



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



## **EVOLUÇÃO DO MAPA DIP SIMULADO PELO MODELO IGRF PARA A LOCALIDADE E SÃO LUÍS (MA).**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
PIBIC/INPE – CNPq/MCT**  
Concedido pelo CNPq em 04/08/2005.

**PROCESSO: 105374/2005-2**

**Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida - (INPE, Bolsista PIBIC/INPE –  
CNPq/MCT)**  
E-mail: [pedro@dae.inpe.br](mailto:pedro@dae.inpe.br)

**Dr. Clezio Marcos De Nardin - (Orientador, DAE/CEA/INPE – MCT)**  
E-mail: [denardin@dae.inpe.br](mailto:denardin@dae.inpe.br)

**São José dos Campos  
Julho de 2007**



## **Dados de Identificação**

### **Bolsista:**

Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida  
Curso: Licenciatura em Física  
ETEP - Faculdades

### **Orientador:**

Dr. Clezio Marcos De Nardin  
Divisão de Aeronomia - DAE/CEA/INPE – MCT  
Instituto nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT  
São José dos Campos - SP

### **Colaboradores:**

Laysa Cristina Araújo Resende – ETEP/DAE/CEA/INPE – MCT  
Henrique Carlotto Aveiro – DAE/CEA/INPE - MCT

### **Local de Trabalho/Execução do Projeto:**

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

**SUMÁRIO**

INTRODUÇÃO.....	7
CAPÍTULO 1 .....	8
REVISÃO TEÓRICA.....	8
“New Measurements for Improved IRI TEC Representation (International Reference Ionosphere Workshop 2006).”.....	8
Baixa Ionosfera .....	8
A Parte de Baixo do Perfil de Densidade Ionosférica.....	8
Pico da Camada F .....	9
Porção Superior do Perfil de Densidade Ionosférica.....	10
TEC e GPS .....	10
CAPÍTULO 2 .....	11
INSTRUMENTAÇÃO E FERRAMENTAS MATEMÁTICAS.....	11
1. Sondadores Digitais.....	11
1.1. Dados Coletados .....	12
1.2. Programa de Análise.....	12
2. Magnetômetro .....	13
3. Simulação Numérica .....	14
3.1 O Modelo International Reference Ionosphere (IRI) .....	14
3.1.1. Exemplos de Simulações Realizadas .....	14
3.2. Modelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF) .....	16
3.2.1. Exemplos de Simulações Realizadas .....	16
4. Transformada de Fourier.....	17



CAPÍTULO 3 .....	18
ATIVIDADES COMPLEMENTARES E PUBLICAÇÕES .....	18
Cursos Realizados .....	18
Trabalhos Publicados em Anais.....	18
Trabalhos Submetidos .....	19
CAPÍTULO 4 .....	21
Análise dos Dados Reduzidos.....	21
1. Resultados das Análises dos Dados Simulados pelo Modelo Global IGRF .....	21
CONCLUSÕES .....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

**INDICE DE FIGURAS**

<i>Figura 2.1 – Foto da digissonda de São Luís –MA.</i>	11
<i>Figura 2.2 – (a) Foto da antena transmissora da digissonda. (b) Foto da antena receptora digissonda de São Luís –MA.</i>	12
<i>Figura 2.3 – a. Imagem do ionograma mostrando a Região F sem espalhamento.</i>	12
<i>b. Imagem do ionograma mostrando um espalhamento na Região F.</i>	12
<i>Fig 2.4 - Elementos do vetor magnético</i>	13
<i>Figura 2.5 – Exemplo de saída de dados do modelo IRI para a região de São Luís para o dia 01/01/2003</i>	16
<i>Figura 2.6 - Exemplo de saída de dados do modelo IGRF para a região de São Luís para o dia 01/01/2003.</i>	17
<i>Figura 4.1- Mapa do ângulo dip do campo magnético terrestre em janeiro de 1990. A linha vermelha representa o equador magnético da terra.</i>	21
<i>Figura 4.2- Mapa do ângulo dip do campo magnético terrestre do mês de agosto de 1990 a 2009.</i>	23
<i>Figura 4.3- Análise espectral dos dados de magnetômetro no domínio das frequências por amplitude</i>	24

## INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de agosto de 2006 a junho de 2007. Neste período foram desenvolvidas atividades de estudos teóricos dos temas relacionados com o projeto proposto, para conhecimento e explicação das atividades instrumentais. Este trabalho teve dois objetivos específicos. O primeiro deles era qualificar cientificamente o acadêmico envolvido neste projeto nas áreas do desenvolvimento científico e tecnológico relacionados com as ciências espaciais e atmosféricas. O segundo objetivo era monitorar o comportamento da ionosfera sobre o território brasileiro através de estudos comparativos entre modelos globais, modelos locais e dados reduzidos de sondadores digitais da ionosfera (também conhecido como digissondas) e dados de magnetômetros. Este segundo objetivo tem como motivação a necessidade de desenvolvimento do conhecimento científico sobre os efeitos do Clima Espacial no Ambiente Ionosférico Brasileiro, com ênfase em médias e baixas latitudes, e sobre os modelos existentes que podem servir de bases para o desenvolvimento de ferramentas eficientes de Previsão do Clima Espacial Local. Além disso, foi desenvolvido um trabalho específico com a finalidade mostrar o mapa DIP sobre o território brasileiro através de simulações feitas no modelo IGRF. O enfoque principal deste estudo é na previsão da localização do equador magnético. Este estudo se apresenta de forma estratégica, uma vez que muitos experimentos do INPE que são conduzidos no Observatório Espacial de São Luís (OESLZ-INPE/MCT), região sobre o equador magnético, são dependentes da geometria das linhas de campo magnético. Nesse contexto, efetuou-se um estudo, submetido à apresentação do SICINPE 2007 - Seminário de Iniciação Científica do INPE.

Neste relatório vamos apresentar no capítulo 1 os trabalhos de revisão teórica, a fim de desenvolver os conceitos principais sobre a ionosfera, sobre o modelo IRI e sobre o modelo IGRF. No capítulo 2 vamos apresentar a instrumentação utilizada para o desenvolvimento do trabalho e as atividades relacionadas com a coleta e redução de dados relacionados ao projeto. No capítulo 3 mostraremos um breve resumo para a formação complementar relacionado à participação do bolsista em congressos e palestras. No capítulo 4 apresentaremos alguns estudos realizados a partir dos dados analisados através das simulações do campo magnético terrestre. Finalmente, apresentaremos as conclusões deste trabalho.

## CAPÍTULO 1

### REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão mostrados os trabalhos de revisão. O objetivo destes estudos é sobre avanços em modelagens ionosféricas (determinação da temperatura, determinação do conteúdo eletrônico total, perturbações ionosféricas, densidade eletrônica da baixa ionosfera e determinação da densidade do pico da camada F) e modelagens magnéticas (harmônicos esféricos).

*Space Research today, n° 168, Abril de 2007*

*COSPAR meetings Reports*

*“New Measurements for Improved IRI TEC Representation  
(International Reference Ionosphere Workshop 2006).”*

*Buenos Aires, Argentina, 16 – 20 de outubro de 2006*

O workshop 2006 do IRI foi realizado em Buenos Aires e foi organizado pelo Dr. Mosert com a equipe do CASLEO e com ajuda do grupo da Universidade Nacional de Tucuman em La Plata. Foram reunidos 60 participantes que representaram diversos países. Esse evento foi dividido em 7 principais seções intituladas: Modelagem do TEC (Conteúdo Eletrônico Total), Parte de Cima da simulação, Baixa Ionosfera, Pico da Região F e Parte de Baixo das Simulações, Perturbações Ionosféricas, Dados de Pesquisa para o IRI e Temperaturas. Este encontro foi promovido pela COSPAR (*Committee on Space Research*) e URSI (*International Union of Radio Science*).

#### **Baixa Ionosfera**

L. A. McKinnell (África do Sul) apresentou a nova versão do modelo para região auroral e de baixa ionosfera. Nesse modelo foram incorporados os parâmetros do ângulo zenital solar e o índice Ap com os parâmetros de entrada e foi incluída uma versão especial que roda sem a necessidade de fornecer os valores de absorção. Essa versão está sendo programada para ser incluída no IRI-2006. Frederich (Austrália) introduziu sua primeira tentativa na determinação da densidade eletrônica nas calotas polares, utilizando a técnica NN (*Neural Net*). O modelo alcança a região F e descreve variações com dia do ano, variações de altitude, com os índices Kp e F10.7 e com o ângulo solar zenital. Dadas estas variações, são baseadas em 6 anos de dados de espalhamento incoerente do EISCAT Svalbard e em 371 arquivos das medidas localizadas em Heiss Island. Comparações com o modelo IRI indicam que a extrapolação do IRI nas camadas polares produz valores que correspondem razoavelmente as condições perturbadas.

#### **A Parte de Baixo do Perfil de Densidade Ionosférica**

A maioria dos papers relacionados aos parâmetros B0, B1 e D1 utilizando dados de ionossondas são de origem de estações Européias e Africanas. Os objetivos de longo prazo é trocar a tabela atual que forma o modelo IRI por funções matemáticas simulações àquelas que foram propostas em Pequim (China), para variações sazonais e diurnas dos parâmetros. Reinisch e Huang notaram variações bruscas da densidade eletrônica na região F1 ionosférica devido a descontinuidade do modelo para espessura D1 da camada F1 e foi sugerido melhorias. Pesquisadores Italianos e Cubanos

apontaram que, em alguns casos, a parte de baixo do perfil da densidade eletrônica observada em baixas latitudes são bastante subestimados pelo IRI a ponto de afetar o Conteúdo Eletrônico Total (TEC). Correções para os problemas serão um importante elemento da nova iniciativa de modelagem B0.

### **Pico da Camada F**

Atualmente o IRI inclui duas opções para a frequência crítica da Camada F2 (foF2), o modelo CCIR-67 é recomendado para o continente e o modelo URSI-88 para áreas oceânicas. Grande volume de dados de ionossonda foram acumulados desde a criação de modelos que foram construídos e a equipe do IRI tem encorajado esforços para que se estabeleça melhorias do modelo para todo o globo. Oyeyemi e McKinnell apresentaram o primeiro resultado de tais tentativas de modelagem. Eles treinaram uma rede neural (NN – Neural Net) com foF2 para 85 estações globais cobrindo os anos de 1976 a 1986 e 1995 a 2005. Os dados foram obtidos através NGDC-SPIDR, UML-DIDBase, e IPS-Services. Os parâmetros de entrada foram dia do ano em UT, ângulo zenital solar, latitude geográfica, inclinação magnética, declinação e índice solar magnético e índice solar. Os primeiros resultados foram muito promissores e indicaram uma melhor performance do NmF2 que o CCIR e URSI do atual modelo IRI. Os autores pediram mais dados para a geração de melhorias adicionais no modelo e foram prometidas mais entradas para as ionossondas das estações brasileiras e sondadores de tópo. O primeiro problema dos esforços da modelagem foram as qualidades dos dados com problemas de longo prazo gravados pelas ionossondas. O grupo IRI contatou o NGDC para apontar problemas específicos com dados de ionossondas vindos do Sistema SIPDR. Representantes do NGDC relataram que muitos desses problemas foram resolvidos ou têm sido trabalhados ativamente. Pesquisadores Argentinos tem estudado dados de 14 estações da América Central e do Sul e descobriram que o foF2 mínimo ao nascer do sol em é freqüentemente deslocado em 1 ou 2 horas comparado com o valor do foF2 dos modelos CCIR e URSI. Uma causa comum pode ser o uso de setores com hora local ao invés de usar horas solares local para dados de ionossonda que são usados no desenvolvimento de mapas do CCIR e URSI.

Jonas Rodrigues de Souza, Mangalathayl Ali Abdu e Inês Staciari Batista (Brasil) apresentaram uma nova versão para o espalhamento da camada F, uma ocorrência probabilística do modelo para longitudes brasileiras. O novo modelo usa polinômios de Bernstein como função base, uma alta resolução com atividade solar e supõe latitudes simétricas em relação ao equador magnético. Comparações com medidas durante a campanha COPEX mostrando boa correlação. Essa última versão do modelo fará parte do IRI 2006. O grupo pretende estender esse modelo para longitudes usando dados de sondadores de tópo, especialmente do sub-continente indiano.

Esforços continuam para incluir uma descrição de variações no modelo IRI. Estendendo esses estudos para as latitudes da Antártica com dados da estação da Argentina foi encontrada uma grande variação relativa no inverno. O grupo ionosférico do Instituto de Geofísica e Astronomia em Havana atuaram muito nessa área usando banco de dados de ionossonda global. B. Lazo apresentou um trabalho da atividade solar desse grupo e um sumário dos trabalhos sobre esta variabilidade das variações de seus trabalhos. Onde melhora a qualidade dos arquivos do SPIDR que será de grande benefício.

## **Porção Superior do Perfil de Densidade Ionosférica**

Com a disponibilidade do TEC em tempo real de muitos GPS, atualizações das medidas do IRI são um tópico de grande interesse. Pesquisadores Italianos sugerem procedimentos de “injeção” de ajustes do IRI usando o TEC para medidas de valores efetivos do índice solar. Pesquisadores Argentinos apresentam um esquema de dedução *Vary-Chap* de parâmetros para perfil de tópo por combinação de dados de GPS e ionossondas. A aproximação *Vary-Chap* foi introduzida por Reinisch, Nsumei e Huang e representa o perfil de tópo com a modificação Chapman – Function assumindo uma escala variável de altura. Eles também apresentam os mais recentes resultados do grupo UML incluído variação sazonal e latitudinal do *Vary-Chap* deduzido dos parâmetros dos dados do sondador de tópo ISIS. Um dos parâmetros *Vary-Chap* é a escala de altura para o pico da camada F. Altadill (Espanha) apresentou um modelo empírico para esse parâmetro baseado nos valores dos dados da digissonda Ebro durante um ciclo solar. Escalas de alturas obtidas com ionossonda de Grahamstown foram estudadas por Nambala e McKinnell e Oyeyemi, os quais encontraram que a escala de altura é maior no verão e menor no inverno, alcançando o máximo diurno durante o meio-dia e exibindo uma correlação muito boa com o parâmetro B0. Garner desenvolveu um trabalho com uma análise completamente detalhada do grande banco de dados DMSP das medidas de densidades eletrônicas em 850 km de altura.

## **TEC e GPS**

M Fernandez, Juan e Sanz descreveram técnicas para estimar escala-média (período menor a 200 minutos) propagando distúrbios ionosféricos (MSTIDs) de medidas de GSP e uma primeira estimativa da probabilidade de ocorrência do MSTIDs. Mapas de VTEC para a América do Sul são produzidos de hora em hora pelo laboratório GESA na Universidade de La Plata usando dados que estão disponíveis no GNSS.

Dados de Ionossonda e GPS do Brasil mostram que o IRI subestima a intensidade EA e a meia noite o TEC no setor brasileiro (M. A. Abdu - Brasil) para todos os níveis de atividade solar. Fuller, Araujo e Crodrescu estimaram que o nível da rede de comunicação dos receptores GPS de solo de dupla-frequência, com uma incerteza de 2 a 4 traços do TEC na determinação do tempo real. T. Garner descreveu no ARL:UT uma caixa de ferramentas GPStk (GPS toolkit) e ARL's (Modelo de Assimilação de dados Ionosféricos em 3 dimensões) que aceita dados dos receptores de GPS: do solo, do satélite, de sinais de advertência, do TOPEX, de medidas *in situ* e de ionossondas. Ele também apresenta os primeiros resultados de sinais de advertência lançados pelo COSMIC, adicionando medidas de TEC que são melhores usadas para os estudos de mudanças no TEC. Pulinets estudou respostas do TEC GPS dos pulsos positivos do Dst (erupção solar, correntes da magnetopausa), notado estranhos desvios positivos maiores que 50%.

## CAPÍTULO 2

### INSTRUMENTAÇÃO E FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

Neste capítulo serão descritos características dos sondadores digitais (digissondas), os quais foram utilizados para a realização deste estudo. Sobre esse equipamento serão descritos alguns detalhes sobre seu funcionamento, será apresentada uma breve explicação sobre os dados coletados e sobre o programa de análise de dados. Também serão descritos os simuladores utilizados para estudos comparativos como o modelo IRI e o Modelo IGRF. Outro instrumento que será comentado neste capítulo será o magnetômetro. Vamos também apresentar a formulação matemática da transformada de Fourier usada para uma análise espectral nos dados de magnetômetro.

#### 1. Sondadores Digitais

O Radar de Sondagem Ionosférica Digital (figura 2.1) é um tipo de radar que emite pulsos de energia eletromagnética em frequências variáveis entre 0.5 MHz a 30 MHz, com potência de pico da ordem de 10 kW e potência média em torno de 500 W. A operação deste equipamento tem como objetivo principal fornecer dados para a análise do comportamento da densidade de elétrons das camadas E e F da ionosfera.



Figura 2.1 – Foto da digissonda de São Luís –MA.  
Fonte Cunha Neto (2006)

O sistema integrado consiste de um receptor, um transmissor, uma chave de antenas, computadores, periféricos, antenas transmissoras (figura 2.2 a) e receptoras (figura 2.2b) que utilizam pulsos de alta frequência transmitidos verticalmente para a camada ionosférica através de uma antena transmissora tipo Delta, com cargas resistivas de 600 Ohms com derivação central, e recebe os sinais refletidos através de quatro antenas receptoras tipo *turnstyle*, onde após a recepção os sinais são gravados e processados,

mostrando os parâmetros ionosféricos e perfil da densidade de elétrons através de ionogramas.



Figura 2.2 – (a) Foto da antena transmissora da digissonda. (b) Foto da antena receptora digissonda de São Luís –MA.  
Fonte Cunha Neto (2006)

### 1.1. Dados Coletados

Os dados coletados pela digissonda são, essencialmente, ecos do sinal refletidos pelas camadas ionosféricas. A seqüência destes ecos recebidos, organizado adequadamente, produz o um registrado denominado ionogramas (Figura 2.3), gráficos da variação da altura virtual de reflexão em função da frequência do sinal emitido. O software usado para a sua interpretação é o *ARTIST*. Anomalias como as bolhas de plasma são caracterizadas por espalhamentos nos traços da região F (*Spread F*). O aparecimento de bolhas de plasma tem influência direta nas comunicações transionosféricas. As bolhas podem causar degradação do sinal que as atravessa, provocando erro de interpretação de sinais recebidos ou até a perda de sinal.

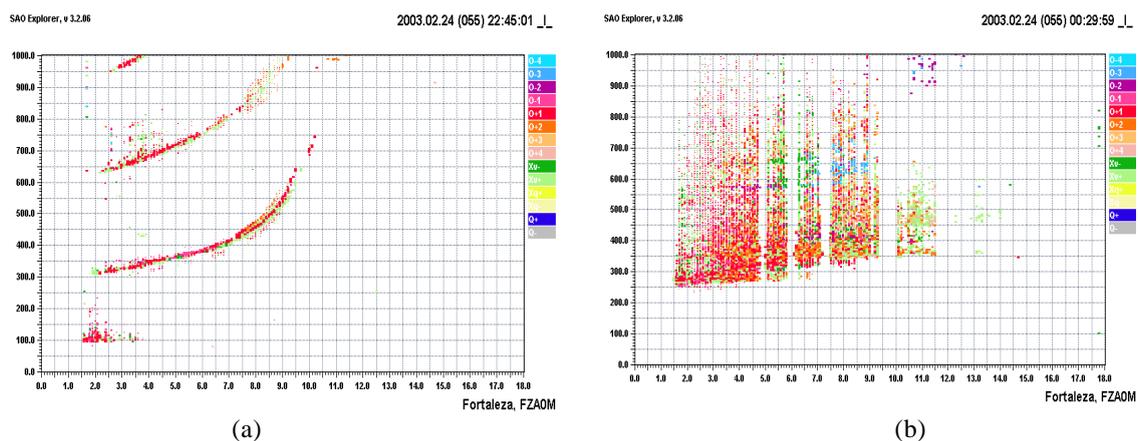


Figura 2.3 – a. Imagem do ionograma mostrando a Região F sem espalhamento.  
b. Imagem do ionograma mostrando um espalhamento na Região F.

### 1.2. Programa de Análise

O programa de análise utilizado é o *SAO-Explorer* (SAO-X). Este programa é o responsável pela interpretação dos sinais recebidos pelos sistemas receptores e sua posterior organização em forma de ionogramas, doravante denominados dados brutos.

Os dados brutos que o grupo de pesquisas em ionosfera da nossa divisão possui estão arquivados em dois formatos básicos. Os dados mais antigos estão encriptados no formato denominado TAP. Este formato contém, além dos dados básicos, a informação da interpretação automática feita pelo programa *Artist*. Modernamente, os dados brutos são encriptados no formato denominado GRM. Neste formato, a interpretação automática é gravada em um arquivo em separado dos dados brutos. Alguns dos parâmetros ionosféricos fornecidos pelo programa *Artist* a partir do ionograma, os quais são usados para neste projeto estão listados a seguir:

- foF1    frequência crítica da onda ordinária da camada F1;
- foF2    frequência crítica da camada F2. É a frequência máxima de reflexão da onda eletromagnética na ionosfera;
- h'F     altura virtual mínima da camada F: este parâmetro representa a altura da base da camada F da ionosfera, sem levar em conta o atraso de propagação da luz no meio magneto iônico, e é obtido através de leitura direta nos ionogramas;
- h'F2    altura virtual mínima do traço ordinário da camada estável mais alta na região F;
- hpF2    é uma estimativa da altura do pico da camada F2 obtida a partir de uma aproximação parabólica para a forma dessa camada; e
- hmF2    altura do pico da camada F.

## 2. Magnetômetro

No OESLZ estão instalados dois magnetômetros do tipo *fluxgate* os quais monitoram o campo magnético e suas flutuações nos sistemas mais utilizados: coordenadas geográficas (**X**, **Y**, **Z**) e coordenadas magnéticas (**H**, **D**, **Z**). A Figura 2.4 mostra o vetor total do Campo Geomagnético que é representado pela letra **F**. A componente magnética norte representa o elemento linear **X**, a componente magnética leste representa **Y**, **Z** a componente vertical para baixo, **H** a componente horizontal perpendicular a superfície da Terra. O elemento angular **D** representa a declinação magnética, e é o ângulo entre o norte geográfico (**X**) e a componente horizontal do campo magnético (**H**). O elemento angular **I** representa a inclinação magnética, e é o ângulo entre a componente magnética horizontal (**H**) e o vetor intensidade total do campo magnético (**F**).

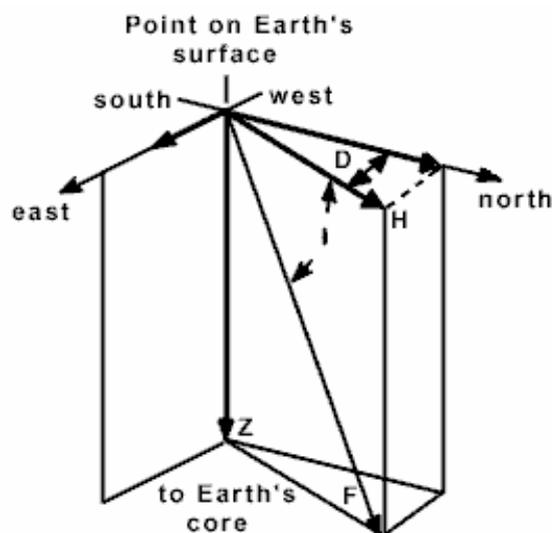


Fig 2.4 - Elementos do vetor magnético

O magnetômetro instalado em São Luís tem o objetivo principal de registrar as variações diurnas geomagnéticas relacionadas ao eletrojato equatorial na região brasileira e do ângulo de inclinação magnética, possibilitando investigações experimentais sobre as variações temporais do campo magnético terrestre. Nos estudos realizados no decorrer deste ano de bolsa foi utilizado o instrumento consiste de um sensor tipo fluxgate enterrado a 1 m de profundidade numa distância de 60 m do computador de processamento. Este magnetômetro mede as componentes X, Y e Z. A fórmula usada para o cálculo do ângulo DIP (Eq. 1) é baseada nas componentes medidas do magnetômetro. (Chapman e Bartels, 1940)

$$\arccos I = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \quad (1)$$

Os dados são armazenados em intervalos de 1 segundo. Contudo, a resolução temporal adotada em todos estudos foi de 1 minuto. Esse decremento na resolução foi obtido através da média do minuto de aquisição.

### 3. Simulação Numérica

Nesta seção vamos apresentar, de forma sucinta, o modelo ionosférico que foi utilizado para simular os perfis de densidade eletrônica e seus parâmetros ionosféricos que estão sendo comparados com as medidas dos mesmos parâmetros pelos sondadores digitais.. Também apresentaremos o modelo de campo magnético terrestre que foi utilizado para simular dados do campo magnético para estudos comparativos com o magnetômetro.

#### 3.1 O Modelo International Reference Ionosphere (IRI)

O IRI é um projeto internacional patrocinado pelo Comitê de Pesquisa Espacial (COSPAR) e pela União Internacional de Rádio Ciência (URSI). Estas organizações deram forma a um grupo de trabalho para produzir um modelo padrão empírico da Ionosfera, baseado em todas as origens dos dados de disponíveis. Diversas edições firmemente melhoradas do modelo foram liberadas. Para a posição, a hora e a data dadas, IRI descreve a densidade do elétron, a temperatura do elétron, a temperatura do íon, e a composição do íon na escala da altura de aproximadamente 50 quilômetros a aproximadamente 2000 quilômetros; e também o índice do elétron. Fornece médias mensais na ionosfera para circunstâncias magnética quietas. As origens dos dados de principais são a rede global das ionossondas, os radares incoerentes (*Jicamarca, Arecibo, Malvern, St. Santin*), os sondadores de ISIS e de *Alouette*, e em instrumentos dos diversos satélites e foguetes. IRI é atualizado anualmente durante oficinas especiais (por exemplo, durante o conjunto geral do COSPAR). Diversas extensões são planejadas, incluindo modelos para a tração iônica, a descrição da ionosfera auroral e polar e a consideração de efeitos de tempestades magnéticas.

##### 3.1.1. Exemplos de Simulações Realizadas

O modelo IRI fornece como resultados de sua simulação a densidade ionosférica, variação percentual da composição iônica, as temperaturas eletrônicas, iônicas e da

atmosfera neutra, entre outros parâmetros. Na figura 2.5 apresentamos um exemplo de saída do modelo IRI, onde observamos a variação com alturas destas quantidades descritas acima. Esta simulação foi feita para a região de São Luís (2°31' S, 44°16' O), para o dia 1 de janeiro de 2003.

**ModelWeb Browser Results**  
*iri model listing*

**Input parameters**  
year= 2003., month= 01, day= 01, hour=12.,  
latitude= -2.33, longitude= 315.8, height= 100.  
Prof. parameters: start= 100. stop= 2000. step= 50.

URSI maps are used for the F2 peak density (NmF2)  
CCIR maps are used for the F2 peak height (hmF2)  
B0-Table option is used for the bottomside thickness parameter B0  
Danilov- option is used for the ion composition  
The foF2 STORM model is turned on  
IRI-95 option is used for the electron temperature  
IRI-95 option is used for the D-region Ne  
Scotto-97 no L option is used for the F1 occurrence probability  
Peak Densities/cm-3: NmF2=1605667.5 NmF1= 0.0 NmE= 141170.0  
Peak Heights/km: hmF2= 342.49 hmF1= 0.00 hmE= 110.00

Solar Zenith Angle/degree 48.3  
Dip (Magnetic Inclination)/degree 8.41  
Modip (Modified Dip)/degree 8.35  
Solar Sunspot Number (12-months running mean) Rz12 81.3  
Ionospheric-Effective Solar Index IGI2 106.6

H km	ELECTRON DENSITY			TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%	
100.0	120010	0.075	-1	-1	-1	0	0	0	0	26	74	0	-1.0	-1	
150.0	246039	0.153	676	676	761	9	0	0	0	30	61	0	-1.0	-1	
200.0	544473	0.339	863	863	1440	48	0	0	0	12	40	0	-1.0	-1	
250.0	999473	0.622	910	910	2108	97	0	0	0	1	1	0	-1.0	-1	
300.0	1445410	0.900	922	922	2261	98	0	0	0	1	1	0	-1.0	-1	
350.0	1607413	1.001	926	926	1729	96	4	0	0	0	0	0	-1.0	-1	
400.0	1364954	0.850	927	927	1243	96	4	0	0	0	0	0	-1.0	-1	
450.0	954345	0.594	927	991	1251	96	4	0	0	0	0	0	-1.0	-1	
500.0	624844	0.389	927	1131	1351	95	4	1	0	0	0	0	-1.0	-1	
550.0	417926	0.260	927	1275	1453	94	4	1	1	0	0	0	-1.0	-1	
600.0	297891	0.186	927	1418	1561	93	4	2	1	0	0	0	-1.0	-1	
650.0	228666	0.142	927	1562	1683	90	4	4	2	0	0	0	-1.0	-1	
700.0	187840	0.117	927	1706	1811	87	3	7	3	0	0	0	-1.0	-1	
750.0	163050	0.102	927	1849	1940	81	3	11	5	0	0	0	-1.0	-1	
800.0	147594	0.092	927	1993	2068	73	2	17	8	0	0	0	-1.0	-1	
850.0	137755	0.086	927	2136	2197	62	1	26	10	0	0	0	-1.0	-1	
900.0	131396	0.082	927	2280	2325	50	1	37	13	0	0	0	-1.0	-1	
950.0	127244	0.079	927	2424	2454	38	0	48	14	0	0	0	-1.0	-1	
1000.0	124514	0.078	927	2567	2583	27	0	58	14	0	0	0	-1.0	-1	
1050.0	122710	0.076	927	2709	2711	19	0	68	13	0	0	0	-1.0	-1	
1100.0	121518	0.076	927	2840	2840	13	0	76	11	0	0	0	-1.0	-1	
1150.0	120728	0.075	927	2968	2968	9	0	82	9	0	0	0	-1.0	-1	
1200.0	120204	0.075	927	3097	3097	6	0	85	9	0	0	0	-1.0	-1	
1250.0	119856	0.075	927	3226	3226	5	0	86	9	0	0	0	-1.0	-1	
1300.0	119627	0.075	927	3354	3354	4	0	87	9	0	0	0	-1.0	-1	
1350.0	119474	0.074	927	3480	3480	3	0	88	9	0	0	0	-1.0	-1	
1400.0	119374	0.074	927	3585	3585	2	0	89	9	0	0	0	-1.0	-1	
1450.0	119306	0.074	927	3643	3643	2	0	89	9	0	0	0	-1.0	-1	
1500.0	119263	0.074	927	3680	3680	1	0	89	9	0	0	0	-1.0	-1	
1550.0	119234	0.074	927	3714	3714	1	0	90	9	0	0	0	-1.0	-1	
1600.0	119215	0.074	927	3749	3749	1	0	90	9	0	0	0	-1.0	-1	
1650.0	119202	0.074	927	3783	3783	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
1700.0	119194	0.074	927	3817	3817	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
1750.0	119188	0.074	927	3851	3851	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
1800.0	119186	0.074	927	3886	3886	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
1850.0	119182	0.074	927	3920	3920	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
1900.0	119180	0.074	927	3954	3954	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
1950.0	119178	0.074	927	3988	3988	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	
2000.0	119175	0.074	927	4023	4023	0	0	91	9	0	0	0	-1.0	-1	

Figura 2.5 – Exemplo de saída de dados do modelo IRI para a região de São Luís para o dia 01/01/2003

Na primeira coluna desta simulação o modelo oferece a altura em quilômetros. Na segunda coluna temos a densidade eletrônica que é medido em centímetros cúbicos. A terceira coluna refere-se à temperatura. A quarta coluna tem como função mostrar o percentual de cada um dos íons relacionados em sua altitude. A ultima camada mostra o conteúdo eletrônico total (TEC), que no caso não foi requisitado para o modelo IRI fornecer. E, conforme, estabelecido no projeto inicial foram realizadas simulações para diversos dias nos quais a digissonda operou observando os parâmetros ionosféricos.

### 3.2. Modelo International Geomagnetic Reference Field (IGRF)

O modelo IGRF (*International Geomagnetic Reference Fields*) é uma representação matemática do campo magnético principal da terra usado em estudos do interior terrestre, da crosta, da ionosfera e da magnetosfera. O IGRF é oriundo de uma colaboração internacional baseada na cooperação entre institutos e agências responsáveis pela coleta e publicação dos dados do campo magnético. O modelo incorpora dados dos observatórios permanentes e se baseia na expansão de harmônicos esféricos (Cain et al., 1968). A versão a mais recente do modelo é a 10ª geração IGRF que foi finalizada pela modificação do 5º grupo de trabalho da IAGA em abril de 2005. Ele inclui modelos do campo principal em intervalos de cinco anos de 1900 a 2005, e um modelo secular da variação para 2000-2005 (McLean, 2007).

#### 3.2.1. Exemplos de Simulações Realizadas

O modelo IGRF fornece como resultados da primeira parte da sua simulação o ângulo de declinação magnética, inclinação magnética, a componente horizontal do campo magnético, as componentes X, Y, Z e o vetor intensidade total do campo magnético F. A segunda parte da simulação são as variações anuais desses mesmos parâmetros. Na figura 2.6 apresentamos um exemplo de saída do modelo IGRF, onde observamos a quantidades descritas acima. Esta simulação foi feita para a região de São Luís (2°31' S, 44°16' O), para o dia 1 de janeiro de 2003.

Geomag v6.0 - Aug 24, 2005

Model: DGRF2000

Latitude: -2.33 deg

Longitude: -44.60 deg

Altitude: 0.00 meters

Date of Interest: 2003.00

```
-----  
Date      D      I      H      X      Y      Z      F  
(yr)    (deg min) (deg min) (nT)   (nT)   (nT)   (nT)   (nT)  
2003.00 -20d 38m -2d 40m 26504.3 24804.6 -9338.7 -1230.8 26532.9  
-----
```

Date (yr)	dD (min/yr)	dI (min/yr)	dH (nT/yr)	dX (nT/yr)	dY (nT/yr)	dZ (nT/yr)	dF (nT/yr)
2003.00	-2.0	-22.2	-39.9	-42.7	-0.1	-169.4	-31.5
-----							

Figura 2.6 - Exemplo de saída de dados do modelo IGRF para a região de São Luís para o dia 01/01/2003.

#### 4. Transformada de Fourier

O método da transformada de Fourier tem importantes aplicações em análises de dados. A Eq. 2 apresenta o método pelo qual são obtidos os coeficientes da transformada discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT). Contudo, há um método computacional mais eficiente para o cálculo dos coeficientes, conhecido como transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT), o qual é baseado na otimização dos somatórios.

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \cdot e^{\frac{-i \cdot 2\pi \cdot j \cdot k}{N}} \quad (2)$$

O cálculo direto dos coeficientes de uma série de N amostras requer cerca de N<sup>2</sup> operações aritméticas contra 2.N.log<sub>2</sub>(N) operações efetuadas na FFT. Essa ferramenta é utilizada para converter uma série de dados no domínio do tempo para o domínio das frequências. No nosso caso, a FFT é usada para estimar o espectro de densidade de amplitudes da variação do ângulo DIP do campo magnético em função da frequência. A eficiência da FFT torna mais acessível o tratamento de alguns problemas, como por exemplo, no caso de um extenso número de dados (Denardini, 1999).

## CAPÍTULO 3

### ATIVIDADES COMPLEMENTARES E PUBLICAÇÕES

Neste capítulo vamos apresentar as atividades complementares de formação do bolsista realizadas durante o período de bolsa 2006-2007 referentes ao assunto deste relatório. Essas atividades têm como objetivo o desenvolvimento pessoal e profissional do acadêmico. Este capítulo está dividido em três partes. Na primeira serão apresentados os cursos feitos pelo bolsista. Na segunda parte vamos apresentar os seminários onde o bolsista submeteu o trabalho, foi aceito e apresentado. Na terceira parte são os trabalhos que o bolsista submeteu que ainda não foram apresentados. Durante o período de vigência da bolsa e em concordância com os objetivos propostos no projeto o bolsista participou como apresentador de trabalho científico em seminários específicos de iniciação científica que contribuíram para o desenvolvimento e formação complementar.

#### Cursos Realizados

Título: IDL e Métodos Matemáticos

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos - SP

Ministrante: Dr. Clezio Marcos Denardini, pesquisador do INPE, São José dos Campos.

Carga horária do curso: 30 horas.

#### Trabalhos Publicados em Anais

##### **Congresso: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica de Engenharia**

Título: Análise da Eficiência do Modelo IRI na Determinação da Altura do Pico da Camada da Região F na Região de São Luís (Ma) nos Horários de Pré-Reversão Durante Períodos Magnéticamente Calmos.

Autores: **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Laysa Cristina Araújo Resende, Henrique Carlotto Aveiro, Lilian P. Moor e Clezio Marcos Denardini.

Título: Metodologia para Detecção de Rastros Meteóricos Utilizando Radars Coerentes

Autores: Henrique Carlotto Aveiro, Lilian Piecha Moor, Tiago Jaskulski, Laysa C. A. Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini, Mangalathayil A. Abdu, Nelson Jorge Schuch.

Título: Comparação da Amplitude de Deriva de Pré-Reversão em Cachoeira Paulista (SP) e São Luís (MA)

Autores: Laysa Cristina Araújo Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Henrique Carlotto Aveiro, Lilian P. Moor e Clezio Marcos Denardini.

Local: UNIJUI – Ijuí – RS

Período: 4 a 6 de outubro de 2006

##### **Congresso: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronômica**

Título: Análise Quantitativa da Eficiência do Modelo IRI na Determinação de Densidades Eletrônicas na Região de São Luís (MA)

Autores: **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Laysa Cristina Araújo Resende, Clezio Marcos Denardini.

Título: Estudo Comparativo das Derivas Verticais Obtidos por Sondadores Digitais nas Estações de São Luís (MA) e Cachoeira Paulista (SP)

Autores: Laysa Cristina Araújo Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini.

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos - SP  
Período: 23 a 26 de outubro de 2006

**Congresso: 14º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP**

Título: Variação Diurna da Eficiência do Modelo IRI na Determinação da Densidade Eletrônica da Região F na Região de São Luís (MA) Durante Períodos Magneticamente Calmos.

Autores: **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Laysa Cristina Araújo Resende, Clezio Marcos Denardini.

Título: Comparação dos Resultados Obtidos pelo Software de Redução Automática com os Resultados após a Revisão do Operador na Determinação da Densidade Eletrônica Ionosférica.

Autores: Laysa Cristina Araújo Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini.

Local: Universidade de São Paulo – USP Cidade Universitária  
Período: 8 a 10 de novembro de 2006

**Congresso: Seminário de Iniciação Científica do INPE**

Título: Estudos Comparativos de Simulações Numéricas e análises de Dados de Perfis de Densidade Eletrônica para a Região Brasileira.

Autores: **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Laysa Cristina Araújo Resende, Clezio Marcos Denardini.

Título: Estudo Comparativo dos Parâmetros Ionosféricos Obtidos por Sondadores Digitais nas Estações de São Luís (MA) e Cachoeira Paulista (SP)

Autores: Laysa Cristina Araújo Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini.

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos - SP  
Período: 11 e 12 de julho de 2006

**Trabalhos Submetidos**

**Congresso: Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica Espacial.**

Título: Estudo da Variação do Ângulo de Inclinação Magnética em São Luís (MA): Modelo IGRF vs Magnetômetro

Autores: **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini, Laysa Cristina Araújo Resende e Henrique Carlotto Aveiro.

Título: Estudo sobre as Presenças de Camadas Ionosféricas Esporádicas em Períodos Calmos e Perturbados em São Luís (MA): Um Caso Estudado.

Autores: Laysa Cristina Araújo Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini.

Título: The Lowering of the EEJ Back-Scattering Region Based on Coherent Radars Soundings in the Brazilian Sector

Autores: Clezio Marcos Denardini, M. A. Abdu, José Humberto A. Sobral, Cristiano. M. Wrasse, Henrique Carlotto Aveiro, Ênia P. A. Olivio, Laysa Cristina Araújo Resende e **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**.

Local: InterContinental Hotel – Rio de Janeiro - RJ

Período: 19 e 23 de novembro de 2007

**Congresso: Seminário de Iniciação Científica do INPE**

Título: Evolução do Mapa dip Simulado Pelo Modelo IGRF Para a Localidade e São Luís (MA).

Autores: **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Laysa Cristina Araújo Resende, Clezio Marcos Denardini.

Título: Estudo Comparativo Sobre as Presenças de Camadas Ionosféricas Esporádicas em Períodos Calmos e Perturbados nas Estações de São Luís (MA) e Cachoeira Paulista (SP)

Autores: Laysa Cristina Araújo Resende, **Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida**, Clezio Marcos Denardini.

Local: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – São José dos Campos - SP

Período: 11 e 12 de julho de 2007

## CAPÍTULO 4

### Análise dos Dados Reduzidos

Neste capítulo apresentaremos o estudo realizado com os dados simulados pelo bolsista, onde também foram incluídos dados analisados pelos colaboradores do projeto. Nesta fase do projeto, mostraremos uma introdução da análise do mapa do ângulo dip do campo magnético terrestre no período entre 1990 e 2010. Esta análise será apresentada no Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE 2007)

#### 1. Resultados das Análises dos Dados Simulados pelo Modelo Global IGRF

As simulações feitas no modelo IGRF já foram citadas nos capítulos anteriores. Elas foram manuseadas no programa *Origin* e sobrepostas a uma figura do mapa do mundo. A figura 4.1 mostra um exemplo de interpretação feita com os dados simulados do mapa do ângulo dip do campo magnético terrestre para o mês de janeiro de 1990.

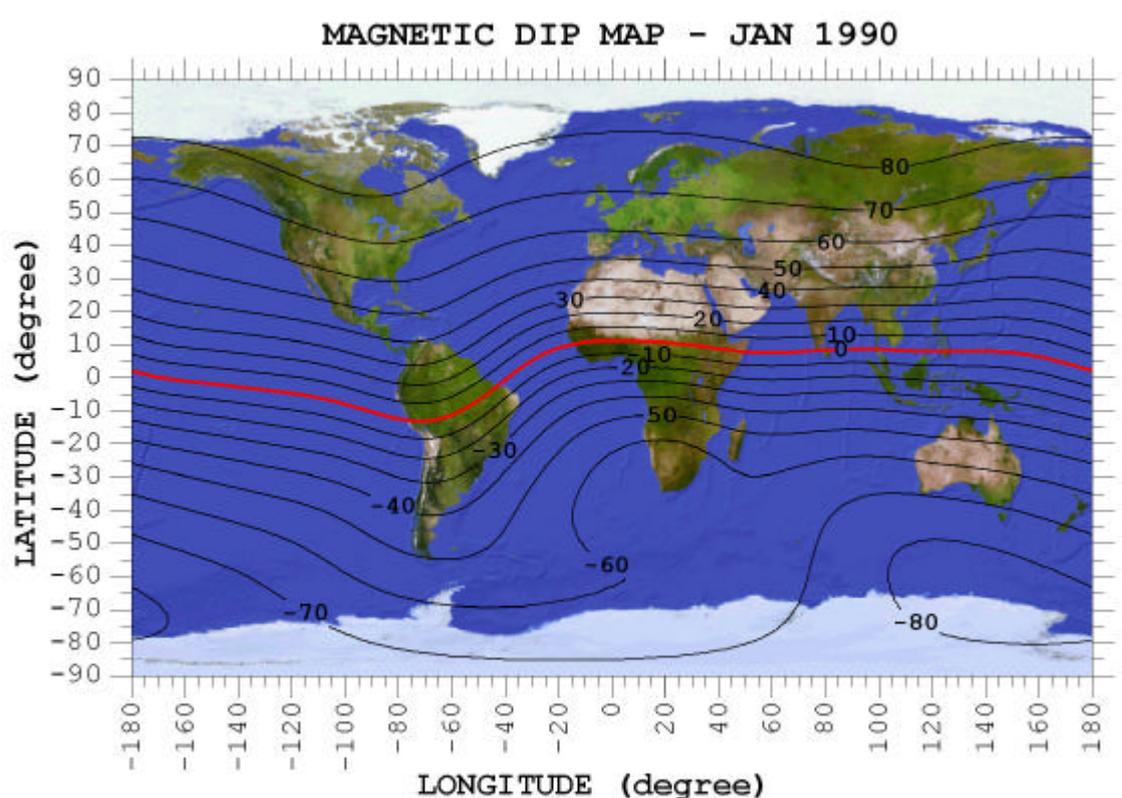


Figura 4.1- Mapa do ângulo dip do campo magnético terrestre em janeiro de 1990. A linha vermelha representa o equador magnético da terra.

O Campo Geomagnético não é estável, apresentando variações temporais e espaciais. Por consequência, o local onde a linha do campo magnético terrestre é paralela à superfície da Terra (equador magnético) também apresenta uma variação temporal. No mapa da figura acima o equador magnético está representado pela linha vermelha.

Uma das maneiras de localizar o equador magnético é em relação ao ângulo DIP (ângulo de inclinação magnética  $I$ ). Este elemento angular é o ângulo entre a componente magnética horizontal ( $H$ ) e o vetor intensidade total do campo magnético

(F). Para visualizar essa variação do equador magnético, vamos utilizar o modelo IGRF para simular um mapa do ângulo DIP. O estudo da evolução do equador magnético é muito importante para estudos futuros os quais podem envolver fenômenos que podem ter uma dependência com a localização do equador magnético, como no caso do eletrojato equatorial. Nestes termos, este estudo se apresenta de forma estratégica, uma vez que muitos experimentos do INPE que são conduzidos no OESLZ-INPE/MCT, região sobre o equador magnético, são dependentes da geometria das linhas de campo magnético. As figuras 4.2. são continuações desta análise do mapa do ângulo dip para o mês de agosto para os anos de 1990 a 2009.

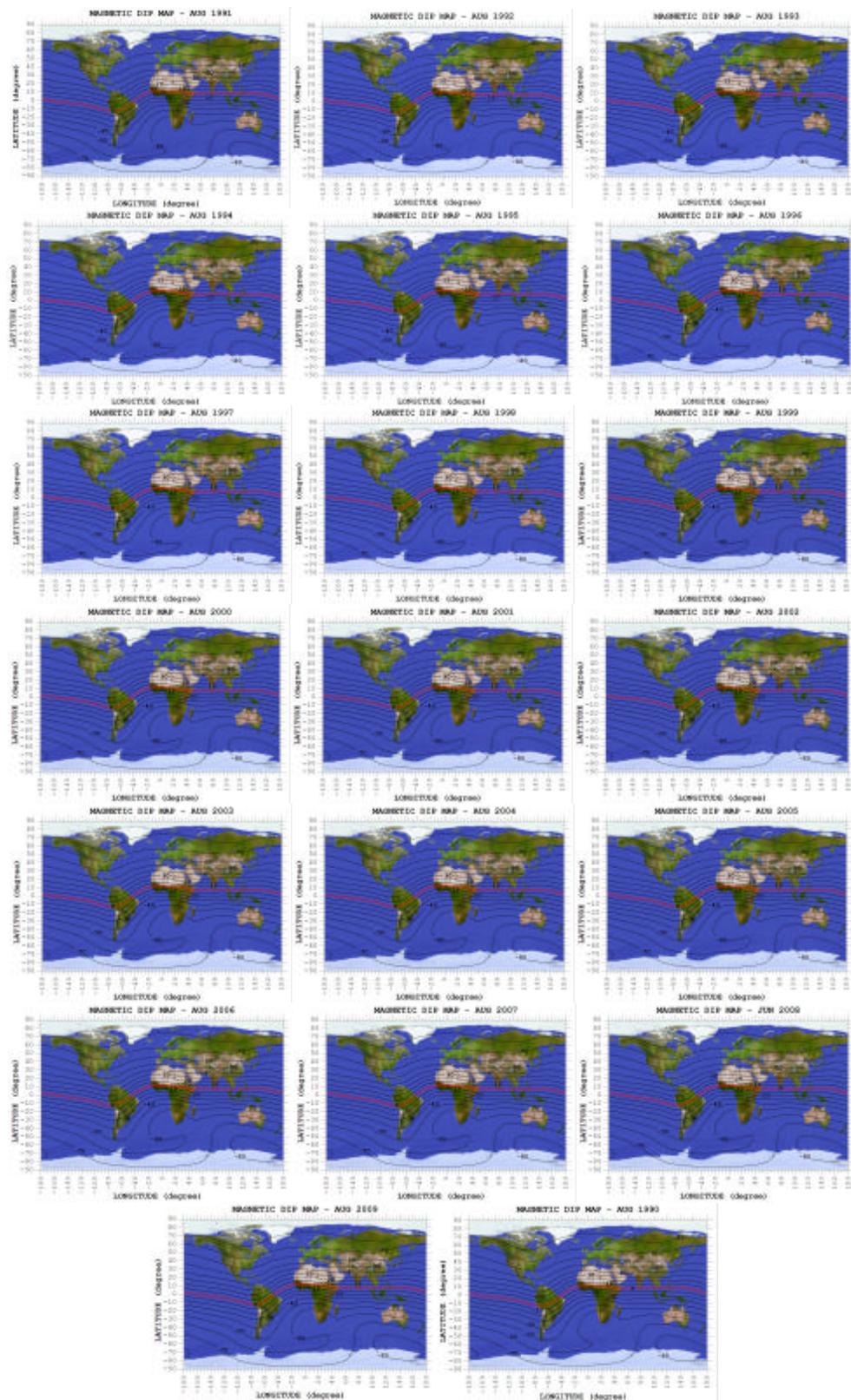


Figura 4.2- Mapa do ângulo dip do campo magnético terrestre do mês de agosto de 1990 a 2009.

Com esta simulação será possível, entre outras coisas, perceber as variações do campo magnético terrestre.

Algumas das variações mais conhecidas e estudadas são classificadas em variações seculares e variações diurnas solares e lunares. Variação secular é a mudança lenta e contínua no campo principal do Campo Geomagnético. Ela é associada com as correntes elétricas que fluem no núcleo externo da Terra e tem uma escala temporal que chega a mil anos. As variações diárias são causadas principalmente pelas correntes fluindo na atmosfera superior, onde o movimento devido aos ventos e marés na atmosfera resulta na ação do dínamo, gerando campos e correntes ionosféricas. Estas variações apresentam dependência com a latitude, estação e com o ciclo de manchas solares (período de 11 anos). Em dias de pouca atividade solar ela é chamada de variação diurna do campo geomagnético ou variação *Solar Quiet*, Sq, apresentando uma magnitude para o campo magnético na faixa desde algumas dezenas até centenas de nano teslas. Essa variação diária pode ser causada também devido as interações da magnetosfera terrestre com compressões causadas por atividade solar (Nair, 1970).

A figura 4.3 demonstra essas variações presentes no campo magnético terrestre. Essa figura é a análise da transformada de Fourier dos dados de magnetômetro do OESLZ – INPE/MCT para os períodos de 2002 a 2004, um dos resultados do estudo que foi submetido para apresentação no *Tenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society (X CISBGf)*.

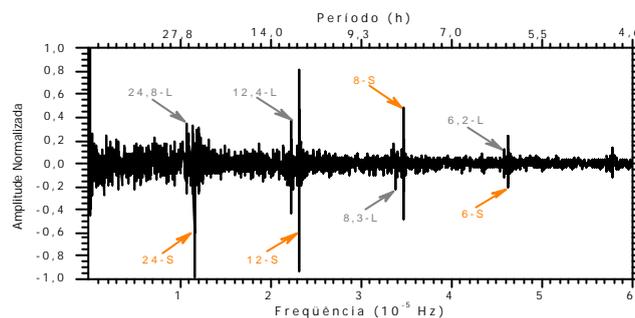


Figura 4.3- Análise espectral dos dados de magnetômetro no domínio das frequências por amplitude

Neste gráfico, foi possível identificar picos de amplitudes os quais estão correlacionados com os períodos das oscilações da atmosfera neutra causados por marés atmosféricas. Esta característica mostra o acoplamento da dinâmica da atmosfera neutra com o campo magnético terrestre, através das influências do sistema de correntes Sq nos dados de magnetômetro. As setas apontam àquelas que cremos ser as oscilações relacionadas às marés atmosféricas. Essas marés são divididas, basicamente, em marés solares com período submúltiplo de 24 h (setas laranja) e marés lunares com período submúltiplo de 24,84 h (setas cinza). Podemos observar no gráfico as marés solares presentes com os seguintes períodos: maré diurna ~24 h (23,15); maré semi-diurna ~12h (11,57); maré ter-diurna ~8 h (7,93) e maré quadri-diurna ~6 h (5,97). Já as marés lunares foram observadas no gráfico com períodos de: maré diurna ~24,84 h (24,79); maré semidiurna ~12,42 h (12,39); maré ter-diurna ~8,28 h (8,33) e quadri-diurna ~6,20 h (6,12).

Outros estudos decorrentes das variações do campo magnético são, por exemplo, as análises das variações de afastamento do equador magnético dos sítios de medição. Em um dos resultados efetuados para apresentar no X CISBGf verificamos que o equador magnético está se afastando lentamente. Nesta análise vemos esse afastamento de

acordo com o aumento do módulo do ângulo dip Os gráficos da figura 4.4 mostram a variação do ângulo dip calculada a partir dos dados de magnetômetros e simulados usando o modelo IGRF. Sobreposto às variações temporais estão as respectivas retas obtidas pelos ajustes lineares.

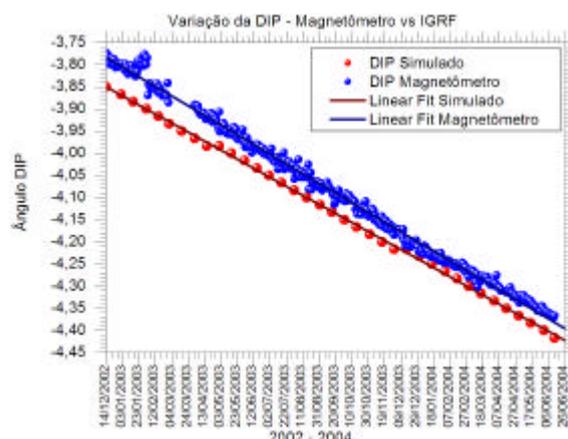


Figura.4.4 - Variação do ângulo DIP (graus) medido e simulado para os dias 14 de dezembro de 2002 até 10 de junho de 2004 no OESLZ.

O gráfico acima apresenta a variação do ângulo DIP (em graus) dos dados simulados (bolas vermelhas) e a variação dos dados medidos por magnetômetro (bolas azuis) em função do tempo. Nesse gráfico foram feitos ajustes lineares dos dados simulados (reta vinho) e dos dados medidos (reta azul marinho) para definir a tendência de longo prazo. Uma rápida visualização do gráfico mostra que ambos apresentam uma tendência decrescente que indica que aumentando do módulo ângulo DIP, o que evidencia que o equador magnético está se afastando da latitude de São Luis. Isso já era esperado devido à variação secular do campo magnético (Chapman e Bartels, 1940). A tendência do aumento do ângulo DIP observada nas simulações do IGRF é de  $0,4453^\circ/\text{ano}$ . A mesma tendência verificada nos dados obtidos pelo magnetômetro não passa de  $0,3979^\circ/\text{ano}$ . O que parece indicar que o modelo IGRF superestima a variação do ângulo DIP, ou seja, ele superestima a taxa de variação secular em São Luís. A diferença entre as taxas obtidas dos dados de magnetômetro e das simulações do IGRF é de  $0,0474^\circ/\text{ano}$ .

## CONCLUSÕES

Consideramos a revisão bibliográfica do *paper* do Bilitza sobre o modelo empírico IRI mostrada no capítulo 1 é de grande importância, pois a cada 5 anos o modelo passa por correções nos parâmetros de entradas e de métodos de processamento. Isso pode influenciar significativamente os resultados dos estudos que utilizem as respostas deste modelo. Além disso, esse modelo foi utilizado durante a análise de dados que foram submetidos e apresentados em congressos científicos.

Em relação à instrumentação foram desenvolvidos estudos sobre os aparelhos utilizados no período da bolsa. A digissonda, radar que monitora a parte de baixo do perfil ionosférico, foi utilizado em comparações com as simulações do modelo IRI. Já o magnetômetro, aparelho de registra as variações do campo magnético terrestre, foi utilizado para comparações com estudos das simulações do modelo global IGRF. Nestes estudos sobre o IGRF, o bolsista desenvolveu habilidades computacionais e matemáticas programando em ambiente IDL e métodos espectrais por métodos de Fourier, o qual foi utilizado em publicação submetida à apresentação no X CISBGf, um congresso internacional para cientistas e pesquisadores da área das Ciências Espaciais e Atmosféricas. Com isso, foi aprimorada a capacidade de pesquisar nas fontes bibliográficas adequadas, foram aprimoradas também as habilidades em análise de dados geofísicos e desenvolvidas as capacidades de escrever trabalhos científicos completos.

Nos trabalhos desenvolvidos podemos ver claramente que na comparação do ângulo DIP obtido por dados de magnetômetro e por simulações do modelo IGRF, ambos os gráficos apresentam uma tendência crescente no módulo do ângulo DIP, confirmando que o equador magnético está se afastando gradativamente da localidade do observatório. Contudo, essas simulações do IGRF parecem superestimar a velocidade deste afastamento em São Luís. Mas esta superestimativa vem decrescendo com o tempo. As simulações para várias alturas mostraram que o equador magnético apresenta uma variação com o aumento da altitude. No solo ele está localizado mais ao norte que em altitudes maiores.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdu, M. A. *Equatorial Spread F and Ionosphere - Thermosphere System: A review. Geophysical Research Letters*, v.2, p.193-209. 1993.
- Arora, B. R. e S. K. Bhardwaj. *Spatial and frequency characteristics of equatorial enhancement of geomagnetic field variations*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v.65, n.14-15, SEP-OCT, p.1283-1292. 2003.
- Bilitza, D. *International Reference Ionosphere 2000*, R. Sci., 36(2):261-275, 2001.
- Brum, C.G.M. **A importância do dia quieto na absorção ionosférica da camada D da ionosfera e sua aplicação para os dados de riômetros da estação antártica comandante Ferraz**, São José dos Campos, 192p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Cain, J.C., S. Hendricks, W.E. Daniels, and Jensen, D.C. *Computation of the Main Geomagnetic Field from Spherical Harmonic Expansions*, pp. 1-7, National Aeronautics and Space Administration, Greenbelt, MD, 1968.
- Campbell, W. H. *A Review of Equatorial Studies of Rapid Fluctuations in Earth's Magnetic Field. Annales de Geophysique*, v.22, n.3, p.492-501. 1966.
- Chapman, S. e Bartels, J. *Geomagnetism*. vol. 1, Clarendon Press, Oxford, 1940.
- Chen, Francis F. *Introduction to Plasma Physics*. New York: Plenum Press, 1977.
- Cunha Neto, A - **Radar de Sondagem Ionosférica Digital – Digissonda**. [on-line] Disponível em < <http://www.dae.inpe.br/slz/digissonda.html> > Acesso em: fevereiro de 2006.
- Davies, K. *Ionospheric Radio Propagation*. Washington D. C.: National Bureau of Standards. 1965. 470 p.
- Denardini C. M. Dissertação de Mestrado. **Desenvolvimento de um Sistema de Correção de Fase para o Radar Ionosférico de São Luís do Maranhão**. São José dos Campos, 1999. INPE – 7174 – TDI/676.
- Denardini, C.M. **Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para radar ionosférico de São Luís Maranhão**. São José dos Campos, 137p. Dissertação
- Duhau, S. and Martinez, E. A. *On the origin of the fluctuations in the length of day and in the geomagnetic field on a decadal time scale. Geophysical Research Letters*, v.22, n.23, p. 3283-3286, DEC 1995.
- Hargreaves, J. K. *The solar-terrestrial environment*. Cambridge; Cambridge University Press, 1992
- Kelley, M. C. *The Earth's Ionosphere – Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press Inc., 1989.
- Kivelson, M. G. e C. T. Russell. *Introduction to Space Physics*. New York: Cambridge Univ. Press. 1995. 568 p.
- Knecht, D. J. e B. M. Shuman. *The Geomagnetic Field. In: A. S. Jursa (Ed.). Handbook of Geophysics and the Space Environment*. Springfield, VA: National Technical Information Service, v.4, 1985. The Geomagnetic Field, p.4.1-4.37
- Nair, K. N. *Daily Variation of the Geomagnetic Field at the Dip Equator*. *Nature* 1970, volume 226, pag 740-741, maio de 1970.
- Pushkov A. N, Chernova T.A. *Space Spectrum of the Main Geomagnetic-Field and the Spectrum of its Time Variations*. *Geomagnetizm i Aeronomiya*, v. 19 n.4, p.593-605, 1979.

- Reinisch, W. B., Bibl, K., Kitrosser, D. F., Sales, G. S., Tang, J. S., Zhang, Z., Bullett, T. W., Ralls, J. A. *The Digisonde 256 ionospheric sounder: Wits Handbook*, v. 2, p. 350-380, 1989.
- Rishbeth H.; e Garriott, O.K, *Introduction to ionosphere physics*. New York: Academic, 1969.
- Saba, M.M.F. **Estudo da atividade magnetosférica através dos índices geomagnéticos AE, ap e Dst**. São José dos Campos, INPE, Novembro de 1992 (Dissertação de mestrado).
- Yamashita, C. S. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. José Humberto Andrade Sobral e pelo Dr. Magalathayil Ali Abdu, INPE, São José dos Campos, 2000. **tempestades magnéticas intensas na Ionosfera de baixa latitude**. São José dos Campos. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.