



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



**ESTUDOS COMPARATIVOS DOS PERFIS IONOSFÉRICOS  
SIMULADOS COM OS ADQUIRIDOS PELA DIGISSONDA DOS ANOS  
DE 2001 E DE 2003**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
PIBIC/INPE – CNPq/MCT  
Concedido pelo CNPq em 17/03/2008.

PROCESSO: 102033/2008-0

**Laís Maria Guizelli Moraes - (INPE, Bolsista PIBIC/INPE – CNPq/MCT)**  
**E-mail: [lais@dae.inpe.br](mailto:lais@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 2008**



## **Dados de Identificação**

### **Bolsista:**

Lais Maria Guizelli Moraes  
Curso: Licenciatura em Matemática  
UNITAU: Universidade de Taubaté

### **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 (ISE/ETEP, Bolsista PIBIC/CNPq).  
Pedro Daniel Santos Carvalho de Almeida (DAE/INPE, Mestrando).  
Henrique Carlotto Aveiro (DAE/INPE, Mestrando).

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

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

"O que vale na vida não é o ponto de partida e sim a caminhada. Caminhando e semeando, no fim terás o que colher."  
*(Cora Coralina)*

*Aos meus pais,  
Elisabeth Guizelli e  
José Joaquim de Moraes,  
e ao meu orientador  
Dr. Clezio Marcos De Nardin.*

## **AGRADECIMENTOS**

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

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

A Deus, pela vida.

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

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

Aos meus amigos de trabalho, Goreti, Henrique, Laysa, Pedro, e a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Em especial, a minha mãe Elisabeth Guizelli, pelo amor, esforço, atenção e por estar sempre ao meu lado.

**SUMÁRIO**

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>12</b>
<b>Sol e Ionosfera Terrestre.....</b>	<b>12</b>
1.1 O Sol .....	12
1.1.1 Estruturas Internas.....	12
1.1.2 Estruturas Externas.....	13
1.1.3 Ciclo de Atividade Solar.....	15
1.1.4 Tipos de Radiações.....	17
1.1.5 Ventos Solares.....	18
1.1.6 Atividade Solar .....	18
1.1.7 Atividade Magnética .....	19
1.1.8 Tempestades Magnéticas.....	20
1.2 A Ionosfera Terrestre .....	22
1.2.1 Região D.....	23
1.2.2 Região E.....	23
1.2.3 Região F.....	23
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>24</b>
<b>Instrumentação.....</b>	<b>24</b>
2.1 Digissonda.....	24
2.2 Dados Coletados.....	24
2.3 Programa de Análise.....	25
2.4 O Modelo <i>International Reference Ionosphere</i> (IRI).....	26
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>27</b>
<b>Atividades de Processamentos e Redução de Dados.....</b>	<b>27</b>
3.1 Classificação dos Dias Selecionados.....	27
3.2 Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos.....	27
3.3 Exemplos de Simulações Realizadas.....	31
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>33</b>
<b>Análise dos Dados Reduzidos.....</b>	<b>33</b>
4.1 Resultados das Análises dos Dados de São Luís e das Simulações Numéricas.....	33
4.2 Discussão dos Resultados.....	35
4.2.1 Análise da Variação Temporal da Frequência Crítica da Camada F.....	35
4.2.2 Análise da Variação Temporal da Altura Média do Pico da Camada F.....	35
<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>38</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1:</b> Estrutura do Sol, esquematizada fora de escala.....	12
<b>FIGURA 2:</b> Granulação Solar.....	13
<b>FIGURA 3:</b> Imagem do eclipse total de 4 de novembro de 1994, mostrando a cromosfera e, principalmente, a coroa.....	14
<b>FIGURA 4:</b> Comparação do tamanho das manchas solares com o tamanho da Terra, que é colocada ao lado de Júpiter por motivo de análise.....	15
<b>FIGURA 5:</b> Geometria de uma nuvem magnética. ....	18
<b>FIGURA 6:</b> A magnetosfera é comprimida no lado diurno devido à força das partículas que chegam, e estendido no lado noturno.....	20
<b>FIGURA 7:</b> Ilustração dos cinturões de Van Allen, tanto interno quanto externo.....	20
<b>FIGURA 8:</b> (A) Imagem de uma antena transmissora, (B) Imagem da antena receptora digissonda de São Luiz – M.A.....	24
<b>FIGURA 9:</b> Exemplo de perfil ionosférico obtido no dia 07 de maio de 2001, às 00 h 15 min UT, em São Luís - MA .....	25
<b>FIGURA 10:</b> Ilustração do programa <i>SAO-Explorer</i> onde podemos visualizar: (A) a tela onde são escolhidos os parâmetros o qual serão trabalhados, que no caso foram selecionados foF2, foF1 e hmF2; (B) o ionograma que mostra os dados a cada 15 minutos e (C) a tela das características dos dados durante o dia todo .....	26
<b>FIGURA 11:</b> Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 7 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.....	28
<b>FIGURA 12:</b> Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 8 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.....	28
<b>FIGURA 13:</b> Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 9 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.....	29
<b>FIGURA 14:</b> Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 10 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.....	29
<b>FIGURA 15:</b> Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 11 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.....	30
<b>FIGURA 16:</b> Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 12 de maio de 2001 no sítio de São Luís – MA.....	30



**FIGURA 17:** Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 13 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.....31

**FIGURA 18:** Exemplo de saída de dados do modelo IRI para a região de São Luís no dia 7 de maio de 2001.....32

**FIGURA 19:** Série de gráficos da variação da frequência crítica em relação ao tempo para o período de estudo (07-13/05/2001) e variação média com seu respectivo erro médio quadrático. Em verde escuro são os dados obtidos a partir da digissonda localizada no sítio de São Luís- MA, e em laranja são os dados simulados pelo modelo IRI.....33

**FIGURA 20:** Série de gráficos da variação da altura do pico da camada F em relação ao tempo para o período de estudo (07-13/05/2001) e variação média com seu respectivo erro médio quadrático. Em verde claro são os dados obtidos a partir da digissonda no sítio de São Luís- MA, e em cinza são os dados simulados com o modelo IRI.....34

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>TABELA 1:</b> Classificação e descrição das manchas solares. ....	16
<b>TABELA 2:</b> Classificação dos <i>flares</i> baseado no fluxo de energia emitido em Raios-X.....	19
<b>TABELA 3:</b> Escala logarítmica dos valores do índice Kp.....	21
<b>TABELA 4:</b> Classificação de uma tempestade geomagnética.....	22
<b>TABELA 5:</b> Dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética...	27

## **INTRODUÇÃO**

Neste trabalho serão apresentadas as atividades desenvolvidas no período de março a junho de 2008. Neste período foram desenvolvidas atividades teóricas e práticas relacionadas com o tema do projeto. Como atividade teórica foi realizada uma revisão bibliográfica solar. Como atividades práticas, foram reduzidos e trabalhados os dados da digissonda instalada no Observatório Espacial de São Luís (OESLZ-INPE/MCT), no Maranhão (2,33° S, 44,20° O) do ano de 2001. Foi realizado um estudo comparativo com os dados simulados pelo modelo *International Reference Ionosphere* (IRI) para o mesmo período. Nesse contexto, efetuou-se um estudo, submetido à apresentação do Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE) 2008.

No capítulo 1 deste relatório serão apresentados trabalhos de revisão teórica, a qual teve a finalidade de desenvolver os conceitos iniciais do Sol, campo magnético terrestre e da ionosfera. No capítulo 2 serão apresentadas as instrumentações utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. No capítulo 3 apresentaremos um resumo das atividades de pesquisa realizada ao longo do período a que se refere este relatório. No capítulo 4 serão sumarizadas as discussões sobre os resultados observados nessa pesquisa, em comparação com os modelos relacionados com a redução de dados. E por fim, apresentamos a conclusão deste relatório.

## CAPÍTULO 1

### SOL E IONOSFERA TERRESTRE

Neste capítulo serão mostrados os trabalhos de revisão teórica sobre o Sol, o Campo Magnético Terrestre, e a Ionosfera. O objetivo destes estudos é contextualizar a pesquisa realizada pela bolsista e apresentá-la aos conceitos com os quais ela deve se deparar nos estudos da sua área de atuação.

#### 1.1 O Sol

A massa do Sol é 334.672 vezes a massa da Terra. A distância da Terra ao Sol é de  $1,5 \times 10^8$  km. Isso faz com que a radiação solar leve cerca de 8 min para chegar até nós.

Sua temperatura varia de aproximadamente  $1,55 \times 10^5$  °C no núcleo até  $5,50 \times 10^3$  °C na fotosfera. Seus principais componentes são o Hidrogênio, que representa 91,2% de seu número de partículas, e o Hélio com 8,7%.

Como toda estrela, o Sol é uma esfera gasosa que se encontra em equilíbrio hidro-dinâmico entre as duas forças principais que agem dentro dele: para fora a pressão termodinâmica, produto das altas temperaturas internas, e para dentro a força gravitacional. A estrutura solar pode ser dividida em duas grandes regiões: o interior e a atmosfera (Stix, 1991).

##### 1.1.1 Estruturas Internas

A energia se move do núcleo (centro) para as camadas da borda, que são chamadas de zona de irradiação (a mais interna) e zona de convecção (a mais externa). Na FIGURA 1 observamos as estruturas internas e externas do Sol.

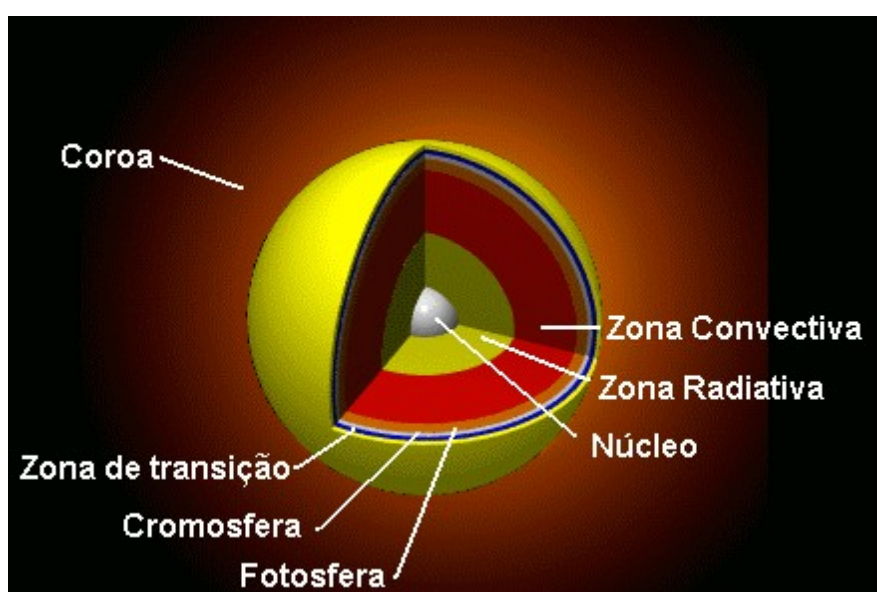


FIGURA 1: Estrutura do Sol, esquematizada fora de escala.

FONTE: Hetem et al. (2008).

### Núcleo Solar

No núcleo é gerada a energia solar. Esta energia é transportada para a superfície solar através da radiação, principalmente Raios Gama e Raios-X pela região de radiação e por convecção dos fluidos aquecidos até atingir a parte externa do Sol na região de convecção.

### Zona Radioativa

A zona radioativa envolve movimento de energia, mas não de matéria. O gás dentro desta camada se movimenta lentamente. Esta estrutura compõe 55% do raio de circunferência do Sol, desde o núcleo. Nesta zona, a energia do núcleo é conduzida para fora pelo processo radioativo. Neste processo, um fóton é criado e viaja cerca de 1 micron (1 milionésimo de metro) antes de ser absorvido por uma molécula de plasma solar. Depois da absorção, a molécula de plasma solar é aquecida e emite novamente outro fóton no mesmo comprimento de onda, esse fóton reemitido viaja mais um micron antes de ser absorvido por outra molécula de plasma solar e o ciclo se repete, cada interação entre fóton e a molécula de plasma solar leva tempo. Cerca de  $10^{25}$  absorções e remissões acontecem nesta zona antes que o fóton chegue à superfície. Há um longo intervalo de tempo entre o fóton criado no núcleo e o que alcança a superfície.

### Zona Conectiva

Já a zona conectiva é caracterizada por impulsos turbulentos durante o transporte da energia. As correntes de condução de calor são movimentos ascendentes de plasma solar mais quente ao lado dos movimentos descendentes de plasma solar menos quente. As correntes de convecção de calor carregam partículas para o lado externo da superfície com mais velocidade do que a transferência radiativa que ocorre no núcleo e na zona radiativa (Freudenrich, 2000).

## **1.1.2 Estruturas Externas**

### Fotosfera

Aparentemente, a superfície solar é uniforme. Na realidade, ela é formada por pequenas estruturas hexagonais, os grânulos, que podem ser observados na FIGURA 2. Verificou-se posteriormente que essas estruturas são topos de colunas ascendentes de gás aquecido que ao se resfriarem descem pelas zonas escuras vizinhas decorrentes dos processos de convecção. Estima-se que a diferença de temperatura entre os grânulos e as zonas escuras é de cerca de  $7,27 \times 10^2$  °C (CDA-CDCC USP/SC, 2000).



FIGURA 2: Granulação Solar.

FONTE: Hetem et al. (2008).

## Cromosfera

A cromosfera é a região da atmosfera solar localizada entre a fotosfera e a coroa. A observação da cromosfera, por muito tempo só foi possível quando ocorriam eclipses totais que encobriam a luz fotosférica. A FIGURA 3 é uma foto do eclipse total de 4 de novembro de 1994. A temperatura na cromosfera se reduz a partir da fotosfera até atingir 500 km de altitude com  $3,72 \times 10^3$  °C e, então há novamente um aumento até atingir  $8,44 \times 10^3$  °C a altitude de 2000 km quando se inicia a coroa (CDA-CDCC USP/SC, 2000).

O nome da cromosfera é baseado em sua cor avermelhada, devida a emissão da linha de hidrogênio da série de Balmer (H $\alpha$ ) a 6562 Å. Outra linha de emissão no espectro cromosférico é a linha do hélio, o qual requer altas temperaturas para ser excitado. As transições atômicas de baixo potencial de excitação, como aquelas de metais neutros, são vistas somente na base da cromosfera, enquanto que linhas do cálcio e do ferro ionizado são encontradas a altitudes maiores (Hetem et al, 2008).

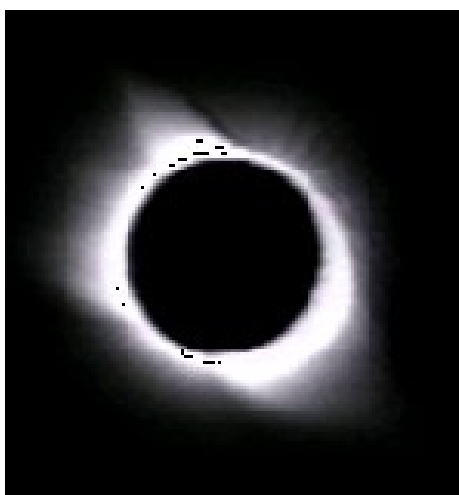


FIGURA 3: Foto de um eclipse onde observamos a cromosfera e, principalmente, a coroa.

FONTE: Mattos (1994).

Na cromosfera são observadas alguns dos fenômenos solares "explosivos" mais conhecidos como, por exemplo, protuberâncias, de mais de  $1 \times 10^5$  km de comprimento e ejeções de massa coronal. Algumas delas formam enormes arcos que acompanham as linhas de campo magnético solar e alcançam temperaturas superiores a  $1 \times 10^4$  °C. As protuberâncias tendem a ocorrer mais frequentemente durante os períodos de atividade máxima do Sol e podem durar várias semanas (PORTALUFONET, 2001).

## Coroa

É a camada mais extensa (abrange quase todo o sistema solar) da atmosfera solar. A densidade da matéria nessa camada é cerca de 10 milhões de vezes menor que na fotosfera e diminui conforme se afasta do Sol. Pode ser visualizada em eclipses solares totais e com o coronógrafo. A Coroa pode ser distinguida em três regiões: Coroa interna com espessura 1,3 raios solares a partir da cromosfera; Coroa intermediária que vai de 1,3 a 2,5 raios solares e a Coroa externa de 2,5 a 24 raios solares. (Leithold, 1988).

### 1.1.3 Ciclo de Atividade Solar

O ciclo de atividade solar está relacionado com a geometria do Campo Magnético Solar, o qual altera a sua configuração de dipolar para toroidal a cada 10-11 anos. Um indicador de atividade solar é, por exemplo, o número de manchas solares.

#### Manchas Solares

As manchas solares são regiões onde os campos magnéticos se concentram. Elas são áreas mais escuras que o restante da fotosfera e nos dão a impressão de serem negras. De fato, isto ocorre em virtude de sua temperatura mais baixa que as áreas circundantes na fotosfera. Sua temperatura, de cerca de  $4 \times 10^3$  °C, é inferior à temperatura de  $5,7 \times 10^3$  °C das áreas circundantes.

A área escura da mancha é denominada umbra, com temperatura de aproximadamente  $4,3 - 4,8 \times 10^3$  °C. Em torno da umbra, existe a penumbra cuja temperatura varia de  $5,4$  a  $5,5 \times 10^3$  °C. Essas manchas podem ser várias vezes maiores que a Terra. A FIGURA 4 compara a dimensão da Terra com a dimensão de uma mancha solar. As manchas surgem por razão do intenso campo magnético do Sol, que impede em alguns pontos a subida do calor proveniente do interior, provocando a formação de áreas mais frias. A vida média de uma mancha isolada é de duas semanas. O mais comum, porém, é surgirem aos pares ou grupos, então sua vida média será de aproximadamente três meses (PORTALUFONET, 2001).

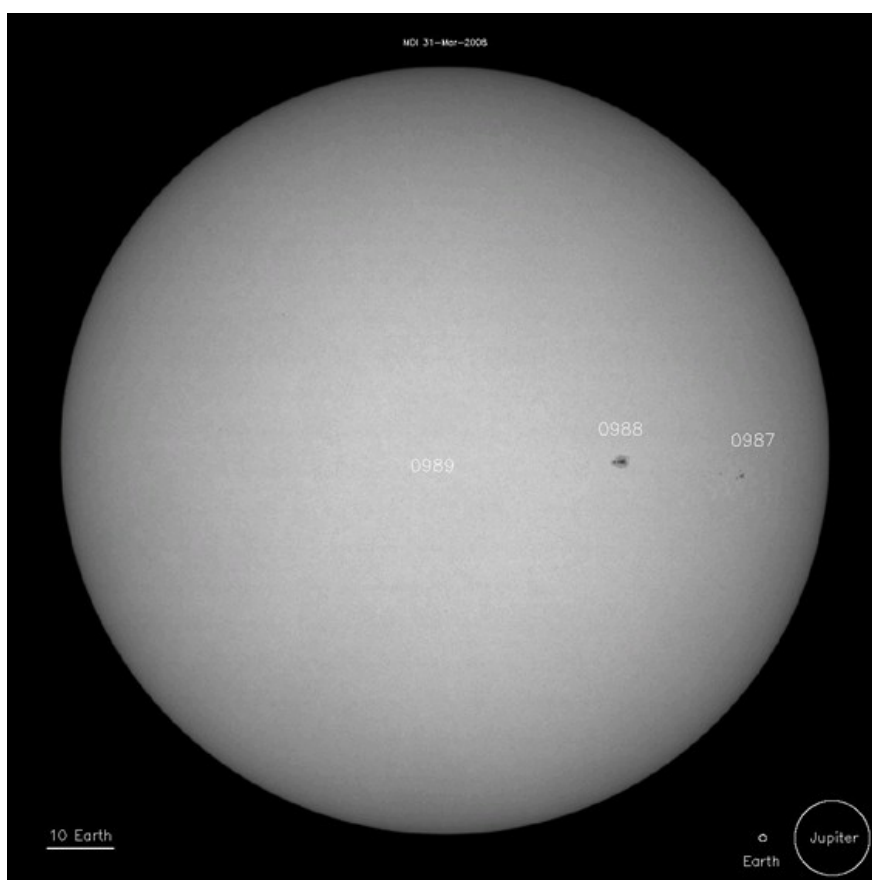


FIGURA 4: Comparação do tamanho das manchas solares com o tamanho da Terra, que é colocada ao lado de Júpiter por motivo de análise.

FONTE: Imagem obtida pelo satélite SOHO no dia 31 mar 2008.

Dizer quem uma mancha é unipolar significa que ela aparece como um único ponto, diferentemente das bipolares que aparecem aos pares e em grupos. As manchas são classificadas conforme seu tamanho e sua complexidade. Na TABELA 1 apresentamos a classificação das manchas solares com a sua respectiva descrição.

TABELA 1: Classificação e descrição das manchas solares.

GRUPOS	DESCRIÇÕES
A	são unipolares e não possuem penumbra.
B	São bipolares e não possuem penumbra.
C	São bipolares e possuem uma mancha principal com penumbra.
D	São bipolares, possuem penumbra ao redor de toda a mancha e têm um comprimento menor que 10° longitudes heliográficas.
E	São bipolares, possuem penumbra ao redor de toda a mancha e têm um comprimento entre 10° e 15° longitudes heliográficas.
F	São bipolares, possuem penumbra ao redor de toda a mancha e têm um comprimento maior que 15° longitudes heliográficas.
G	São unipolares e possuem penumbra.

FONTE: Stix (1991).

As manchas também se deslocam pelo Sol, conforme o Sol gira em torno de seu eixo. Uma mancha próxima ao equador precisará cerca de 25 dias para completar uma rotação, já uma mancha próxima ao pólo, se houver alguma, vai precisar de um mês para completar a viagem.

### Ciclo de Manchas Solares

Conforme já mencionado, o número de manchas solares é um indicador de atividade solar. Pois, o número de manchas está intimamente relacionado com a fase do ciclo solar. O número de manchas tem uma duração de 11 anos, durante o qual ocorre um máximo e um mínimo de atividade. Chamamos de máximo o período durante o qual a soma do número de manchas individuais solares é maior e, conseqüentemente ocorrem às maiores atividades solares associadas a elas, tais como as fulgurações solares. O ciclo completo do Sol na verdade dura 22 anos posto que de um ciclo de 11 anos para outro ocorre a inversão magnética solar. As primeiras observações das manchas solares foram feitas por Galileu em 1610, utilizando seu telescópio. As observações diárias do Sol iniciaram em 1749 no Observatório de Zurique, na Suíça. Após o estudo da atividade do Sol durante mais de dois séculos e meio podemos dizer que essa atividade não é constante ao longo do tempo. Houve inúmeros ciclos com baixíssima atividade entremeados por outros mais elevados. Até hoje o ciclo mais intenso observado foi o 19 que ocorreu de 1955 a 1966 (TODO O CÉU, 2003).



### 1.1.4 Tipos de Radiações

Já mencionamos que o Sol emana radiação a partir do núcleo para as regiões superiores. Nesta seção apresentaremos, de forma sucinta, alguns dos tipos de radiações que são relevantes para os nossos estudos da ionosfera terrestre.

#### Raios Gama

Os raios gama não têm carga elétrica e representam um componente do espectro eletromagnético. Sua principal característica é ser muito mais penetrantes do que as partículas alfa e beta. Os raios gama que se propagam na direção da Terra não chegam à superfície, pois são absorvidos na parte mais alta da atmosfera (TODO O CÉU, 2003).

#### Radiação Ultravioleta

A radiação ultravioleta é a porção do espectro eletromagnético que compreende os comprimentos de onda de 100 a 400 nm. A porção entre 400 e 320 nm é classificada como UVA, também chamada de "luz negra" ou onda longa. Já porção entre 320 e 280 nm, como UVB, também chamada de onda média e a porção entre 280 e 100 nm, como UVC também chamada de UV curta ou "germicida". A maior parte da radiação UV emitida pelo Sol é absorvida pela atmosfera terrestre. A quase totalidade (99%) dos raios ultravioletas que efetivamente chegam à superfície da Terra são do tipo UVA. A radiação UVB é parcialmente absorvida pelo ozônio da atmosfera. Já a radiação UVC é totalmente absorvida pelo oxigênio atômico e o ozônio da atmosfera (Lang, 2001).

#### Radiação Infravermelha

Essa radiação foi descoberta em 1840 pelo astrônomo William Herschel, que assim como Newton, em 1664, decompôs a luz solar por meio de um prisma, projetando-a numa tela, com a finalidade de descobrir qual das cores do arco-íris aqueceria mais um bulbo de um termômetro.

Hoje em dia sabemos que esta radiação é a porção espectral localizada entre a região das ondas de rádio e a região de luz visível. Na faixa de radiações do infravermelho distinguem-se três regiões: infravermelho próximo, médio e longínquo. A subdivisão baseia-se na facilidade em produzir e observar essas três modalidades do infravermelho, o que depende de seu comprimento de onda. Todavia pode-se estabelecer que o infravermelho próximo está compreendido entre 0,7 e 1,5  $\mu\text{m}$ ; o infravermelho médio está localizado entre 1,5 e 10  $\mu\text{m}$ ; enquanto o infravermelho longínquo é restrito à faixa de 10 a  $10^3$   $\mu\text{m}$ . O infravermelho próximo possui as mesmas propriedades da luz visível. Pode ser produzido por qualquer fonte luminosa e ser estudado com os mesmos detectores (chapas fotográficas, fotocélulas, etc.). Já o infravermelho intermediário requer técnicas mais refinadas para que seja produzido (Silva, 2006).

#### Ondas de Rádio

Ondas de rádio são um tipo de radiação cujo comprimento tem entre  $10^{-3}$  e  $10^3$  m. As porções inferiores deste espectro são parcialmente absorvidos na ionosfera. Radiações com comprimentos de onda maiores de 10 m são refletidas na ionosfera. As ondas de rádio que atingem o solo têm pouca energia em seus fótons (se comparamos com os fotos das luzes visíveis). Isso faz com que os átomos da atmosfera não se agitem tanto, facilitando então a passagem dessas ondas pela atmosfera, ou até mesmo por nuvens de chuva (Brain, 2000).

## Raios-X

Os Raios-X possuem uma extensão de onda de  $10^{-11}$  m. Por causa de seu comprimento de onda extremamente curto, eles são capazes de penetrar materiais que absorvem ou refletem luz visível. Esses raios são produzidos quando elétrons em alta velocidade chocam-se com matéria. Dentro de um tubo de Raios-X isto é feito pela direção de uma corrente de elétrons em alta velocidade contra um objeto de metal. Conforme eles se chocam com os átomos do objeto, os elétrons liberam a maior parte de sua energia na forma de calor. Para condições normais de exposição usadas em radiografia médica, aproximadamente um por cento de sua energia é emitida em forma de Raios-X. (Lang, 2001).

### 1.1.5 Ventos Solares

O vento solar é a emissão contínua de elétrons e íons de hidrogênio carregados provenientes da coroa solar, e atingem velocidade média 400 km/s. Variações na coroa solar devido à rotação do Sol e às suas atividades magnéticas fazem o vento solar ficar variável e instável, exercendo influência nos plasmas ao redor da estrela e planetas próximos a ela. Exemplos do efeito do vento solar são alterações na direção das caudas dos cometas. Quando um cometa passa próximo ao Sol, ele tem a orientação de sua cauda alterada pela direção do vento solar. O vento solar também influi nos campos magnéticos planetários, as magnetosferas.

Além de influir na propagação das ondas de rádio, o vento solar pode influir no comportamento da atmosfera da Terra. As partículas carregadas podem alterar a ionização na alta atmosfera. Além disso, se o vento solar alterar significativamente suas propriedades ele pode causar tempestades magnéticas (KIPPENHAHN, 1994).

### 1.1.6 Atividade Solar

A atividade solar é definida em função dos fenômenos que ocorrem dentro e/ou na superfície do Sol. São exemplos de fenômenos da atividade solar as nuvens magnéticas, os *flares*, as proeminências ou protuberâncias, entre outros.

#### Nuvem Magnética

As nuvens magnéticas são definidas como eventos transientes observados no vento solar. É uma região de campo magnético enrolado em forma de espiral que possui em seu interior um plasma (geralmente de prótons) de baixa densidade e temperatura, a qual pode se desprender do Sol. Nuvens magnéticas são, possivelmente, manifestações das ejeções de massa pela coroa. Uma típica representação das nuvens magnéticas é apresentada na FIGURA 5.

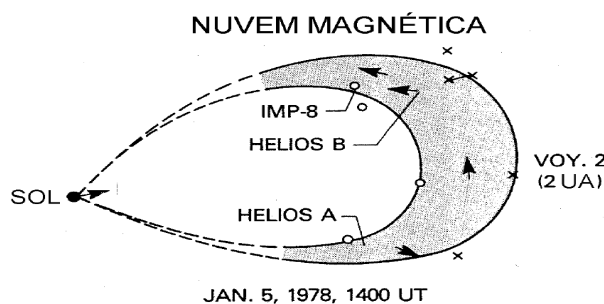


FIGURA 5: Geometria de uma nuvem magnética  
FONTE: Dal Lago (2004, p. 51).

Flares

Flares solares são explosões transientes que acontecem sobre uma região ativa e afetam a coroa e a cromosfera do Sol. Eles liberam grande quantidade de energia armazenada em campos magnéticos, tipicamente  $10^{29}$  a  $10^{32}$  erg. Os flares emitem radiações que se espalham por todo o espectro eletromagnético, criando assinaturas de sua presença desde a região das ondas de rádio até a região dos Raios-X e Raios Gama (APOLO11, 2006). A classificação dos diferentes tipos de flares é feita baseado no fluxo de energia emitido em Raios-X, associados a este flare. E são apresentadas na TABELA 2.

TABELA 2: Classificação dos flares baseado no fluxo de energia emitido em Raios-X.

Classe	Fluxo de Raios-X
	na faixa de 1-8 Å (W/m <sup>2</sup> )
C	$10^{-6} \leq E < 10^{-5}$
M	$10^{-5} \leq E < 10^{-4}$
X	$E \geq 10^{-4}$

FONTE: Jursa (1985).

Protuberâncias

Outro fenômeno observável na superfície do Sol é a protuberância, imensos jatos de gás direcionados pelas linhas de força do campo magnético que podem atingir até  $3 \times 10^6$  km de altura, e que apresentam forma geométrica variada (arco, laço, feixe, etc.). Existem dois tipos básicos de protuberâncias: as quiescentes e as eruptivas. As primeiras são mais numerosas, mais lentas e menos luminosas. Podem durar vários meses e em geral atingem uma altura de  $8 \times 10^3$  km, mas podem chegar até a  $3 \times 10^6$  km. Já as protuberâncias eruptivas são claras, duram alguns minutos e apresentam uma ejeção de matéria com velocidade superior a 100 km/s. Atingem, em geral, a altura de  $4 \times 10^4$  km (COLÉGIO SÃO FRANCISCO, 2008)

**1.1.7 Atividade Magnética**

A atividade magnética é definida em função das perturbações magnéticas que ocorrem no campo magnético terrestre em virtude da resposta deste aos fenômenos solares que atingem a Terra.

Campo Magnético Terrestre

O campo magnético é gerado no núcleo terrestre devido ao movimento do magma. As linhas do campo magnético emergem do pólo norte. O norte geográfico corresponde ao pólo sul magnético e vice-versa. A força da linha de campo magnético se estende infinitamente, mas vai se tornando mais fraco com o aumento da distância da sua fonte. Mas, a interação do das linhas do campo magnético com o vento solar, provoca a criação de uma cavidade determinada de magnetosfera, na qual um lado achatado e outro alongado. A FIGURA 6 ilustra o formato da magnetosfera terrestre.

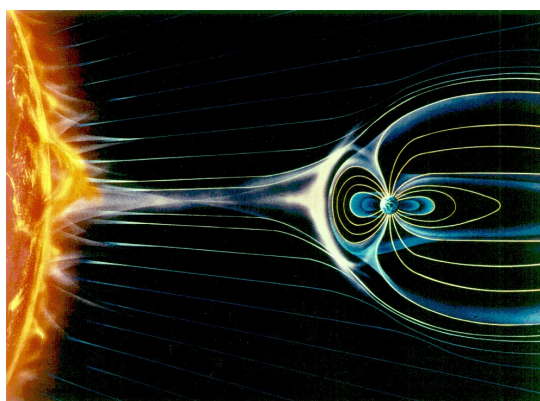


FIGURA 6 :A magnetosfera é comprimida no lado diurno devido à força das partículas que chegam, e estendido no lado noturno.  
FONTE: NASA (2008).

### Cinturões de Van Allen

Os Cinturões de Van Allen são duas regiões de onde há concentração de partículas energéticas dentro da magnetosfera, como mostra a FIGURA 7. O cinturão interno está localizado a cerca de 1,5 raios terrestres, já o cinturão externo está localizado a cerca de 4,5 raios terrestres (um raio terrestre é cerca de  $6,37 \times 10^9$  m). Entre os dois cinturões não existe uma delimitação clara, dependendo do nível de atividade magnética os cinturões podem fundir-se. O cinturão interno contém prótons altamente energéticos, com cerca de 10 MeV e densidade aproximada de 15 prótons por metro cúbico. Os elétrons são menos energéticos, possuem cerca de 0,5 MeV. O cinturão externo possui prótons e elétrons de aproximadamente 1,5 MeV. (Lang, 2001).

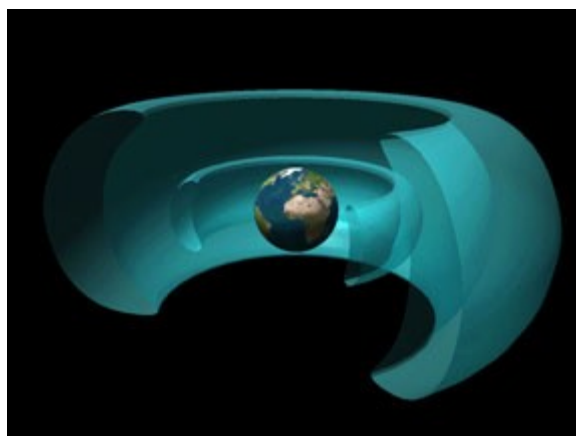


FIGURA 7: Ilustração dos cinturões de Van Allen, tanto interno quanto externo.  
FONTE: GEOCITIES (2008).

### **1.1.8 Tempestades Magnéticas**

As tempestades magnéticas ocorrem por causa de explosões solares que liberam enormes quantidades de partículas e radiação no espaço. Em geral, essas explosões estão ligadas ao aparecimento das manchas solares na superfície do Sol (ciclo solar). O distúrbio ocorre quando há ejeções de massa através da coroa solar em direção à Terra (Lang, 2001). Assim como no caso da utilização das manchas solares como indicadores de atividade solar, há índices magnéticos, os quais

são utilizados como indicadores de atividade magnética. Eles são usados para monitorar as variações que ocorrem no campo magnético terrestre, suas intensidades e durações. Os índices mais utilizados são os índices *Disturbance Storm-Time* (Dst), *Planetarische Kennziffer* ou índice planetário (Kp) e *Auroral Electrojet* (AE) (Dal Poz et al., 2006).

### Índice Kp ( Planetarische Kennziffer )

Este índice é usado para analisar as variações ocorridas na atividade magnética em intervalos de três horas, relativas à curva do dia quieto para um determinado observatório magnético. Existem 13 observatórios distribuídos entre 46° e 63° ao norte e -46° e -63° ao sul do equador geomagnético. (Fedrizzi, 2003). As medidas são convertidas em uma escala quase logarítmica cujos valores variam de acordo com a TABELA 3.

TABELA 3: Escala logarítmica dos valores do índice Kp.

<b>Tempestade magnética</b>	<b>Índice Kp</b>
Muito calma	0 a 1
Calma	1 a 2 <sup>-</sup>
Normal	2 <sup>-</sup> a 3 <sup>+</sup>
Intensa	3 <sup>+</sup> a 4 <sup>+</sup>
Muito Intensa	4 <sup>+</sup> a 9

FONTE: Fedrizzi (2003).

### Índice AE ( Auroral Electrojet )

É um indicador do eletrojato auroral, mede as correntes que fluem da zona auroral e é derivado de dados obtidos em estações magnéticas distribuídas longitudinalmente perto da zona auroral. Para a sua construção, os magnetogramas da componente horizontal H do campo geomagnético das estações são sobrepostos e a envoltória superior é denominada AU enquanto a envoltória inferior é denominada AL (Davies, 1990). A partir daí, o índice AE pode ser construído, sendo definido como a diferença entre a envoltória superior e a envoltória inferior, isto é,  $AU - AL$ .

### Índice Dst (Disturbance Storm Time)

O índice Dst representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial ao longo do globo terrestre (Yamashita, 1999). Existem quatro observatórios geomagnéticos: Hermanus - África do Sul (latitude geográfica: 34,40°), Kakiota - Japão (latitude geográfica: 36,23°), Honolulu - Hawaí (latitude geográfica: 21,32°) e San Juan - Porto Rico (latitude geográfica: 18,32°). É a partir desse parâmetro que se define a tempestade geomagnética, pois, antes e após a ocorrência de uma tempestade, o índice Dst tem sempre um comportamento padrão. Logo antes do início da tempestade, o índice Dst apresenta um pico de intensidade que é conhecido por fase inicial ou início súbito. Após esse pico, desenvolve-se a fase principal da tempestade, que é caracterizada pela brusca queda do valor da intensidade do índice. Esta fase também é conhecida como fase negativa da tempestade, e pode ter uma duração de meia até varias horas (Fedrizzi, 2003). Após alcançar o mínimo, o índice começa a subir de valor, cuja fase é conhecida como fase de recuperação, até atingir aproximadamente o valor calmo, que ocorre quando não há tempestade (Yamashita, 1999). A TABELA 4 mostra o nível de intensidade da tempestade magnética medido pelo índice Dst.

TABELA 4: Classificação de uma tempestade geomagnética.

<b>Tempestade Magnética</b>	<b>Índice Dst</b>
Fraca	Dst > 30nT
Moderada	50 nT < Dst < 100 nT
Intensa	Dst > 100 nT

FONTE: Fedrizzi (2003).

## 1.2 A Ionosfera Terrestre

A ionosfera é uma região da atmosfera terrestre situada entre 60 e 1000 km de altitude. Ela é formada, em essência, por gases ionizados sob altas temperaturas, ou seja, um plasma. A noite quando quase não há essa interação, existe uma perda na ionização atmosférica, mas essa perda chega a ser irrelevante quando a comparamos com a produção que há durante o dia.

Uma vez formada a ionosfera, os íons e elétrons tendem a se recombinar e reagir com outras espécies de gases e produzir outros íons. Assim, há um equilíbrio dinâmico na qual a concentração líquida de elétrons livres (densidade eletrônica) depende da velocidade relativa de produção e perda (Denardini, 1999). Entre os processos de perda na região superior da ionosfera destaca-se a recombinação eletrônica. Ela consiste na recombinação dos elétrons com os íons positivos formando os átomos neutros. Na região inferior da ionosfera, um processo de perda iônica é a junção eletrônica que consiste nos átomos neutros que se unem aos elétrons formando íons negativos. Essa junção explica a concentração de íons negativos na base da ionosfera. Porém todos esses processos de perda não são capazes de eliminar totalmente os elétrons do plasma ionosférico.

A ionosfera é formada de átomos e moléculas neutras, e quando os raios solares que são muito energéticos, a atingem, faz com que essas partículas neutras liberem elétrons, formando os íons positivos, resultando no plasma ionosférico. Portanto a ionosfera só existe por que há uma interação entre a atmosfera e a radiação solar.

A ionização primária ocorre com raios solares na faixa do ultravioleta e dos Raios-X. Os prótons e partículas alfas geram a ionização secundária, que é formada principalmente na ionosfera noturna. A radiação solar é absorvida pela atmosfera e vai diminuindo à medida que vai se aproximando do solo. Os Raios-X, UV e EUV são fótons muito energéticos e possuem a capacidade de remover elétrons dos átomos e moléculas neutras. Quando um elétron se separa da partícula neutra, ele pode se tornar um fotoelétron altamente energético. Assim é formado o íon positivo (Leithold, 1988).

Ao anoitecer o plasma torna-se fracamente ionizado, pois a maior fonte de radiação cessa. Isto indica que a estrutura ionosférica varia conforme a radiação solar. Além disso, a densidade ionosférica varia com o ciclo de atividade solar, a sazonalidade e a latitude. A variação da densidade atmosférica e da absorção da quantidade de energia proveniente da radiação solar geram três regiões ionosféricas distintas, que são as regiões D, E e F.

### 1.2.1 Região D

A região D está localizada na porção inferior da ionosfera, entre ~ 50 e 90 km acima da superfície terrestre. É a menos densa em elétrons e praticamente desaparece durante a noite. Esta região é formada essencialmente por colisões de partículas energéticas com a atmosfera neutra. Esta região possui metais alcalinos (Na, K, Li) e as reações químicas mais importantes envolvem os seguintes elementos: O, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O. Ela também é responsável pela absorção das ondas de rádio em alta frequência (Rishbeth, 1969).

### 1.2.2 Região E

Esta região fica acima da região D, situada entre ~ 90 e 150 km de altura. É a região de máxima condutividade elétrica. As radiações ionizantes predominantes são os Raios-X, o UV e o EUV (Rishbeth, 1969). É nesta região que encontramos a maior quantidade de íons metálicos.

### 1.2.3 Região F

A região F fica acima da região E, iniciando a ~ 150 km da superfície terrestre e estendendo-se até o limite superior da ionosfera (~ 1500 km). Essa região se subdivide em F1 e F2 e em determinados horários e latitudes pode aparecer a F3 (Rishbeth, 1969).

*Camada F1:* localiza-se do limite inferior da região F até ~ 250 km de altura. É a região de transição entre o processo de perda iônica quadrática para o linear.

*Camada F2:* localiza-se a partir de ~ 250 km de altura incluindo o pico de densidade eletrônica, em ~ 300 km. Nesta camada a difusão torna-se um processo cada vez mais importante até dominar completamente a distribuição da densidade eletrônica local. O processo de perda iônica dominante é o processo de perda linear.

*Camada F3:* pode ser dividida em dois tipos, dependendo da época, ou seja, tipo 1, mais comum nos meses de verão, e do tipo 2 nos meses de inverno (Abdu, 1997).

## CAPÍTULO 2

### INSTRUMENTAÇÃO

Existem vários equipamentos para o estudo da ionosfera terrestre como, por exemplo, os sondadores digitais que emitem ondas eletromagnéticas que se propagam na ionosfera. Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos sobre sondadores digitais (a digissonda) e com os programas de análise de dados.

#### 2.1 Digissonda

A digissonda é um tipo de radar com potência de pico da ordem de 10 kW e potência média em torno de 500 W, que emite pulsos de energia eletromagnética em frequências variáveis entre 0,5 a 30 MHz, os quais são transmitidos verticalmente para a camada ionosférica. A digissonda serve para fornecer dados para a análise do comportamento da densidade de elétrons das camadas E e F da ionosfera. Este equipamento utiliza uma antena transmissora (FIGURA 8-A) e quatro receptoras (FIGURA 8-B). Após a recepção os sinais são gravados e processados, mostrando os parâmetros ionosféricos e perfil da densidade de elétrons através de ionogramas (INPE, 2003).

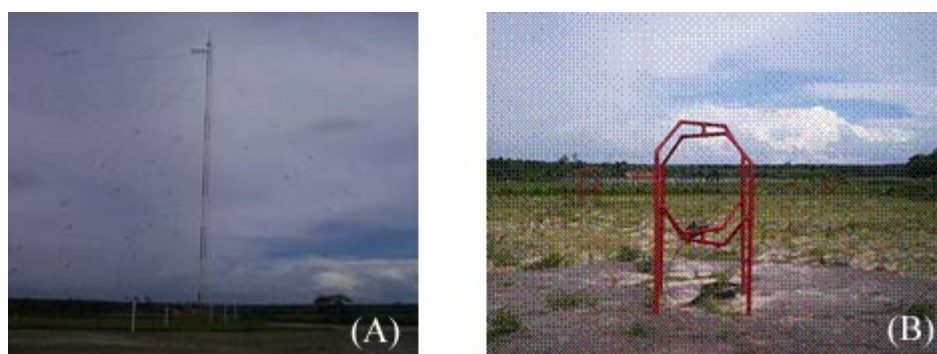


FIGURA 8: (A) Imagem de uma antena transmissora, (B) Imagem da antena receptora digissonda de São Luís - MA.  
Fonte: INPE (2003).

#### 2.2 Dados Coletados

Os dados coletados pela digissonda são, essencialmente, ecos do sinal refletidos pelas camadas ionosféricas. Esses ecos são organizados de acordo com a sua frequência de transmissão e com altura de reflexão para formar os chamados ionogramas (FIGURA 9). O software usado para a interpretação dos ionogramas é o *ARTIST*.



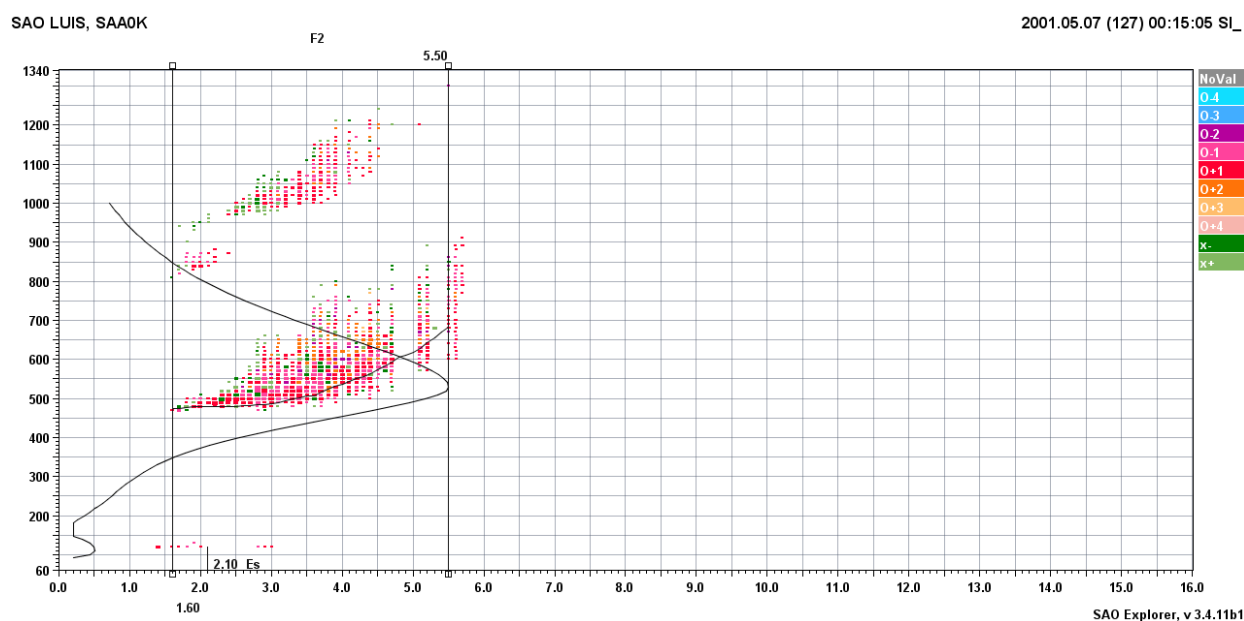


FIGURA 9: Exemplo de perfil ionosférico obtido no dia 07 de maio de 2001, às 00 h 15 min UT, em São Luís - MA.

### 2.3 Programa de Análise

O programa utilizado para a interpretação dos ecos recebidos é o *SAO-Explorer* (FIGURA 10), que através da organização e redução dos dados, gera ionogramas. 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;
- hmF2: altura do pico da camada F.

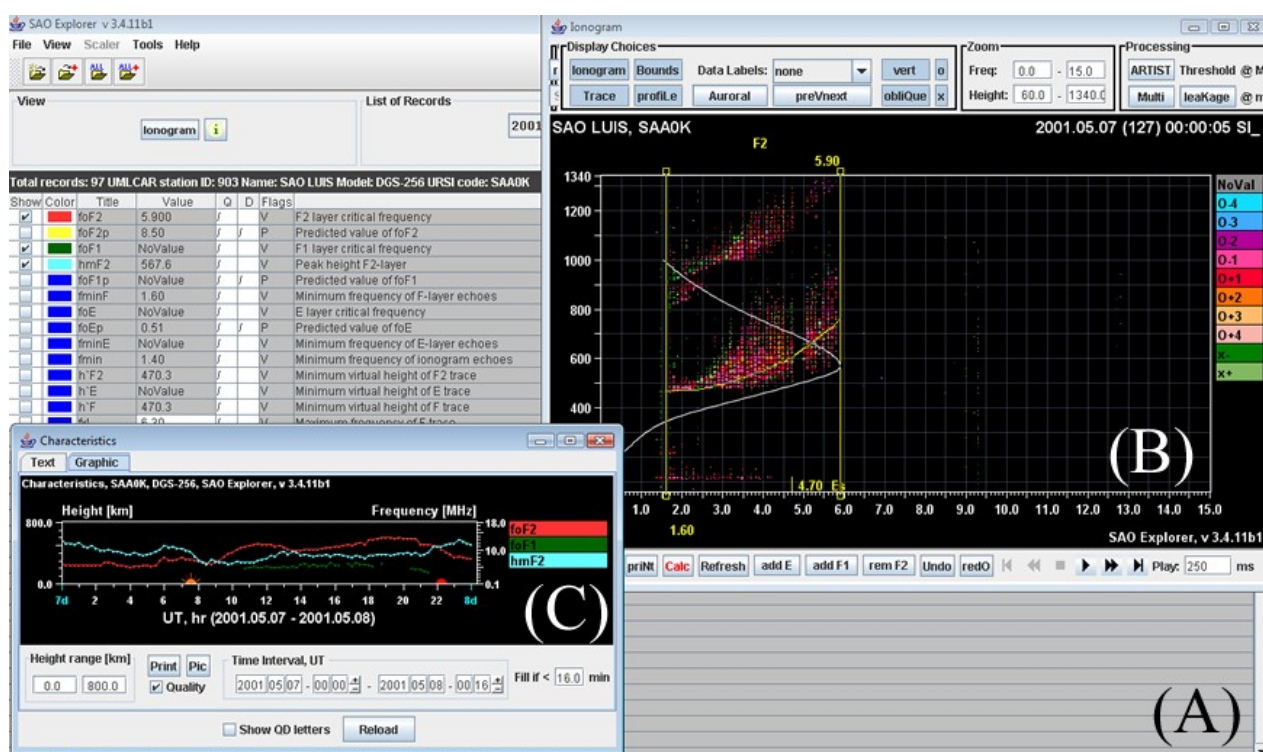


FIGURA 10: Ilustração do programa *SAO-Explorer* onde podemos visualizar: (A) a tela onde são escolhidos os parâmetros o qual serão trabalhados, que no caso foram selecionados foF2, foF1 e hmF2; (B) o ionograma que mostra os dados a cada 15 minutos; e (C) a tela das características dos dados durante o dia todo.

## 2.4 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 trabalham para produzir um modelo padrão ionosférico. Diversas edições melhoradas do modelo estão sendo liberadas. Para determinada posição, hora e data, o IRI descreve a densidade eletrônica, a temperatura eletrônica, a temperatura na atmosfera neutra, e a composição eletrônica na faixa da altura entre 50 e 2000 km. Fornece médias mensais na ionosfera para condições magnéticas calmas. As origens dos dados de principais são a rede global das ionossondas, os radares incoerentes (*Jicamarca, Arecibo, Malvern, St. Santin*), os sondadores de topo a bordo dos satélites de *ISIS* e de *Alouette* e em instrumentos dos diversos satélites e foguetes.

## CAPÍTULO 3

### ATIVIDADES DE PROCESSAMENTO E REDUÇÃO DE DADOS

Neste capítulo vamos apresentar as atividades de coleta e redução de dados selecionados para o estudo proposto neste projeto. Serão expostas a metodologia de classificação dos dados, os processamentos dos dados brutos da estação de digissonda escolhida e as simulações realizadas com o modelo IRI.

#### 3.1 Classificação dos Dias Selecionados

Foram selecionados sete dias do mês de maio de 2001 para os quais foram processados e analisados dados de digissonda coletados São Luís - MA que foram estudados neste trabalho. Estes dias foram separados entre dias de atividade magnética calma e dias de atividade magnética perturbada, como pode ser visto na TABELA 5. Para essa classificação foi escolhido o índice Kp. Se ao decorrer do dia o índice Kp atingiu 3+ durante qualquer hora, o dia foi classificado como perturbado, caso contrário foi classificado como calmo.

TABELA 5: Dias selecionados para análise, classificados de acordo com atividade magnética.

Dia de Maio	Índice Kp	Classificação
7	3- 4 3+ 2 3- 2 3- 1	Perturbado
8	1+ 1- 2+ 2+ 3+ 4- 4+ 4	Perturbado
9	5 5 4- 4- 5- 5+ 5 4+	Perturbado
10	5 +5 4- 3- 3- 2+ 3 3-	Perturbado
11	2+ 1 1+ 1 0+ 1- 2- 3+	Perturbado
12	3+ 2+ 3+ 5- 5+ 4+ 4+ 5-	Perturbado
13	5 3+ 2+ 2+ 3+ 4 5+ 4+	Perturbado

#### 3.2 Resultados do Processamento dos Dados Reduzidos

A partir dos dias selecionados, mostrados na TABELA 4, os dias foram reduzidos utilizando o software SAO-X. Com isso, os parâmetros foF2 e hmF2, os quais tinham sido obtidos automaticamente pelo *Artist* foram corrigidos pela bolsista. Para cada dia de análise, esta atividade envolveu o processamento de ionogramas em intervalos de 15 minutos.

Como resultado desta atividade de processamento dos dados, foram obtidas imagens gráficas, os ionogramas, sobrepostos pelos perfis ionosféricos. A seguir, apresentamos uma seqüência de figuras (11 a 17) contendo diversos ionogramas para os dias efetivamente reduzidos pela bolsista do ano de 2001.

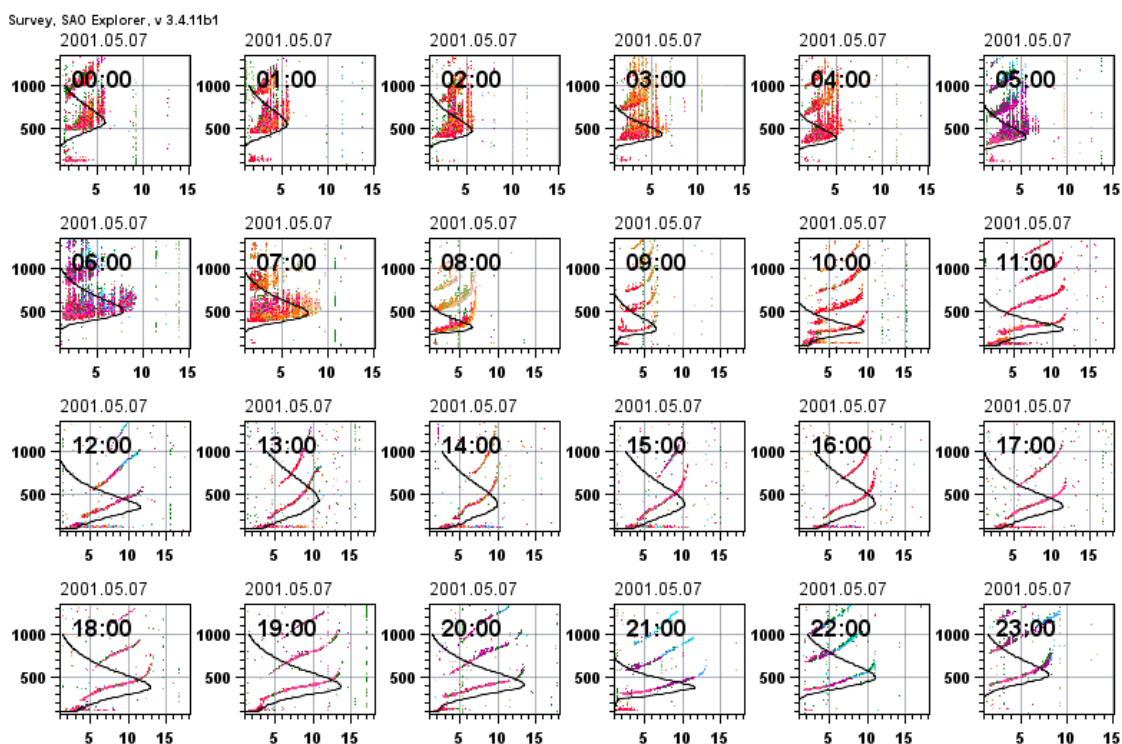


FIGURA 11: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 7 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

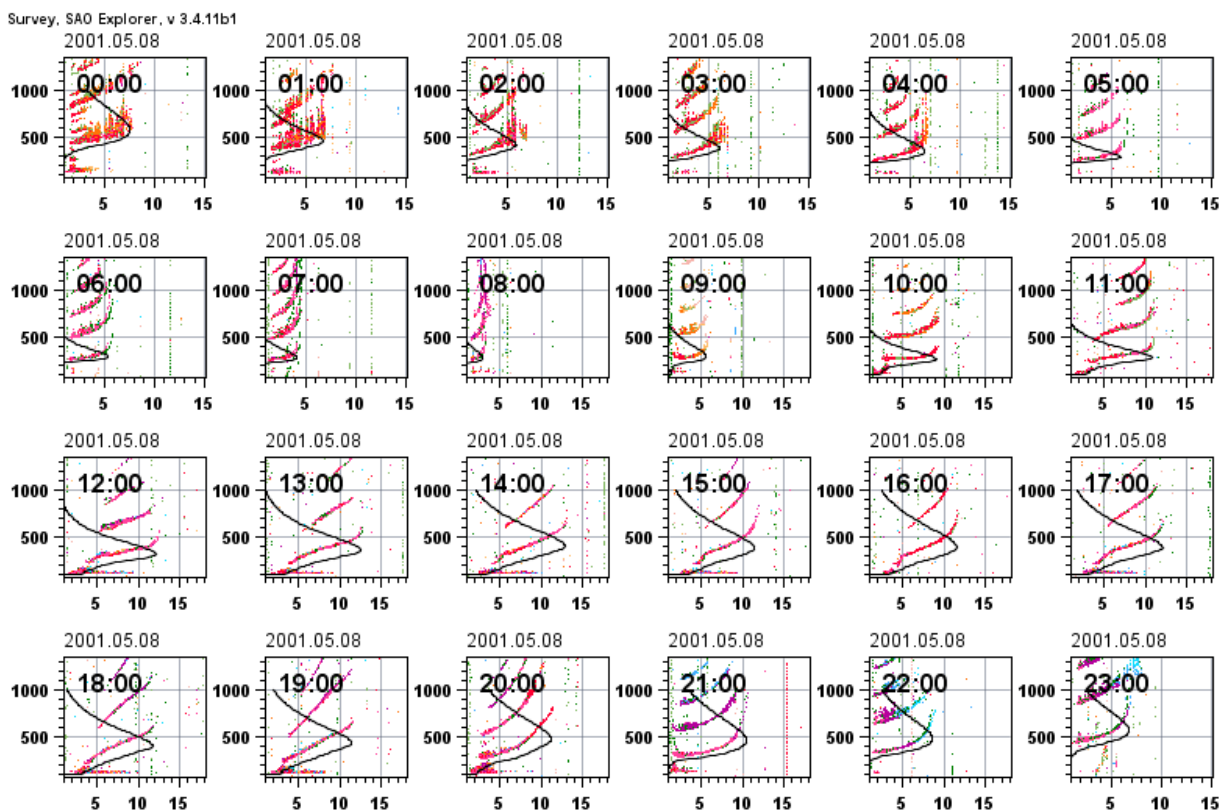


FIGURA 12: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 8 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

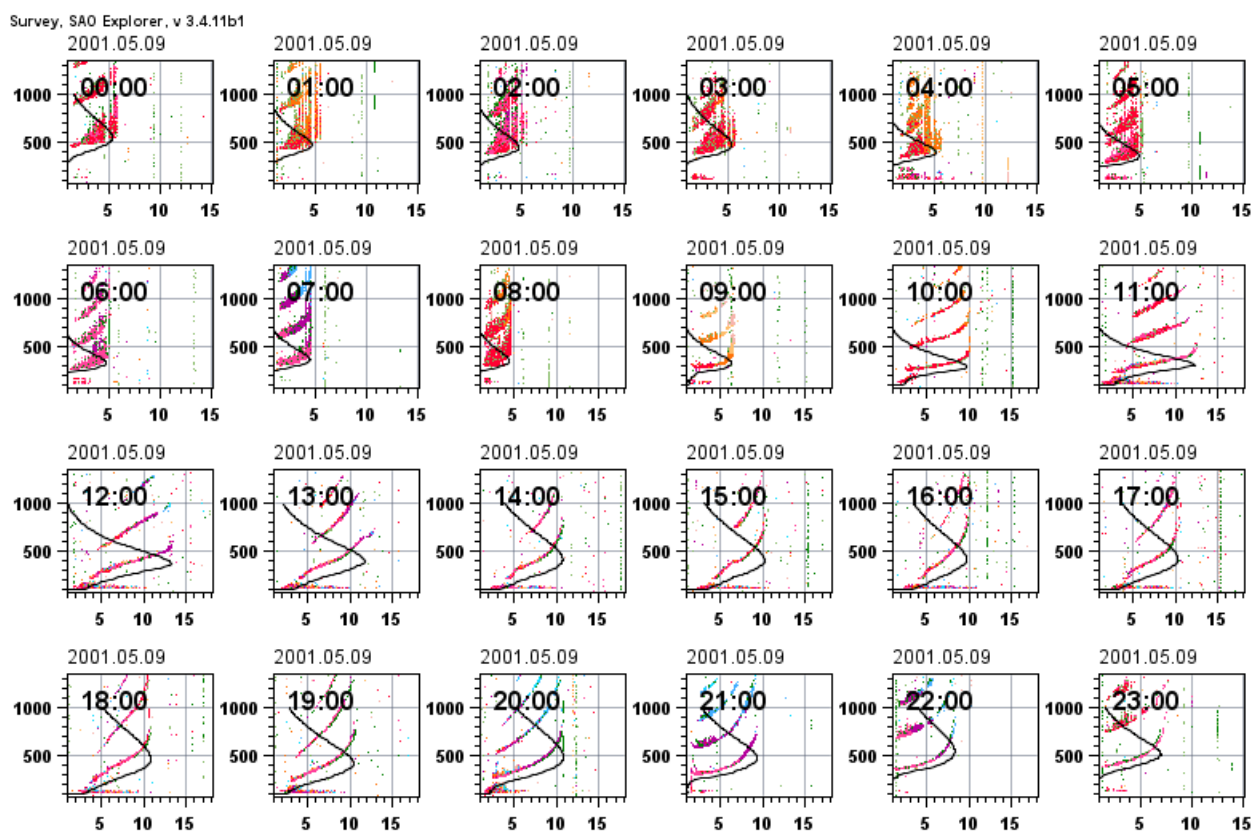


FIGURA 13: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 9 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

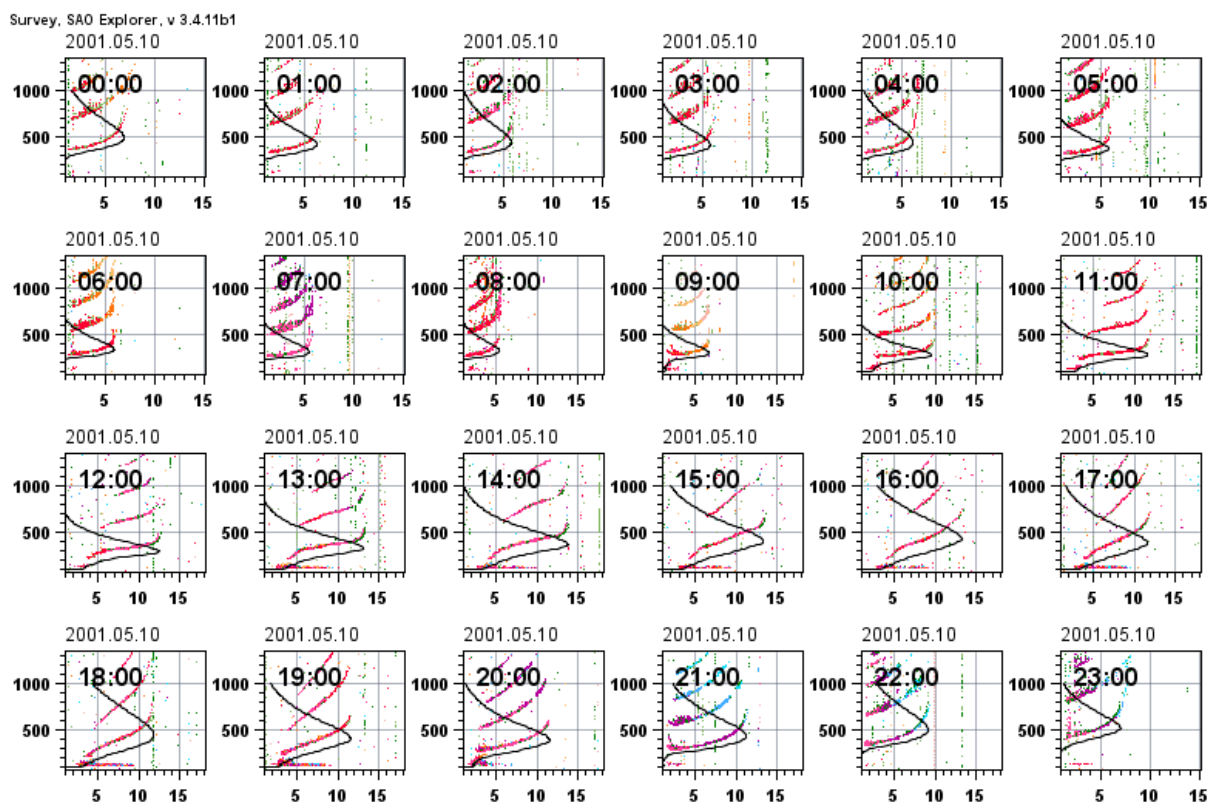


FIGURA 14: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 10 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

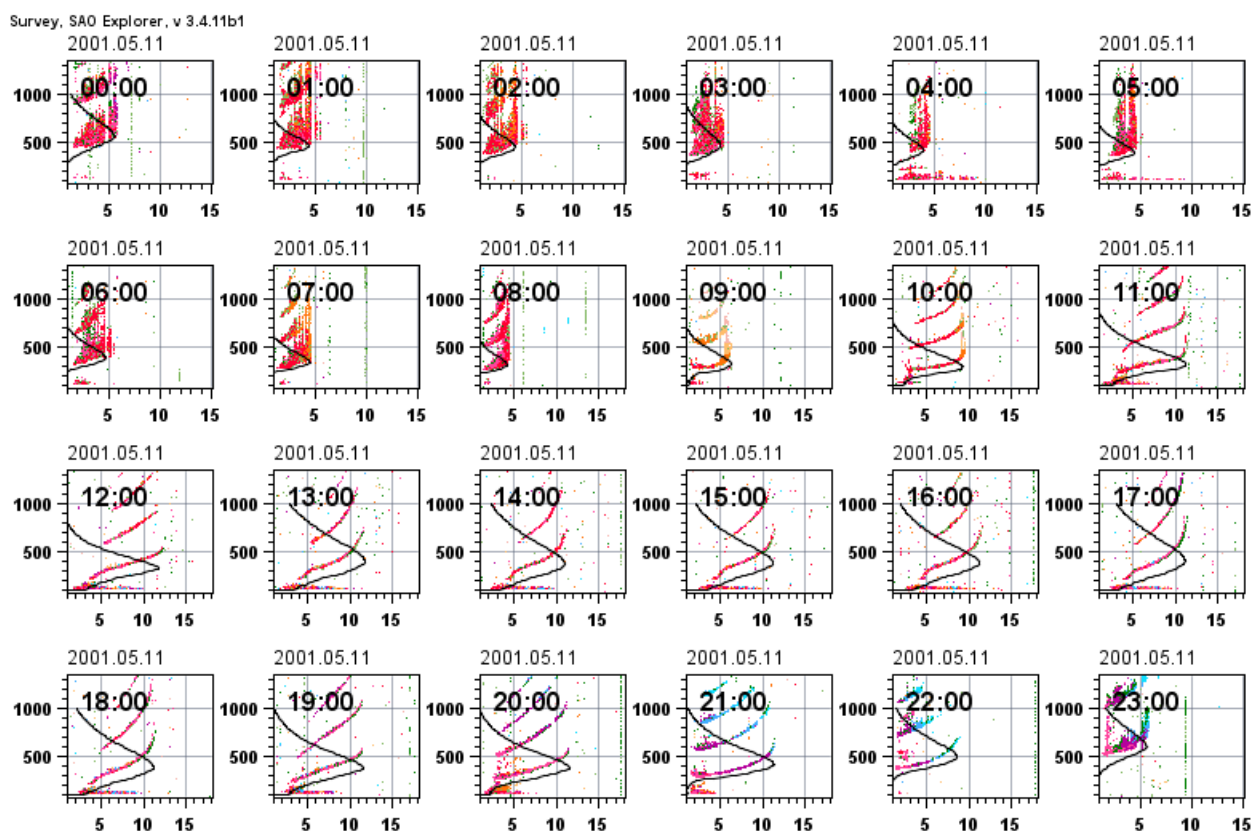


FIGURA 15: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 11 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

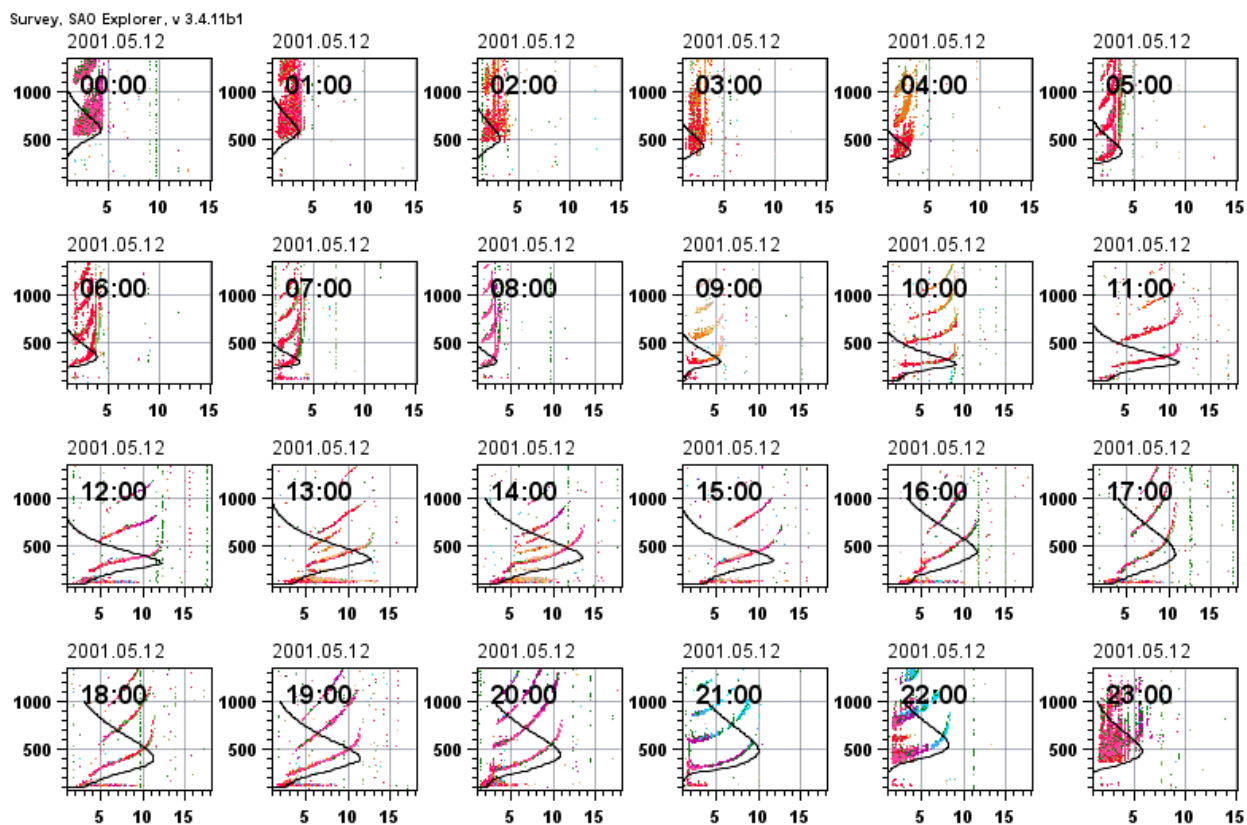


FIGURA 16: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 12 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

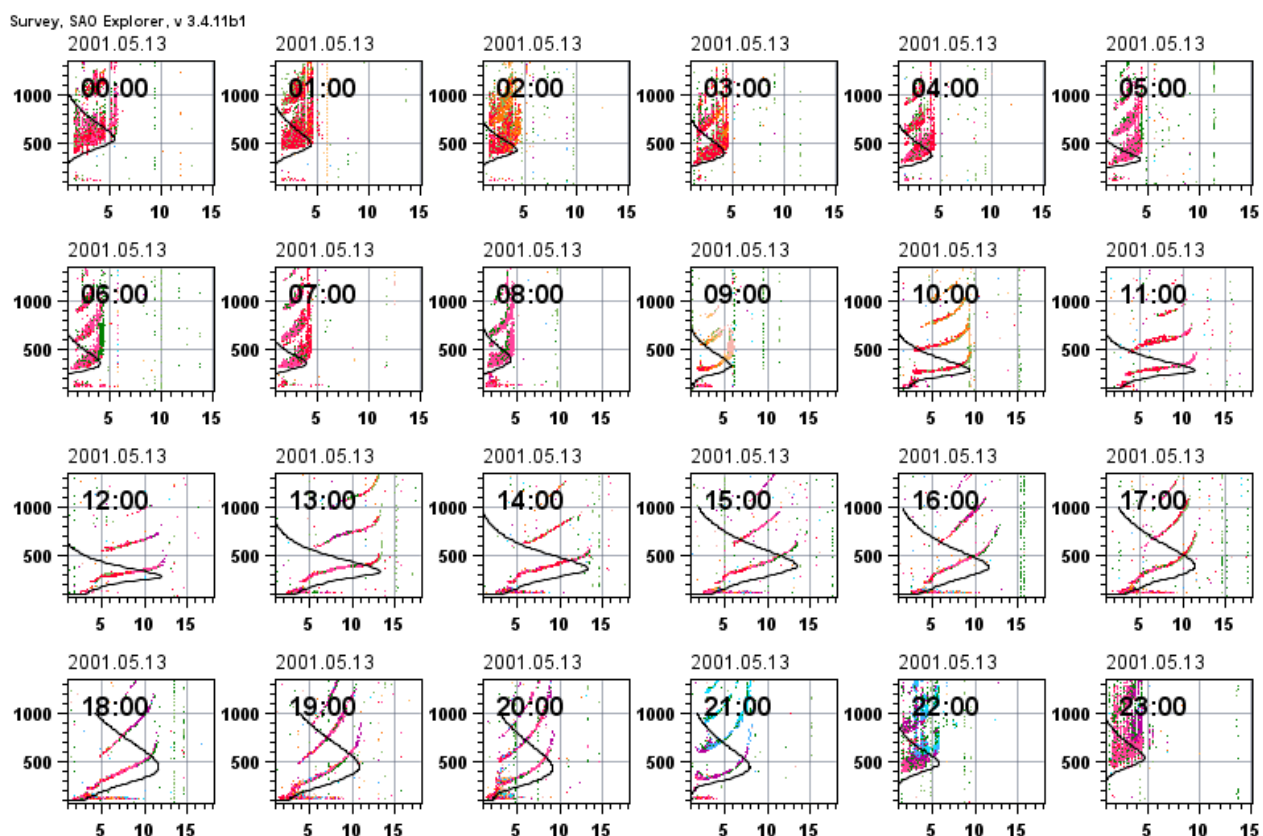


FIGURA 17: Série de Ionogramas obtidos a cada uma hora do dia 13 de maio de 2001 no sítio de São Luís - MA.

### 3.3 Exemplos de Simulações Realizadas

Com o modelo IRI foi simulado a frequência máxima de reflexão da onda eletromagnética na ionosfera (foF2), e altura do pico da camada F (hmF2), para a região de São Luís (2°31' S, 44°16' O). Na FIGURA 18 apresentamos o resultado da simulação destes parâmetros para o dia 7 de maio de 2001, escolhido como exemplo.

### VITMO ModelWeb Browser Results *iri 2007 model listing*

**Required input parameters**

Year= 2001., Month= 05, Day= 7, Hour=1.5,  
Time\_type = Universal  
Coordinate\_type = Geographic  
Latitude= -2.33, Longitude= 315.8, Height= 100.  
Prof. parameters: Start= 0. Stop= 24. Step= .25

**Optional input parameters:**

Sunspot number(Rz12) =not specified  
Ionospheric index(IG12) =not specified  
Upper limit for Electron content = not specified  
F peak model = URSI  
Ne Topside = NeQuick  
foF2 Storm model = on  
Bottomside Thickness = B0 Table  
F1 occurrence probability = Scotto-1997 no L  
D-Region Ne = IRI-95  
Topside Te = TTSA-2000  
Ion Composition = DS95/TT05  
*A value of -1 indicates that the parameter is not available for the specified range*  
*TEC=-1, means you have not entered an upper boundary height in the OPTIONAL INPUT section.*

**Selected parameters are:**

- 1 Hour
- 2 Height, km
- 3 hmF2, km
- 4 foF2, MHz

1	2	3	4
0.00	100.00	363.0	8.947
0.25	100.00	359.4	8.908
0.50	100.00	355.3	8.869
0.75	100.00	350.8	8.827
1.00	100.00	345.9	8.780
1.25	100.00	340.7	8.727
1.50	100.00	335.3	8.668
1.75	100.00	329.7	8.603
2.00	100.00	324.1	8.535
2.25	100.00	318.7	8.465
2.50	100.00	313.4	8.397
2.75	100.00	308.5	8.331

FIGURA 18: Exemplo de saída de dados do modelo IRI para a região de São Luís no dia 7 de maio de 2001.



## CAPÍTULO 4

### ANÁLISE DOS DADOS REDUZIDOS

Neste capítulo apresentaremos o estudo realizado com os dados reduzidos pela bolsista. Este estudo compreendeu uma análise da variação dos parâmetros ionosféricos da região F de São Luís - MA ( $2^{\circ}31' S$ ,  $44^{\circ}16' O$ ) em comparação com os mesmos parâmetros obtidos com o uso do modelo empírico IRI. Estes parâmetros ionosféricos e a classificação dos dias foram discutidos nos capítulos anteriores.

#### 4.1 Resultados das Análises dos Dados de São Luís e das Simulações Numéricas

Nos gráficos da FIGURA 19 apresentaremos os gráficos da frequência crítica da camada F<sub>2</sub> (foF<sub>2</sub>) em função do tempo (h) em hora universal e, no último gráfico da coluna da direita, o valor médio da frequência crítica. Os dados representados em verde escuro foram coletados pela digissonda instalada no sítio de São Luís - MA e reduzidos pela bolsista. Já os representados em laranja foram os dados simulados pelo IRI. Vale ressaltar que os gráficos estão em hora universal, ou seja, 3 horas em relação ao meridiano de Greenwich.

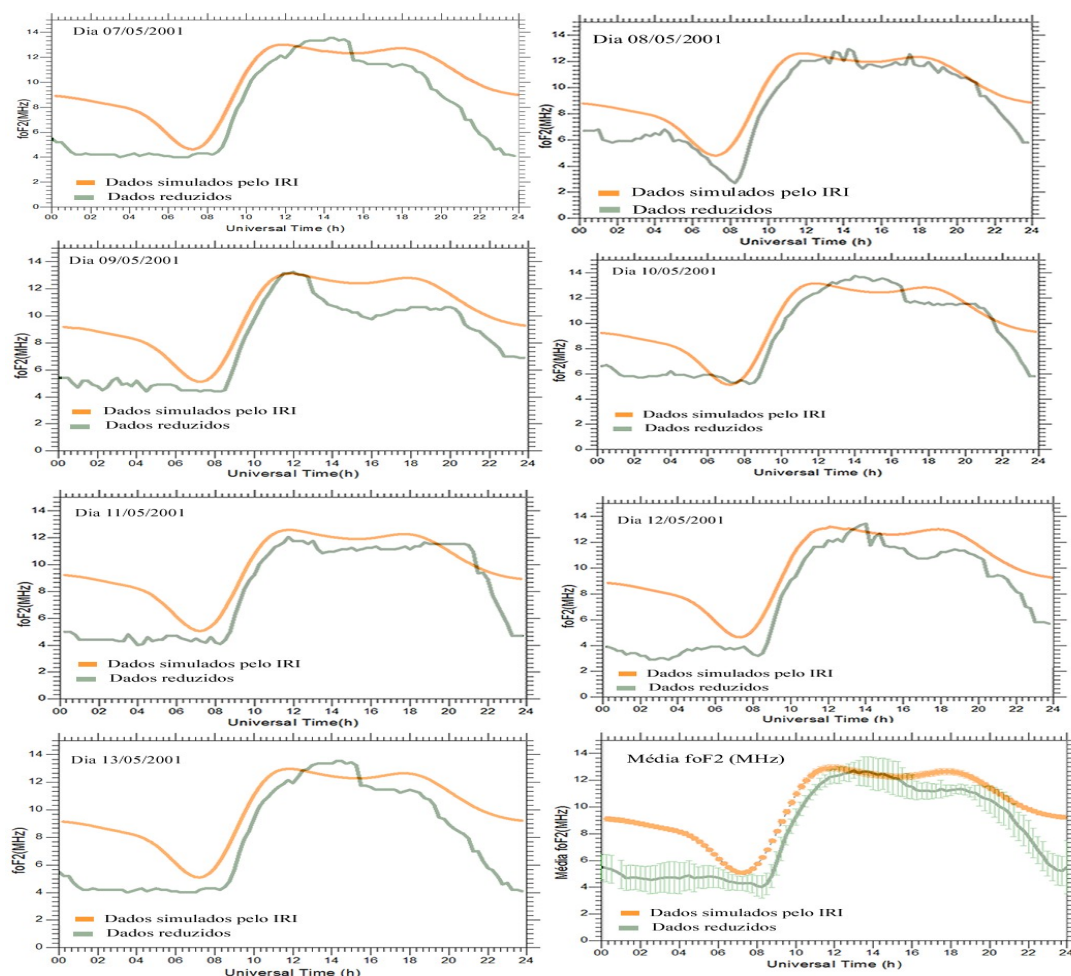


FIGURA 19: Série de gráficos da variação da frequência crítica em relação ao tempo para o período de estudo (07-13/05/2001) e variação média com seu respectivo erro médio quadrático. Em verde escuro são os dados obtidos a partir da digissonda localizada no sítio de São Luís- MA, e em laranja são os dados simulados pelo modelo IRI.

Nos gráficos da FIGURA 20 apresentamos os gráficos da altura do pico da camada F (hmF2) em função do tempo (h) em hora universal e, no último gráfico da coluna da direita, o valor médio do pico. O traço verde claro representa os dados coletados pela digissonda instalada no sítio de São Luís - MA e reduzidos pela bolsista, já os cinza são os dados simulados pelo IRI.

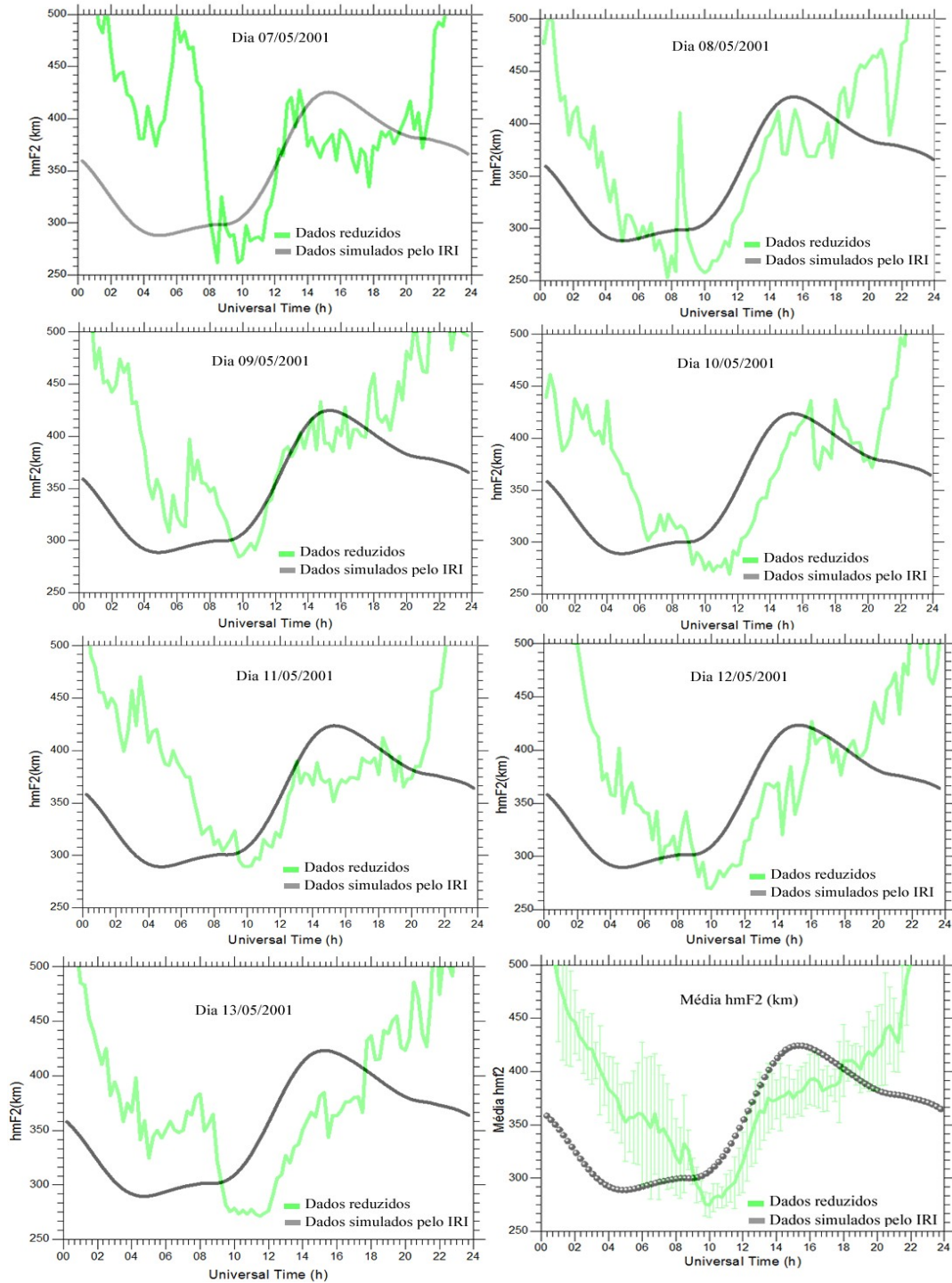


FIGURA 20: Série de gráficos da variação da altura do pico da camada F em relação ao tempo para o período de estudo (07-13/05/2001) e variação média com seu respectivo erro médio quadrático. Em verde claro são os dados obtidos a partir da digissonda no sítio de São Luís- MA, e em cinza são os dados simulados com o modelo IRI.

## 4.2 Discussão dos Resultados

### 4.2.1 Análise da Variação Temporal da Frequência Crítica da Camada F

Os gráficos da variação temporal da frequência crítica da camada F (foF2) são, de fato, uma representação direta da variação da densidade eletrônica ao longo do dia, conforme demonstrado através da equação (1). Esta equação mostra a relação entre a densidade eletrônica à frequência do plasma. Esta frequência do plasma é a frequência a qual reflete os rádios-sinais emitido pela digissonda e que são registrados em forma de ionogramas.

$$n_e = \frac{m_e \cdot \epsilon_o}{e^2} \cdot (2\pi f)^2 \Rightarrow n_e = 1,24 \times 10^4 f^2 \quad (1)$$

Nesta equação,  $m_e$  é a massa do elétron e vale, aproximadamente,  $9,31 \times 10^{-31}$  kg,  $\epsilon_o$  é o índice de permissividade no vácuo e tem o valor aproximado de  $8,85 \times 10^{-12}$  F.m<sup>-1</sup>, e  $e$  é carga elementar do elétron cujo valor aproximado é de  $1,6 \times 10^{-19}$  C.

Ao analisarmos os gráficos de variação em relação ao tempo da frequência crítica média observada com o auxílio da digissonda podemos perceber que, durante a madrugada, ou seja, da meia noite até as 8 h UT, a foF2 permanece praticamente constante. Após esse horário, há um aumento significativo da frequência crítica até aproximadamente as 12 h UT. Isso se deve pelo fato do nascer do Sol, a maior fonte de ionização, o que aumenta substancialmente a produção iônica, resultando em um aumento expressivo da densidade eletrônica. Quando ocorre o pôr-do-sol, por volta das 21h UT, a principal fonte de ionização da ionosfera é cancelada e a taxa de produção é drasticamente reduzida, reduzindo a densidade eletrônica até as 8h UT. Isto é claramente observado nos nossos dados.

Comprando os dados observados com os dados simulados, verificamos algumas discrepâncias. Estas discrepâncias são observadas, principalmente, no período noturno. Uma possível explicação se deve ao nível de perturbação magnética. O IRI é um modelo empírico que trabalha com médias mensais de dados obtidos em dias calmos. Os nossos dados foram obtidos durante dias magneticamente perturbados, conforme já foi apresentado nas seções anteriores. Outra possível explicação está na baixa densidade eletrônica noturna, o que dificulta a medição pela digissonda, reduzindo a precisão.

### 4.2.2 Análise da Variação Temporal da Altura Média do Pico da Camada F

Há um comportamento característico da variação da altura média do pico da camada F, tanto pelos dados obtidos pela digissonda instalada em São Luís, quanto pelos simulados com o modelo IRI, no qual há uma queda acentuada do pico da camada F durante a madrugada, há um crescimento acentuado durante a manhã, e uma tendência a estabilidade na parte da tarde. Com relação a este último aspecto, as simulações do modelo IRI parecem não ter a capacidade de manter completamente essa estabilidade na parte da tarde, oferecendo um pequeno decréscimo da camada, isso se deve ao fato do modelo IRI não considerar atividade magnética em suas simulações padrões, como foi dito anteriormente.

Tanto os gráficos com a variação da altura média do pico da camada F observados com a digissonda de São Luís quanto os gráficos com a variação da altura média do pico da camada F obtida com simulações pelo modelo IRI mostram que a partir de 10 h UT a altura média do pico da camada F

apresenta um aumento considerável até as 15-16 h UT. Contudo, uma diferença importante entre a variação do hmF2 observada e simulada aparece nos horários em torno do pôr-do-sol, aproximadamente, às 20 h UT. A altura média do pico da camada F observada nos dados coletados de digissonda em São Luís mostra um aumento significativo nesta faixa de horário. O mesmo não é claramente observado na variação da altura média do pico da camada F obtida com simulações pelo modelo IRI.

A elevação da hmF2 nos horários das de 10 às 15-16 h UT, comum aos dados simulados e observados, parece ser resultado do efeito fonte, típico da região equatorial. Quanto às discrepâncias observadas, nós sabemos que nesta faixa de horário há um fenômeno chamado de pico de pré-reversão, o qual acreditamos ser o responsável pela maior parte da diferença. Mas é importante ressaltar que estamos tratando de dados obtidos em períodos perturbados. Portanto, pode ser que parte desta diferença, assim como as pequenas diferenças observadas nos horário entre 10 e 15 h UT, sejam devido às alterações nos sistemas de correntes ionosféricas causadas pela condição perturbada.

Outra interessante característica podem ser observadas nestes gráficos, como, por exemplo, alguns picos de rápida elevação da camada F. Veja, por exemplo, os aumento substancial do hmF2 que ocorre antes do pôr-do-sol nos dia 07 de maio. Outro claro exemplo é a elevação bastante rápida da camada F que ocorre após as 08 h UT do dia 08 de maio. Estes fenômenos ainda não foram explicados e são objetos de interesse para nossos trabalhos futuros.

## **CONCLUSÕES**

O estudo dos fenômenos que ocorrem na ionosfera equatorial é de grande importância para que se possa estabelecer mecanismos de previsão. Neste sentido, os esforços para formação da bolsista na área de ciência espacial se concentraram, principalmente, no estudo sobre o Sol e sua influência na ionosfera terrestre. E para a parte prática deste trabalho, a digissonda foi escolhida como instrumento cujos dados foram processados e analisados pela bolsista.

O instrumento de trabalho para a realização do processamento de dados de digissonda foi a o software SAO-X que permite visualizar o perfil de densidade eletrônica dos dados da digissonda. Para as simulações numéricas foi utilizado o modelo IRI, o qual é um modelo empírico que fornece valores médios dos mesmos parâmetros ionosféricos observados pela digissonda.

Nossas análises mostraram algumas discrepâncias entre os dados observados e os resultados dos modelos. Parte desta diferença se deve a característica perturbada do período analisado.

Neste período de projeto a bolsista apresentou capacidade de interagir profissionalmente com os diversos integrantes do grupo de pesquisas ionosféricas do INPE, com os quais a bolsista foi capaz de colaborar com esforço integrado de pesquisa. Além disso, adquiriu a capacidade de elaborar trabalhos científicos, executá-los e compilar seus resultados, culminando com a preparação de trabalho para apresentação em eventos científico compatível com o seu grau de conhecimento.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Abdu, M. A.; BALAN, N.; Bailey, G.J.; Oyama, K. I.; Richards, P. G.; MacDougall, J.; Batista, I. S. **Equatorial plasma fountain and its effects over three location: evidence for additional layer, the F3 layer.** Washington, Estados Unidos da América, p. 2047-2056. 1997.
- APOLO11. **A estrutura externa do sol.** 2006. [online]  
<[http://www.apolo11.com/atividade\\_solar.php](http://www.apolo11.com/atividade_solar.php)> Acessado em 30 jun. 2008.
- Brain. M. **Como funciona o rádio.** 2000. [online] <<http://eletronicos.hsw.uol.com.br/radio.htm>>  
Acessado em abr. 2008.
- CDA-CDCC USP/SC. **O sistema Solar.** 2000. [online] <<http://cdcc.sc.usp.br/cda/aprendendo-basico/sistema-solar/sol.html>> Acessado em mar. 2008.
- COLÉGIO SÃO FRANCISCO. **As atividades e fenômenos solares.** [online]  
<<http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/sol/atividades-fenomenos-solares.php>> Acessado em jul. 2008.
- Dal Lago, A., **Um estudo de estruturas geofetivas no meio interplanetário e de suas causas solares,** Ph. D. thesis, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2004.
- Dal Poz, W. R. ; Camargo, P. O. **Conseqüências de uma tempestade geomagnética no posicionamento relatico com receptores GPS de simples frequencia.** 2006. [online]  
<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/7236/5182>> Acessado em abr. 2008.
- Davies, K. **Ionospheric Radio.** London: Peter Peregrinus, 1990. [online]  
<<http://biblioteca.univap.br/dados/000001/000001E8.pdf>> Acessado em abr. 2008.
- Denardini, C.M. **Desenvolvimento de um sistema de correção de fase para radar ionosférico de São Luís Maranhão.** São José dos Campos, 137p. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1999.
- Fedrizzi, M. **Estudo do efeito das tempestades magnéticas sobre a ionosfera utilizando dados do GPS.** São José dos Campos,. 223p. Tese de Doutorado em Geofísica Espacial, Divisão de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2003. [online]  
<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/7236/5182>> Acessado em 9 abr. 2008.
- Freudenrich, C. C. **Como funciona o Sol.** 2000. [online] <<http://ciencia.hsw.uol.com.br/sol2.htm>>  
Acessado em 13 abr. 2008.

GEOCITIES. **Cinturões de Van Allen**. 2008. [online]

<<http://www.geocities.com/CollegePark/Lounge/8727/vanallen.html>> Acessado em 30 jun. 2008.

Hetem, J. G.; Pereira, V. J.; Oliveira, C. M. O Sol. 2008. [online]

<<http://www.astro.iag.usp.br/~jane/aga215/apostila/cap07.pdf>> Acessado em mai. 2008.

INPE - DAE/INPE **Radar de Sondagem Ionosférica Digital – Digisonda**, 2003. [online] -

<<http://www.dae.inpe.br/slz/digisonda.html>> Acessado em 10 jun. 2008.

Kippenhahn, R. **Discovering the secrets of the Sun**. Inglaterra, p. 230 – 232, 1994.

Jursa, A.S., **Handbook of Geophysics and the Space Environment**, 1023 pp., Air Force Geophysics Laboratory, Springfield, 1985.

Lang, K. R. **The Cambridge encyclopedia of the Sun**. Estados Unidos da América: Massachusetts, p.3 – 8, 162-166, 197 – 170, 2001.

Leithold, A. A. **Anomalia magnética do Atlântico Sul**. 1988. [online]

<<http://anomalia.magnetica.atlantico.sul.googlepages.com/home>> Acessado em mar. 2008.

Mattos, J. G. **Fotos obtidas pelo GEA**. Santa Catarina. 1994. [online]

<<http://www.gea.org.br/fotoslages.html>> Acessado em mai. 2008.

NASA [online] <[http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/sunearth\\_lg.gif](http://science.nasa.gov/ssl/pad/solar/images/sunearth_lg.gif)> Acessado em 15 mai. 2008.

PORTALUFONET. **Sol**. 2001. [online] <[http://www.portalufonet.com/sistema\\_solar/sol.htm](http://www.portalufonet.com/sistema_solar/sol.htm)>

Acessado em abr. 2008.

Rishbeth, H., Garriot, E O. K. **Introduction to Ionospheric Physics**. New York, NY, EUA, 1969.

[online] <<http://mtc-m05.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/2001/08.03.12.28/doc/Pdfs/Capitulo%202.pdf>> Acessado em abr. 2008.

Satélite SOHO. **Sunspots**. [online] <<http://sohowww.nascom.nasa.gov/sunspots/>> Acessado em 31 mar. 2008

Silva, L. C. M. **Radiação Infravermelha**. 2006. [online]

<<http://www.algosobre.com.br/fisica/radiacao-infravermelha.html>> Acessado em mar. 2008.

Stix, M. **The Sun: An Introduction**. 1º edição: A&A LIBRARY. Alemanha: Friburgo, p.1-6, 284 - 188. 1991.

TODO O CÉU, **A fotosfera**. 2003. [online]

<<http://www.todoceu.com/detalhamento/fotosfera.html>> Acessado em mar. 2008.

Yamashita, C.S. **Efeito das tempestades magnéticas intensas na ionosfera de baixa latitude**. São José dos Campos. 175p. Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial, Divisão de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 1999. [online]

<<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/bcg/article/viewFile/7236/5182>> Acessado em abr. 2008.