:00.000 | 061 | 30034.00 | -419.80 | 35376.70 | 46406.40 |
| 2000-03-01 | 00:10:00.000 | 061 | 30033.80 | -419.80 | 35376.60 | 46406.10 |
| 2000-03-01 | 00:11:00.000 | 061 | 30033.60 | -419.80 | 35376.30 | 46405.70 |
| 2000-03-01 | 00:12:00.000 | 061 | 30033.60 | -419.80 | 35376.20 | 46405.70 |
| 2000-03-01 | 00:13:00.000 | 061 | 30033.80 | -419.80 | 35376.10 | 46405.80 |
| 2000-03-01 | 00:14:00.000 | 061 | 30033.80 | -419.80 | 35376.10 | 46405.70 |
| 2000-03-01 | 00:15:00.000 | 061 | 30033.90 | -419.70 | 35376.00 | 46405.70 |
| 2000-03-01 | 00:16:00.000 | 061 | 30034.00 | -419.70 | 35376.00 | 46405.80 |
| 2000-03-01 | 00:17:00.000 | 061 | 30034.20 | -419.70 | 35376.10 | 46406.00 |
| 2000-03-01 | 00:18:00.000 | 061 | 30034.40 | -419.70 | 35376.20 | 46406.20 |
| 2000-03-01 | 00:19:00.000 | 061 | 30034.90 | -419.70 | 35376.50 | 46406.70 |
| 2000-03-01 | 00:20:00.000 | 061 | 30035.20 | -419.60 | 35376.70 | 46407.10 |
| 2000-03-01 | 00:21:00.000 | 061 | 30035.50 | -419.60 | 35376.70 | 46407.30 |
| 2000-03-01 | 00:22:00.000 | 061 | 30035.60 | -419.50 | 35376.70 | 46407.40 |

Além do Intermagnetic é possível acessar os dados direto do site da NOAA. Do WDC, *World Data Center*¹ é possível ter acesso a estação de preferência, no nosso caso VSS, com acesso a dados separados em horas e minutos. A metodologia dessa dissertação pode ser utilizada para dados de maior resolução. Neste estudo, usamos dados de minutos na base de dados do NOAA, em que os arquivos estão organizados por ano, sendo que, especificamente para Vassouras, temos dados históricos de 1998 a 2007. Para nosso estudo de conceito a base de análise considera os anos base de 2000 e de 2005. Com referência aos arquivos baixados após a seleção do ano, existem outras subpastas separadas por meses (de janeiro a dezembro) e a opção é fazer *download* do arquivo do mês em questão.

¹<ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/wdc/geomagnetism/data/observatories/definitive>

APÊNDICE B: FERRAMENTAS UTILIZADAS

Existem inúmeras famílias Wavelets que podem ser utilizadas como filtros na decomposição. A princípio, os algoritmos foram desenvolvidos em R que possibilita o uso de vários tipos de *threshold*: o probabilístico e o universal. Para comparar os resultados encontrados no R, utilizou-se o algoritmo DWT-1D da toolbox XWAVE-TOOL e implementado para o software livre Octave, permitindo o uso de um outro tipo de *threshold*, que é o *threshold* manual.

Demonstrando flexibilidade no uso da metodologia, para o procedimento em hardware, utilizou-se um equipamento usual: um Notebook HP Pavillon dv2250BR com processador Intel Core Duo com 120 de HD, memória de 2G, de 667MHz.

Todo desenvolvimento foi feito no ambiente operacional GNU/Linux Ubuntu, versão igual ou superior a 8, sendo que o software Livre R (R Development Core Team, 2006) é uma linguagem e ambiente para computação estatística e gráficos. Fazem parte da filosofia do Projeto GNU e está disponível sob os termos da Licença Pública Geral do GNU da Fundação do Software Livre na forma de código fonte. Foram necessários a instalação de alguns pacotes wavelets para o desenvolvimento desta aplicação como: wavethresh, wavelets, treethresh e por fim o waveslim, encontrados facilmente com uma ferramenta de busca tipo Google.

APÊNDICE C: ATIVIDADES GEOMAGNÉTICAS

Nas Figuras C.1-C.9, apresenta-se a atividade geomagnética caracterizada pelo índice Dst para março de 1989, para março, junho, setembro e dezembro de 2000 e igualmente para março, junho, setembro e dezembro de 2005.

Essas representações gráficas deram base para, por inspeção visual, o especialista identificar os períodos de tempestade geomagnética, que estão classificadas na Tabela 6.1. Nos gráficos estão indicados apenas o instante de início da tempestade. Houve a marcação apenas das ocorrências que eram inequívocas. Há dificuldades na identificação das fracas e das que apresentam um padrão de complexidade durante o período de recuperação.

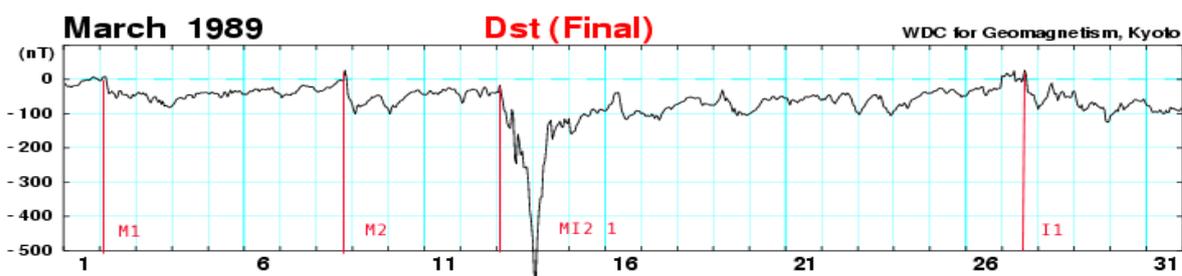


Figura C.1 - Atividade geomagnética em março de 1989

Tabela C.1 - Março 1989, DstMin (> 500 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/03 | 23-31/03 |
| Fraca | 0 | 0 |
| Moderada | 2 | 0 |
| Intensa | 0 | 1 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 1 | 0 |

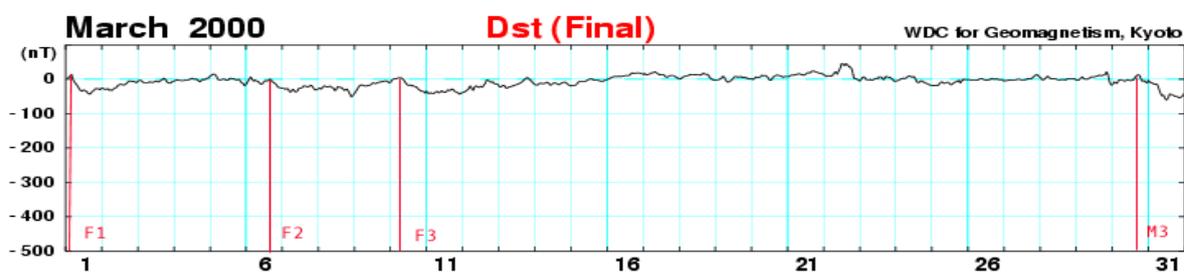


Figura C.2 - Atividade geomagnética em março de 2000

Tabela C.2 - Março 2000, DstMin (-60 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/03 | 23-31/03 |
| Fraca | 3 | 0 |
| Moderada | 0 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

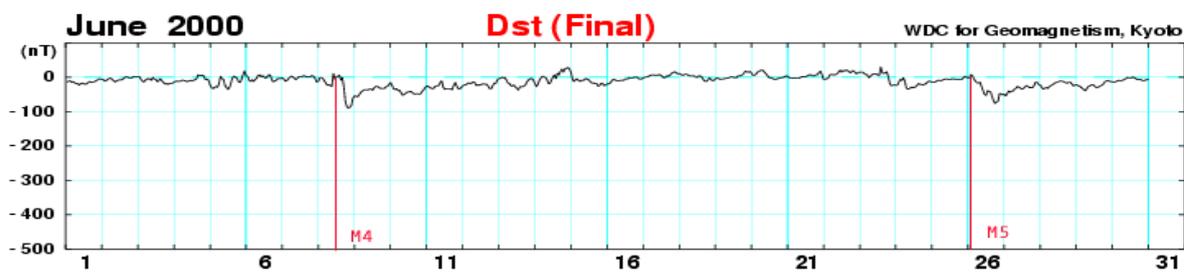


Figura C.3 - Atividade geomagnética em junho de 2000

Tabela C.3 - Junho 2000, DstMin (-90 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/06 | 23-30/06 |
| Fraca | 0 | 0 |
| Moderada | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

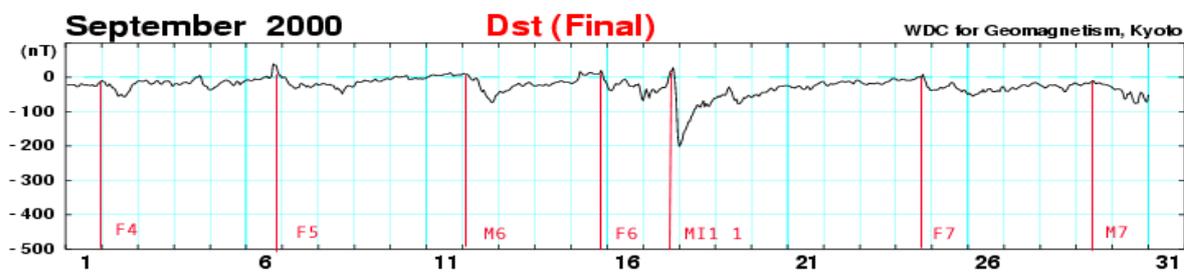


Figura C.4 - Atividade geomagnética em setembro de 2000

Tabela C.4 - Setembro 2000, DstMin (-201 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/09 | 23-30/09 |
| Fraca | 3 | 1 |
| Moderada | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 1 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

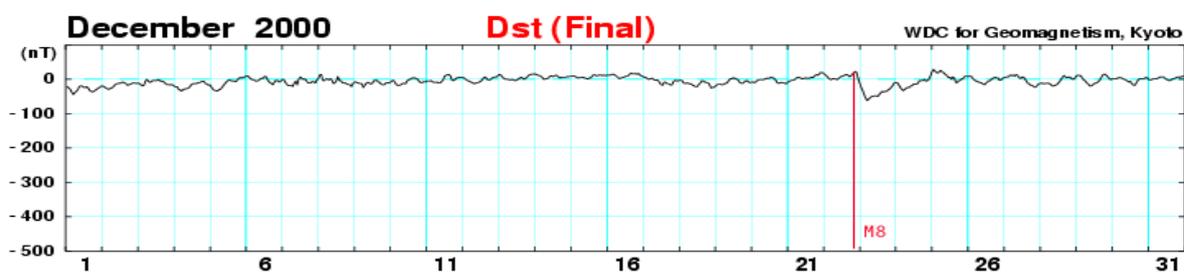


Figura C.5 - Atividade geomagnética em dezembro de 2000

Tabela C.5 - Dezembro 2000, DstMin (-62 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/12 | 23-31/12 |
| Fraca | 0 | 0 |
| Moderada | 1 | 0 |
| Intensa | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

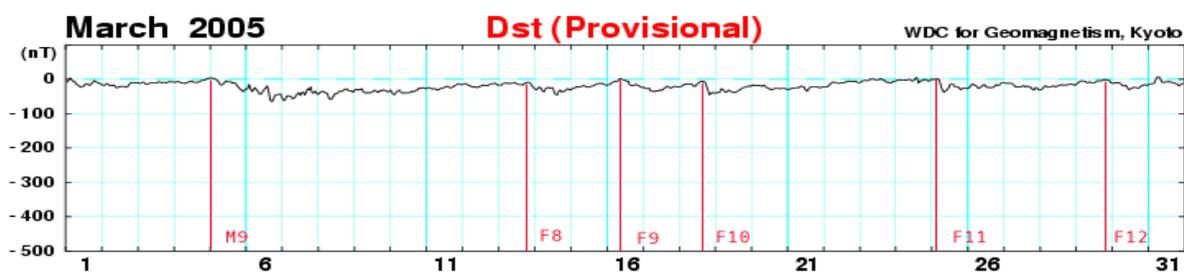


Figura C.6 - Atividade geomagnética em março de 2005

Tabela C.6 - Março 2005, DstMin (-65 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/03 | 23-31/03 |
| Fraca | 3 | 2 |
| Moderada | 1 | 0 |
| Intensa | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

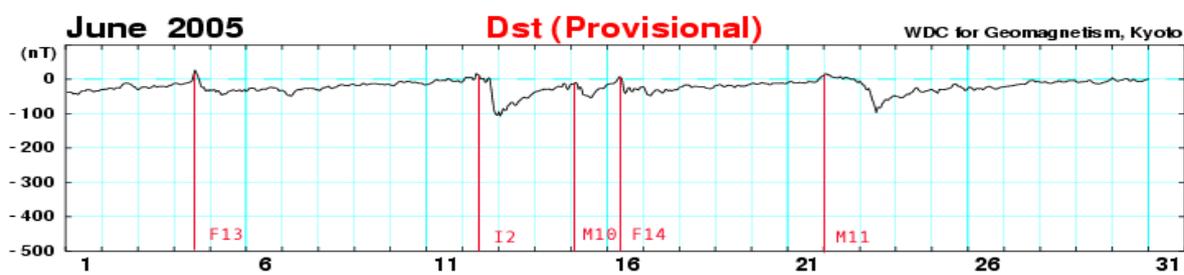


Figura C.7 - Atividade geomagnética em junho de 2005

Tabela C.7 - Junho 2005, DstMin (-106 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/06 | 23-30/06 |
| Fraca | 2 | 0 |
| Moderada | 2 | 0 |
| Intensa | 1 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

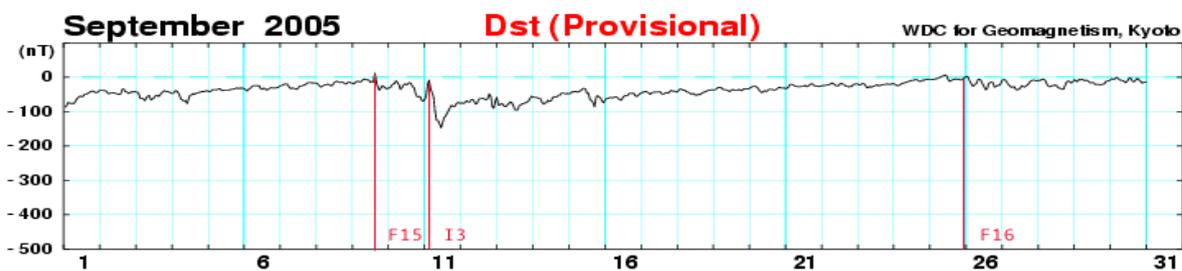


Figura C.8 - Atividade geomagnética em setembro de 2005

Tabela C.8 - Setembro 2005, DstMin (-147 nT)

| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/09 | 23-30/09 |
| Fraca | 1 | 1 |
| Moderada | 0 | 0 |
| Intensa | 1 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 |

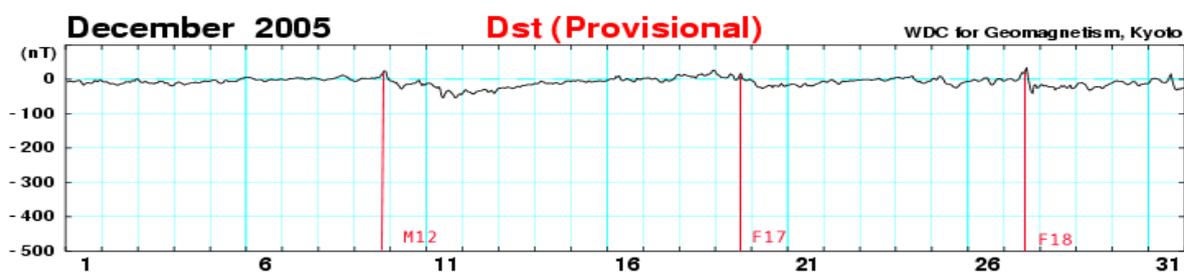


Figura C.9 - Atividade geomagnética em dezembro de 2005

Tabela C.9 - Dezembro 2005, DstMin (-54 nT)

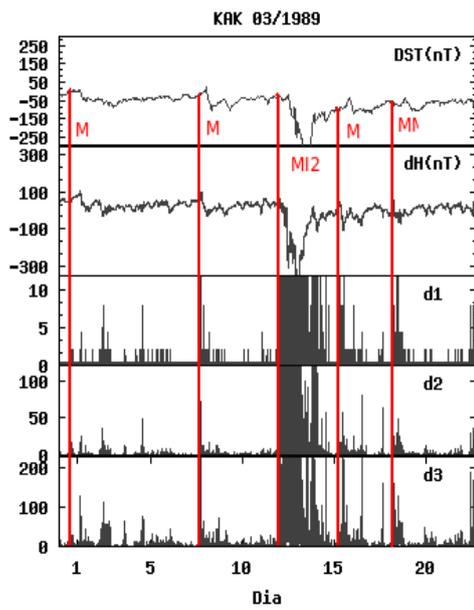
| Intensidade | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|----------|
| | 1-22/12 | 23-31/12 |
| Fraca | 1 | 1 |
| Moderada | 0 | 0 |
| Intensa | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 1 | 0 |

Tabela C.10 - Tabulação das Tempestades geomagnéticas - Geral

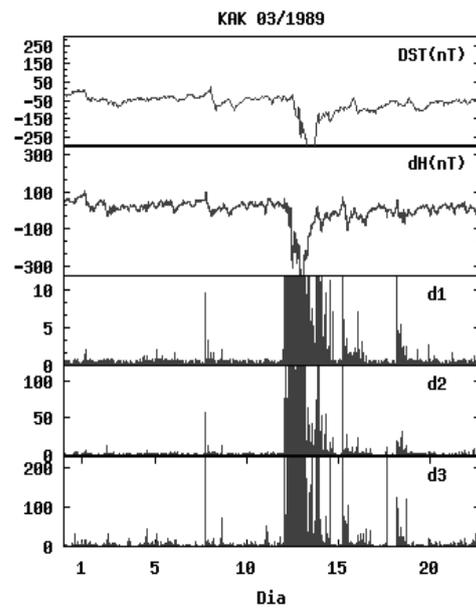
| Intensidade (nT) | Número de Tempestades | |
|------------------|-----------------------|-------|
| | 1-22 | 23-31 |
| Fraca | 13 | 5 |
| Moderada | 9 | 3 |
| Intensa | 2 | 1 |
| Muito Intensa I | 1 | 1 |
| Muito Intensa II | 1 | 0 |
| Total | 26 | 10 |

APÊNDICE D: MAGNETOGRAMAS ANALISADOS PELA TÉCNICA WAVELET COM THRESHOLDING MANUAL

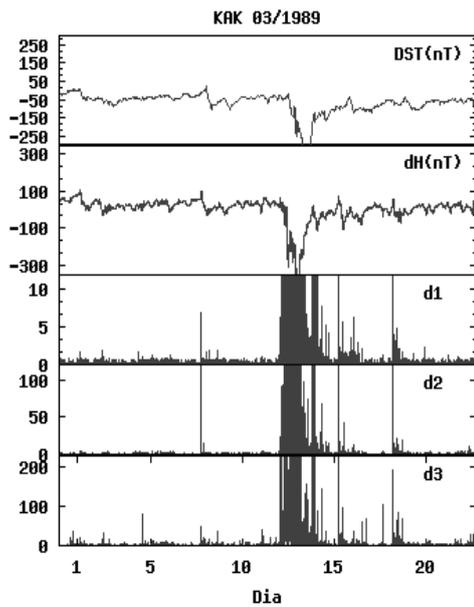
Neste apêndice apresentam-se os resultados como gráficos e tabelas para cada período de dados.



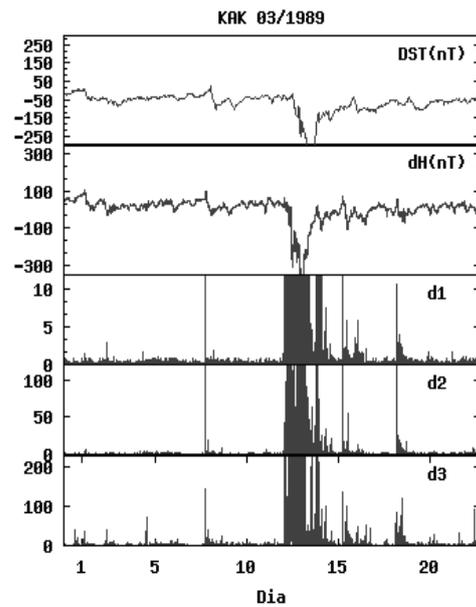
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3

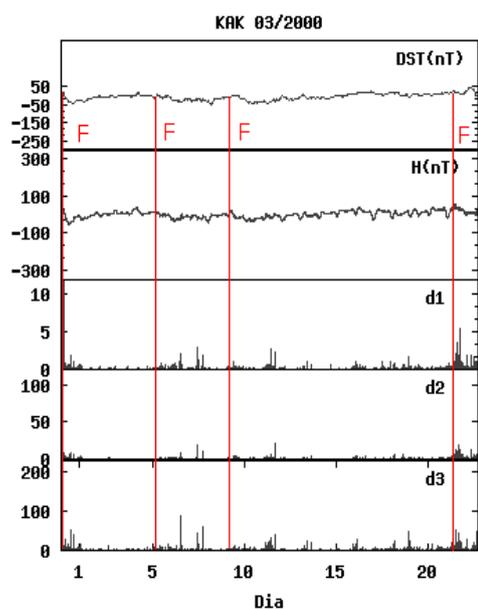


(d) Daubechies de ordem 4

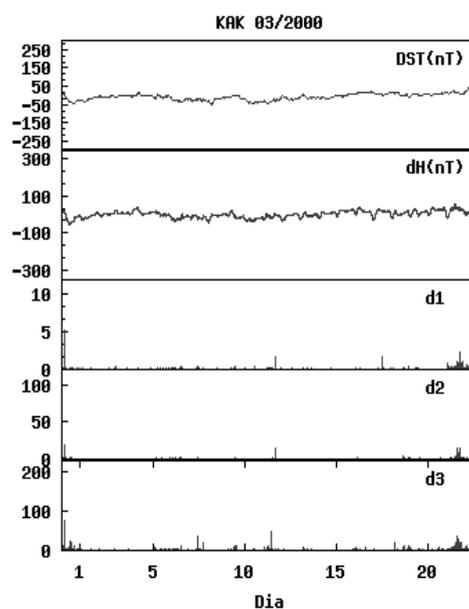
Figura D.1 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês março de 1989. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.1 - Identificação de Tempestades: Kakioka Março 1989, DstMin (> -500 nT)

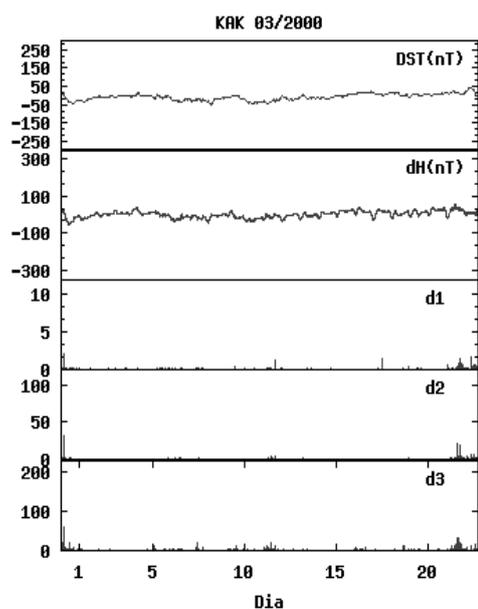
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Moderada | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |



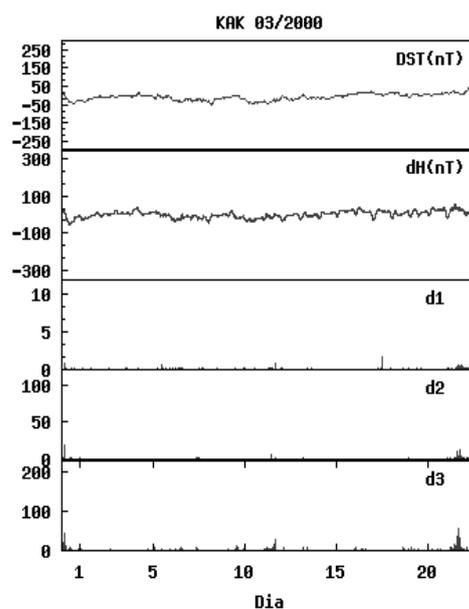
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

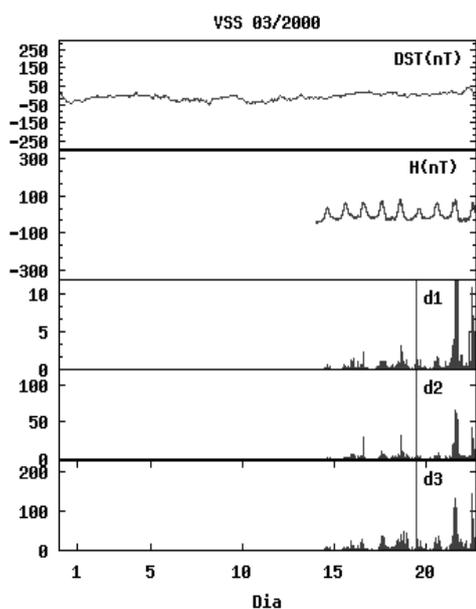


(c) Daubechies de ordem 3

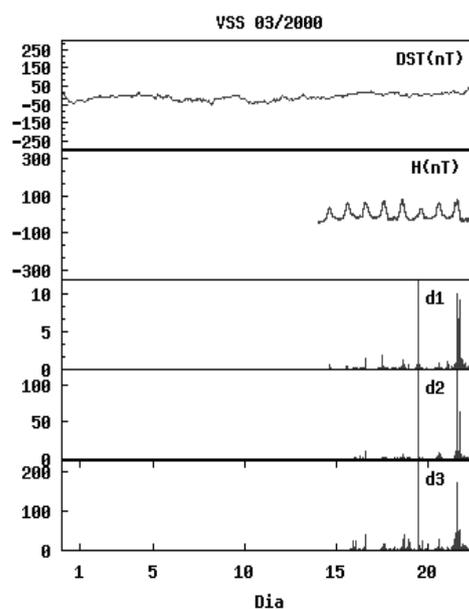


(d) Daubechies de ordem 4

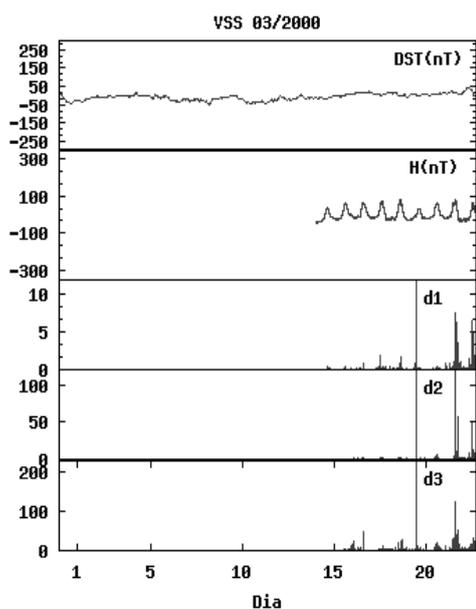
Figura D.2 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês março de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



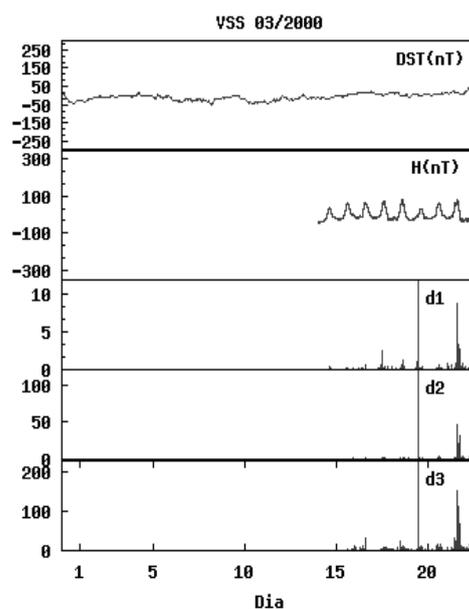
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

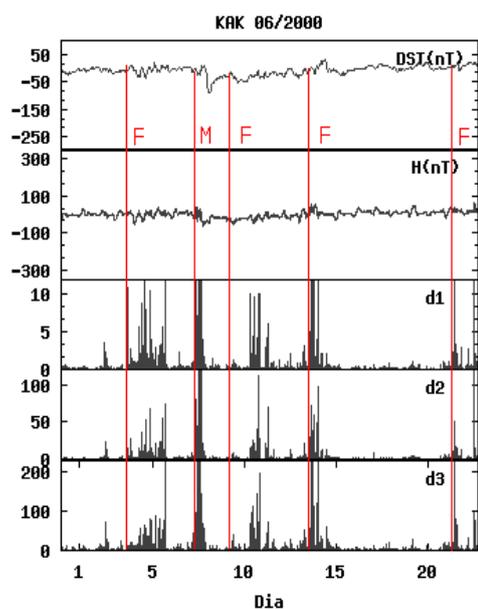
Figura D.3 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês março de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.2 - Identificação de Tempestades: Kakioka Março 2000, DstMin (-50 nT)

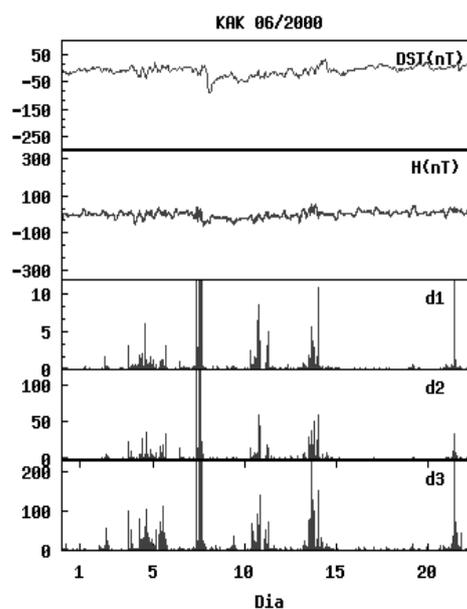
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 3 | 4 | 2 | 2 | 2 |
| Moderada | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.3 - Identificação de Tempestades: Vassouras Março 2000, DstMin (-50 nT)

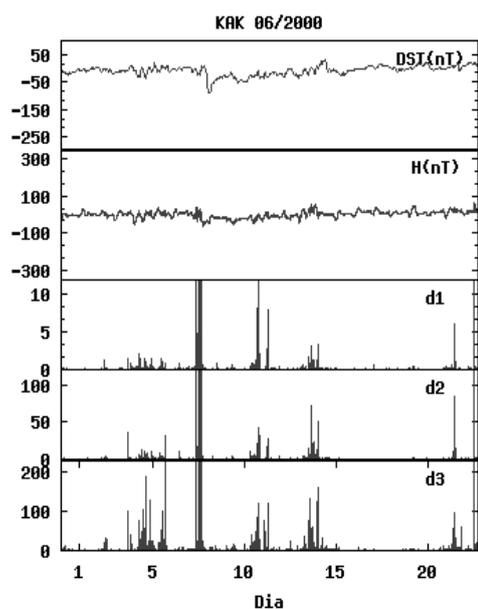
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | - | - | - | - | - |
| Moderada | - | - | - | - | - |
| Intensa | - | - | - | - | - |
| Muito Intensa I | - | - | - | - | - |
| Muito Intensa II | - | - | - | - | - |



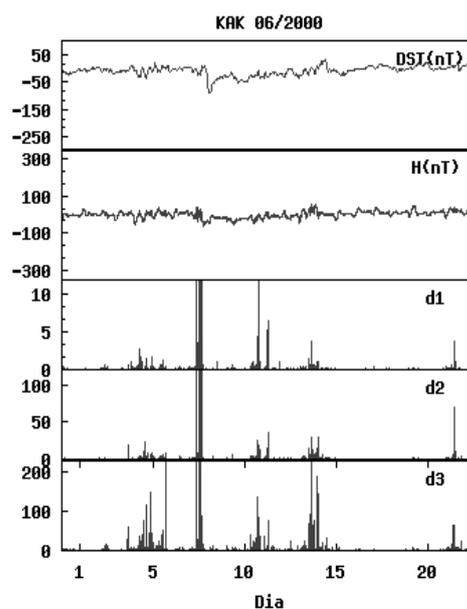
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

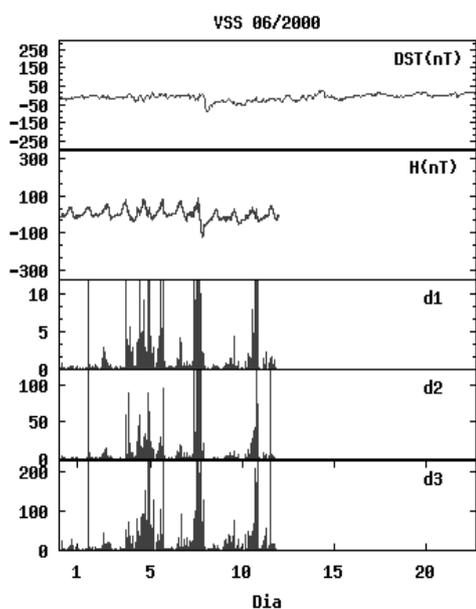


(c) Daubechies de ordem 3

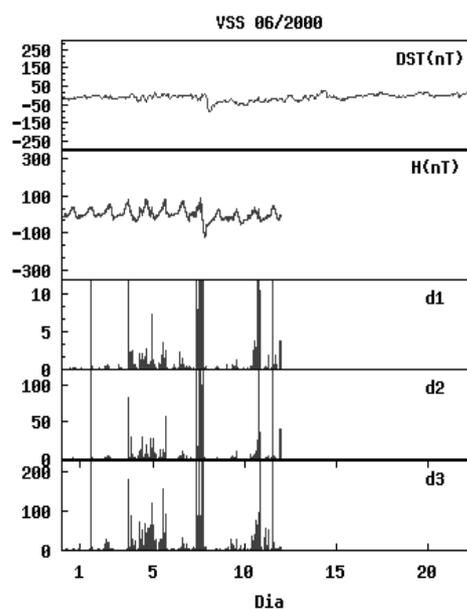


(d) Daubechies de ordem 4

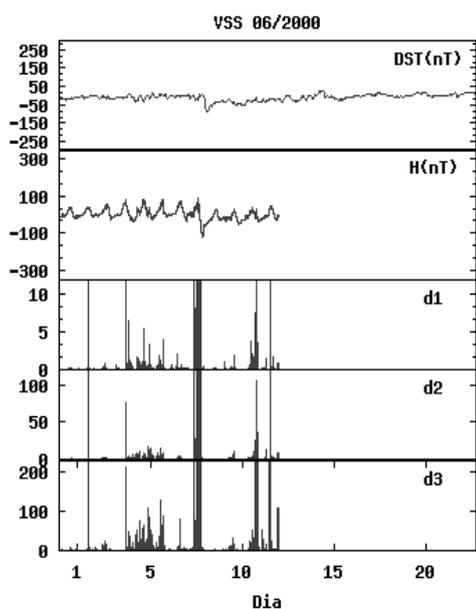
Figura D.4 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês junho de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



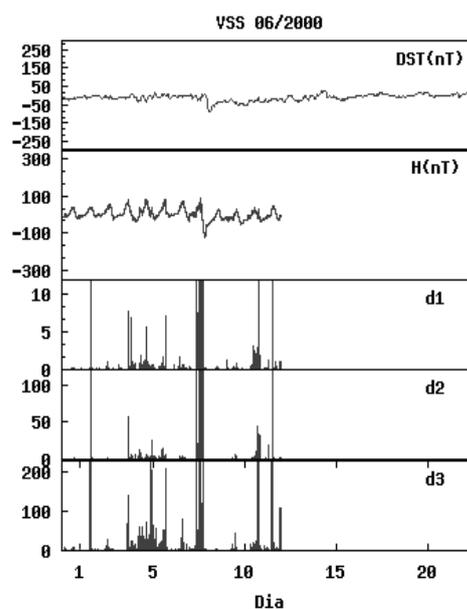
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

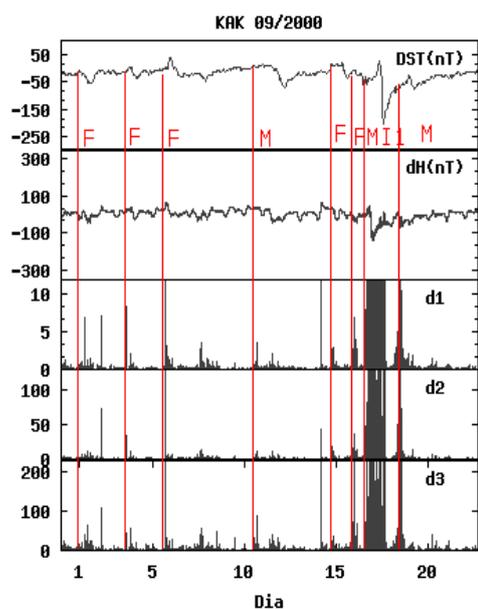
Figura D.5 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês junho de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.4 - Identificação de Tempestades: Kakioka Junho 2000, DstMin (-90 nT)

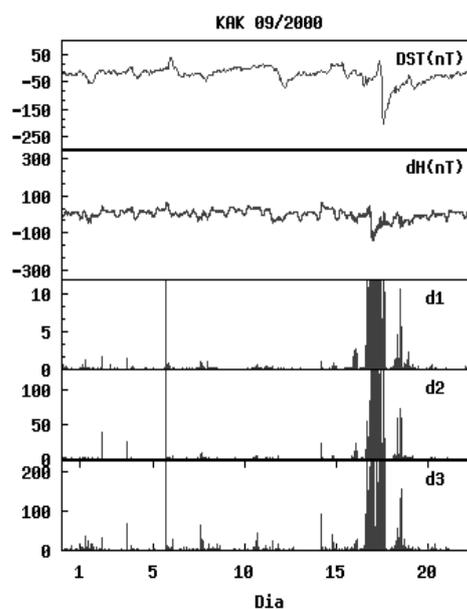
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 0 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.5 - Identificação de Tempestades: Vassouras Junho 2000, DstMin (-90 nT)

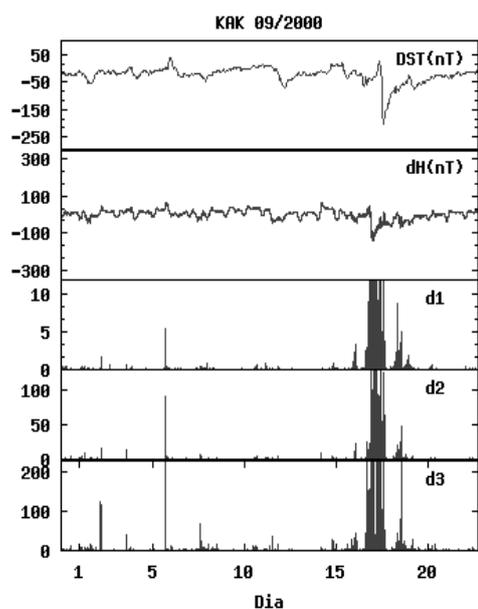
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | - | - | - | - | - |
| Moderada | - | - | - | - | - |
| Intensa | - | - | - | - | - |
| Muito Intensa I | - | - | - | - | - |
| Muito Intensa II | - | - | - | - | - |



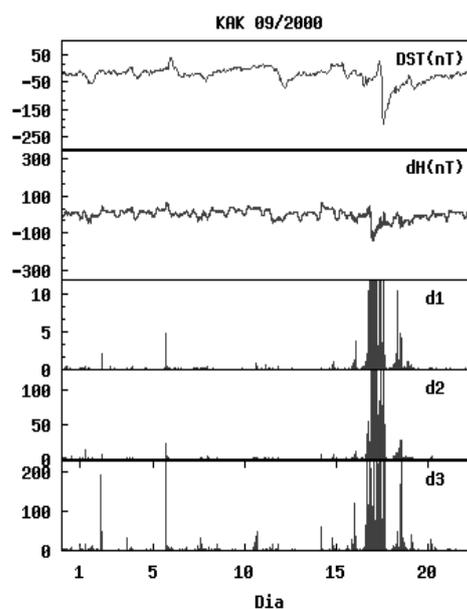
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

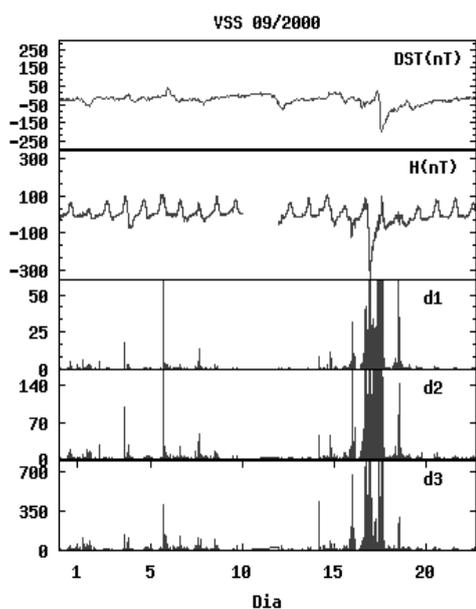


(c) Daubechies de ordem 3

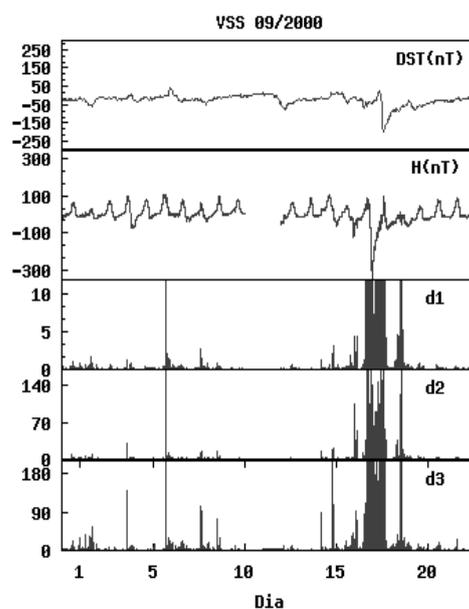


(d) Daubechies de ordem 4

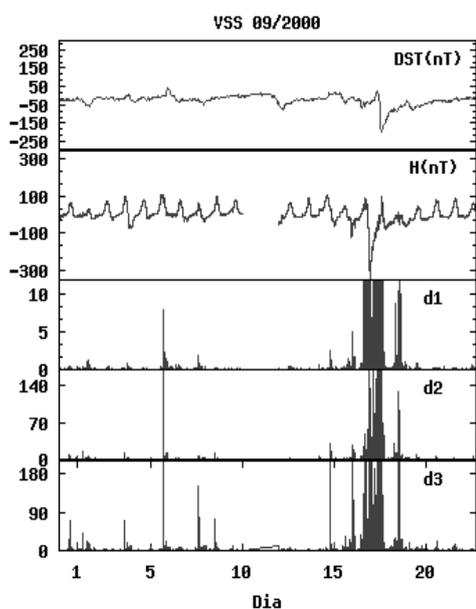
Figura D.6 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



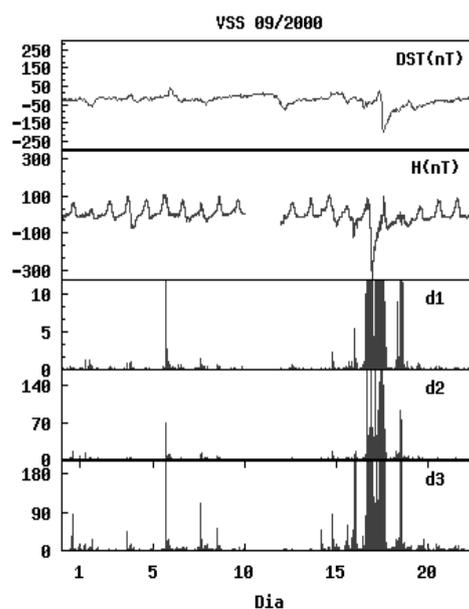
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

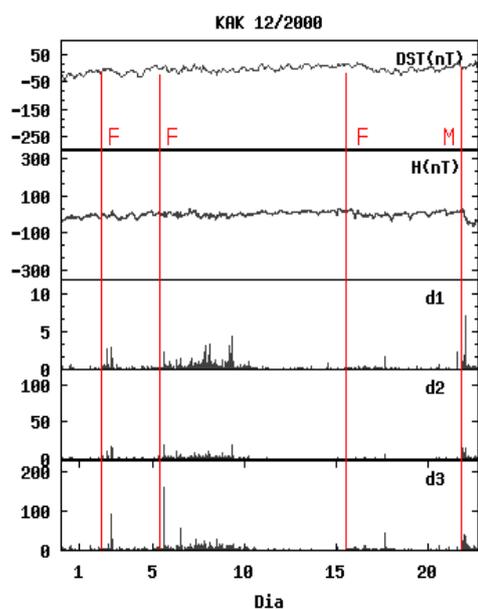
Figura D.7 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.6 - Identificação de Tempestades: Kakioka Setembro 2000, DstMin (-201 nT)

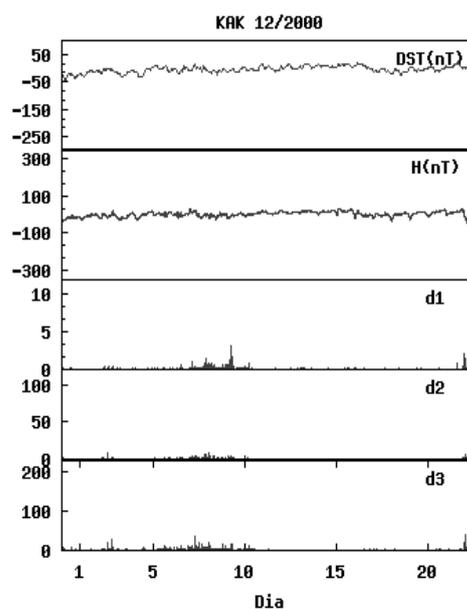
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | DstV | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 3 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.7 - Identificação de Tempestades: Vassouras Setembro 2000, DstMin (-201 nT)

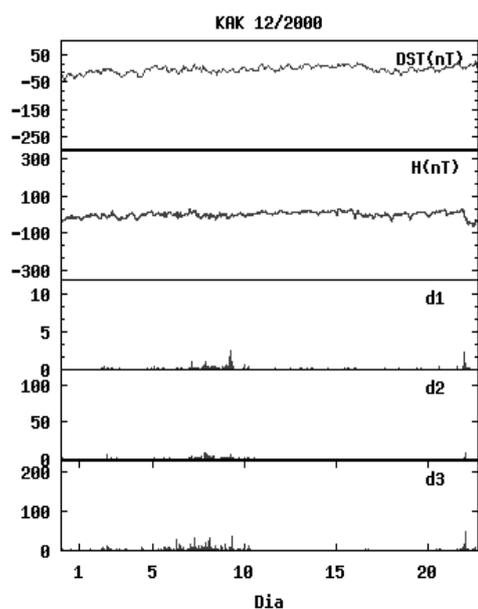
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | - | - | - | - | - |
| Moderada | - | - | - | - | - |
| Intensa | - | - | - | - | - |
| Muito Intensa I | - | - | - | - | - |
| Muito Intensa II | - | - | - | - | - |
| Compressão | - | - | - | - | - |



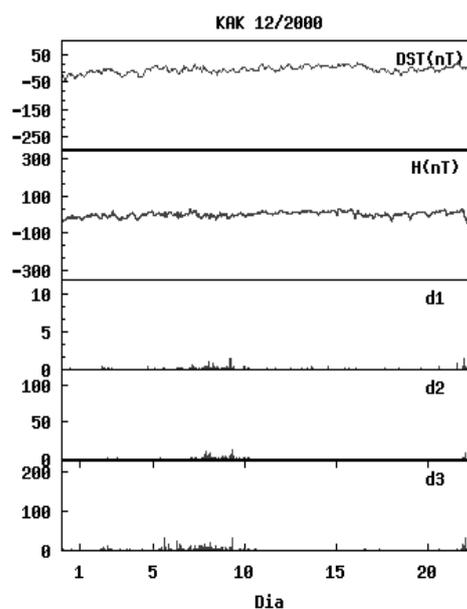
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

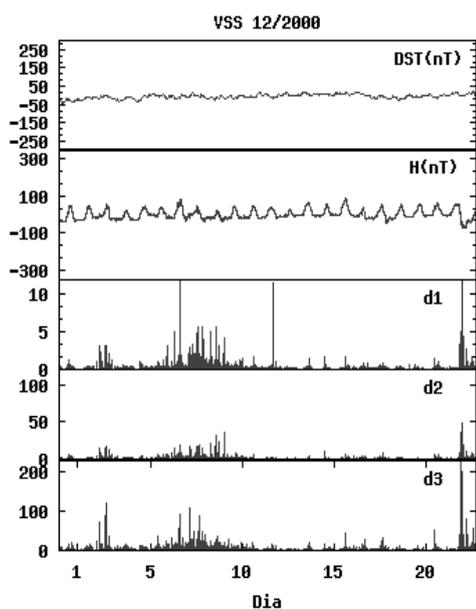


(c) Daubechies de ordem 3

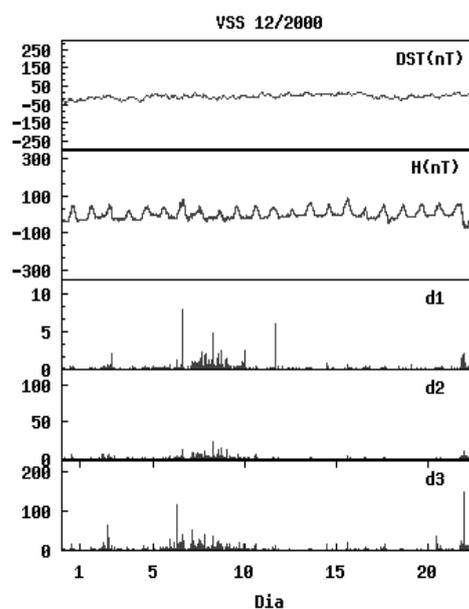


(d) Daubechies de ordem 4

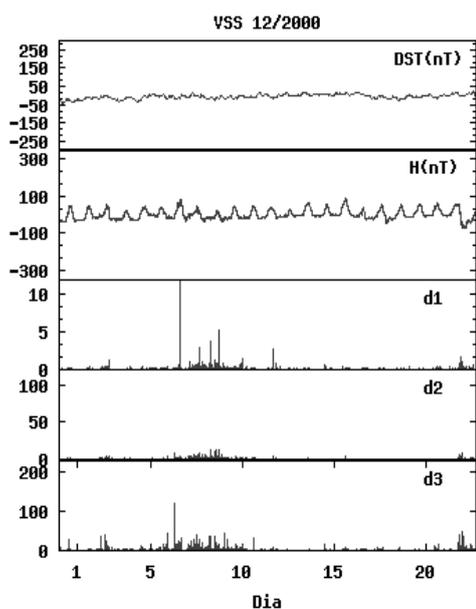
Figura D.8 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



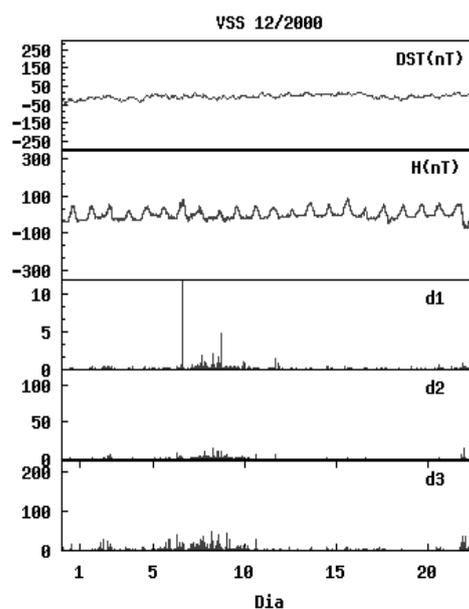
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

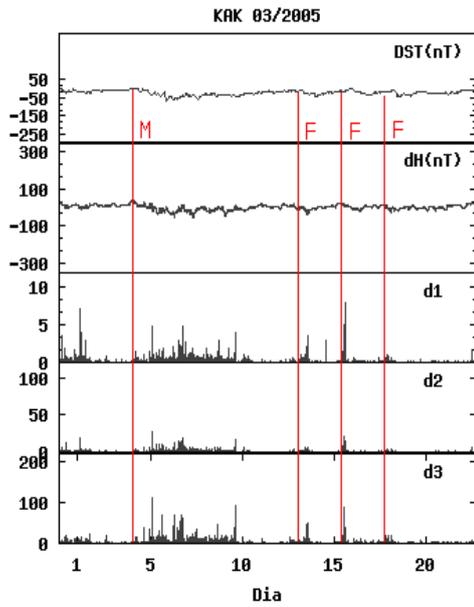
Figura D.9 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.8 - Identificação de Tempestades: Kakioka Dezembro 2000, DstMin (-62 nT)

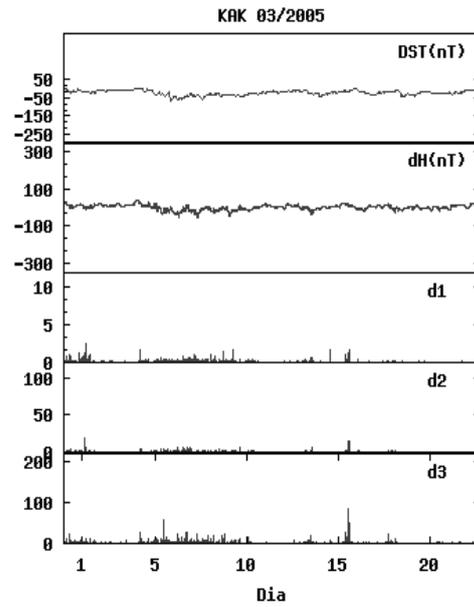
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.9 - Identificação de Tempestades: Vassouras Dezembro 2000, DstMin (-62 nT)

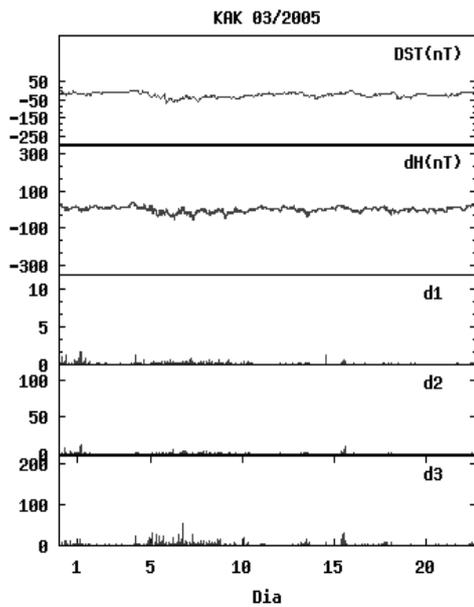
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



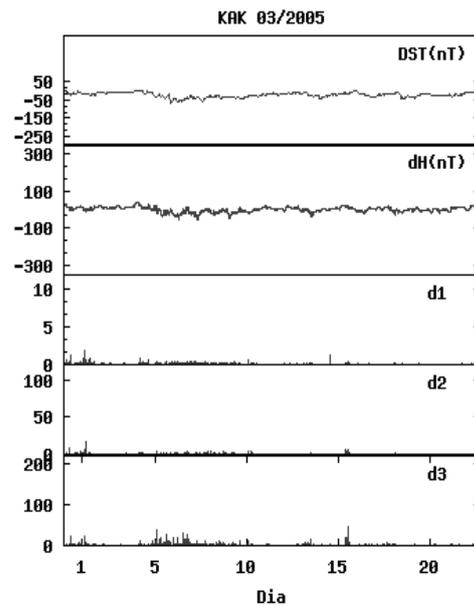
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

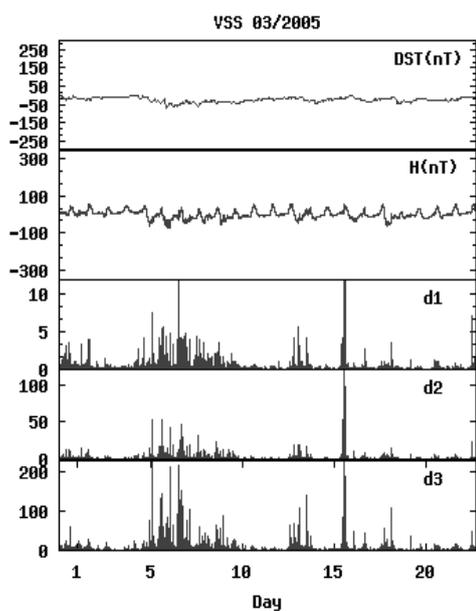


(c) Daubechies de ordem 3

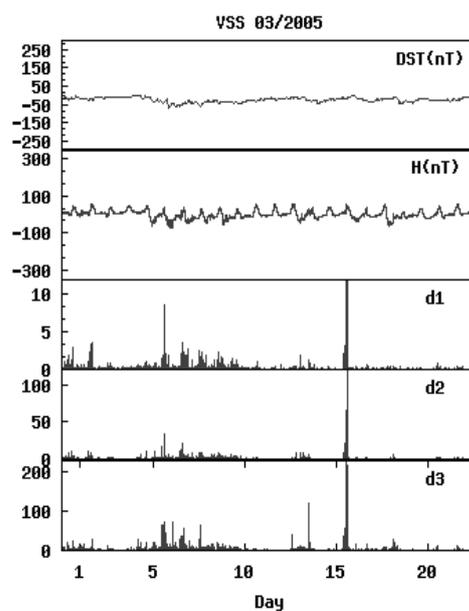


(d) Daubechies de ordem 4

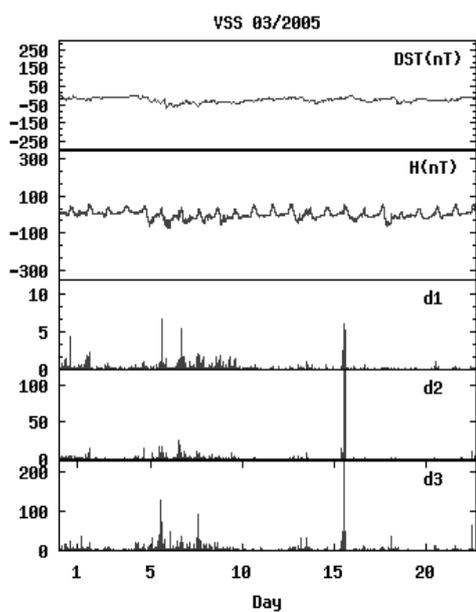
Figura D.10 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês março de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



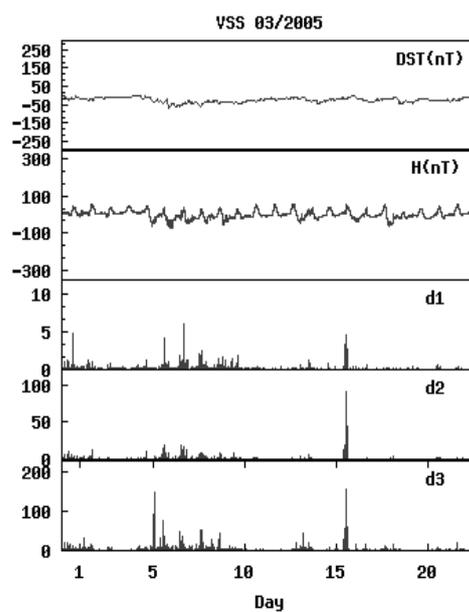
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

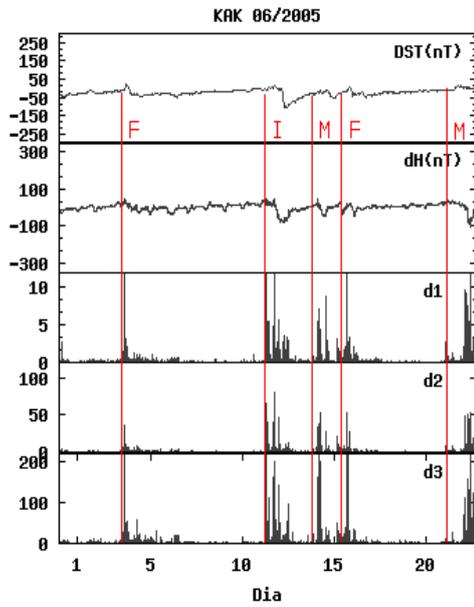
Figura D.11 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês março de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.10 - Identificação de Tempestades: Kakioka Março 2005, DstMin (-65 nT)

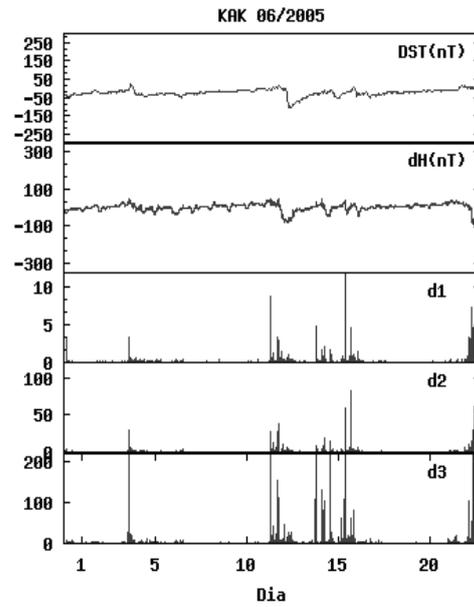
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.11 - Identificação de Tempestades: Vassouras Março 2005, DstMin (-65 nT)

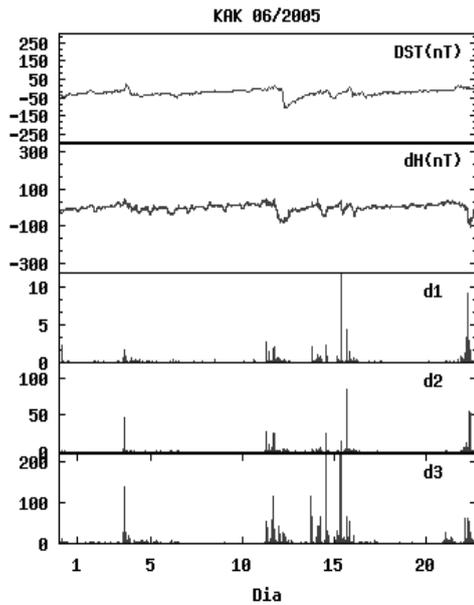
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



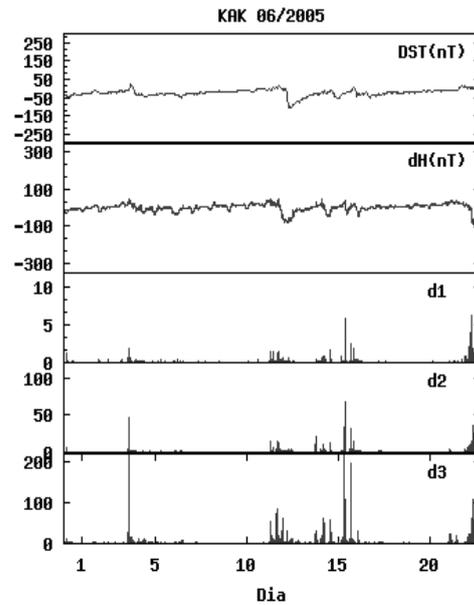
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

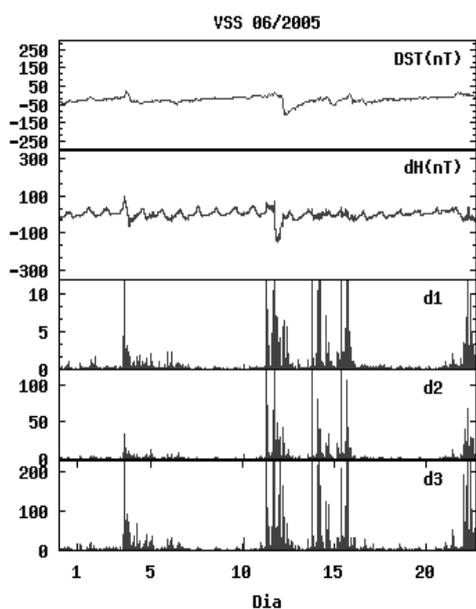


(c) Daubechies de ordem 3

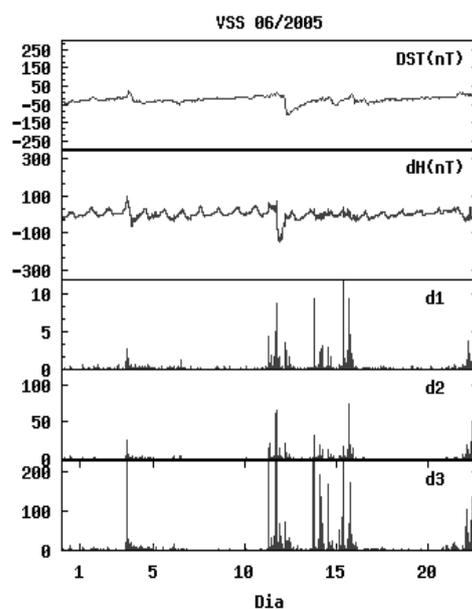


(d) Daubechies de ordem 4

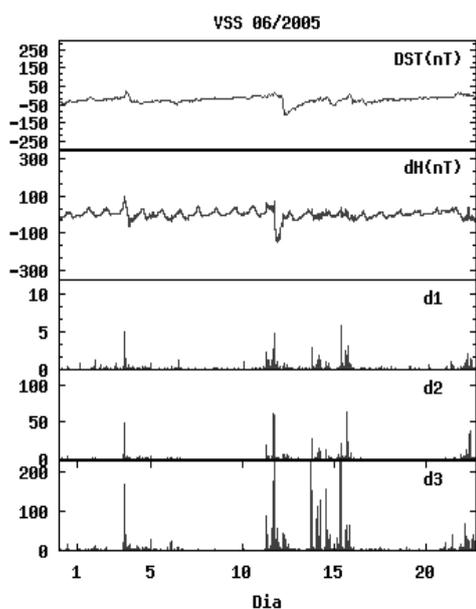
Figura D.12 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês junho de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



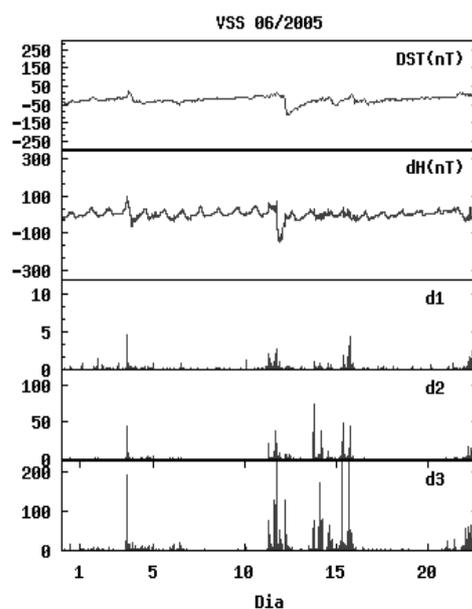
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

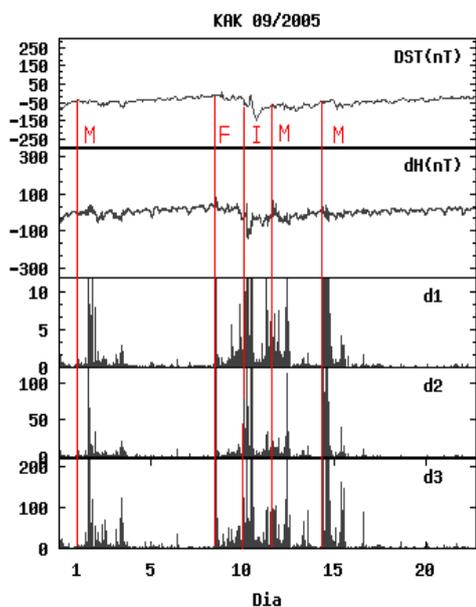
Figura D.13 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês junho de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.12 - Identificação de Tempestades: Kakioka Junho 2005, DstMin (-106 nT)

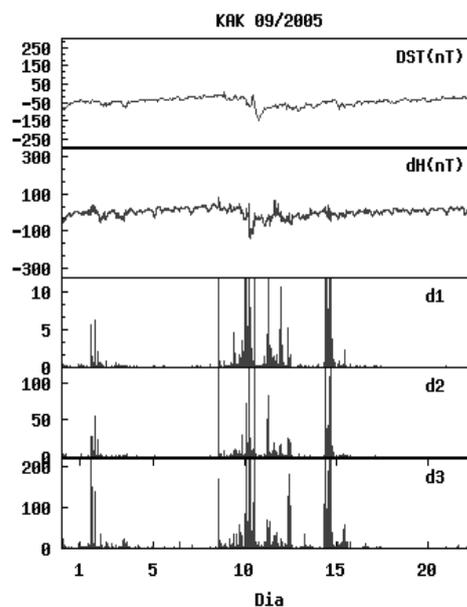
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Moderada | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Intensa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.13 - Identificação de Tempestades: Vassouras Junho 2005, DstMin (-106 nT)

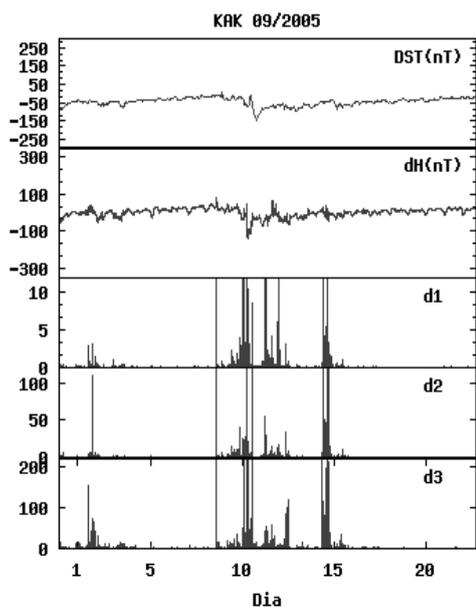
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Moderada | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Intensa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



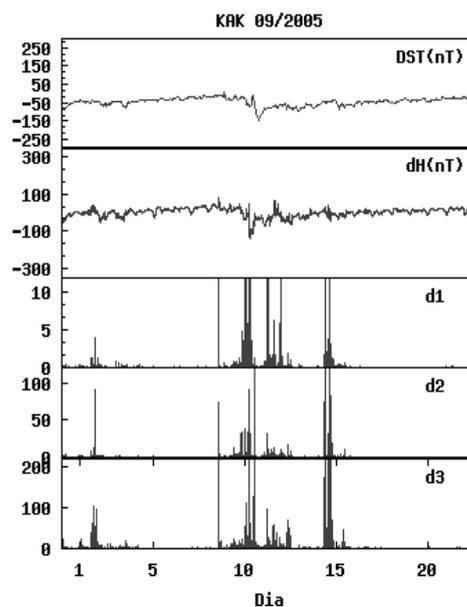
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

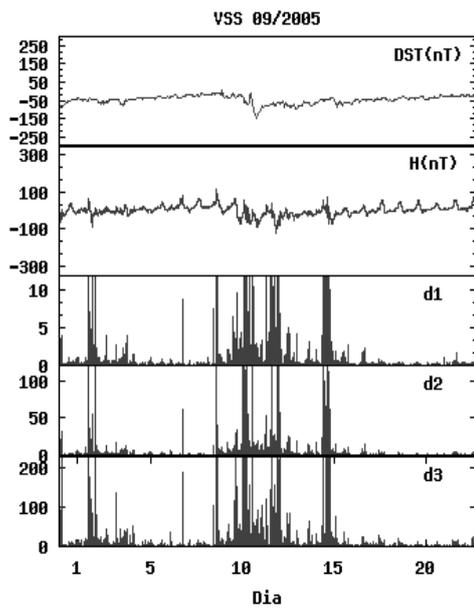


(c) Daubechies de ordem 3

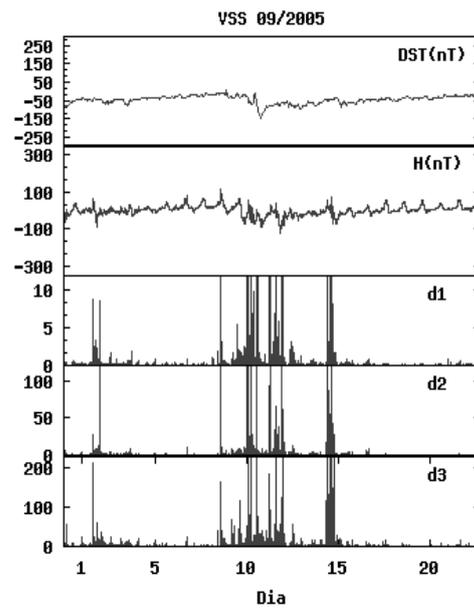


(d) Daubechies de ordem 4

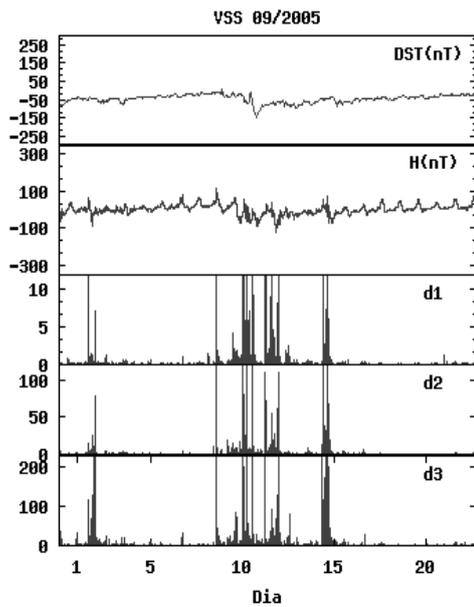
Figura D.14 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



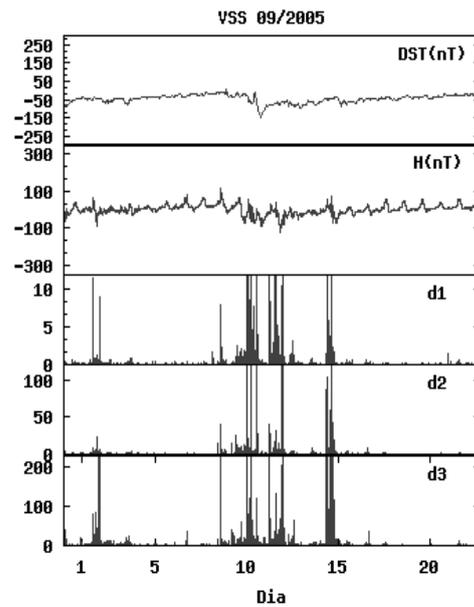
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

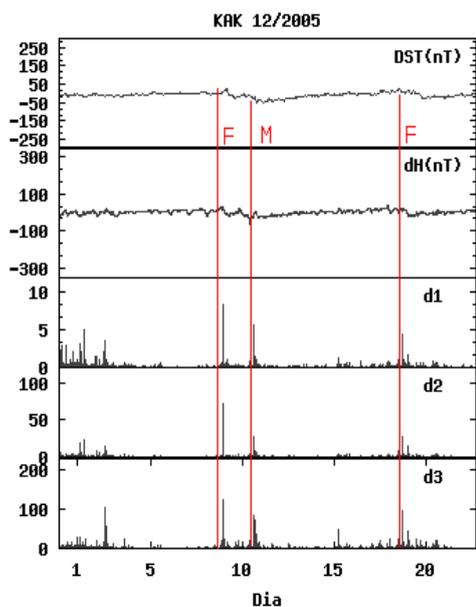
Figura D.15 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.14 - Identificação de Tempestades: Kakioka Setembro 2005, DstMin (-147 nT)

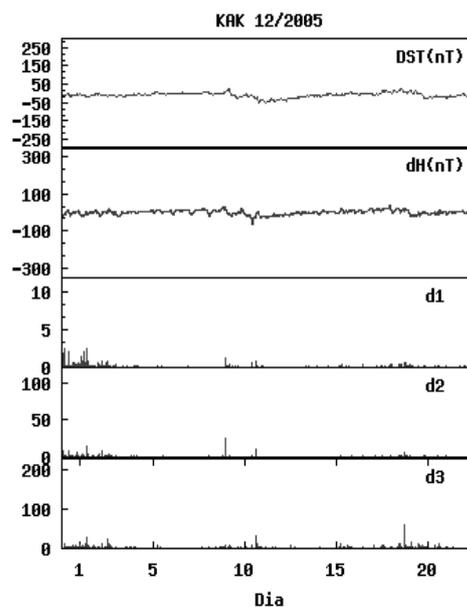
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Moderada | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Intensa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.15 - Identificação de Tempestades: Vassouras Setembro 2005, DstMin (-147 nT)

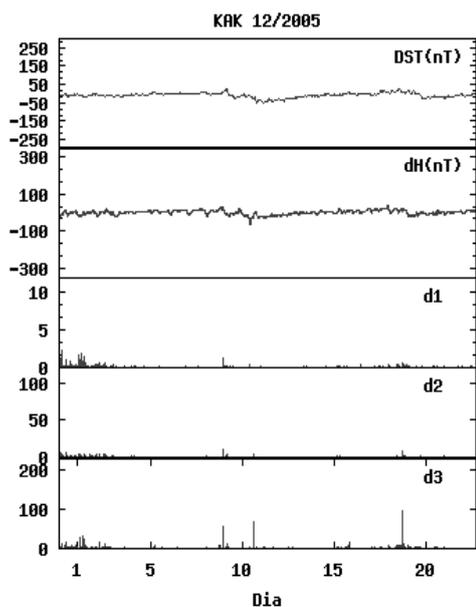
| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Moderada | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Intensa | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |



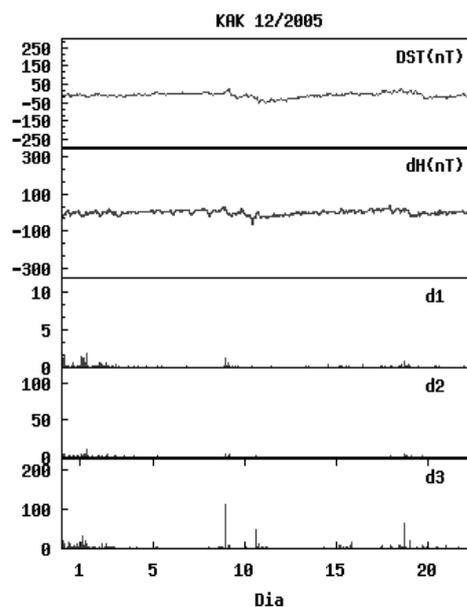
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2

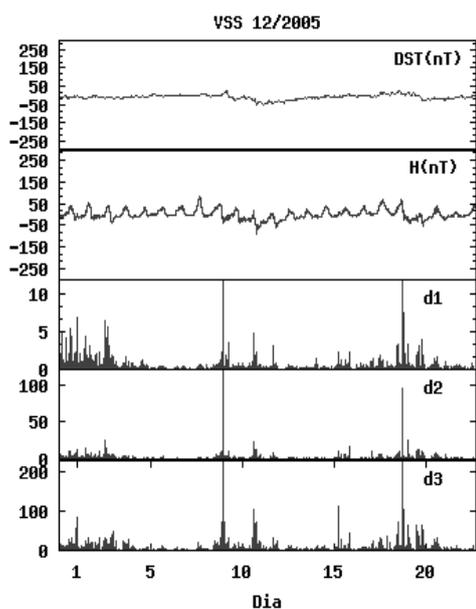


(c) Daubechies de ordem 3

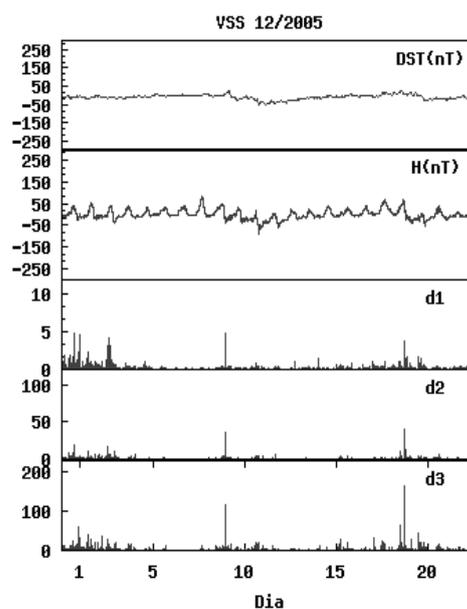


(d) Daubechies de ordem 4

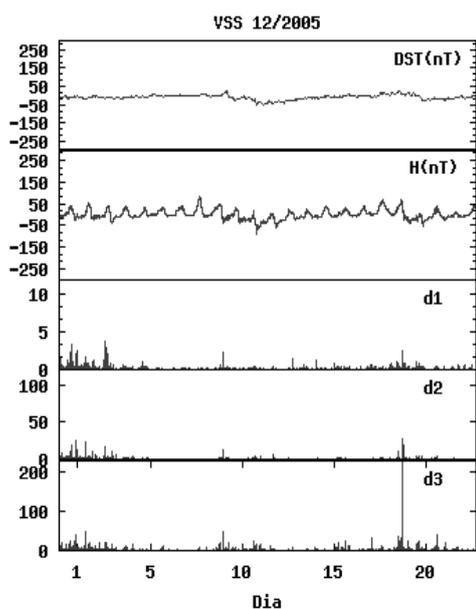
Figura D.16 - Magnetograma da estação de Kakioka e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.



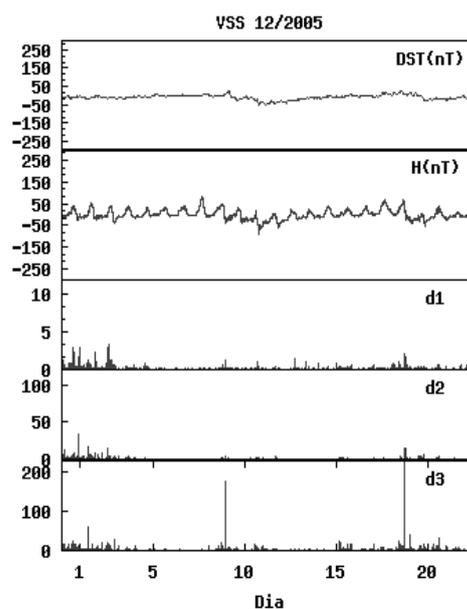
(a) Daubechies de ordem 1



(b) Daubechies de ordem 2



(c) Daubechies de ordem 3



(d) Daubechies de ordem 4

Figura D.17 - Magnetograma da estação de Vassouras e a amplitude quadrada de seus coeficientes wavelets para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e a amplitude dos coeficientes wavelets ao quadrado dos 3 primeiros níveis de decomposição.

Tabela D.16 - Identificação de Tempestades: Kakioka Dezembro 2005, DstMin (-54 nT)

| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Moderada | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.17 - Identificação de Tempestades: Vassouras Dezembro 2005, DstMin (-54 nT)

| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Moderada | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| Intensa | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa I | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Muito Intensa II | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Compressão | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tabela D.18 - Tabulação das Tempestades geomagnéticas - Kakioka

| Intensidade | Tempestades | | | | |
|------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|
| | Dst | Ordem 1 | Ordem 2 | Ordem 3 | Ordem 4 |
| Fraca | 13 | 24 | 17 | 16 | 16 |
| Moderada | 9 | 14 | 14 | 13 | 13 |
| Intensa | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Muito Intensa I | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Muito Intensa II | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Total | 26 | 42 | 35 | 33 | 33 |

Coefficientes Wavelets

Há variações nas amplitudes dos quadrados dos coeficientes wavelets e sua assinatura acima da linha de base na identificação dos distúrbios de acordo com a família da wavelet. Podendo esses valores ser considerados como candidatos naturais a thresholds manuais escolhidos para futuras análises automáticas dessas estações. Acima desses valores de *threshold* não ocorreu a identificação simultânea nesses três níveis de nenhum outro tipo de perturbação que não fosse associados distúrbios em questão. Os valores dos *thresholding* separados por ano/mês das estações de Kakioka e Vasouras encontram-se nas Tabelas D.19 e D.20 respectivamente.

São indicados em negrito onde ocorre os valores mínimos apresentados na Tabela D.19 que sugere como 9.2 para nível 1, 2.5 para nível 2 e 40.1 para nível 3 que não fossem associados aos distúrbios na magnetosfera de interesse nesse estudo.

Tabela D.19 - Coeficientes Wavelets da Estação de Kakioka

| Wavelets de Daubechies Mar-1989 | Coeficientes Wavelet | | |
|------------------------------------|----------------------|-------------|-------------|
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 684.5 | 2162.2 | 4704.5 |
| Ordem 2 | 4704.5 | 826.85 | 826.8 |
| Ordem 3 | 857.3 | 1660.9 | 5221.8 |
| Ordem 4 | 891.8 | 2991.8 | 4913.9 |
| Wavelets de Daubechies Mar-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 12.5 | 22.0 | 87.8 |
| Ordem 2 | 5.1 | 19.3 | 76.5 |
| Ordem 3 | 5.2 | 31.1 | 59.9 |
| Ordem 4 | 6.0 | 18.1 | 58.0 |
| Wavelets de Daubechies Jun-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 165.6 | 504.0 | 913.7 |
| Ordem 2 | 350.5 | 742.3 | 1497.3 |
| Ordem 3 | 564.5 | 774.1 | 1339.4 |
| Ordem 4 | 589.0 | 415.8 | 1756.6 |
| Wavelets de Daubechies Set-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 271.4 | 1069.3 | 1943.8 |
| Ordem 2 | 124.9 | 431.0 | 1477.6 |
| Ordem 3 | 230.1 | 505.1 | 1420.2 |
| Ordem 4 | 241.6 | 558.3 | 1368.0 |
| Wavelets de Daubechies Dez-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 7.2 | 18.0 | 160.2 |
| Ordem 2 | 4.0 | 9.1 | 40.1 |
| Ordem 3 | 7.3 | 9.2 | 47.1 |
| Ordem 4 | 7.7 | 12.7 | 32.1 |
| Wavelets de Daubechies Mar-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 8.0 | 28.1 | 110.2 |
| Ordem 2 | 2.5 | 17.9 | 85.6 |
| Ordem 3 | 3.3 | 12.9 | 55.7 |
| Ordem 4 | 3.4 | 16.2 | 45.6 |
| Wavelets de Daubechies Set-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 367.2 | 2065.7 | 4131.4 |
| Ordem 2 | 714.8 | 1271.0 | 2373.9 |
| Ordem 3 | 1272.2 | 1650.1 | 2613.7 |
| Ordem 4 | 1323.3 | 837.2 | 1182.2 |
| Wavelets de Daubechies Dez-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 8.4 | 72.2 | 126.4 |
| Ordem 2 | 41.5 | 68.1 | 113.1 |
| Ordem 3 | 74.2 | 92.7 | 147.9 |
| Ordem 4 | 77.3 | 47.9 | 114.2 |

Tabela D.20 - Coeficientes Wavelets da Estação de Vassouras

| Wavelets de Daubechies Mar-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
|------------------------------------|----------------------|-------------|--------------|
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 29.6 | 65.6 | 143.6 |
| Ordem 2 | 10.0 | 139.5 | 175.3 |
| Ordem 3 | 7.5 | 126.2 | 123.1 |
| Ordem 4 | 8.9 | 45.4 | 153.6 |
| Wavelets de Daubechies Set-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 673.4 | 2074.8 | 3523.8 |
| Ordem 2 | 230.1 | 1260.0 | 3030.8 |
| Ordem 3 | 344.2 | 518.0 | 2129.8 |
| Ordem 4 | 412.9 | 364.2 | 1072.7 |
| Wavelets de Daubechies Dez-2000 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 14.6 | 49.0 | 240.9 |
| Ordem 2 | 7.9 | 23.8 | 148.6 |
| Ordem 3 | 15.0 | 13.5 | 120.1 |
| Ordem 4 | 20.3 | 14.9 | 47.0 |
| Wavelets de Daubechies Mar-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 85.8 | 136.8 | 347.1 |
| Ordem 2 | 25.1 | 161.5 | 514.8 |
| Ordem 3 | 7.0 | 167.3 | 253.0 |
| Ordem 4 | 7.1 | 89.8 | 155.8 |
| Wavelets de Daubechies Jun-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 63.8 | 244.9 | 863.2 |
| Ordem 2 | 36.9 | 72.8 | 661.6 |
| Ordem 3 | 73.8 | 103.6 | 399.6 |
| Ordem 4 | 79.4 | 73.6 | 329.7 |
| Wavelets de Daubechies Set-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 1824.1 | 3358.2 | 4816.7 |
| Ordem 2 | 1325.0 | 2604.5 | 4773.0 |
| Ordem 3 | 2358.1 | 3286.8 | 4605.1 |
| Ordem 4 | 2453.7 | 1666.8 | 3647.9 |
| Wavelets de Daubechies Dez-2005 | Coeficientes Wavelet | | |
| | Nível 1 | Nível 2 | Nível 3 |
| Ordem 1 | 15.6 | 138.0 | 534.6 |
| Ordem 2 | 300.0 | 552.0 | 1020.8 |
| Ordem 3 | 545.7 | 754.3 | 1193.3 |
| Ordem 4 | 570.6 | 401.1 | 536.7 |

APÊNDICE E: OUTROS TIPOS DE THRESHOLDING

Das análises de todos os períodos verificou-se que, o *threshold* manual foi mais eficaz na identificação dos distúrbios. Nessa sessão apresentam-se os resultados dos demais thresholding estudados. Nesses casos apresentado nas Figuras [E.1-E.16](#), o threshold probabilístico e indicado por P, universal por U, hard H e o soft S.

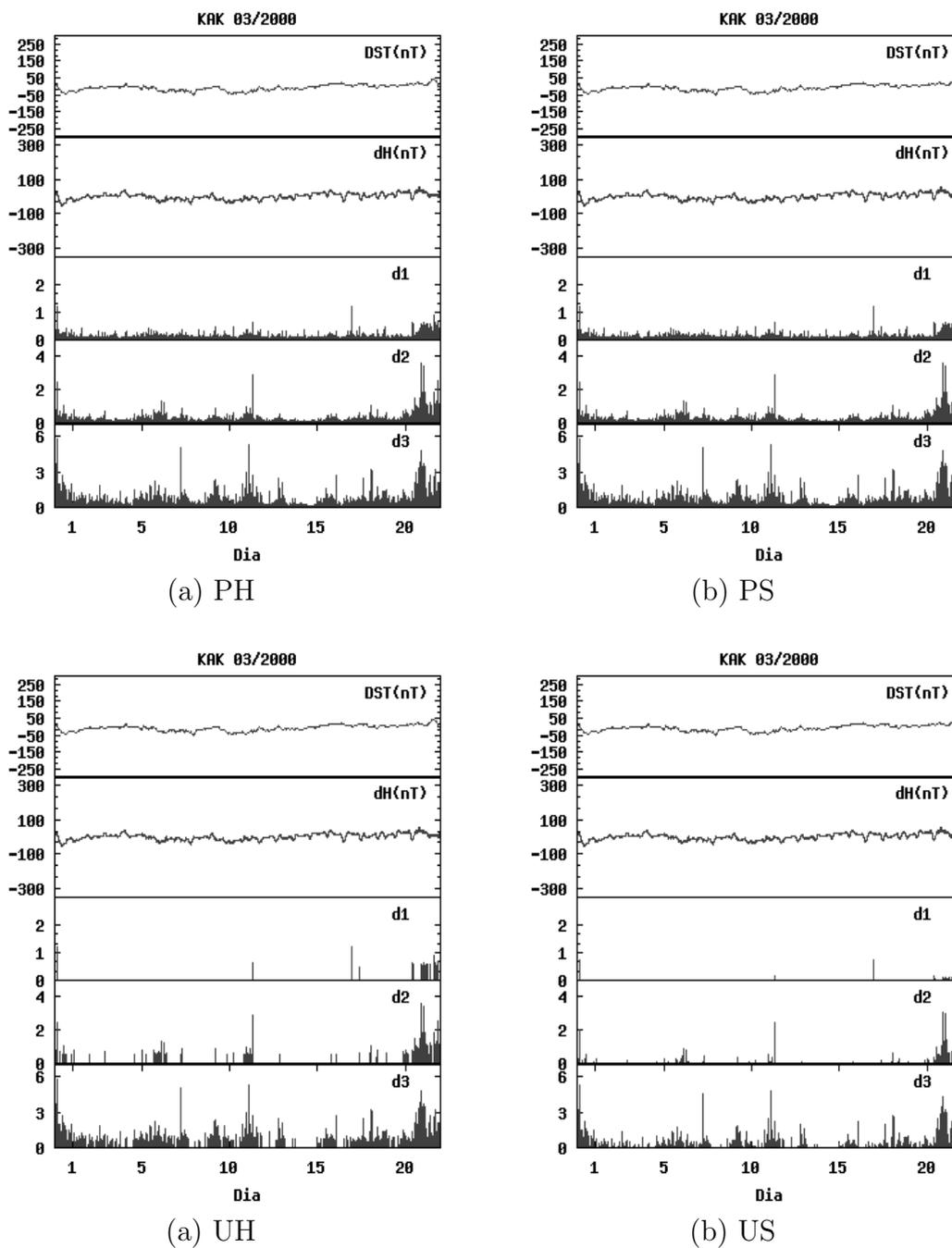


Figura E.1 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês março de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

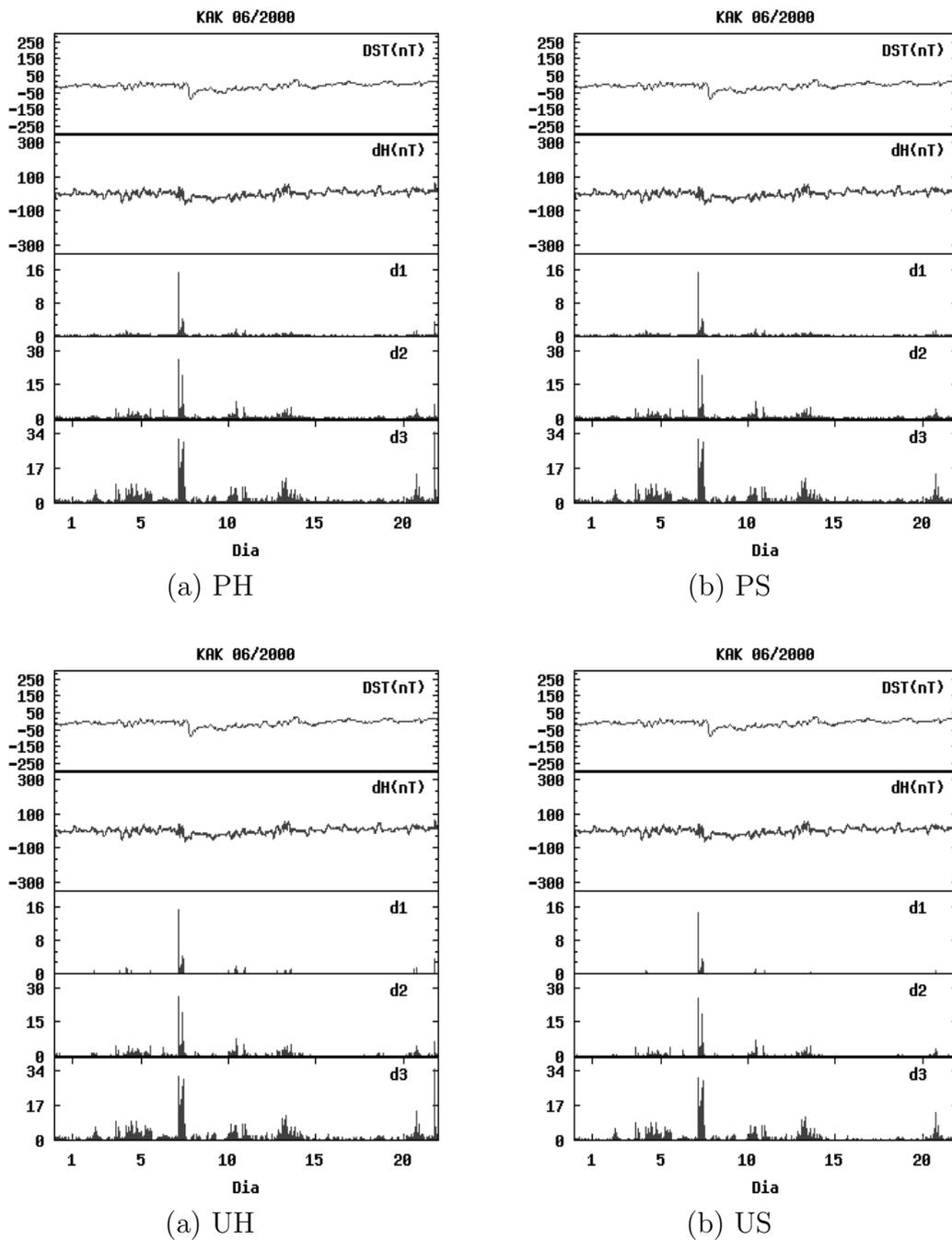


Figura E.2 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês junho de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

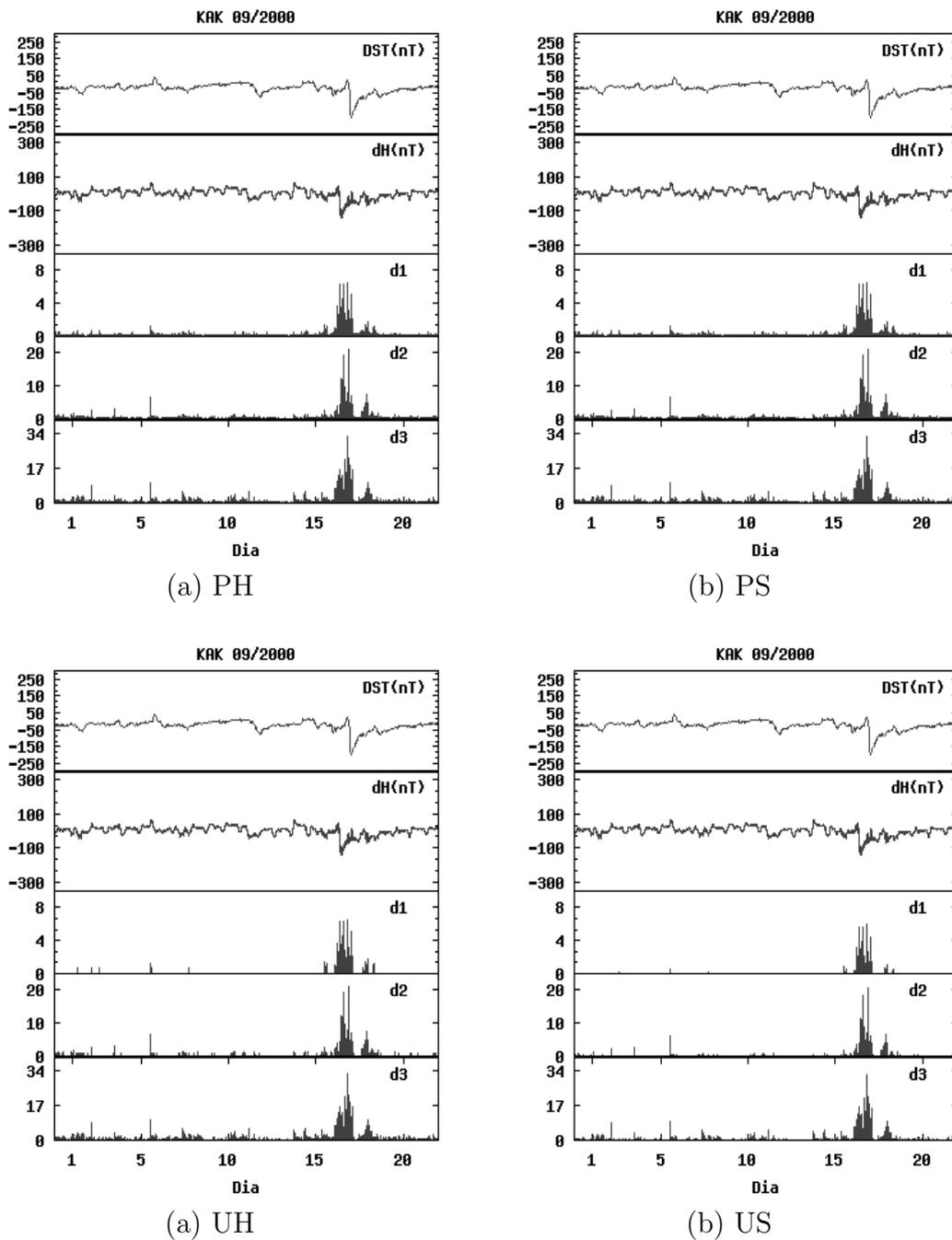


Figura E.3 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

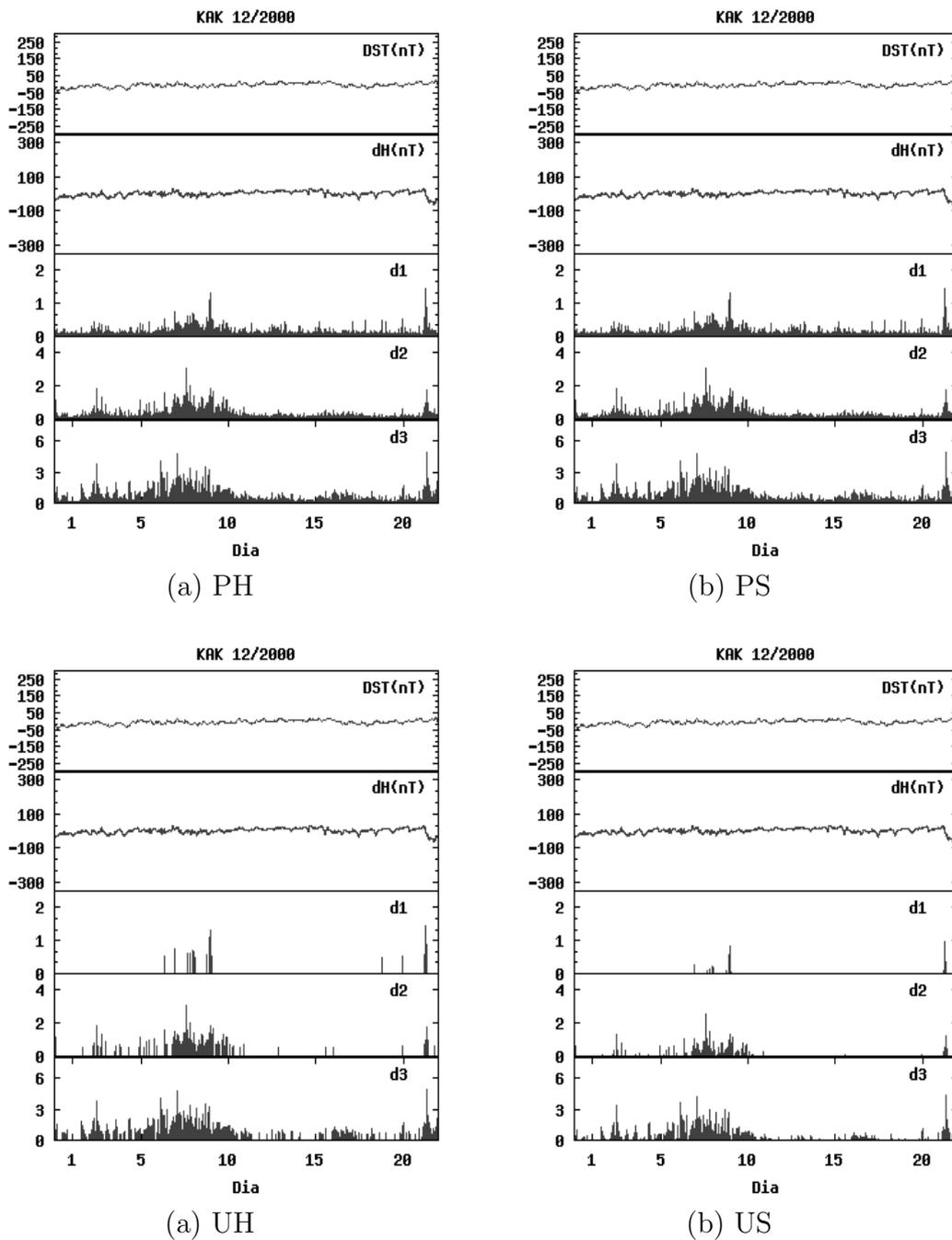


Figura E.4 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

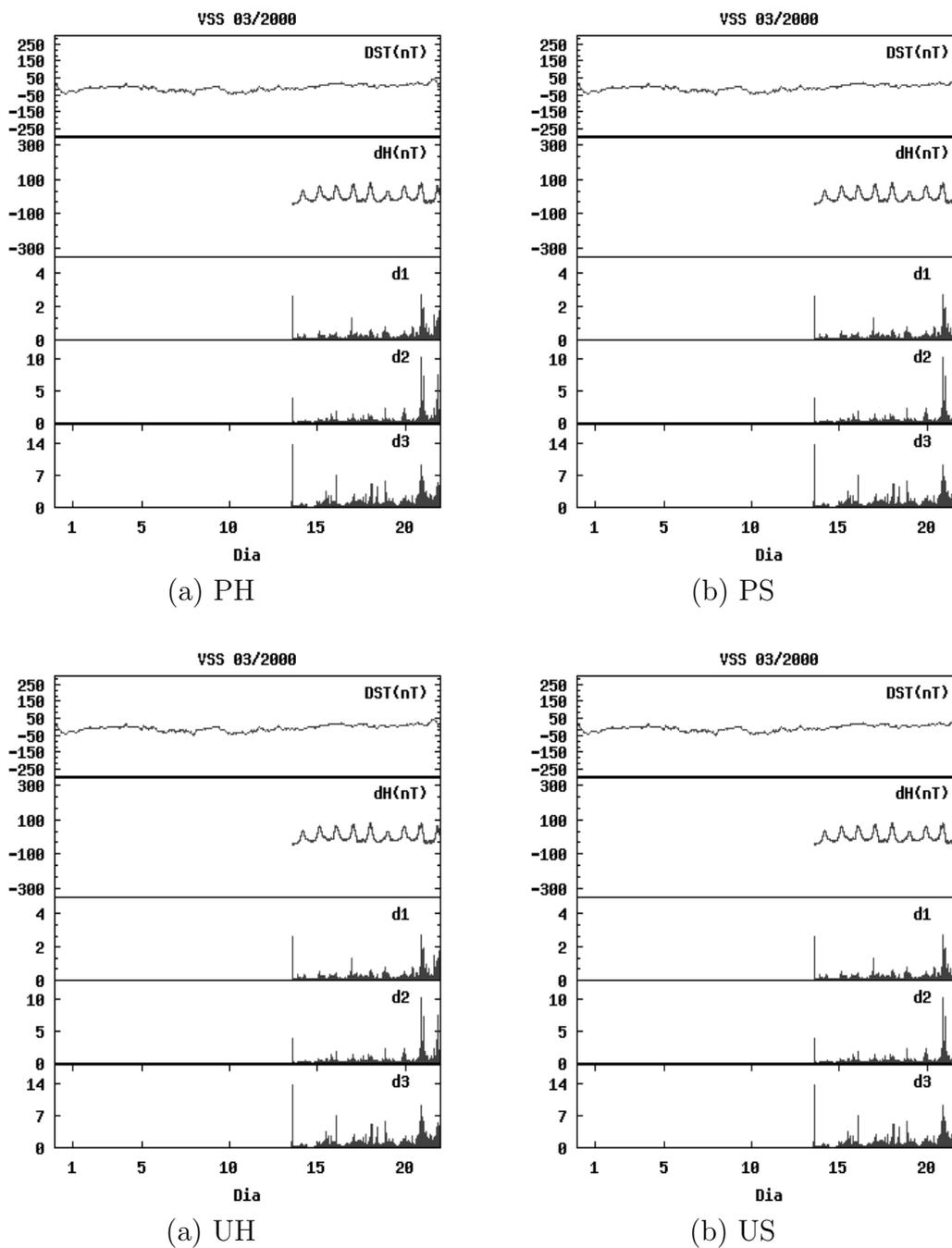


Figura E.5 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês março de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

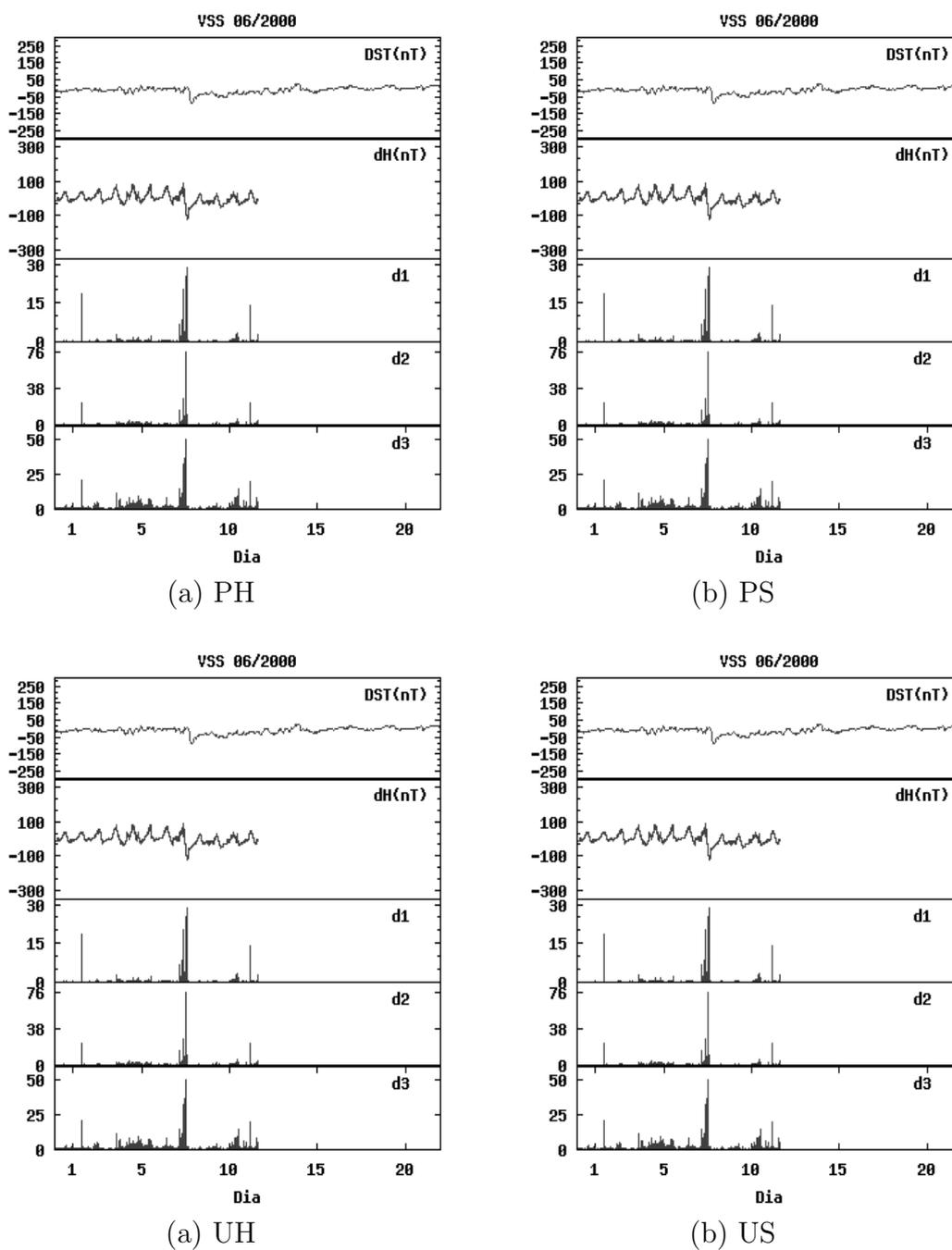


Figura E.6 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês junho de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

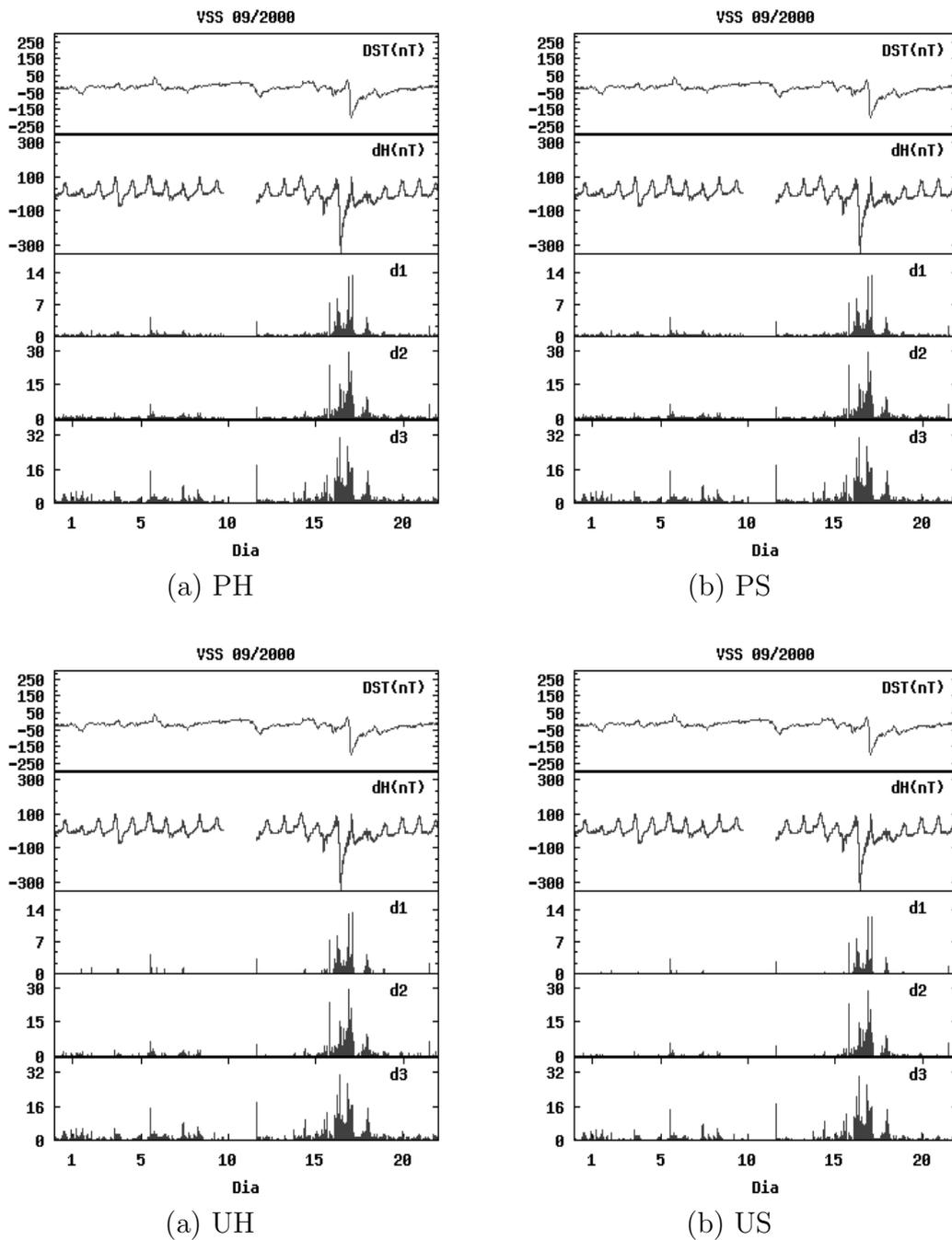


Figura E.7 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

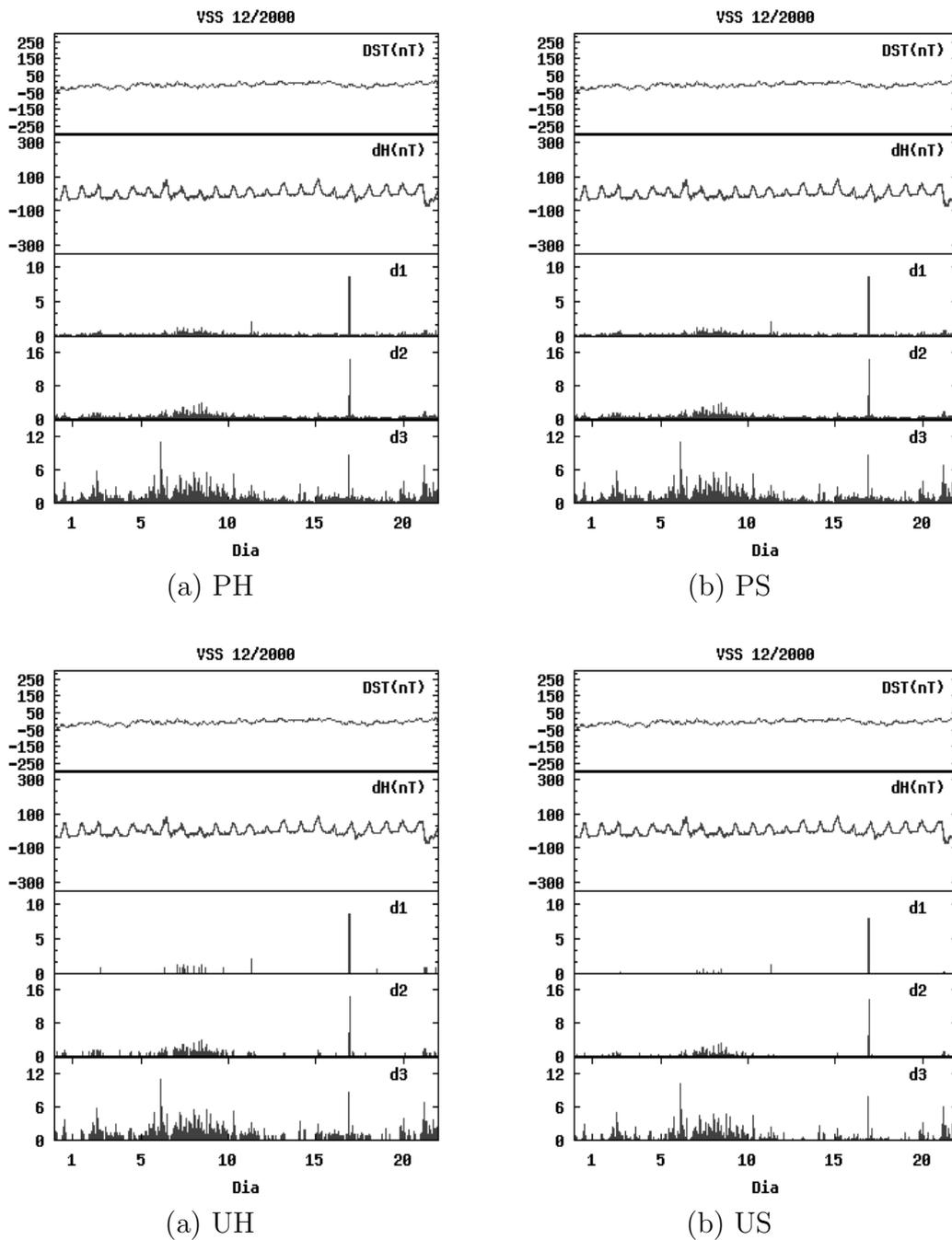


Figura E.8 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2000. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

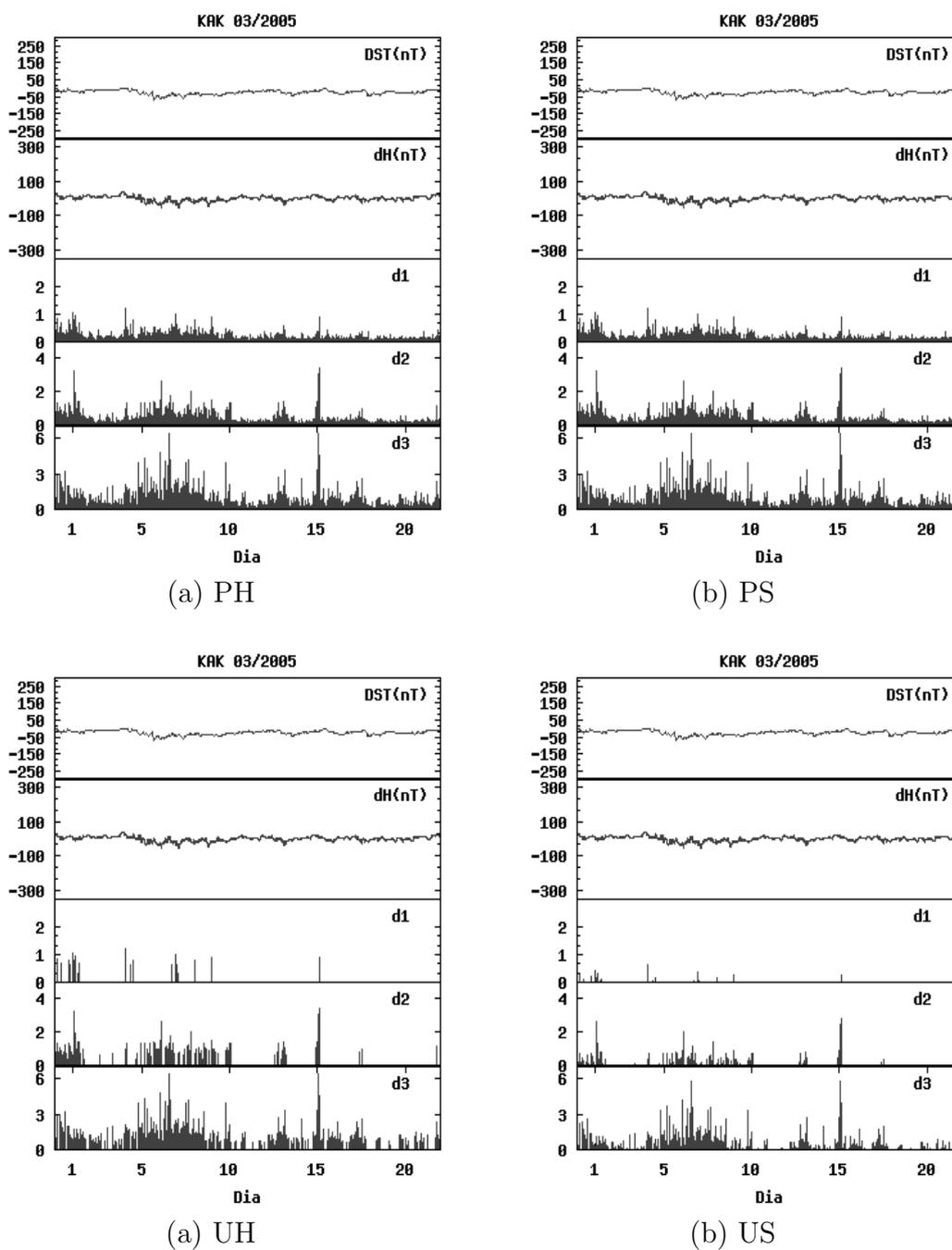


Figura E.9 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês março de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

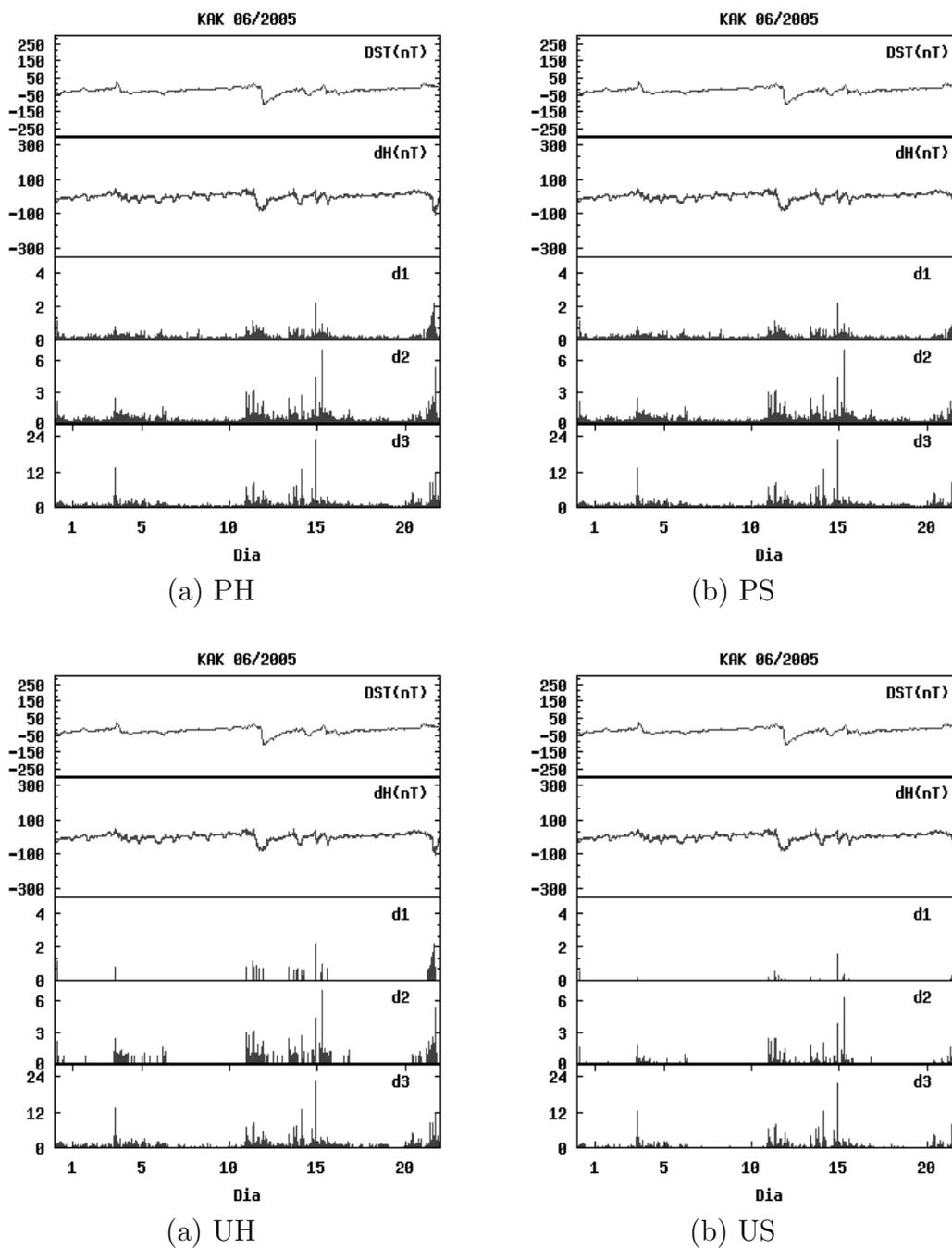


Figura E.10 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês junho de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

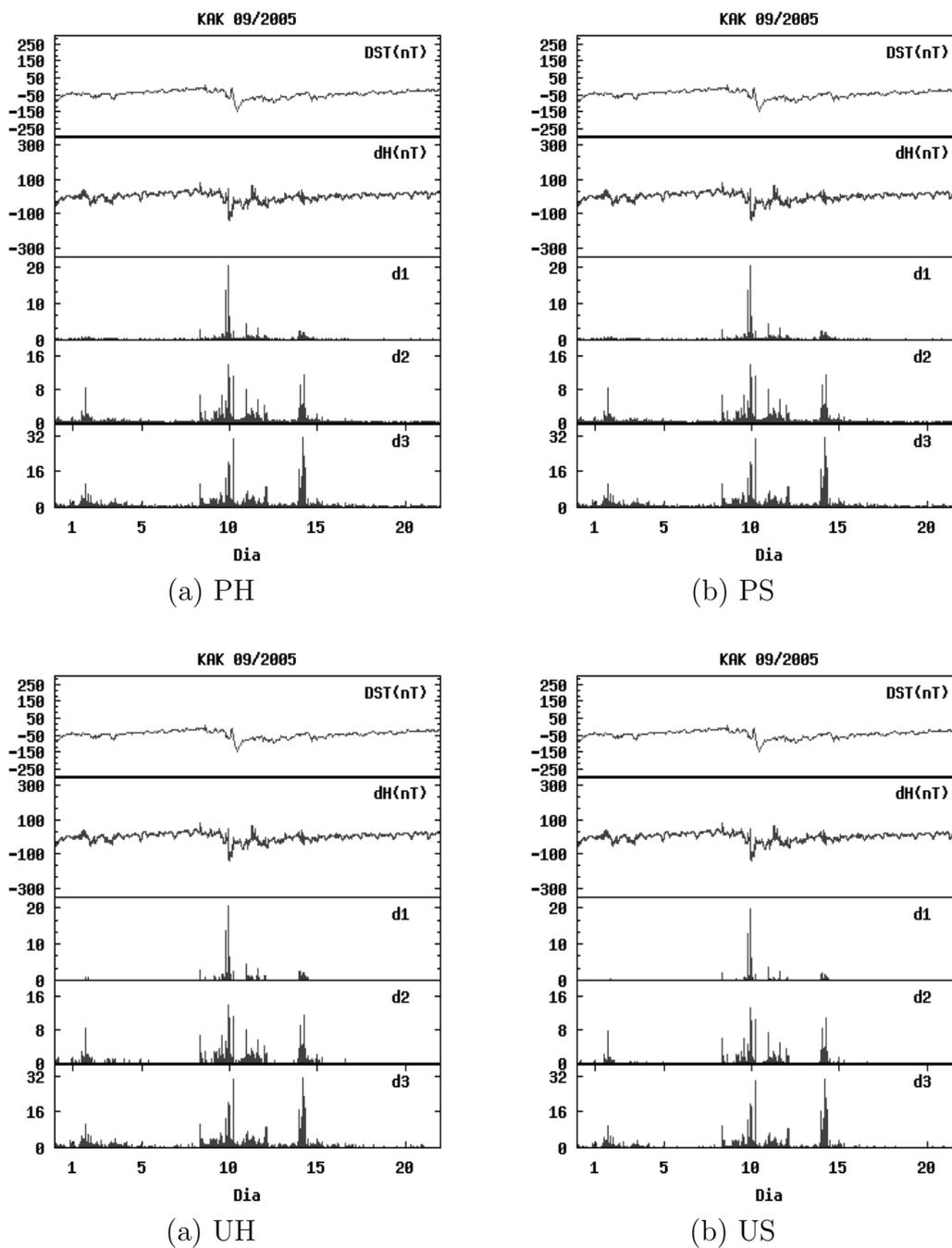


Figura E.11 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

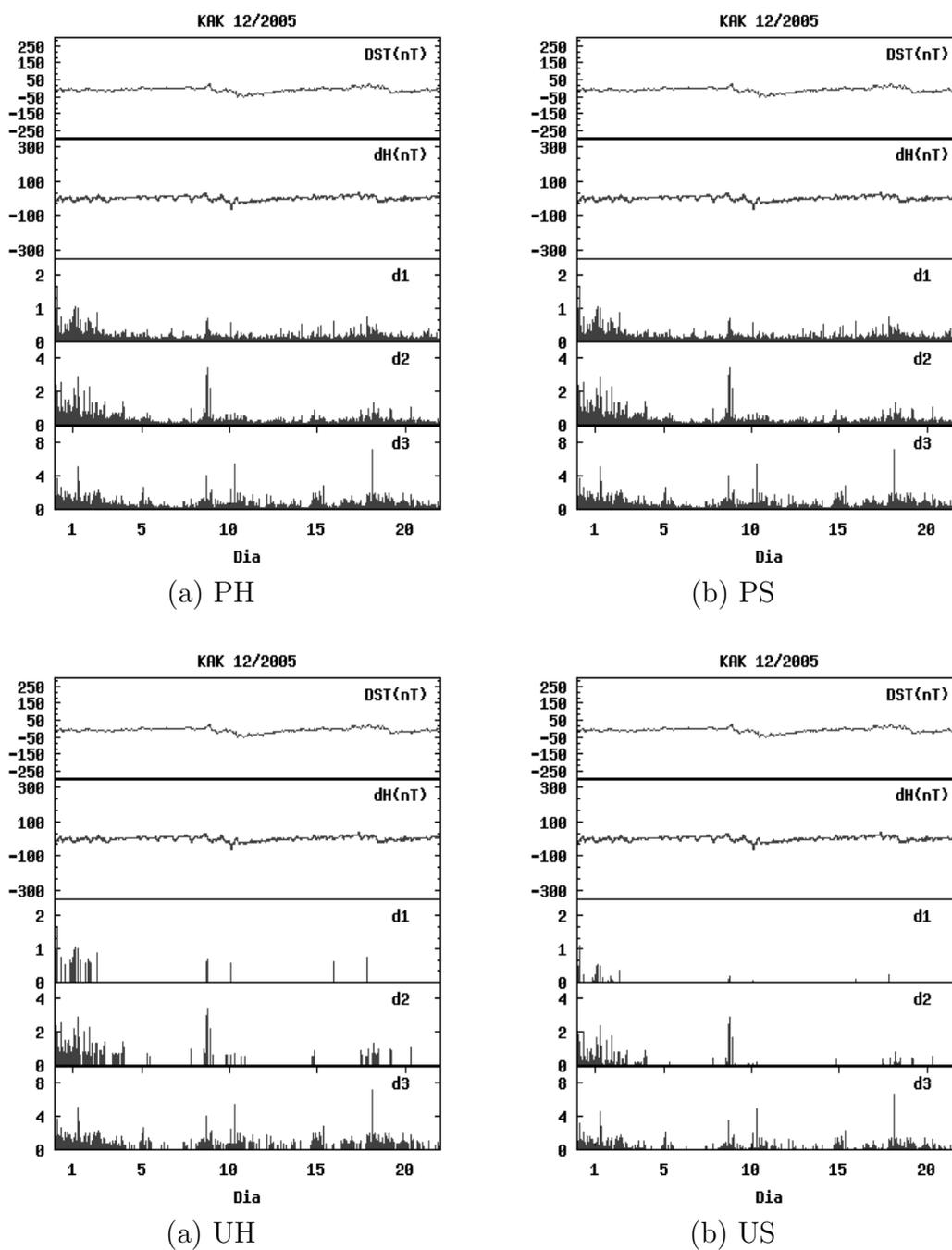


Figura E.12 - Magnetograma da estação de Kakioka aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

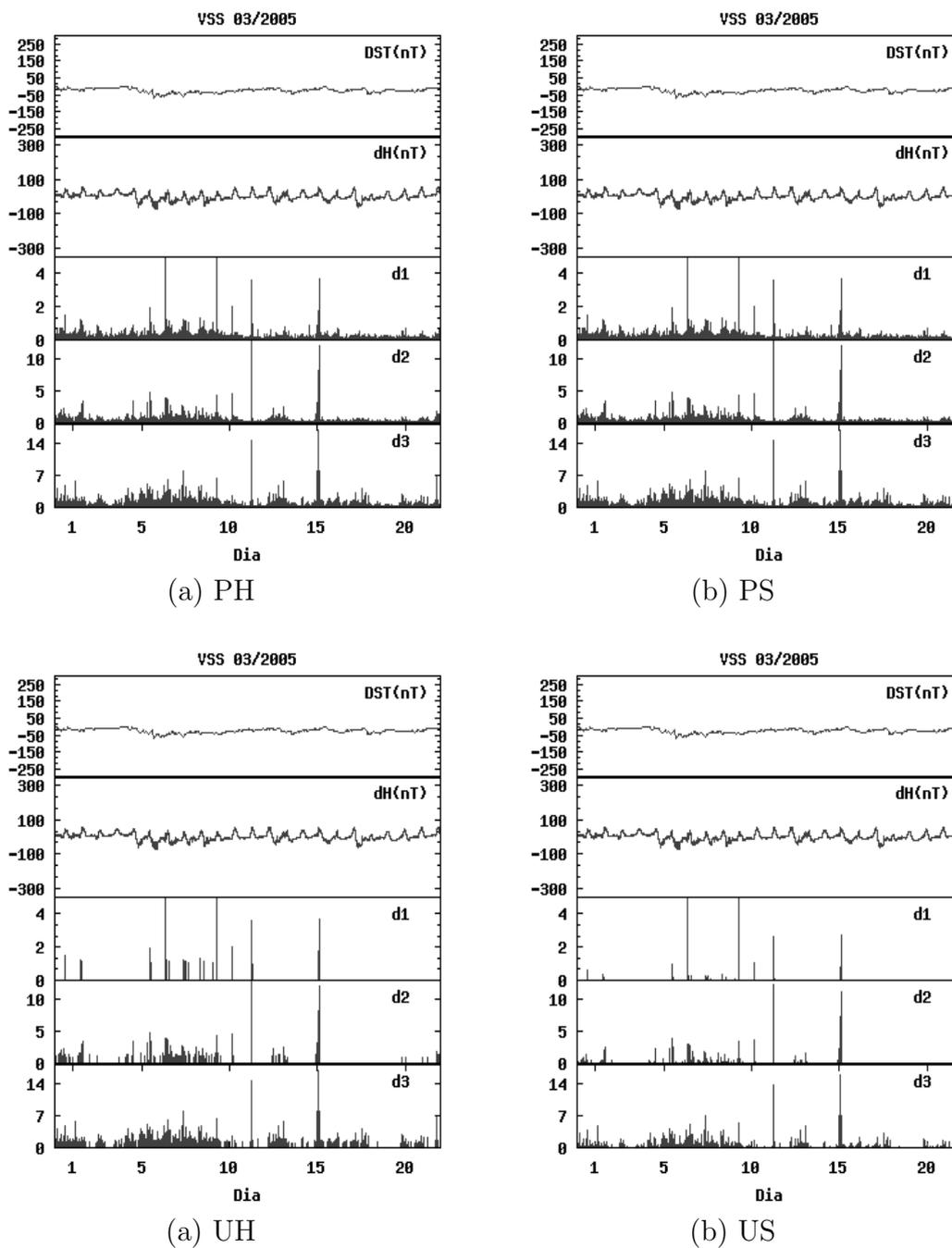


Figura E.13 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês março de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

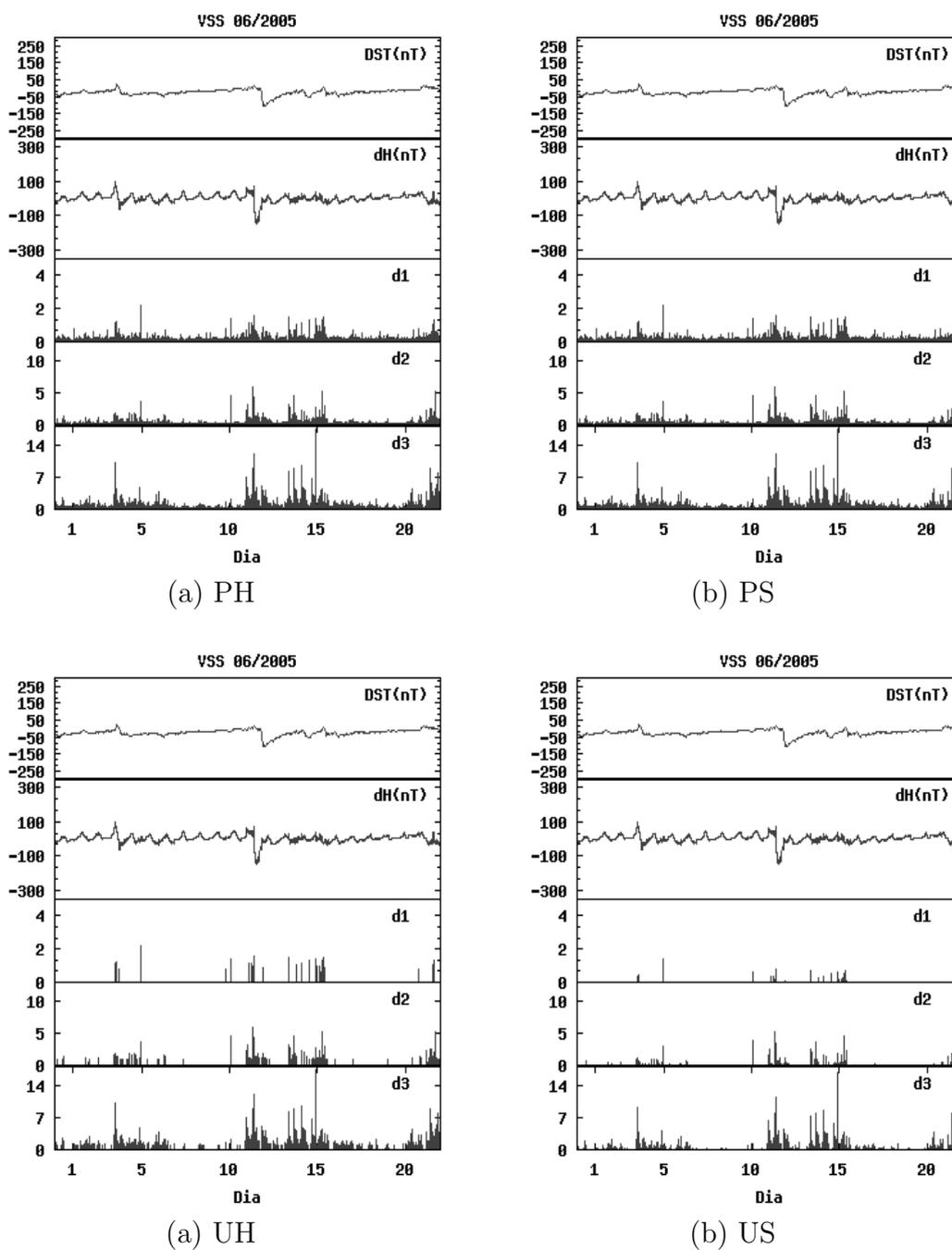


Figura E.14 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês junho de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

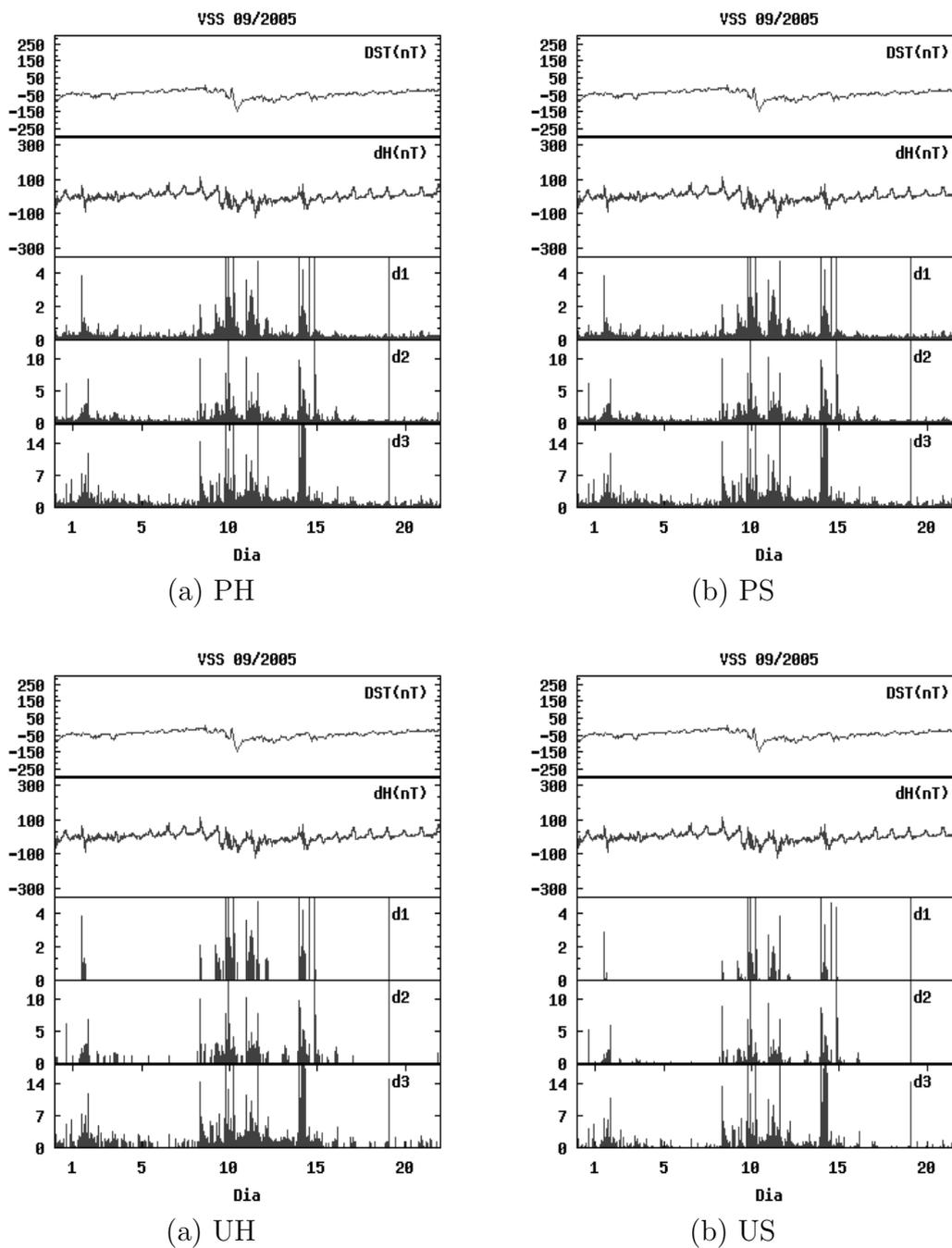


Figura E.15 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês setembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

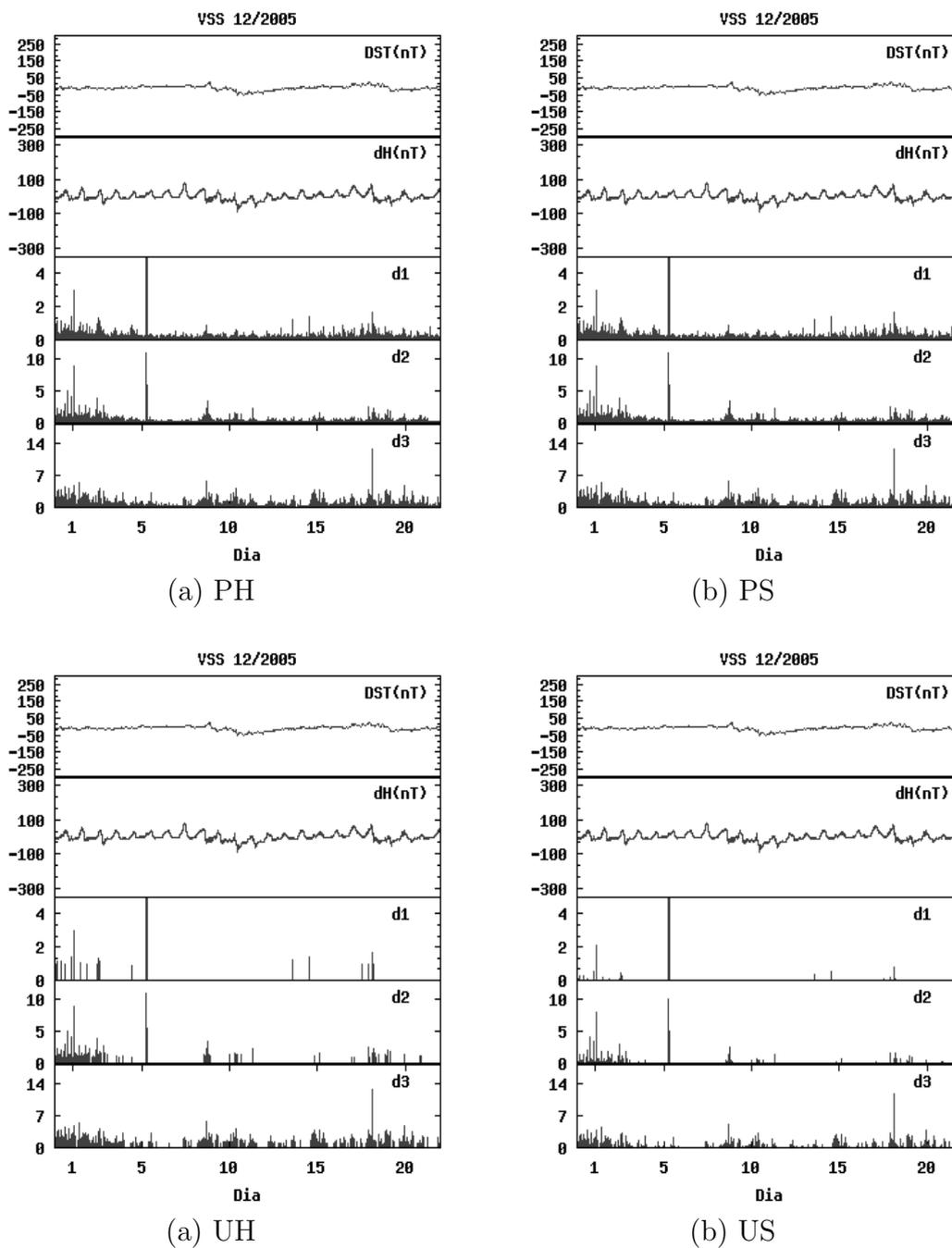


Figura E.16 - Magnetograma da estação de Vassouras aplicado aos *thresholding* Probabilístico hard (PH), probabilístico Soft (PS), Universal Hard(UH) e o Universal Soft (US) para os 22 primeiros dias do mês dezembro de 2005. De cima para baixo nos gráficos apresentam-se, o índice Dst indicando as tempestades para comparação, a variação componente horizontal do campo geomagnético e os 3 primeiros níveis de decomposição.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Constam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.