



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE  
NA IONOSFERA EQUATORIAL, UTILIZANDO  
OBSERVAÇÕES EM MANAUS (2,9°S, 60°W).**

**NEWTON SILVA DE LIMA**

**MANAUS - AMAZONAS  
2009**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS  
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE GRAVIDADE  
NA IONOSFERA EQUATORIAL, UTILIZANDO  
OBSERVAÇÕES EM MANAUS (2,9°S, 60°W).**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geociências na área de concentração de Geologia Ambiental.

**NEWTON SILVA DE LIMA**

**Orientador: Prof. Dr. Rutenio Luiz Castro de Araujo**

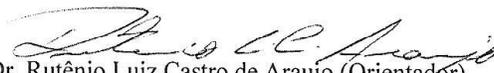
**MANAUS - AMAZONAS  
2009**

**"Estudo da Propagação de Ondas de Gravidade na Ionosfera Equatorial ,  
Utilizando Observações em Manaus (2,9°S, 60°W)"**

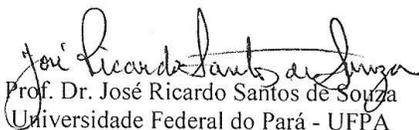
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do Título de Mestre em Geociências, área de concentração em Geologia Ambiental.

Aprovada em 11 de maio de 2009.

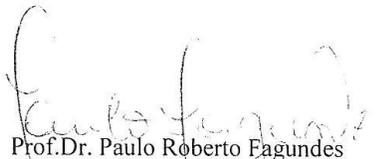
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rutênio Luiz Castro de Araujo (Orientador)  
Universidade Federal do Amazonas - UFAM



Prof. Dr. José Ricardo Santos de Souza  
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Dr. Paulo Roberto Fagundes  
Universidade do Vale do Paraíba- UNIVAP

Ficha Catalográfica  
(Catalogação realizada pela Biblioteca Central da UFAM)

Lima, Newton Silva de

L732e      Estudo da propagação de ondas de gravidade na ionosfera equatorial, utilizando observações em Manaus (2,9°S, 60°W) / Newton Silva de Lima. - Manaus: UFAM, 2009.  
88 f. il.

Dissertação (Mestrado em Geociências) — Universidade Federal do Amazonas, 2009.

Orientador: Prof. Dr. Rutenio Luiz Castro de Araujo

1. Ondas de gravidade 2. Ionogramas I. Araujo, Rutenio Luiz Castro de. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 551.511.31(043.3)

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Rutenio Luiz Castro de Araujo (Geofísico – UFAM) pela orientação e exemplo de pessoa e professor universitário.

Aos Drs. Cláudio Milliotti, Clauzionor Lima Silva, José Duarte Alecrim, professores do Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFAM, por enxergarem a relevância ao tema deste trabalho.

A equipe de professores do Laboratório de Física e Astronomia do IP&D (Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da UNIVAP/SJC-SP): Dr. Paulo Roberto Fagundes, Dr. José Ricardo Abalde, Dr. Yogeshwar Sahai, Doutorando Valdir Gil Pillat, Dr. Fábio Becker-Guedes (INPE/SJC-SP), pelo apoio, orientação e principalmente a atenção à causa da formação científica.

À FAPESP e CNPq pelo financiamento do projeto (equipamentos, *software* UDIDA, livros e a infra-estrutura científica e humana proporcionada aos pesquisadores do IP&D em Manaus), sem os quais não seria possível a realização do mesmo.

Ao Goddard Space Flight Center – NASA, através do *Community Coordinated Modeling Center*, que gentilmente realizaram as modelagens **ABBYNORMAL** (*AB*sorption *BY* the *D* and *E* Region of HF Signals with **NORMAL** Incidence) com *Data-Driven D-Region model (DDDR)*, pedido nº. 110608\_IT\_4.

À Direção da ULBRA em Manaus pelo apoio incondicional a pesquisa, as viagens para São José dos Campos - São Paulo e outras localidades, que proporcionou o enriquecimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Ambiental Alan dos Santos Ferreira, que me levou para o grupo de pesquisa da UNIVAP/ULBRA, meu companheiro de viagens, como também pela Redução e Tratamento de Dados.

À DEUS, à minha Família e principalmente a outras tantas pessoas que me trouxeram para este caminho, nesta jornada terrena...

## RESUMO

Este trabalho investiga o comportamento de ondas de gravidade (OG) na ionosfera sobre a cidade de Manaus (2,9°S, 60°W). Para tal, foram analisados ionogramas que são espectros de frequência em função da altitude e a variação temporal da altura, para um conjunto de frequências fixas (3, 4, 5, 6, 7 8 MHz). As observações foram realizadas por um sistema de radar chamado ionossonda; que opera na faixa de rádio frequência entre 1 e 20 MHz. O período estudado compreende uma parte do ciclo solar 23, ou seja, desde agosto de 2002 até dezembro de 2006. Observou-se que a ionosfera apresenta fortes perturbações durante períodos geomagneticamente calmos. Estas perturbações são atribuídas a propagação de ondas de gravidade que são geradas na baixa atmosfera e se propagam até a alta atmosfera e ionosfera.

Palavras chave: Ondas de gravidade, região equatorial, ionosfera, região - F.

## ABSTRACT

This work studies the behavior of gravity waves (GW) in the ionosphere over the city of Manaus (2,9°S, 60°W). For that purpose, ionograms which are specters of frequency in function of the altitude and the secular variation of the height for a set of fixed frequencies (3, 4, 5, 6, 7 8 MHz). The observations were analyzed carried through by a system of called radar ionosonde. This system operates in the radio frequency band between 1 and 20 MHz. The studied period comprehends a part of solar cycle 23, that is, since August of 2002 until December of 2006. Additionally, it was also observed that the ionosphere presents strong disturbances during geomagnetically quiet periods. These disturbances are attributed to the propagation of gravity waves which are generated in the lower atmosphere and propagate up to the high atmosphere and ionosphere.

Keywords : gravity waves, equatorial region, ionosphere, F-region.

## **LISTA DE TABELAS**

Tab. 3.1– Especificações – CADI.....	33
Tab.3.2 – Processo Operacionalidades (ON) em dias da Ionossonda na estação de Manaus entre 2002 a 2006.....	38
Tab. 4.1 - Parâmetros de OG em período geomagneticamente calmos de agosto de 2002 a dezembro de 2006 sobre Manaus (MAN).....	63

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Variabilidade Sazonal-Longitudinal mostrando os cinco setores que representam a taxa de ocorrência de Bolha de Plasma Equatorial (mês x longitude) $\pm$ 5%.....	2
Fig. 1.2 - Visualização de diferentes ionogramas e de uma Bolha de Plasma Equatorial, mostrado os sentidos de deriva Oeste-Leste; e evolução Norte-Sul), através de um fotômetro (Imagedor All Sky).....	3
Fig. 1.3 – Equador Magnético em 1957 e 2000 .....	5
Fig. 1.4 – Variações ondulatórias na altura da camada para várias frequências (3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz) indicam a assinatura de Ondas de Gravidade sobre Manaus, obtida nos dias 04, 05 e 12 de agosto de 2002.....	6
Fig. 1.5 – Irregularidade Ionosférica (Spread-F e Bolha de Plasma) registrada na rede de estações da UNIVAP-ULBRA em Manaus, Palmas e São José dos Campos, em 07 de setembro de 2002.....	7
Fig. 1.6 – Espectro eletromagnético do Sol.....	8
Fig. 1.7 – Estrutura interna solar, segundo (SILVA, 2006).....	9
Fig. 1.8 – Interação entre o vento solar e magnetosfera terrestre.....	12
Fig. 1.9 – Caso clássico da variação do campo magnético terrestre com a 3 fases de uma tempestade magnética .....	13
Fig. 1.10 – Perfil vertical de temperatura durante o dia e noite função do ciclo solar (Fonte: FAGUNDES <i>et al.</i> , 2007).....	15

Fig 1.11 - Perfil vertical da ionosfera.....	15
Fig. 1.12 - Ilustração da formação da camada Es, segundo Hines, 1974 ( Adaptado de HINES, 1974, p.297).....	17
Fig. 2. 1 – Traço do meteoro distorcido pela ação do vento na altura em que ocorreu a ablação do meteoro (HINES, 1974, p.250).....	22
Fig. 2.2 – Painel pictórico mostrando a amplificação na amplitude da OG com a altura, na ausência de dissipação de energia (HINES, 1974, p.253).....	23
Fig. 2.3 – Mostra os modos de OG. A área cinza mostra os modos excluídos. A linha pontilhada mostra os modos que podem propagar com períodos de 200 minutos (HINES, 1974, p.254).....	24
Fig. 2.4 - Relação entre o comprimento de onda, velocidade e direção de propagação da onda.(Adaptado de Hargreaves, 1995, pág 125).....	26
Fig. 2.5 - Diagrama mostrando ondas acústicas, ondas de gravidade e ondas evanescentes. As linhas pontilhadas indicam os efeitos desprezando-se a gravidade ou compressividade, respectivamente....	28
Fig. 3.1 – Descrição pictórica do funcionamento da ionossonda.....	30
Fig. 3.2 - Visão do ângulo sólido ( $\Omega_A$ ) da área utilizada pela ionossonda que opera em Manaus (2,9°S e 60,0°W).....	30
Fig. 3.3 - Exemplo de um ionograma que realizou uma varredura de 180 frequências.....	32
Fig. 3.4 – Detalhes da localização do observatório onde opera a ionossonda em Manaus.....	34

Fig. 3.5 – Gráfico de setores indicando a distribuição temporal to tempo em que a ionossonda operou e o tempo em que ficou inoperante.....	35
Fig. 3.6 – Histograma indicando o número de dias que a ionossonda de Manaus operou em função do ano.....	35
Fig. 3.7 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2002.....	36
Fig. 3.8 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2004.....	36
Fig. 3.9 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2005.....	37
Fig. 3.10 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2004.....	37
Fig. 3.11 – Variação diária dos parâmetros $h'F$ , $h_pF2$ e $foF2$ , para o 12/08/2004, sobre Manaus.....	39
Fig. 3.12 – Variação diurna da altura virtual para as frequências 3.1, 4.1, 5.1, 6.3, 7.1 e 8,1 MHz.....	39
Fig. 4.1 – Evolução temporal de ionogramas adquiridos em 4 de agosto de 2002 durante a ocorrência de irregularidades ionosférica de larga escala (" <i>Spread-F</i> ").....	42

Fig. 4.2 – Evolução temporal de ionogramas adquiridos em 4 de agosto de 2002 durante a propagação de ondas de gravidade.....	44
Fig. 4.3 – Evolução temporal de ionogramas adquiridos em 4 de agosto de 2002 durante a propagação de ondas de gravidade.....	46
Fig. 4.4 –Variação da altura virtual ( $h'F$ ) nas frequências de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz referentes a 4 de agosto de 2002.....	47
Fig. 4.5 – Variação de altura virtual nas frequências de 6 e 8 MHz referente a 4 de agosto de 2002.....	48
Fig. 4.6 –Variação da altura virtual ( $h'F$ ) nas frequências de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz referentes a 6 de setembro de 2002, em Manaus. (A) Evidencia estruturas chamadas <i>Ripples</i> superposta a OG com período de horas.....	50
Fig. 4.7 – Painel que ilustra a evolução temporal de 24 h do dia 6 de setembro de 2002, em Manaus (MAN), em comparação com o ionograma de OG (isolinhas), com detalhes de três secções.....	51
Fig. 4.8 – Painel que ilustra a evolução temporal de 24 h do dia 6 de setembro de 2002, em Manaus (MAN), em comparação com o ionograma de OG (isolinhas), com detalhes de três secções.....	52
Fig. 4.9 - Em detalhe o ionograma do dia 6 de setembro de 2002, com parâmetros de ondas de gravidade de período de horas.....	53
Fig. 4.10 – Variação diurna da ionosfera vista através de 6 isolinhas em 28 de dezembro de 2004 sobre Manaus.....	55
Fig. 4. 11 – Variação de $h'F$ na formação de OG em período de atividade solar média em 28 de dezembro de 2004 em Manaus.....	56

Fig. 4.12– Oscilação diurna causada pela taxa de ionização na formação da camada F em 31 de dezembro de 2004 em Manaus.....	57
Fig. 4.13 – Ocorrência de OG durante o dia em 7 de dezembro de 2005, sobre a cidade de Manaus, em destaque a altura pico a pico da OG.....	59
Fig. 4.14 – Formação de OG e absorção das frequências de 3 MHz e 4 MHz, durante o dia, em destaque a variação de altura da OG, em 6 de outubro de 2005, em Manaus.....	60
Fig. 4.15 – Ionogramas em dias geomagneticamente calmos na latitude $2,9^{\circ}$ S e longitude $60,0^{\circ}$ W, nos meses de janeiro e março de 2006 (Manaus).....	61
Fig. Fig. 4.16 - Variações de h'F durante os dias 6 e 17 de setembro de 2002, 6 de outubro e 13 de dezembro de 2004, 4 de novembro e 30 de dezembro de 2005 , 5 de janeiro e 4 de março de 2006, observados em Manaus.....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Bz – Componente Vertical do Campo Magnético (T)

C2 – Estação de Medidas Geomagnéticas – Kyoto / Japão

CADI – Canadian Advanced Digital Ionosonde

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DST – Disturbe Storm Time

Es – Camada Esporádica ou “E” Esporádica

EUV – Extremo Ultravioleta

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

foF2 – Frequência Crítica (ordinária) de Pico da Camada F2

fxF2 – Frequência Extraordinária da Camada F2 (Hz)

GPS – Global Position System

h'F1 – Altura Virtual da Base da Camada F1 (m)

HF – High Frequency (Hz)

hpF2 – Altura Virtual de Pico da Camada F2 (m)

IP&D – Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento (UNIVAP)

Kp – Planetary Magnetic

LNA – Laboratório Nacional de Astronomia

LT – Local Time

OG – Onda de Gravidade

ON – Observatório Nacional

PPG – Programa de Pós-Graduação

RADAR – Radio Detection And Ranging

RF – Rádio Freqüência

TID – Travelling Ionosphere Disturbance

UDIDA – Univap Digital Ionosonde Data Analysis

UFAM – Universidade Federal do Amazonas

ULBRA – Universidade Luterana do Brasil

UNIVAP – Universidade do Vale do Paraíba

URSI – Union Radio-Scientifique Internationale

UT – Universal Time

UV - Ultravioleta

VHF – Very High Frequency (Hz)

VIS – Vertical Incidence Sounding

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 A Região e os Fenômenos em Alta Atmosfera.....	1
1.2 O Sol.....	7
1.3 - Índice de Atividade Geomagnética (Kp, Dst e AE).....	11
1.3.1 – Índice Kp.....	11
1.3.2 – Índice Dst.....	12
1.3.3 – Índice AE.....	13
1.4 – Estrutura Aeronômica – A Ionosfera (Termosfera).....	14
1.4.1 – Região D.....	16
1.4.2 – Região E.....	17
1.4.3 – Região F1 e F2.....	17
1.5 – Objetivos.....	19
<b>CAPÍTULO 2 - ONDAS DE GRAVIDADE E DISTÚRBIOS VIAJANTES.. .....</b>	<b>20</b>
2.1 – Observações de OG na ionosfera e atmosfera superior.....	21
2.2 – Desenvolvimento matemático.....	25
<b>CAPÍTULO 3 - INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO.....</b>	<b>29</b>
3.1 – O funcionamento da ionossonda.....	29
3.1.1 – A ionossonda do tipo CADI.....	41
3.2 – Aquisição de dados.....	34
3.3 – Ferramenta computacional para visualizar e analisar os dados bservados.....	38

<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE ONDAS DE GRAVIDADE (OG) EM PERÍODOS GEOMAGNETICAMENTE CALMOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 – Estudo de OG em 04 de agosto de 2002 (Atividade Solar Máxima).....	43
4.2 – Estudo de OG em 06 de setembro de 2002 (Atividade Solar Máxima) .....	49
4.3- Estudo de OG em 28 de dezembro de 2004 (Atividade Solar Média).....	55
4.4- Estudo de OG em 7 de dezembro de 2005 e 6 de outubro de 2005 (Atividade Solar Média).....	58
4.5- Estudo de OG em 2006 (Atividade Solar Mínima).....	60
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....</b>	<b>65</b>
5.1 - Trabalhos Futuros .....	66
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>67</b>

## CAPÍTULO 1

Belém-do-Pará. São Luiz-do-Maranhão. Fortaleza-do-Ceará. Salvador-da-Bahia. Manaus, também, um dia já foi como as outras capitais acima, a Manáos-do-Amazonas.

...Elas incentivavam a divulgação, aperfeiçoamento técnico e modos de produzir nas suas escolas e centros de investigação e pesquisa... As suas lideranças eram formadas na Escola Livre Universitária de Manaus, fundada em 1909, nos cursos de Agronomia, Agrimensura, Medicina, Farmácia, Odontologia e Direito, e nas Faculdades de Ensino Superior de Belém do Pará.

Samuel Isaac Benchimol (1924-2002) em Manáos-do-Amazonas (Memória Empresarial, Vol I, 1994).

(Com mais de 100 obras sobre a Amazônia, foi um brasileiro, que honrou a Terra em que nasceu.).

### 1. Introdução

Neste capítulo apresento uma simples homenagem aos 100 anos de aniversário desta Universidade, com a citação do livro do Emérito Prof. Samuel Benchimol, que tanto contou histórias desta Terra Amazônica. Também apresento um breve foco sobre a região e a natureza da composição dos fenômenos de alta atmosfera e ionosféricos, com uma descrição do objetivo de cada capítulo deste trabalho.

#### 1.1 A Região e os Fenômenos em Alta Atmosfera

A região estudada encontra-se ao norte do Brasil e sempre foi foco de grandes interesses econômicos e ambientais. Anteriormente foram os seringais, hoje além da floresta e dos rios, também possui um Pólo Industrial de eletro-eletrônico, termoplásticos e de duas rodas muito forte na América Latina. A localidade sedia a principal base de monitoramento aéreo na Amazônia.

O mosaico em estudo compreende a Amazônia Ocidental, na região de Manaus, (2,9°S, 60,0°W), Manáos-do-Amazonas, como fora chamada por Samuel Benchimol (1994). Ponto intermediário entre os

equadores geográfico e magnético, intrinsecamente importante no escopo da investigação ionosférica na região equatorial do setor brasileiro, onde ocorrem vários fenômenos interessantes na alta atmosfera (geração de ondas de gravidade, irregularidades ionosféricas de grande, média e pequenas escalas, eletrojato equatorial e efeito fonte).

A Amazônia está situada em uma região de máximo na distribuição global de ocorrência das bolhas de plasma (irregularidade ionosféricas de grande escala), ou seja, no Brasil ocorrem mais bolhas que em qualquer outra região do planeta (BURKE *et al.*, 2004), Figuras 1.1, 1.2, 1.4 e 1.5.

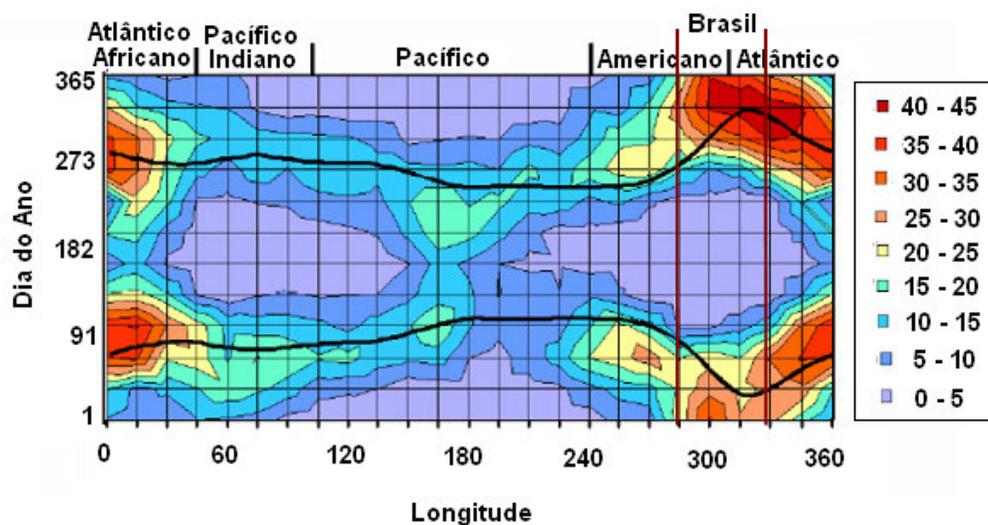


Figura 1.1 - Variabilidade Sazonal-Longitudinal da taxa de ocorrência de Bolha de Plasma Equatorial (irregularidades ionosféricas de grande escala) para os cinco setores do globo terrestre (Fonte: BURKE *et al.*, 2004).

As irregularidades de grande escala mencionadas acima são regiões onde a densidade do plasma é menor que a densidade do plasma ambiente e são alinhadas ao meridiano magnético. Estas

irregularidades são geradas na região equatorial, logo após o entardecer e se propagam normalmente para leste até se dissiparem. É amplamente aceito que estas irregularidades são geradas pela instabilidade do tipo Rayleigh-Taylor e que a rápida subida da camada F após o entardecer e ondas de gravidade são os principais ingredientes para a taxa de crescimento da instabilidade. Estas irregularidades também são chamadas de espalhamento-F (spread-F) devido ao traço difuso nos ionogramas. A figura 1.2 apresenta detalhes da observação destas irregularidades utilizando ionossonda e imageadores do tipo all-sky.

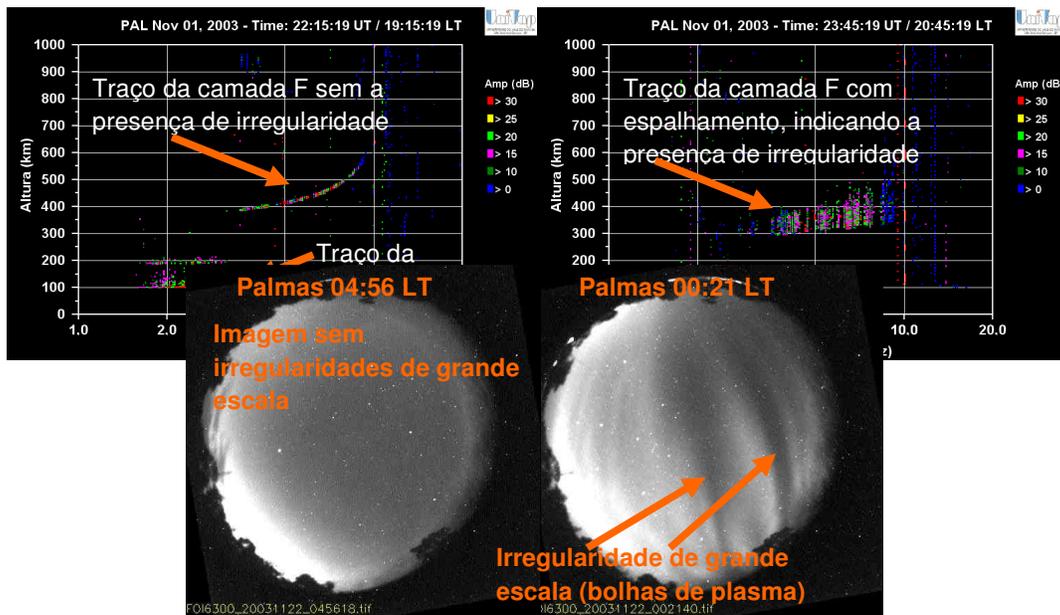


Figura 1.2- Painel superior mostra a diferença entre ionogramas (Palmas) com e sem a presença spread-F que indicam a presença ou não de irregularidades ionosféricas. Painel inferior mostra imagens da emissão do OI 630,0 nm obtidas por um imageador do tipo all-sky (Palmas), onde se pode distinguir a presença ou ausência de irregularidades de plasma de grande escala (bolhas de plasma).

Como muito dos fenômenos que ocorre na ionosfera estão intimamente ligados com o campo magnético terrestre é importante ressaltar que o equador magnético encontra-se constantemente em deriva (Batista et al 2006); fato de observação que em 1950 o equador magnético passava em Natal (RN), nos anos de 1990 sobre a cidade de São Luiz no Maranhão, hoje se aproxima da cidade de Belém do Pará (Figura 1.3). É um comportamento geomagnético da estrutura terrestre ainda pouco compreendido pelos pesquisadores.

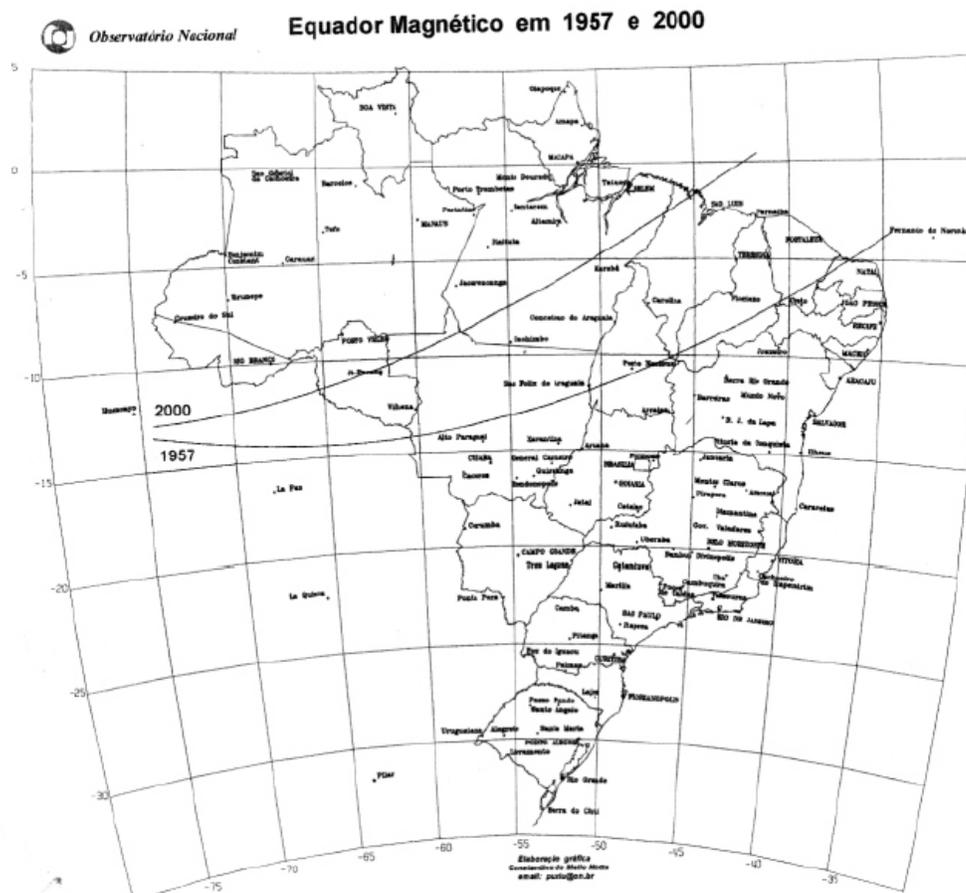


Figura 1.3 – Equador Magnético em 1957 e 2000. (Fonte: Observatório Nacional).

A dinâmica da alta atmosfera (região entre 70 km e 700 km de altitude) e ionosfera (parte ionizada da atmosfera) também é motivo de intensos estudos. O trabalho pioneiro realizado por Hines (1960) chamou a atenção da comunidade científica sobre a importância da propagação de ondas na atmosfera superior (Fig. 1.5), mas precisamente sobre ondas de gravidade (ondas com períodos de horas até minutos). Posteriormente inúmeras investigações foram realizadas para caracterizar as ondas de gravidade (OG) em altas, médias e baixas latitudes (HARGREAVES, 1992). Porém, ainda existem poucos trabalhos dedicados ao estudo de OG na região equatorial.

As perturbações ionosféricas oscilantes como ondas de gravidade (OG) e os distúrbios ionosféricos viajantes (TID – *Travelling Ionospheric Disturbances*), são tratados por alguns pesquisadores como sinônimos (KELLEY, 1989, HARGREAVES, 1992). As TID, que são oscilações com período da ordem de horas a minutos, são produzidas em períodos geomagnéticos perturbados por efeito Joule em altas latitudes e viajam na direção equatorial, enquanto que as OG, geralmente têm suas origens em baixa atmosfera por ventos troposféricos, frentes frias ou convecção tropical (FAGUNDES *et al.*, 2007). Hines (1960) acrescenta que as OG originam por transferência de *momentum* e por gradientes de pressão e gravidade em meio anisotrópico. Fagundes (2007) propõe estudar ondas de gravidade, através de ionogramas obtidos por ionossonda digital, utilizando análises sondagem com alta resolução temporal (100 segundos), que são seguidas neste trabalho.

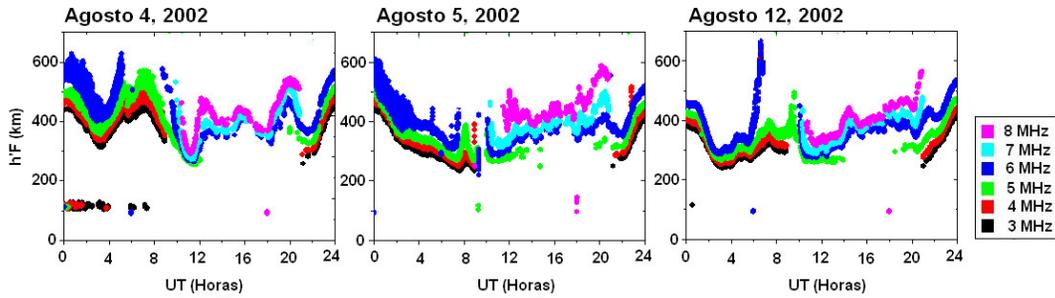


Figura 1.4 – Variações diárias na altura virtual da camada para várias freqüências (3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz) As variações ondulatorias indicam a presença de Ondas de Gravidade sobre Manaus. Dados obtidos em Manaus nos dias 04, 05 e 12 de agosto de 2002.

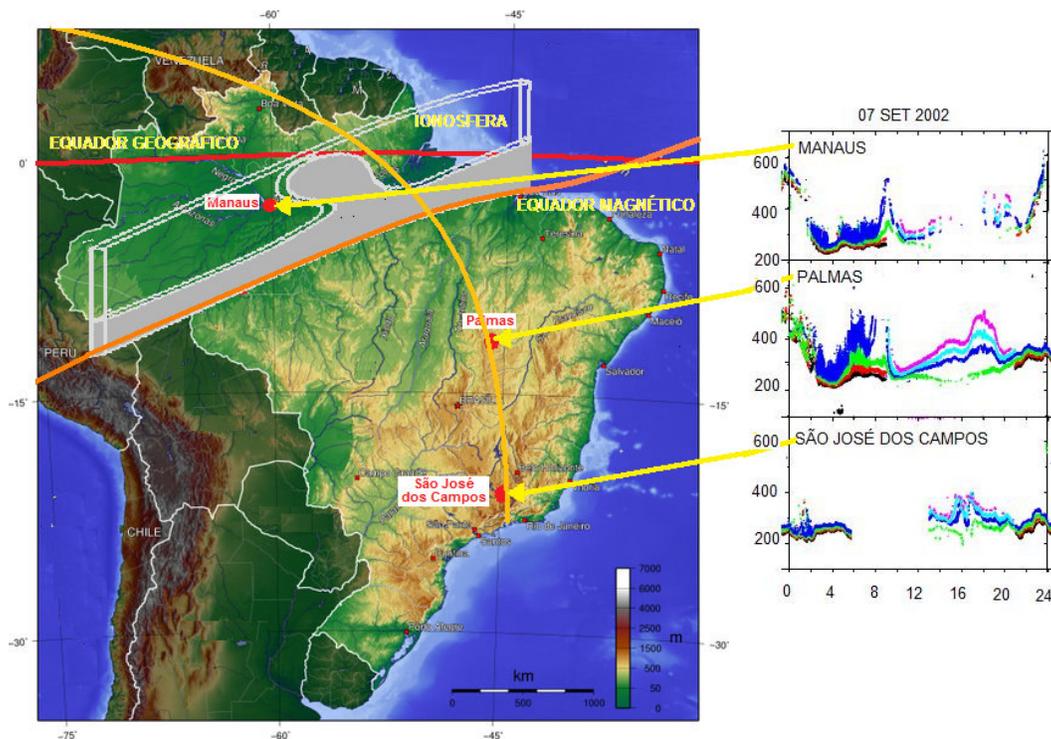


Figura 1.5 – Ilustração de uma irregularidade Ionosférica de grande escala (Bolha de Plasma) e localização dos observatórios da rede de observação UNIVAP-ULBRA.

## 1.2. O Sol

O Sol emite radiação ao longo de todo espectro eletromagnético (Figura 1.6), desde radiação gama até as ondas de rádio, passando pela radiação-x, ultravioleta, visível, infravermelho, microondas. A maior parte da intensidade concentra-se na faixa do visível. (ECSS, 2000).

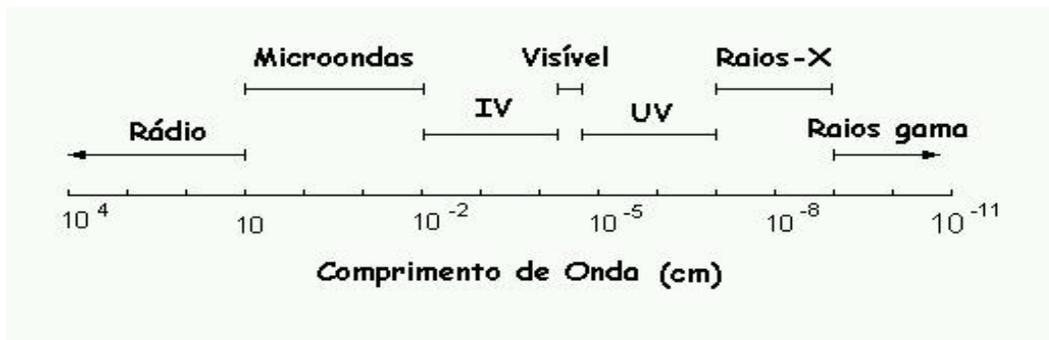


Figura 1.6 - Espectro eletromagnético do Sol

A estrutura solar pode ser compreendida pelo ponto de vista de duas regiões; a interior, que vai de seu centro até a superfície e dividida em camadas, enquanto que a segunda que é a atmosfera externa de atividade constante na emissão de radiação e massa no meio ambiente interplanetário. O núcleo do Sol contém aproximadamente 10% da massa solar e ocupa um quarto do raio solar. Nesta região acontecem as reações termo-nucleares, a energia proveniente destas reações é transportada para fora por radiação, até 70% de seu raio (Figura 1.7). O transporte de energia até a superfície se faz por convecção. Na interface de radiação-convecção existe a tacoclina, local de origem dos campos magnéticos no Sol (SILVA, 2006).

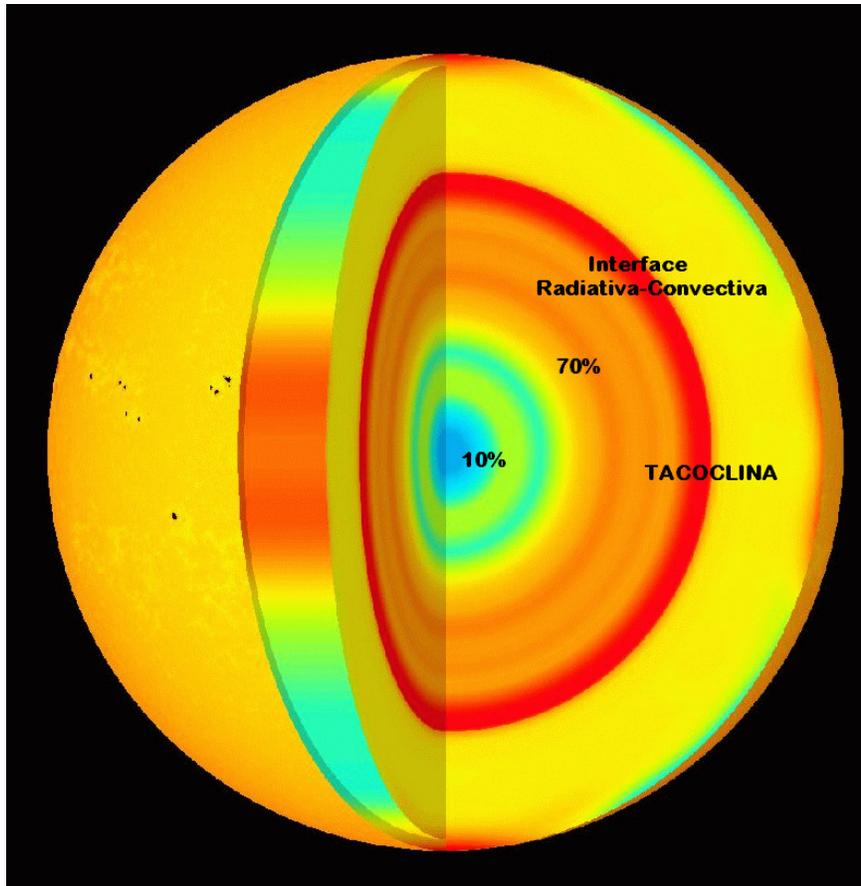


Figura 1.7 – Estrutura interna solar, segundo (SILVA, 2006).

Esquemáticamente, o Sol é possuidor de uma atmosfera exterior dividida em um número de camadas de acordo com processos físicos dominantes de respectivas regiões (a primeira camada com 300 km de espessura é a mais fria, é conhecida como camada visível do Sol, que é a fotosfera; a segunda de cor avermelhada é a cromosfera, com temperatura de dezenas de milhares de Kelvin, visível em eclipses e pode ser observada na faixa do comprimento de ondas do ultravioleta; a terceira camada ou coroa é a mais extensa e faz fronteira com o meio interplanetário, podendo ser observada em faixa de radiação dos raios-X (SCHERER, *et al.*, 2005; SILVA, 2006). O modelo do interior solar de pressão e temperatura estratificado é um resultado do equilíbrio hidrostático, de processos de geração e transporte de energia ali

produzida com alto grau de sofisticação. A validade deste modelo empírico testado através da heliossismologia é confirmada. A estrutura solar investigada por heliossismologia tem um bom grau de aproximação em um nível de 0,1%, de diferença do modelo teórico (CHRISTENSEN-DALSGAARD, 2003).

O núcleo do Sol, com aproximadamente 15% de seu raio ( $R_{\odot}$ ), é dominado pela reação termo-nuclear operando em uma temperatura acima de  $10^7$  K, produzindo um fluxo de energia. Muito importante é o ciclo próton-próton (pp), transformando núcleo de hidrogênio (próton) em  $\text{He}^4$ . A produção de neutrinos pelo processo termo-nuclear no núcleo do Sol (eletrônicos, muônicos; tauônicos), são detectáveis na Terra (BAHCALL *et al*, 2003).

A energia gerada no núcleo é transportada através de fótons para a zona de radiação do Sol (0,15 a 0,7  $R_{\odot}$ ). Os fótons são absorvidos e reenviados à zona de radiação através de transferência de energia em matéria de alta densidade, ocorrendo um decréscimo de temperatura no processo de difusão caracterizado na escala de tempo em aproximadamente  $10^7$  anos (SCHERER, *et al.*, 2005).

Em 0,7 ( $R_{\odot}$ ) encontra-se a interface da zona radiativa com a zona convectiva (camada tacoclina), contorno de origem do fluxo magnético do dínamo solar. Na zona convectiva observa-se a formação de granulação visível na superfície do plasma solar.

Na cromosfera e na coroa solar a energia que chega da interação do campo magnético da zona de convecção induz vários processos de instabilidade, dissipação e choque. Na coroa solar é importante as atividades observáveis através de manchas (*spots*) e explosões que configuram arcos de gás - *coronal loops* (protuberância em forma de arco), com mais de centenas de milhares de quilômetros de altura,

espícula (jato vertical de gás), com cerca de 10.000 km de altura, erupção solar (liberação súbita de energia associada às manchas solares), macroespícula, jato vertical de gás com cerca de 40.000 km de altura, filamentos (protuberância visível contra a fotosfera). Distinguir as regiões aberta e fechada da topologia magnética solar se faz necessário pela natureza das observações, visto que, os campos magnéticos originados nesta superfície, são de interações distintas, (SILVA, 2006). Nestas regiões, linhas abertas do campo magnético estendem-se da heliosfera para o espaço interplanetário a partir de uma rede formada de monopólos magnéticos, em um verdadeiro regime de vento estelar. Enquanto que as regiões fechadas são concentrações de *bipólos* magnéticos em “*looping*”. Estas características de distribuição de redes magnéticas (abertas ou fechadas) dependem exclusivamente da fase e do ciclo solar (SCHRIJVERAND-ZWAAN, 2000).

### **1.3 - Índices de Atividade Geomagnética. (Kp, Dst e AE)**

#### **1.3.1 Índice Kp**

Índice Geomagnético Kp (Índice Planetário), introduzido por J. Bartels (1940) em *Geomagnetism*, também assinado por S. Chapman, este trabalho trouxe um método estatístico perfeito de um modelo geofísico de um índice geomagnético intitulado “*planetarische Kennziffer*” (índice planetário). Eliminado as irregularidades do campo magnético da Terra, Bartels mostrou que o impacto dos ventos solares com a magnetosfera poderia ser transformado em um diagrama musical em escala semi-logarítmica para uma varredura de 3 horas, traduzindo o estado médio de atividade magnética no globo terrestre. Os valores numéricos de K variam de 0 a 9, com frações intermediárias de 1/3. Este índice é obtido fazendo-se a média de medidas do campo magnético em 13 distintas localidades distribuídas no globo terrestre (GFZ, 2005; KIRCHHOFF, 1990).

### 1.3.2 Índice Dst

Índice Dst (*Disturbance Storm Time*), índice horário que mede a atividade geomagnética, magnetômetros próximos ao Equador. Este índice foi introduzido em 1964 por Sugiura para observação de atividade geomagnética. Quando há um aumento na velocidade e concentração do vento solar e ao atingir a Terra provoca distúrbios ionosféricos súbitos (DIS), que se constituem em verdadeiras tempestades ionosféricas ou tempestades magnéticas. As ondas eletromagnéticas, EUV e R-X, não interagem com a magnetosfera e passam por ela normalmente, porém, o vento solar constituído de partículas (elétrons e  $\text{He}^+$ ) choca-se com magnetosfera causando uma compressão nas linhas de campo, de  $10 R_{\oplus}$  para  $6 R_{\oplus}$  em relação a superfície terrestre (veja a Figura 1.8). Após o choque do vento solar com a magnetosfera e se o campo magnético interplanetário está direcionado para o sul, haverá reconecção entre as linhas de campo magnético interplanetário e terrestre. Isto possibilita que as partículas do Sol contornem o campo magnético terrestre e penetre pelo lado noturno da Terra e após de 2 a 5 dias inicia-se a tempestade geomagnética.

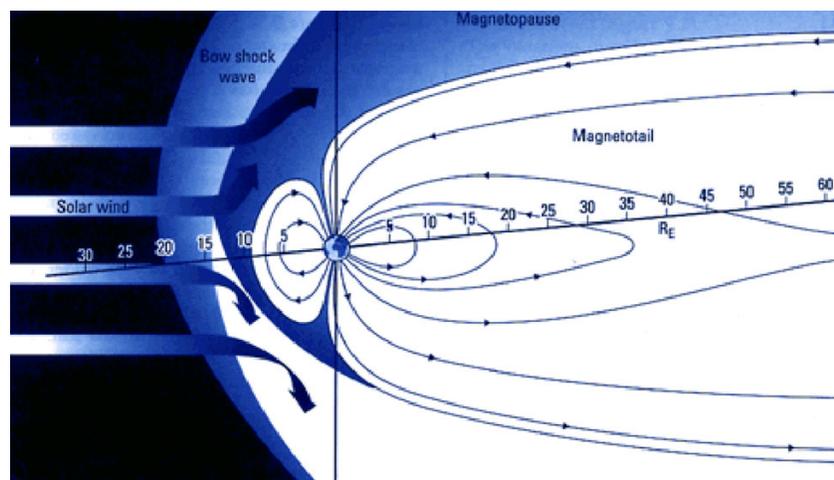


Figura 1.8 – Interação entre o vento solar e magnetosfera terrestre.

No decorrer de uma tempestade geomagnética, o choque do vento solar na magnetosfera produz uma mudança súbita no campo magnético terrestre que é detectado pelos magnetômetros das estações globais. Assim, a tempestade geomagnética pode ser dividida em 3 partes; a primeira é o início súbito, a segunda a fase principal e a terceira a fase de recuperação Figura 1.9 (GFZ, 2007; KIRCHHOFF 1990).

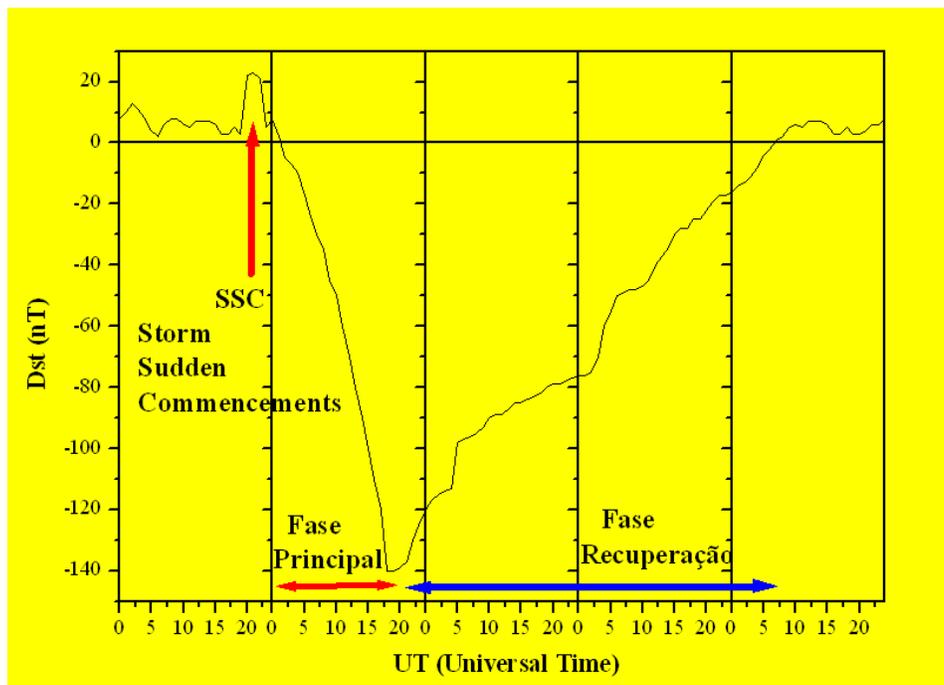


Figura 1.9 – Caso clássico da variação do campo magnético terrestre com a 3 fases de uma tempestade magnética

### 1.3.3 Índice AE

O índice AE mede a variação do campo magnético terrestre causada pelo eletrojato auroral. Este índice é obtido a partir da medida da componente horizontal (H) do campo magnético terrestre, geralmente são utilizadas medidas por no mínimo em 10 localidades. Para cada localidade é registrada a variação da componente norte-sul do campo magnético em função da hora universal (UT). Posteriormente

estes dados são analisados a fim de se determinar os observatórios que apresentaram o menor e o maior valores de H. O menor valor de H é chamado de índice AL e o maior valor de índice AU. Então, a diferença entre AU-AL é chamada de índice AE.

#### **1.4 Estrutura Aeronômica – A Ionosfera (Termosfera)**

Ionosfera, nome sugerido por R. A. Watson-Watt em 1926, oficialmente admitido em 1932 (HARGREAVES, 1992). Tem altura de aproximadamente 60 km (dia) e aproximadamente 90 km (noite) até aproximadamente 1000 km, tendo o íon do oxigênio atômico  $O^+$  como elemento químico mais abundante, como também  $N_2^+$ ,  $O_2^+$ . Acima desta altitude há predominância de  $He^+$  (Heliosfera) e, posteriormente, H (Protonosfera).(Fig. 1.10).

As camadas ionosféricas (D, E, F1 e F2) são formada pela radiação solar na faixa do Raio-X, EUV e UV durante o dia. Porém, durante a noite a camada-F se mantém devido à baixa taxa de recombinação (baixa densidade atmosférica) e pela liberação de energia química e interna dos átomos e moléculas.

A fotoionização atinge seu máximo por volta do meio dia local. Em conseqüência há surgimento das camadas D, E, Es, F1 e F2 (Fig. 1.11) durante o dia e F2 e Es durante a noite (ARANHA, 2006).

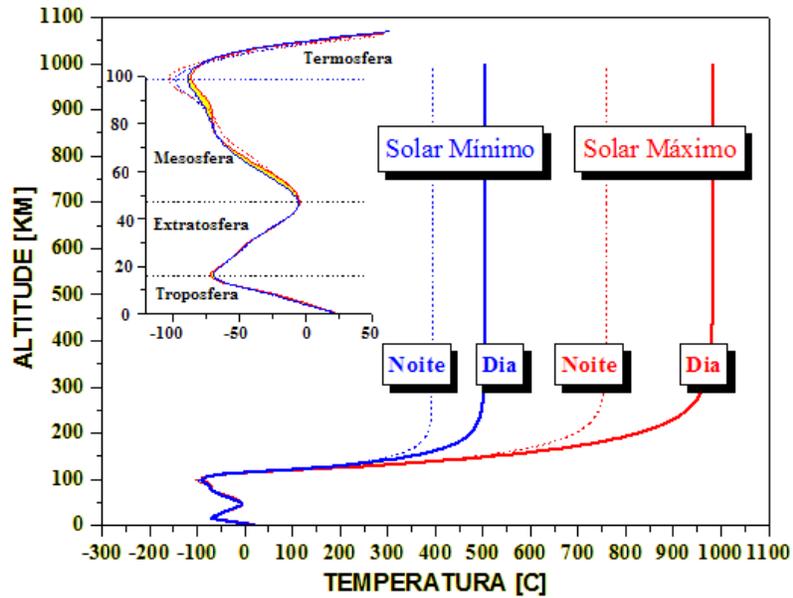


Fig. 1.10 – Perfil vertical de temperatura durante o dia e noite função do ciclo solar (Fonte: FAGUNDES *et al.*, 2007).

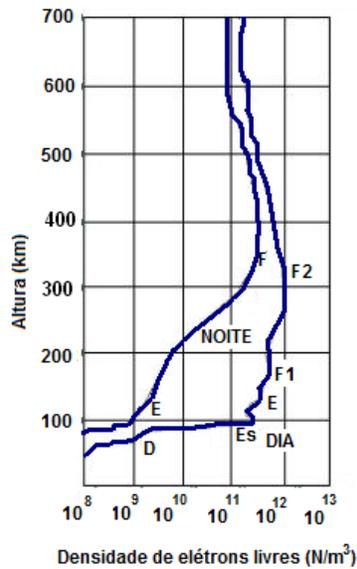


Figura 1.11 - Perfil vertical da ionosfera.

A descrição de uma porção da ionosfera vai depender de um conjunto de equações acopladas (equação da continuidade, equação

de momento, equação de energia e equação do gás perfeito). O equilíbrio dinâmico de concentração de elétrons livres que se padroniza por densidade eletrônica ou iônica depende da relação da taxa de produção e a perda no processo por recombinação. Geralmente o termo é expresso pela equação da continuidade (Eq. 1.1);

$$\partial N / \partial t = q - L - \text{div} (N\mathbf{v}); \quad (\text{Eq. 1.1})$$

Sendo  $q$  razão de produção,  $L$  a perda por recombinação, e o divergente  $(N\mathbf{v})$  expressa a perda de elétrons por movimento, onde  $\mathbf{v}$  define a velocidade dos íons ou elétrons.

#### 1.4.1 - Região D

A base da camada D está localizada a uma altura aproximadamente de 50 km e o limite superior desta camada está localizado entre 70 e 90 km de altitude. Como a densidade da atmosfera neutra é relativamente alta as colisões íons / elétrons com os constituintes neutros são importantes na química da camada D. As principais radiações ionizantes são os R-X, Lyman  $\alpha$  e raios cósmicos.

Assim, a região D é fortemente controlada pela radiação solar, porém o seu comportamento diurno aparente vai depender da técnica utilizada na observação desta camada. Utilizando a técnica de VLF, rádio freqüências muito baixas ( $< 30$  kHz), nota-se uma rápida variação de densidade eletrônica em função da altura. Isto se deve ao fato de que o índice reflexão muda rapidamente dentro de uma distância de um comprimento de onda, assim as ondas de rádio freqüência são refletidas e mostram uma camada muito estreita. Portanto, a altura aparente da camada D vista pela técnica VLF varia de acordo com a equação abaixo.

$$h = h_0 + H \ln \sec \chi. \quad (\text{Eq. 1.2})$$

onde  $h_0 \sim 72$  km,  $H$  é altura de escala ( $\sim 5$  km) e  $\chi$  ângulo de incidência da radiação solar. Uma outra maneira de observar a camada D é a medida de absorção de ondas de rádio frequência que foram refletidas pela camada E. A absorção vai depender da concentração eletrônica e da frequência de colisão camada D. A medida fornece a taxa integrada da absorção ao invés da absorção em uma dada altura (HARGREAVES, 1992).

### 1.4.2 - Região E

Nesta região a ionização do  $O_2$ , ocorre diretamente pela fotoionização devido a radiação na faixa do EUV e R-X. Outros constituintes como O e  $N_2$  também contribuem para a formação da camada E, porém o  $O_2^+$  é o principal íon desta camada. Na (Fig. 1.12), ventos de cisalhamento simultâneos no sentido leste-oeste e oeste-leste em alturas diferentes dentro do envelope do campo magnético terrestre da região E, produzem formação da camada E esporádica (Es), por ação da força resultante de Lorentz (HINES, 1974).

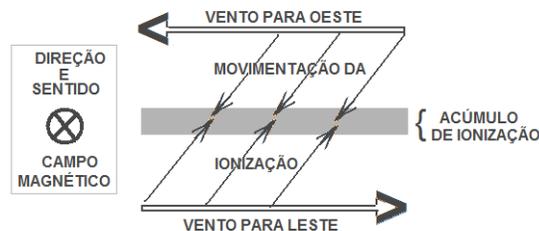


Fig.1.12 - Ilustração da formação da camada Es, segundo Hines, 1974 ( Adaptado de HINES, 1974, p.297)

### 1.4.3 - Região F1 e F2

A camada F1 está localizada entre 150 e 200 km de altitude e se caracteriza por um pequeno pico secundário na concentração eletrônica. As principais radiações que contribuem para a ionização são o extremo ultravioleta (EUV) e Lyman contínuo, sendo que o  $O^+$  é o principal íon desta região.

Já a camada F2 está localizada entre 200 e 1000 km de altitude, o  $O^+$  é o principal íon desta região (ionizado pela radiação EUV e Lyman contínuo). Nesta região o campo magnético terrestre exerce uma grande influência na distribuição da ionização e os processos eletrodinâmicos dominam o comportamento da ionosfera (acoplamento termosfera – ionosfera).

Conforme Kelley (1989) o plasma ionosférico tem propriedades de condutividade elétrica e permissividade eletromagnética, isto é, ora comporta-se como um bom condutor metálico, em outras pode se comportar como uma antena sintonizada em determinadas frequências, podendo refletir determinados comprimentos de onda praticamente sem perdas, absorver outros comprimentos de onda inutilizando totalmente a propagação destas.

A camada F tem variações temporais de sua divisão em F1 e F2, em função do dia e da noite, com conseqüências para a propagação das ondas de radiofrequência (RF). Esta divisão ocorre durante o dia, sendo a F1 a mais baixa, e a F2 a mais alta. A divisão surge devida o processo de ionização, seguido pela recombinação dissociativa, a primeira parte, ou o primeiro processo controla as taxas de perdas da camada F2, e o último na camada F1. Embora a produção máxima de íons seja sempre na camada F1, esta resulta na máxima densidade eletrônica na camada F2, onde as taxas de perdas iônicas são mais baixas. A máxima densidade eletrônica na camada F1 segue rigorosamente a taxa de ionização da camada E, porém existem

modificações significativas e menos previsíveis na altitude da camada. Porém o meio anisotrópico, a influência do campo magnético e as interações com os ventos termosféricos dentro das médias e altas latitudes, são fatores que contribuem para as irregularidades e o retroespalhamento das RF, que estão sujeitas às dependências do estado eletrônico e das condições de variação da camada F2.

## **1.5. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das ondas de gravidade, através de análise de ionogramas em períodos geomagneticamente calmos do ciclo solar 23 (entre os anos de 2002 a 2006), na ionosfera e atmosfera superior, sobre a cidade de Manaus. Os dados utilizados resultam principalmente de observações realizada em Manaus (AM) e quando necessário foi utilizado dados de Palmas (TO) e São José dos Campos (SP) para auxiliar na interpretação científica do comportamento eletrodinâmico da ionosfera equatorial, setor brasileiro.

No capítulo 2 são definidos conceitos tradicionais sobre Ondas de Gravidade e o desenvolvimento matemático, principalmente na visão de Hines e de outros pesquisadores.

O capítulo 3 trata da Instrumentação e observação. Também são destacados os critérios de aquisição e de tratamento de dados e método, com um “*software*” próprio do IP&D (UDIDA).

O capítulo 4 apresenta os resultados e discussões sobre OG em períodos geomagneticamente calmos.

No Capítulo 5 são apresentadas as Conclusões deste trabalho, com uma breve recomendação para futuros trabalhos, neste segmento.

## CAPÍTULO 2

### 2. ONDAS DE GRAVIDADE E DISTÚRBIOS VIAJANTES

As frentes frias, descargas elétricas, distúrbios meteorológicos, e eclipse solar são possíveis fontes de ondas de gravidade (OG) na atmosfera superior. Por outro lado tempestades geomagnéticas são fontes de distúrbios viajantes (*TID*), também conhecidos como “travelling ionospheric disturbances – *TIDs*” (Sauli, *et al.*, 2007, Hines, 1960, Hooke, 1968, Hooke e Schlegel, 1996, Fritts, 1989, Nappo, 2000, Sahai et al 2005, Fagundes et al., 2008).

O estudo de OG e *TID* são importantes na circulação e estrutura da mesosfera, termosfera e ionosfera. Existe um grande interesse da comunidade científica em estudar os aspectos morfológicos das OG, isto é, variação sazonal, direção preferencial de propagação, comprimentos de onda, períodos e velocidade de propagação característica, principalmente na região equatorial que é uma das menos estudadas. Não menos importante, porém mais complexo é o estudo das possíveis fontes de geração de OG. Até o presente momento existem fortes indicações que tempestades, descargas elétricas, frentes frias, cisalhamento de ventos, efeitos orográficos podem ser fontes de OG. A principal motivação deve-se ao papel das OG na dinâmica da baixa e alta atmosfera, principalmente no transporte de momento e energia. Recentemente pesquisadores da NASA publicaram uma nota onde eles mostram fortes evidências de ondas de gravidade geradas por tornado ([http://science.nasa.gov/headlines/y2008/19mar\\_grits.htm?list26092](http://science.nasa.gov/headlines/y2008/19mar_grits.htm?list26092)).

Durante as últimas décadas houve significativos avanços na compreensão dos processos físicos (fluxo de momentum, transporte de energia, viscosidade turbulenta e viscosidade térmica) envolvidos na propagação de ondas de gravidade na mesosfera e baixa termosfera. No entanto, a nossa compreensão

é bastante limitada a respeito do papel das ondas de gravidade na ionosfera. Neste sentido existe um grande esforço para estudarmos as OG na ionosfera, principalmente na ionosfera equatorial.

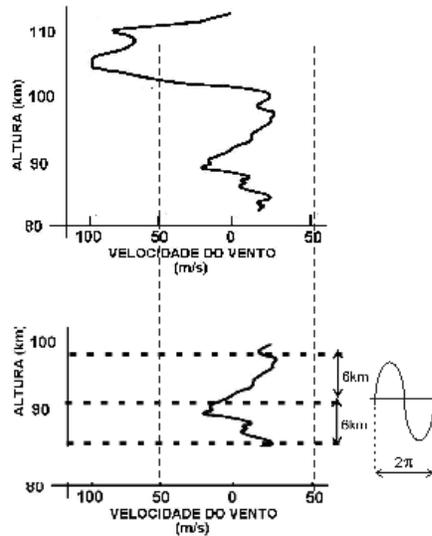
Na geociência, Sauli, *et al.* (2007) menciona que um dos trabalhos pioneiro do estudo de ondas de gravidade foi realizado por Hines (1960) e posteriormente os trabalhos de Herkrider (1964) e Row (1967) relacionaram perturbações do tipo OG com explosões e terremotos. E mais recentemente, utilizando técnicas modernas (GPS, gravímetros e sismógrafos), varias investigações indicam a propagação de OG após acontecimentos de terremotos, explosões naturais ou artificiais e erupções vulcânicas Lognonné *et al.* (2007), Tolstoy, *et al.* (1970), Jung, *et al.* (2006), Molchanov, *et al.* (2004), Erickson, *et al.* (2008).

## **2.1 Observação de OG na ionosfera e atmosfera superior**

Hines (1960) foi o pesquisador precursor dos estudos relacionados com a propagação de OG na alta atmosfera. Medindo movimentos irregulares nas camadas D, E e da porção inferior da camada F e da distribuição irregular de densidade eletrônica em uma altura constante. Inicialmente pensou-se que estes movimentos eram causados por turbulência, porém Hines (1960) propôs que estes movimentos tinham uma origem em um movimento mais organizado, que é controlado pela força gravitacional e força devido o gradiente de pressão. Por este motivo estas ondas foram chamadas de ondas de gravidade.

A primeira evidência direta da existência de movimento ondulatório na alta atmosfera (ondas) foram obtidos observando o traço de meteoros. Os meteoros quando atravessam a atmosfera durante a noite deixam traços luminosos, que é causado pela ablação (pulverização) do meteoro. A observação da evolução temporal deste traço forneceu as primeiras

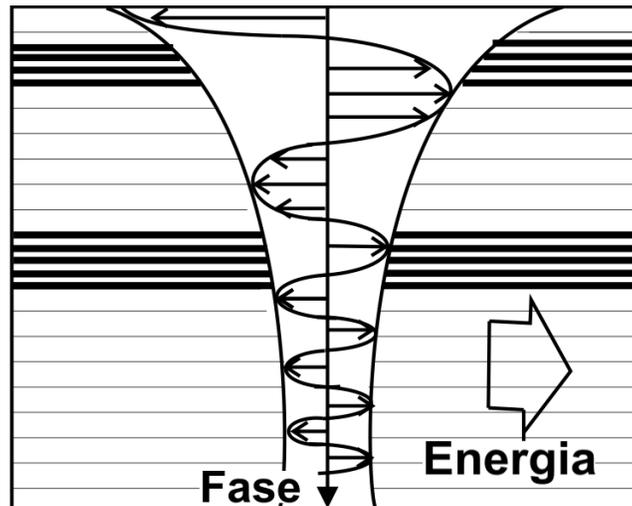
informações sobre as características das OG, nas alturas onde este traço ocorreu (veja Figura 2.1).



**Figura 2. 1** – Traço do meteoro distorcido pela ação do vento na altura em que ocorreu a ablação do meteoro (HINES, 1974, p.250)

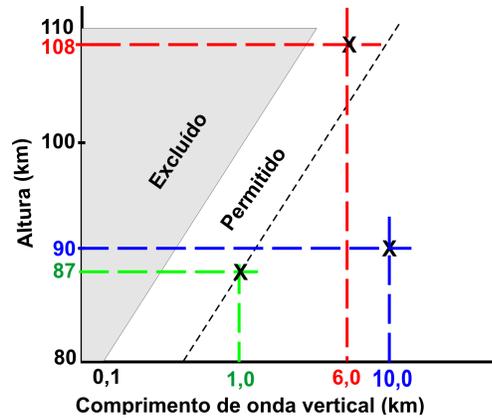
Um estudo detalhado da evolução temporal do perfil vertical da perturbação no traço meteórico (Figura 2.1) mostrou que a amplitude da OG é maior em altitudes mais elevadas. Este incremento na amplitude da OG com a altitude é interpretado em termos de fluxo de energia por unidade de massa. Então o incremento na amplitude da OG é para compensar a diminuição da densidade atmosférica com a altitude. A taxa de crescimento da amplitude da OG é proporcional  $\exp(-\gamma z/C^2)$  onde  $\gamma$  é a taxa de calor específico,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $z$  é a altitude e  $C$  a velocidade do som, sendo que estas constantes são consideradas na altura do traço meteórico. A

amplificação da amplitude da OG com a altitude pode ser mascarada pelo amortecimento devido à dissipação de energia. A Figura 2.2 dá uma visão pictórica da amplificação da amplitude na ausência de dissipação de energia (HINES, 1974).



**Figura 2.2** – Painel pictórico mostrando a amplificação na amplitude da OG com a altura, na ausência de dissipação de energia (HINES, 1974, p.253).

A taxa de energia dissipada é proporcional à viscosidade cinética, que por sua vez é inversamente proporcional à densidade atmosférica. Portanto, a dissipação tornasse mais efetiva quanto maior for a altitude. Nota-se também que a dissipação é mais importante para estruturas ondulatórias de pequena escala. Conseqüentemente a viscosidade tende a remover ondas de pequena escala e a remoção vai se tornando mais efetiva quanto maior for à altitude (veja Figura 2.3). Vários critérios podem ser introduzidos para estabelecer a altura em que um determinado modo de onda foi removida, bem como as condições de contorno envolvidas na região onde a onda foi gerada.



**Figura - 2.3** – Mostra os modos de OG que podem propagar em função do comprimento de onda vertical. A área cinza mostra os modos excluídos. A linha pontilhada mostra os modos que podem propagar com períodos de 200 minutos (HINES, 1974, p.254).

Com o passar do tempo foi-se desenvolvendo outras técnicas para estudar a ionosfera e conseqüentemente contribuíram com o conhecimento do estudo de OG/TID na ionosfera. Dentre as técnicas destaca a reflexão parcial e espalhamento de ondas de rádio por estrutura ionizadas não homogêneas na região D e E, medida da deriva de estruturas na região E e F utilizando a técnica de difração de ondas de rádio, a reflexão total de ondas de rádio pela região E e F (ionossonda) e a variação do conteúdo eletrônico total, utilizando GPS.

Mais recentemente Fagundes et al. (2007), utilizando ionossonda, mostrou com sucesso uma nova metodologia para estudar a propagação de OG/TID na região F. Também neste trabalho concluiu que OG em baixas latitudes podem inclusive gerar estratificação na camada F, gerando uma camada F adicional, chamada de F3. Posteriormente, Klausner et al. (2009) utilizando a mesma metodologia mostrou que a atividade de OG/TID é fortemente influenciada pelo ciclo solar de 11 anos, sendo que as OG durante

o máximo solar tem uma ocorrência 9 vezes maior que durante o mínimo solar.

## 2.2 Desenvolvimento Matemático

A atmosfera superior suporta muitos tipos de ondas. Algumas delas se originam na atmosfera neutra e outras na componente ionizada da atmosfera (ionosfera). Um dos tipos mais importantes são as ondas que tem origem na atmosfera neutra, que são chamadas de ondas de gravidade interna. Estas ondas têm períodos de minutos até horas, comprimento de onda de centenas de quilômetros e viajam a velocidades proporcional a velocidade do som.

Na atmosfera a densidade varia gradualmente com a altitude, nesta situação a ondas de gravidade podem existir. Em geral, a força gravitacional e a força devido à compressão têm que ser levadas em conta. Porém, para estas ondas a rotação e a curvatura da terra pode ser desprezadas. Pode-se escrever a relação de dispersão para uma onda de gravidade interna assumindo-se as seguintes condições iniciais.

- a) As variações de pressão e densidade são pequenas,
- b) Não há perda de energia devido a viscosidade,
- c) A onda se propaga em um plano, cuja a forma é  $\exp[j(\omega t - k_x X - K_z Z)]$ .

A relação de dispersão é dada por:

$$\omega^4 - \omega^2 c^2 (k_x^2 + k_z^2) + (\gamma - 1) g^2 k_x^2 + \omega^2 \gamma^2 g^2 / 4c^2 = 0 \quad \text{Eq. 2.1}$$

onde  $\omega$  é a freqüência angular da onda,  $c$  é velocidade do som,  $\gamma$  é a taxa de calor específico do gás atmosférico,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $k_x$  e  $k_z$  são o

número de onda ( $k = 2\pi/\lambda$ ) horizontal e vertical, respectivamente. Não é necessário utilizar a componente y, porque não existe assimetria na direção horizontal e assim o tratamento bi-dimensional mais a evolução temporal é suficiente. A equação 2.1 expressa a relação entre a frequência da onda e os comprimentos de onda horizontal e vertical. Na figura 2.4 estas quantidades ( $\omega, k_x$  e  $k_z$ ) definem a completamente a fase da onda.

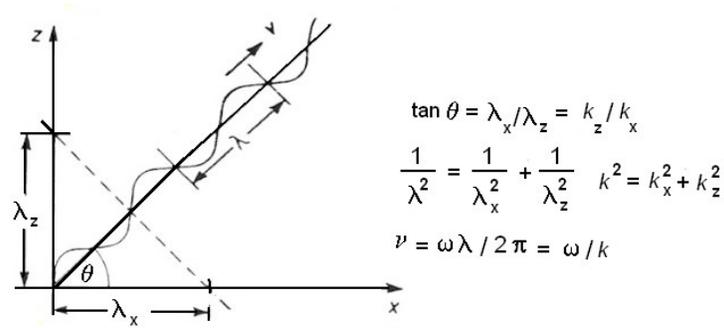


Figura 2.4- Relação entre o comprimento de onda, velocidade e direção de propagação da onda. (Adaptado de Hargreaves, 1995, pág 125)

A fase da onda a um determinado ângulo de elevação é dado por:

$$\theta = \text{tg}^{-1}(\lambda_x / \lambda_z) = \text{tg}^{-1}(k_x / k_z) \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde o comprimento de onda é  $\frac{1}{\lambda^2} = \frac{1}{\lambda_x^2} + \frac{1}{\lambda_z^2} = (k_x^2 + k_z^2) / (2\pi)^2$ .

Portanto o comprimento de onda é  $\lambda = 2\pi / (k_x^2 + k_z^2)^{1/2}$  e a velocidade de fase na direção  $\theta$ , na horizontal e vertical, são dadas por:

$$v = \omega \lambda / 2\pi = \omega / k \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$v_x = \omega / k_x \quad \text{Eq. 2.4}$$

$$v_z = \omega / k_z \quad \text{Eq. 2.5}$$

Se  $g = 0$  a relação de dispersão dada pela equação 2.1 torna-se mais simples e é dada pela equação 2.6. Esta nova equação fornece a relação de dispersão para uma onda acústica com velocidade de fase independente da direção.

$$c = \omega / (k_x^2 + k_z^2) = \omega \lambda / 2\pi \quad \text{Eq. 2.6}$$

Substituindo  $\omega_a = \gamma g / 2c$  e  $\omega_b = (\gamma - 1)^{1/2} g / c$  na equação 2.1 e rearranjando os termos, temos que,

$$k_z^2 = (1 - \frac{\omega_a^2}{\omega^2}) \frac{\omega^2}{c^2} - k_x^2 (1 - \frac{\omega_b^2}{\omega^2}) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Então, fazendo  $\omega^2 \ll c^2 k_x^2$ , que na prática remove o efeito da compressibilidade do gás, obtemos que:

$$k_z^2 = k_x^2 (\frac{\omega_b^2}{\omega^2} - 1) \quad \text{Eq. 2.8}$$

que representa uma onda de gravidade pura. No entanto, a onda somente pode propagar se  $k_x$  e  $k_z$  são reais e positivos, isto requer que  $\omega < \omega_b$ . Então o ângulo de propagação dado pela equação 2.2, pode ser dado por:

$$\theta = \text{tg}^{-1} (\frac{\omega_b^2}{\omega^2} - 1)^{1/2} \quad \text{Eq. 2.9}$$

Na realidade, deve-se tomar a raiz quadrada negativa, porque a propagação da fase da onda é para baixo, está é uma conclusão que não surge deste tratamento matemático simplificado. Nas ondas acústicas a velocidade é determinada pelas propriedades do meio. Então ao selecionar-se uma determinada freqüências o comprimento é selecionado automaticamente, mas a direção de propagação não é determinada fixando a freqüência. A onda de

gravidade é bem diferente, a frequência fixa a direção de propagação, mas não fixa nem a velocidade e o comprimento de onda. No entanto,  $v$ ,  $\omega$  e  $\lambda$  são relacionados pelas equações 2.3, 2.4 e 2.5.

Os espectros de ondas acústicas e ondas de gravidade são descritos pela equação 2.1. Em geral uma parcela de ar move-se numa trajetória elíptica, combinando com um deslocamento longitudinal que é típico de ondas acústicas e um deslocamento e um deslocamento transversal das ondas de gravidade. Como  $k_x$  e  $k_z$  deve ser real nos modos de ondas propagantes, então  $\omega > \omega_a$  ou  $\omega < \omega_b$  e estes dois modos são chamados ondas acústicas e ondas de gravidade, respectivamente. Se  $\omega_b < \omega_a$  então as ondas com frequências entre  $\omega_b$  e  $\omega_a$  são chamadas de ondas evanescentes e não são modos de onda propagantes. A Figura 2.5 ilustra um diagrama com estes três regimes de ondas.

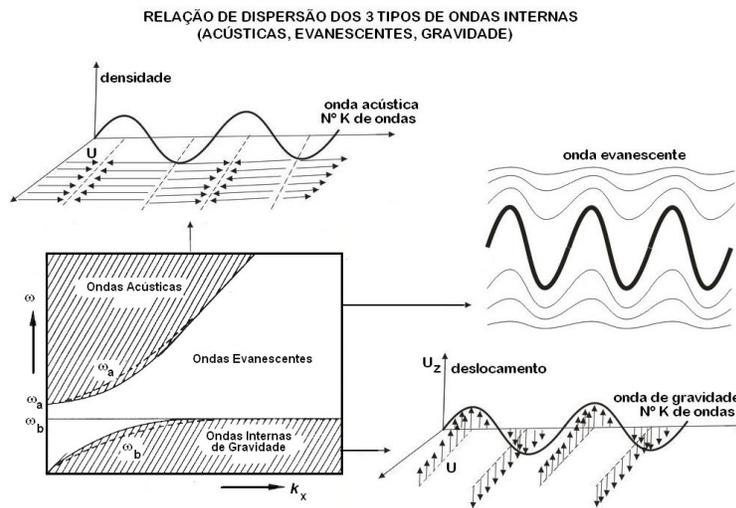


Figura 2.5 - Diagrama mostrando ondas acústicas, ondas de gravidade e ondas evanescentes. As linhas pontilhadas indicam os efeitos desprezando-se a gravidade ou compressibilidade, respectivamente.

## CAPÍTULO 3

### INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÃO

#### 3.1 – O funcionamento da ionossonda.

O instrumento utilizado neste estudo é um radar, chamado de ionossonda. Este sistema transmite pulsos de rádio freqüência na faixa entre 1 a 20 MHz, por uma antena transmissora do tipo delta. Algum tempo após o pulso ser transmitido ele é refletido pela camada ionizada terrestre (ionosfera) e é em seguida é detectado por uma antena receptora, localizada próxima da antena transmissora (veja a Figuras 3.1 e 3.2). O tempo decorrido entre a transmissão e recepção é registrada pela ionossonda, e utilizando a equação 3.1 é possível calcular a altura onde ocorreu a reflexão. Sabendo que, a reflexão ocorre quando a freqüência transmitida ( $f$ ) for igual à freqüência de plasma  $f_{pe}$  e que a  $f_{pe}$  é proporcional à densidade eletrônica. Assim, realizando uma varredura em freqüências dos pulsos transmitidos eles serão refletidos em diferentes altitudes, dependendo da densidade eletrônica, ou seja quando  $f = f_{pe}$ . Portanto, sabendo que está condição ocorre em diferentes alturas, então é possível medir a densidade eletrônica em função da altura (equações 3.2 a 3.4).

$$h = \frac{C \Delta t}{2} \quad \text{Eq. 3.1}$$

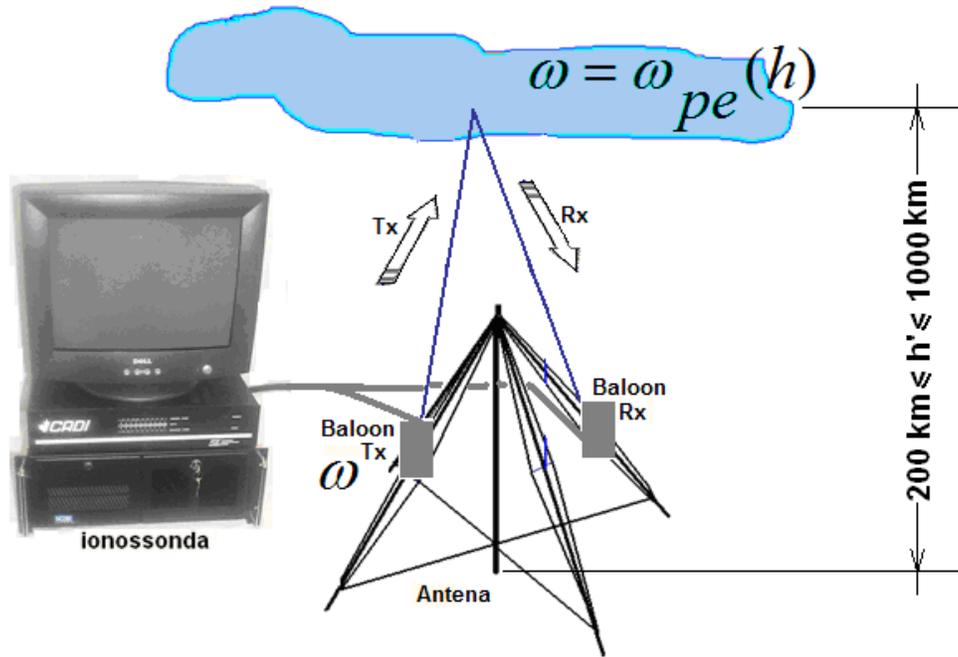


Figura 3.1 – Descrição pictórica do funcionamento da ionossonda.

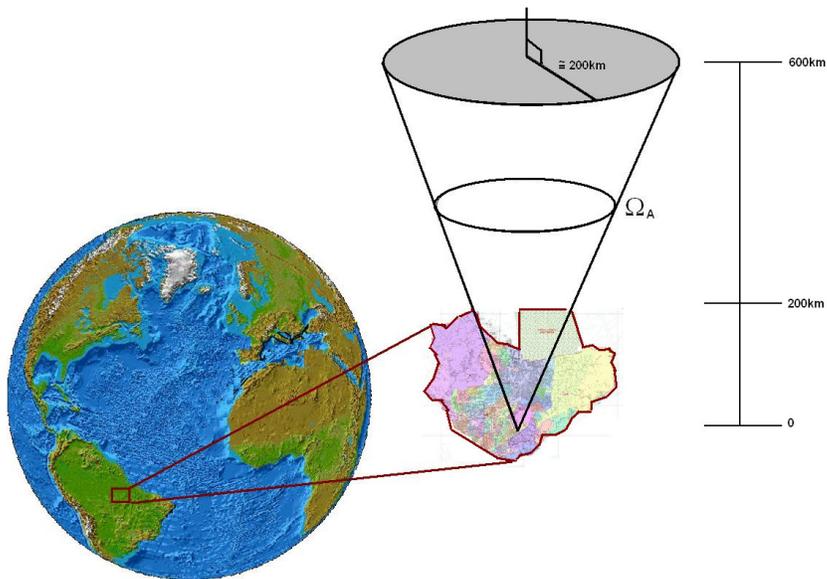


Figura 3.2 - Visão do ângulo sólido ( $\Omega_A$ ) da área utilizada pela ionossonda que opera em Manaus ( $2,9^\circ\text{S}$  e  $60,0^\circ\text{W}$ ).

A freqüência natural de ressonância associada com os elétrons do plasma ionosférico ( $\omega_{pe}$ ) é dada por:

$$\omega_{pe}(h) = \left[ \frac{(N_e e^2)}{(m_e \epsilon_0)} \right]^{1/2} \quad \text{Eq. 3.2}$$

Onde  $\omega_{pe}(h)$  é a freqüência angular de plasma e  $N_e$  é número de elétrons por metro cúbico, “e” a carga do elétron,  $\epsilon_0$  a permissividade elétrica do meio e  $m_e$  massa do elétron. Substituindo-se as constantes obtém-se,

$$\omega_{pe}(h) = 8,98 N_e^{1/2} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Então a densidade eletrônica ( $N_e$ ) pode ser calculada em função da freqüência transmitida ( $f$ ) ou freqüência de plasma ( $f_{pe}$ ), basta utilizar a condição que a reflexão ocorre quando  $f = f_{pe}$  e a relação  $\omega = 2\pi f$ .

$$N_e = 1,24 \times 10^{10} f_{pe}^{1/2} = 1,24 \times 10^{10} f^{1/2} \quad \text{Eq. 3.4}$$

O espectro obtido pela ionossonda é chamado de ionograma (Figura 3.3). O ionograma abaixo mostra a altura (km) onde ocorrem os ecos da freqüência transmitida, como  $f \propto N_e^{1/2}$ , então tem-se o perfil vertical da densidade eletrônica. A altura obtida neste espectro é chamada de altura virtual, visto que se assumiu que a onda eletromagnética propaga-se com a velocidade da luz (C), mas está é uma aproximação.

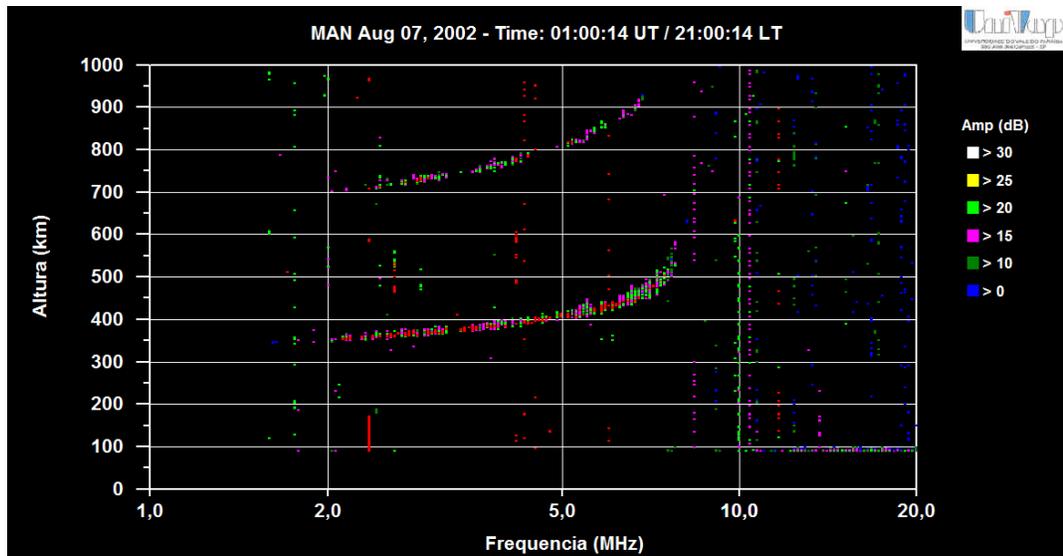


Figura – 3.3 Exemplo de um ionograma que realizou uma varredura de 180 freqüências. A curva inferior indica os ecos da camada F e a curva superior os ecos que foram refletidos pela segunda vez, ou seja, foram transmitidos pela antena, refletidos pela ionosfera, refletidos pela superfície da Terra e novamente refletido pela ionosfera e finalmente detectado pela antena receptora.

As observações utilizadas neste trabalho foram obtidas por uma ionossonda do tipo “**Canadian Advanced Digital Ionosonde – CADI**” (Figura 3.4), desenvolvida pela Rede Canadense de Pesquisa Espacial. Este modelo é ideal para observação e monitoramento da região E e F ionosférica. Possui as seguintes características: opera em uma faixa de altura compreendida entre 90 e 1000 km de altitude com uma resolução de  $\pm 6,0$  km de altura e numa faixa de freqüência de 1 a 20 MHz. Atualmente a ionossonda que opera em Manaus (Figura 3.3) trabalha simultaneamente em 2 modos diferentes. O primeiro modo varre 180 freqüências a cada 300 segundos (5 minutos), o segundo modo varre 6 freqüências a cada 100 segundos.

### 3.1.1 – A ionossonda do tipo CADI.

A ionossonda do tipo CADI apresenta os seguintes sub-sistemas. O transmissor gera pulsos de rádio freqüência na faixa entre 1 e 20 MHz, este pulso é amplificado e transmitido através da atmosfera pela antena de transmissão (do tipo delta). O pulso de rádio freqüência quando retorna a Terra é detectado por uma outra antena (do tipo delta) e amplificado por um pré-amplificador. A placa do pré-amplificador do pulso de rádio freqüência transmitida e a placa de recepção estão instaladas em um computador pessoal. A tabela 3.1 apresenta de forma resumida as principais características da ionossonda (CADI).

**Tab. 3.1 - Especificações – CADI**

<b>POTÊNCIA DE SAÍDA (PICO DE PULSO)</b>	<b>600 W</b>
<b>FAIXA DE FREQUÊNCIA</b>	<b>1 A 20 MHz</b>
<b>FREQUÊNCIA DE VARREDURA</b>	<b>100 A 400 LINEAR OU LOGARITMO</b>
<b>FAIXA DE ALTURA</b>	<b>90 A 1000 km</b>
<b>RESOLUÇÃO DE ALTURA</b>	<b>6 km</b>
<b>CODIFICAÇÃO DE PULSO</b>	<b>CODIFICADO OU SIMPLES PULSO</b>

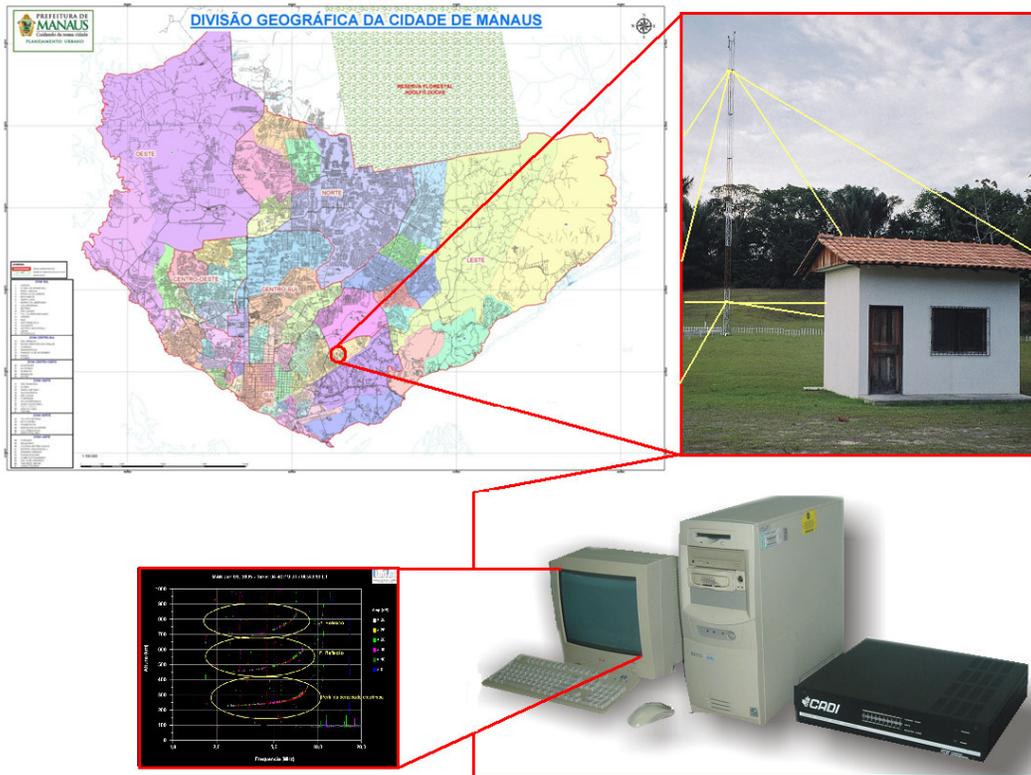


Figura 3.4 – Detalhes da localização do observatório onde opera a ionossonda em Manaus.

### 3.2 –Aquisição de dados.

A Ionossonda opera desde agosto de 2002, e durante este período registrou 14.191.200 ionogramas, totalizando 38.880 horas de observação (4,5 anos). Durante este período a ionossonda operou cerca de 65% do tempo, sendo que os outros 35% do tempo esteve fora de operação devido a queda de energia ou esteve em manutenção devido a danos causados por descargas elétricas (Figura 3.5).

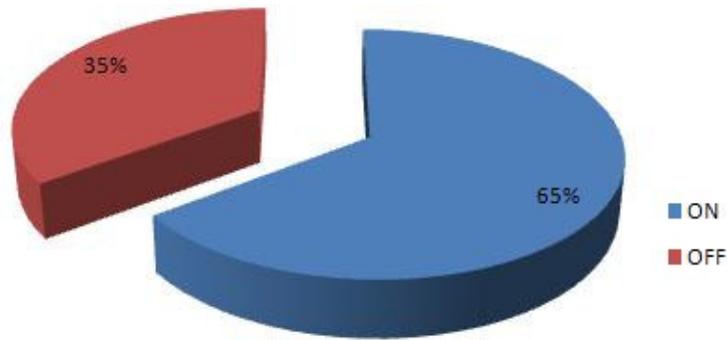


Figura 3.5 – Gráfico de setores indicando a distribuição temporal do tempo em que a ionossonda operou e o tempo em que ficou inoperante.

As Figuras 3.6 a 3.9 e a Tabela 3.1 mostram em detalhes o número de dias em que a ionossonda operou em cada mês para um determinado ano.

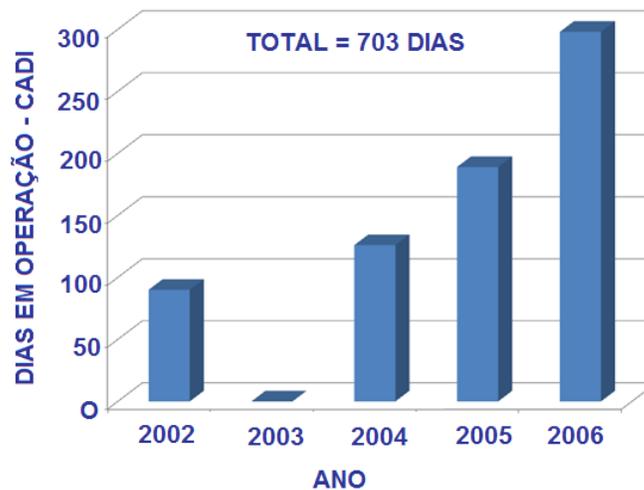


Figura 3.6 – Histograma indicando o número de dias que a ionossonda de Manaus operou em função do ano.

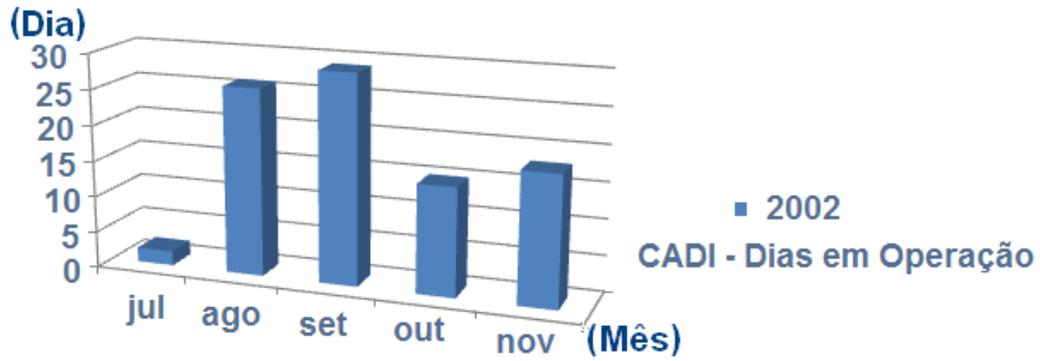


Figura 3.7 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2002.



Figura 3.8– Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2004.

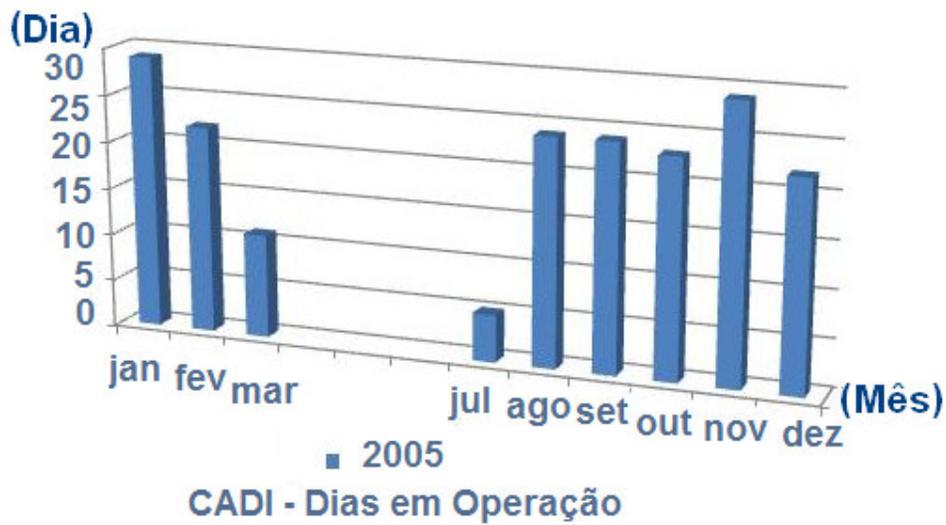


Figura 3.9 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2005.



Figura 3.10 – Histograma indicando o número de dias em função dos meses que a ionossonda operou em 2006.

TABELA. 3.1 – Mostra o número de dias em cada mês em que a ionossonda operou em Manaus.

2002		2004		2005		2006	
MÊS	(ON)	MÊS	(ON)	MÊS	(ON)	MÊS	(ON)
JAN	0	JAN	0	JAN	29	JAN	23
FEV	0	FEV	0	FEV	22	FEV	25
MAR	0	MAR	0	MAR	11	MAR	25
ABR	0	ABR	0	ABR	0	ABR	28
MAI	0	MAI	0	MAI	0	MAI	4
JUN	0	JUN	0	JUN	0	JUN	27
JUL	2	JUL	15	JUL	5	JUL	27
AGO	26	AGO	20	AGO	24	AGO	30
SET	29	SET	22	SET	24	SET	30
OUT	15	OUT	27	OUT	23	OUT	20
NOV	18	NOV	29	NOV	29	NOV	29
DEZ	0	DEZ	13	DEZ	22	DEZ	30

### 3.4 – Ferramenta computacional para visualizar e analisar os dados observados

Em 2003 foi criada uma ferramenta computacional para visualizar e analisar os dados da ionossonda (ionogramas). Este programa chama-se UDIDA (UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis). Utilizando-se este programa é possível extrair parâmetros ionosféricos da camada E e F. Os parâmetros mais importantes para estudo da camada F são a altura virtual da camada F ( $h'F$ ), altura do pico da camada F2 ( $h_pF2$ ) e a frequência crítica da camada F2 ( $foF2$ ). Este mesmo programa apresenta, através de uma interface gráfica, a evolução temporal destes três parâmetros (Figura 3.11).

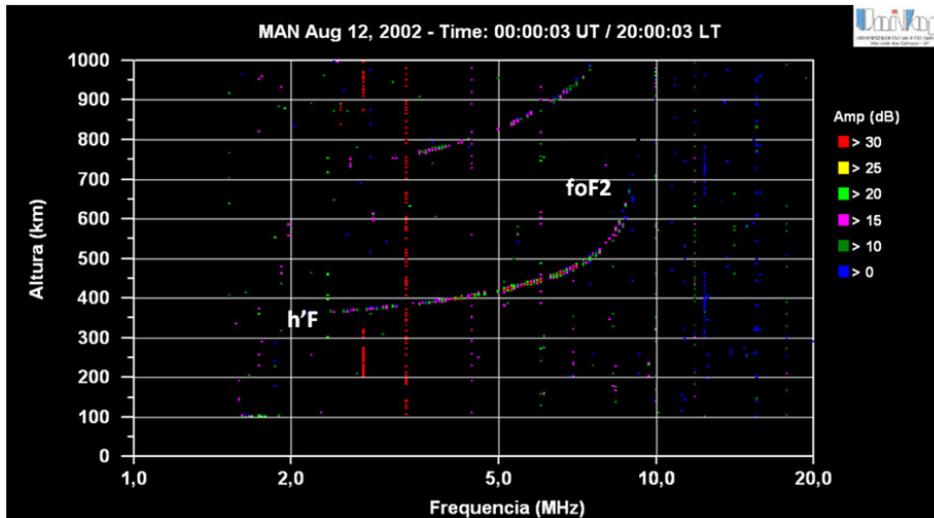


Figura 3.11 – Parâmetros h'F e foF2, para o 12/08/2004, sobre Manaus.

Utilizando o segundo modo de operação da ionosonda; aquele que varre 6 frequências (3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz) a cada 100 s. As observações resultante deste modo de operação permite investigar a variação de altura onde ocorreu a reflexão para cada uma das 6 frequências. A variação da altura para as frequências é chamada de isolinhas (Figura 3.12).

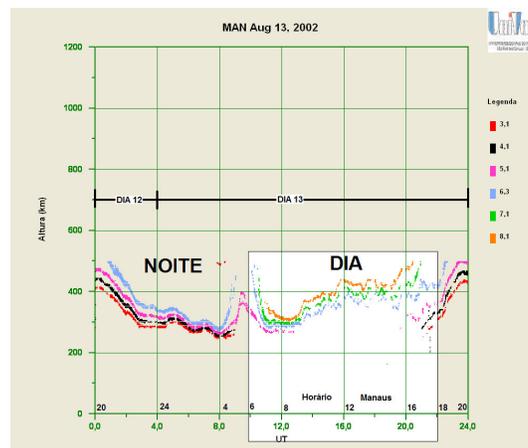


Figura 3.12 – Variação diurna da altura virtual para as frequências 3.1, 4.1, 5.1, 6.3, 7.1 e 8,1 MHz.

## CAPÍTULO 4

### **OS RESULTADOS E DISCUSSÃO SOBRE ONDAS DE GRAVIDADE (OG) EM PERÍODOS GEOMAGNETICAMENTE CALMOS.**

Neste estudo utilizou-se de gráficos do tipo isolinhas e ionogramas para investigar a ocorrência de OG na região F equatorial (Manaus), durante períodos geomagneticamente calmos. Esta investigação utilizou a mesma metodologia proposta por Fagundes et al. (2007) e posteriormente utilizada com grande sucesso por Klausner et al. (2009) para detectar e calcular os parâmetros de OG. O período estudado compreende o final do máximo solar, agosto de 2002, e o mínimo de atividade solar, dezembro de 2006 (ciclo solar 23).

A visualização, análise e interpretação das observações foram realizadas com auxílio do programa de computador chamado UDIDA (*UNIVAP Digital Ionosonde Data Analysis*). As ferramentas computacionais deste programa permitem estudar vários fenômenos físicos como a camada E, camada E esporádica (ES), irregularidade de grande e média escala, perfil de densidade eletrônica e propagação de ondas planetárias e de ondas de gravidade.

As ferramentas do UDIDA que foram utilizadas nestes estudos são mostradas nas Figuras 4.1 a 4.4. Na Figura 4.1 é apresentada uma seqüência de ionogramas, obtida em 4 de agosto de 2002, onde houve uma forte ocorrência de irregularidades ionosféricas e

conseqüentemente ocorreu um forte espalhamento nos ionogramas (“*spread-F*”). Neste estudo é importante identificar quando houve a ocorrência de *spread-F*, visto que este tipo de fenômeno pode dificultar a identificação de OG e posteriormente o cálculo dos parâmetros de onda.

As irregularidades de grande e média escalas (“*Spread-F*”) se caracterizam por uma região não homogênea, onde o plasma ionosférico tem uma densidade menor que o plasma ambiente. Portanto, quando estas regiões (irregularidades) estão localizadas sobre o observatório o traço da região F fica espalhado (borrado), devido às múltiplas reflexões sofridas pelo pulso de RF emitido pelo transmissor da ionossonda (Figura 4.1).

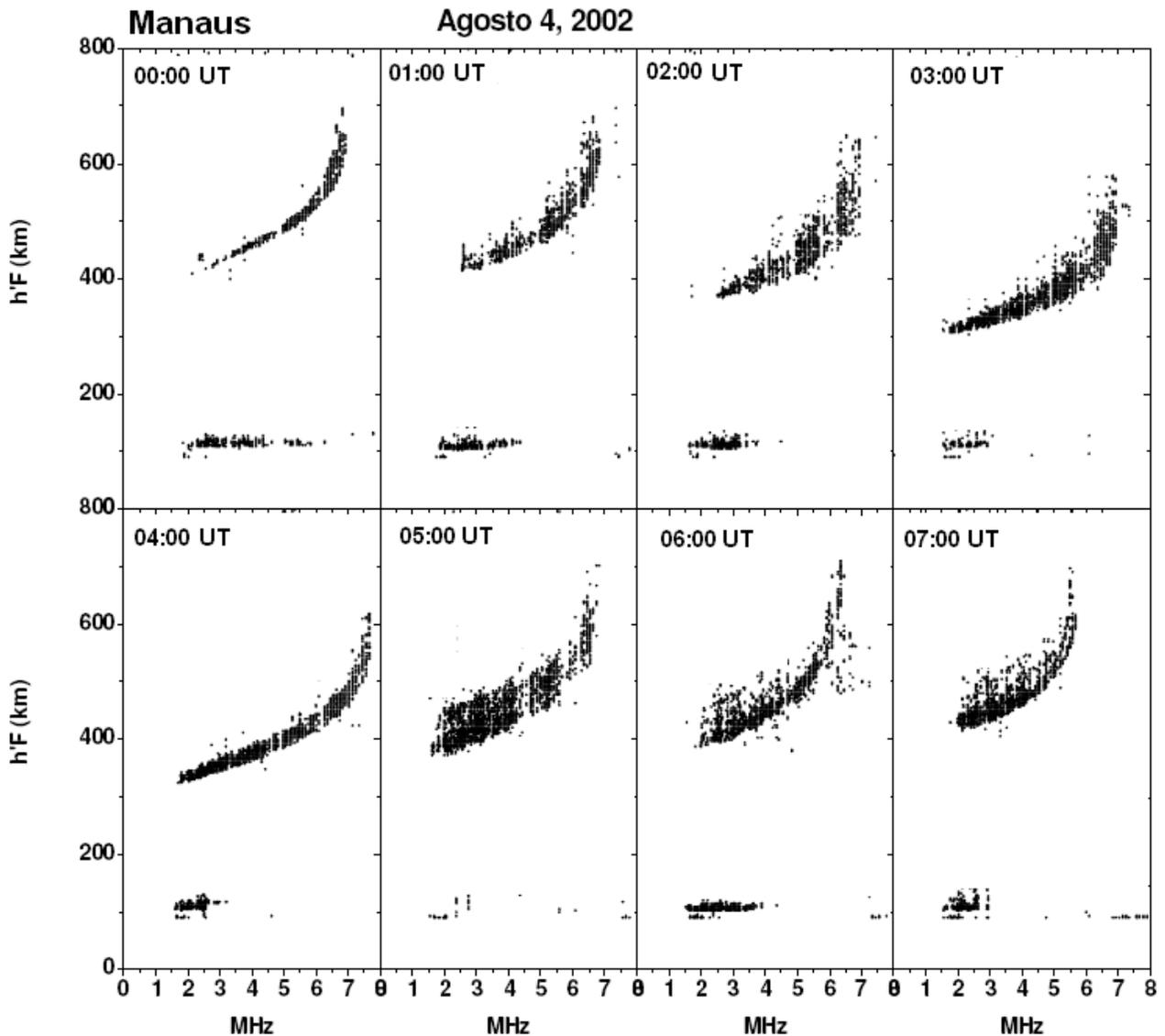


Fig. 4.1 – Evolução temporal da camada F vista através de ionogramas em 4 de agosto de 2002 durante a ocorrência de irregularidades ionosféricas de larga escala (“*Spread-F*”), entre 00:00 UT (20:00 LT) e 07:00 UT (03:00 LT), observado em Manaus (2,9° S, 60,0° W).

#### **4.1 ESTUDO DE OG EM 04 DE AGOSTO DE 2002 (ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA)**

As Figuras 4.2 e 4.3 mostram como o perfil de densidade eletrônica pode ser perturbado por uma OG. Já a Figura 4.4 mostra gráficos do tipo isolinhas, que são amplamente utilizados no estudo de propagação de OG. Estes gráficos fornecem a variação temporal da altura virtual da camada-F. A Figura 4.4 A mostra claramente como as irregularidades de grande e média escalas prejudicam o estudo da propagação de OG na região F. Neste caso é possível notar claramente a existência de estruturas oscilatórias na ionosfera, porém fica difícil definir o horário e a altura onde ocorreram os máximos e mínimos da OG.

A seqüência de ionogramas mostrado na Figura 4.2 evidencia a transição entre noite 08:00 UT (04:00 LT) e o amanhecer 15:00 UT (11:00 LT). Nas primeiras horas do dia, cessa o fenômeno “*Spread-F*” e o perfil da camada F é perfeitamente definido (Figura 4.2), observa-se neste intervalo de tempo entre 09:00 UT (05:00 LT) até as 15:00 UT (11:00 LT) uma variação na altura da camada F e conseqüentemente uma variação do perfil da densidade eletrônica com a aproximação do meio-dia local. A Figura 4.4 B, mostra oscilações como o período de horas, então se pode classificar está onda como OG. A visualização desta OG pode ser feita em detalhes com a ajuda da Figura 4.5 e

utilizando a técnica descrita anteriormente podem-se calcular os parâmetros da onda de gravidade, que são dados por: período ( $T = 4,3h$ ), a velocidade de fase vertical ( $V_z = 50,6 \text{ m/s}$ ), o comprimento de onda vertical ( $\lambda_z = 795,2\text{km}$ ) e a amplitude ( $\Delta h = 185 \text{ km}$ ).

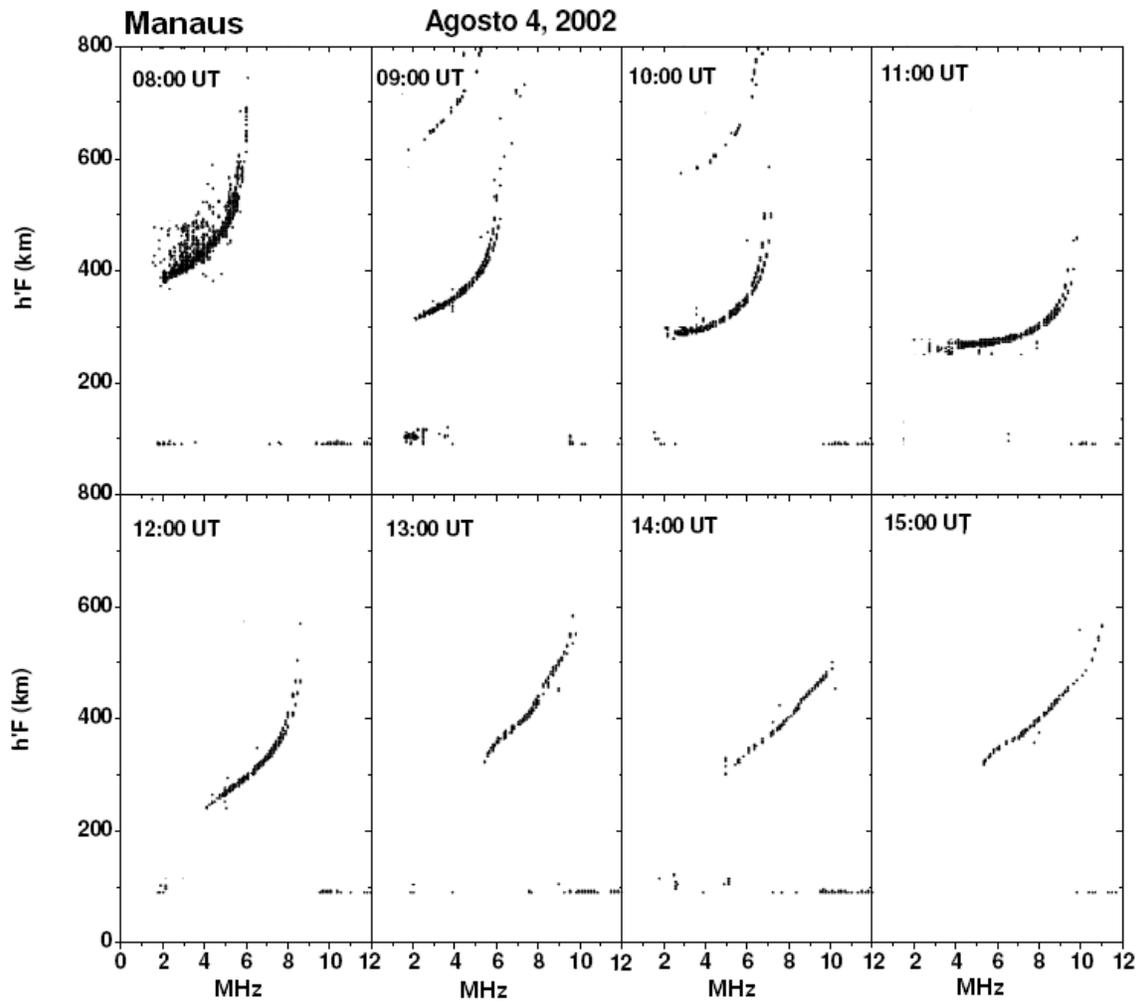


Fig. 4.2 – Evolução temporal da camada-F visto através de ionogramas em 4 de agosto de 2002 durante a propagação de ondas de gravidade

entre 09:00 UT (05:00 LT) e 15:00 UT (11:00 LT), observado em Manaus (  $2,9^{\circ}$  S,  $60,0^{\circ}$  W).

Na Figura 4.3 entre 22:00 UT e 24:00 UT, ocorre o pico pré-reversão sobre a ação da deriva ***ExB***. Entre 22:00 UT (18:00 LT) a camada F inicia um movimento vertical sincronizado para cima (Fig. 4.4 C) e uma rápida visualização do gráfico indica que este movimento é diferente daqueles induzidos pela OG (Fig. 4.5). As oscilações devido as OG apresentam uma defasagem temporal dos máximos e mínimos para 2 frequências próximas. Já a oscilação devido ao campo elétrico o movimento é sincronizado e não apresenta defasagem temporal.

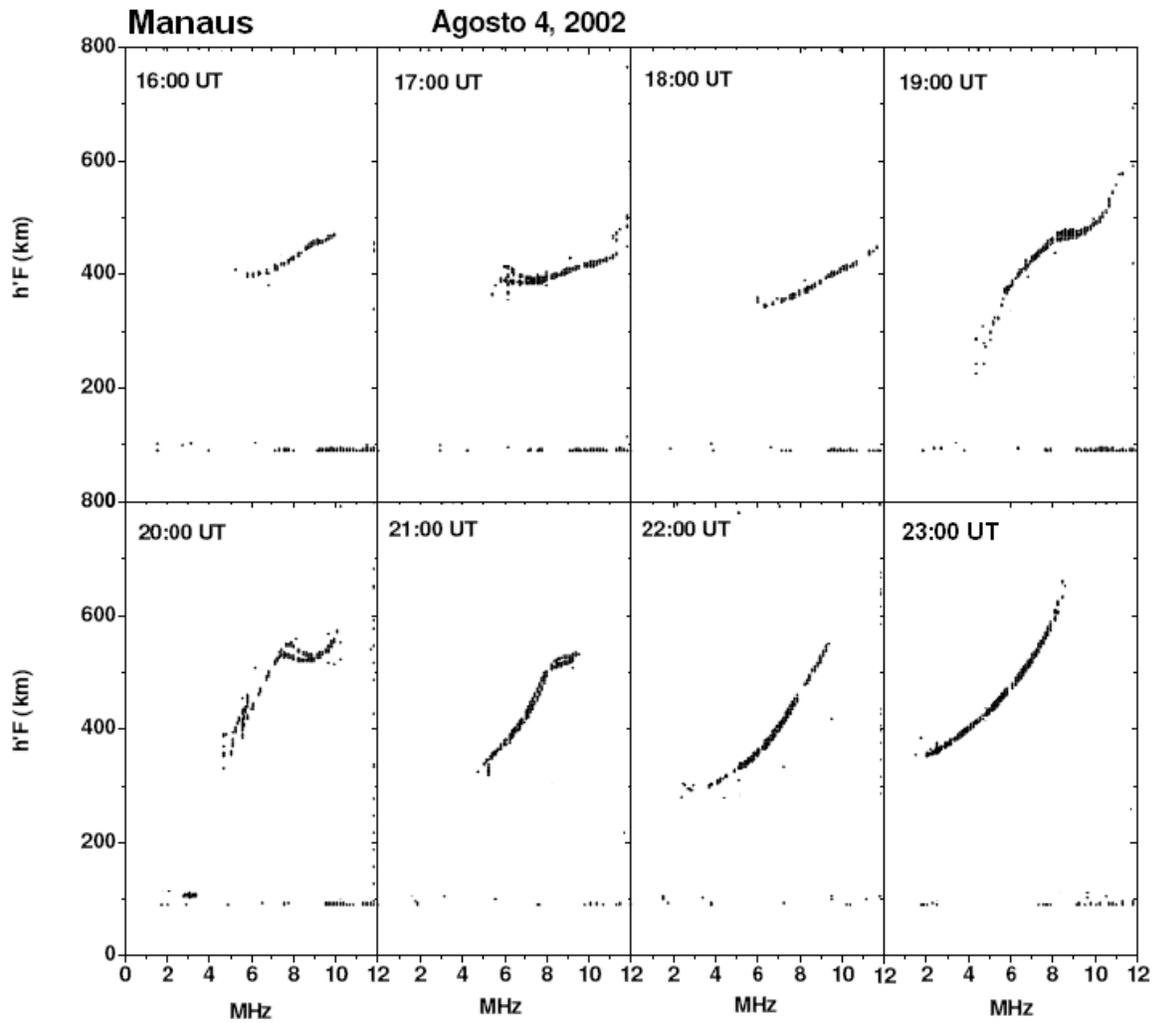


Fig. 4.3 – Evolução temporal da camada-F, vista através de ionogramas em 4 de agosto de 2002 durante a propagação de ondas de gravidade entre 16:00 UT (12:00 LT) e 22:00 UT (18:00 LT) e no intervalo após às 22:00 UT até as 24:00 UT inicia-se o pico pré-reversão.

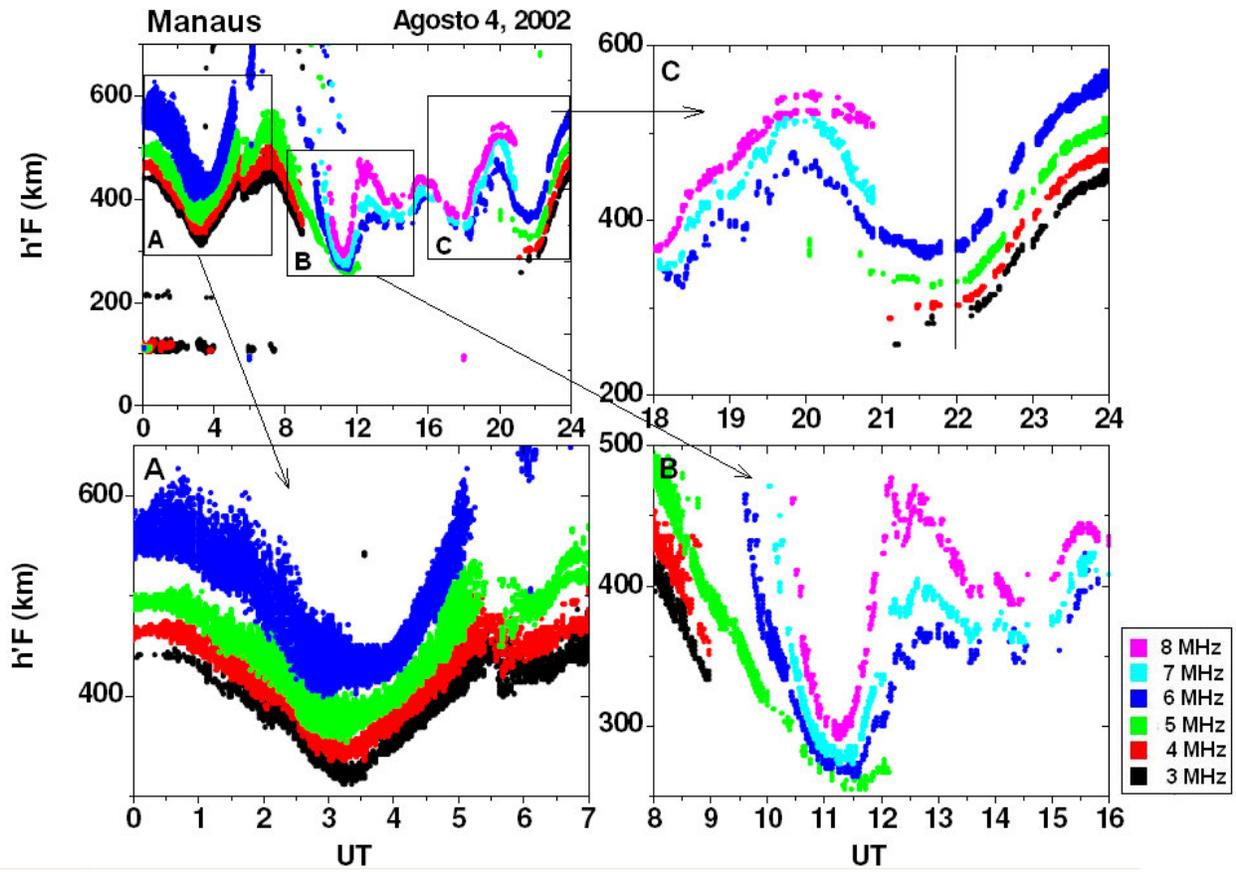


Fig. 4.4 –Variação da altura virtual ( $h'F$ ) nas frequências de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz referentes a 4 de agosto de 2002. Fig. 4.4 A – mostra a ocorrência de irregularidades ionosféricas de larga escala (“*Spread-F*”). Fig. 4.4 B – mostra a propagação de ondas de gravidade. Fig. 4.4 C – a rápida subida da camada-F entre 22:00 UT e 24:00 UT (18:00 LT e 20:00 LT) induzida pelo campo elétrico do pico pré-reversão.

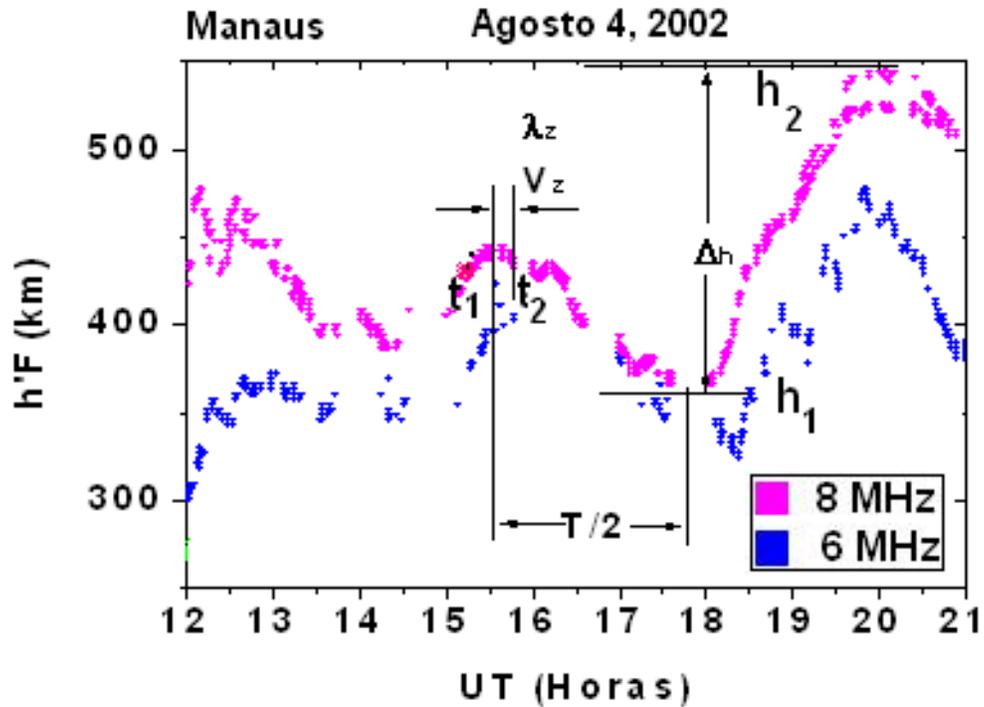


Fig. 4.5 – Variação de altura virtual nas frequências de 6 e 8 MHz referente a 4 de agosto de 2002. Parâmetros das ondas de gravidade entre as 12:00 UT (08:00 LT) até as 21:00 UT (17:00 LT).

A metodologia utilizada para os cálculos de parâmetros de onda, são mostradas a seguir, para o período  $T$  (hora do máximo e mínimo e  $\Delta t$ ), é realizado por  $T = \Delta t \cdot 2$ , com observação da diferença de fase temporal de duas ondas próximas ( $t_1$  e  $t_2$ ), que indica a velocidade de fase  $V_z$  (medida a partir dos picos adjacentes de duas ondas próximas) obtendo parâmetros  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\Delta t$  e  $h_1$ ,  $h_2$  e  $\Delta h$ , finalmente faz-se o cálculo para a velocidade de fase, através de,  $V_z = \Delta h / \Delta t$ , onde o comprimento de onda da direção  $z$  ( $\lambda_z$ ) é dado por  $\lambda_z = V_z \cdot T$ . (Fig. 4.5).

## 4.2 ESTUDO DE OG EM 06 DE SETEMBRO DE 2002 (ATIVIDADE SOLAR MÁXIMA)

As Observações realizadas em 6 de setembro de 2002 são mostradas nas Figuras 4.6 e 4.7. Nestes registros nota-se que entre 00:00 UT (20:00 LT) e 08:00 UT (04:00 LT) o fenômeno “*Spread-F*” é apresentado de duas formas distintas. Na Figura 4.6A vê-se o gráfico de isolinhas e na Figura 4.7A os ionograma (altura virtual ( $h'F$ ) versus frequência (MHz)).

Neste dia (06/09/2002) é possível calcular com auxílio da Figura 4.6A os parâmetros de uma OG com período de 2,3 h, velocidade de fase de 24,2 m/s e  $\lambda_z = 200,3$  km. Porém, superposta a esta onda temos uma outra OG com período de 0,5 horas, Velocidade de fase de 176,3 m/s e  $\lambda_z = 305,9$  km. Estas pequenas oscilações são OG, mas são comumente chamadas de “*Ripples*” (Figuras 4.8 e 4.9). Estas *Ripples* são provavelmente OG com períodos de horas que se quebraram em altitudes menores e dão origem a OG do tipo *Ripple* em altitudes ionosféricas (região F). Além disso, os cálculos de parâmetros de onda indicam que a velocidade da *Ripple* é muito maior que a onda de gravidade com período de 2,3 h.

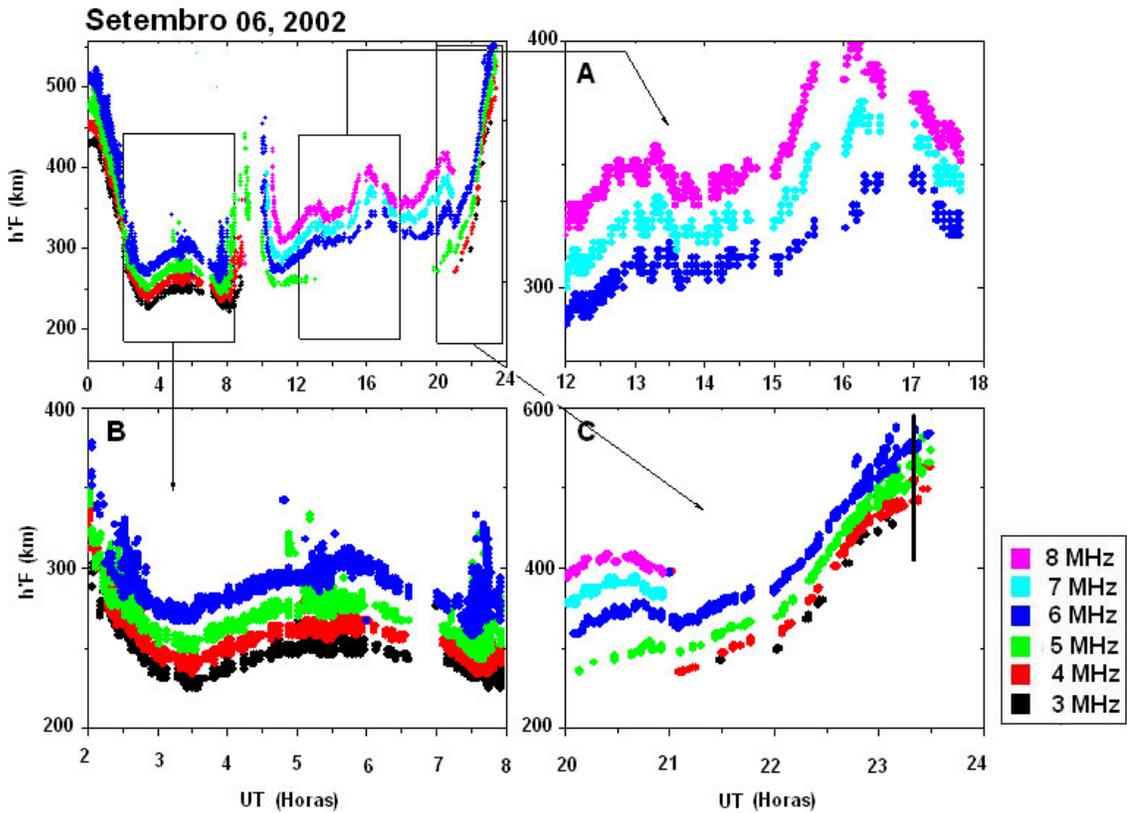


Fig.4.6 –Variação da altura virtual ( $h'F$ ) nas freqüências de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 MHz referentes a 6 de setembro de 2002, em Manaus. (A) Evidência estruturas chamadas *Ripples* superposta a OG com período de horas. (B) Observação simultânea de irregularidades ionosféricas (spread-F) e propagação de OG. (C) Rápida subida da camada-F provocada pelo pico pré-reversão.

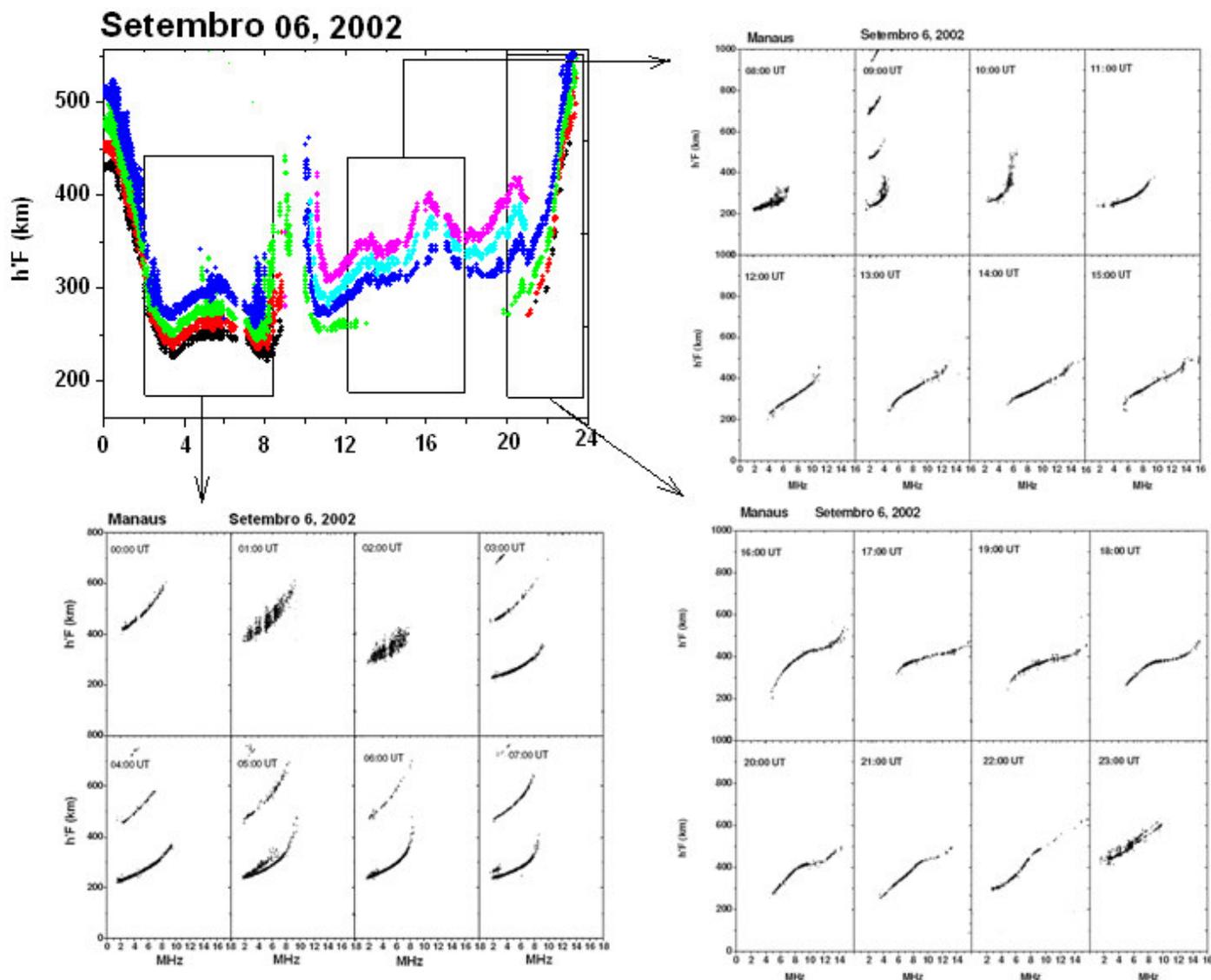


Fig 4.7 – Paineil que ilustra a evolução temporal de 24 h do dia 6 de setembro de 2002, em Manaus (MAN), em comparação com o gráfico de OG (isolinhas), com detalhes de três secções de ionogramas.

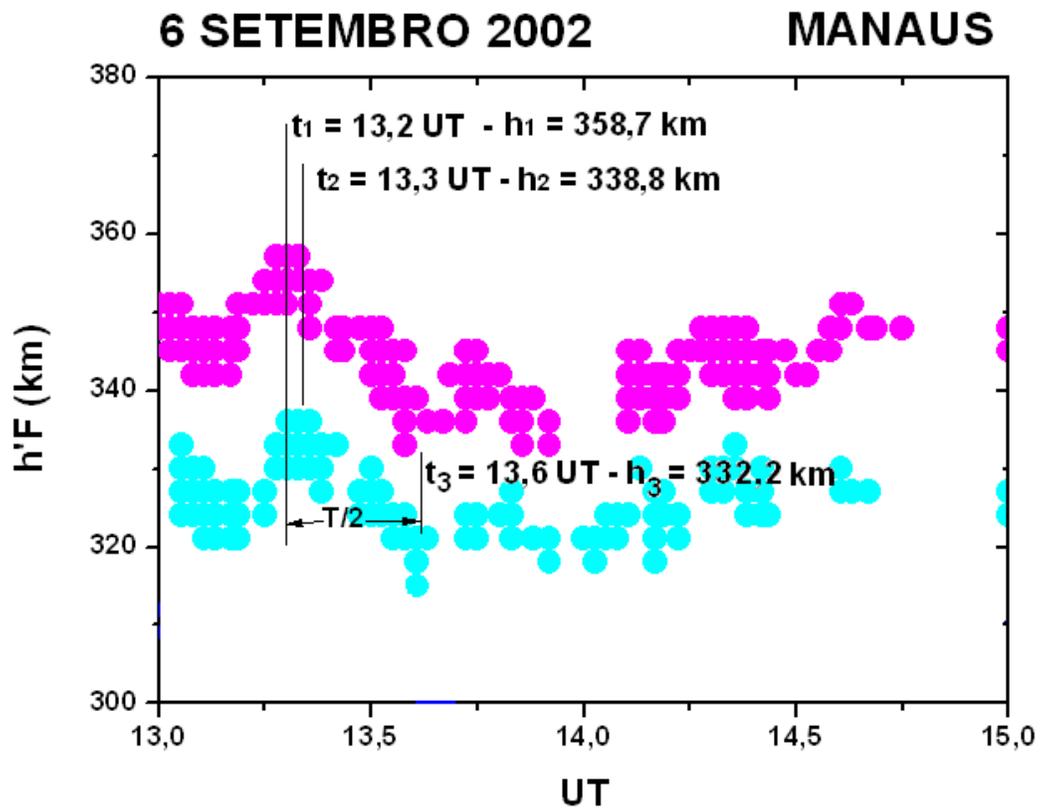


Fig. 4.8 – Em detalhe isolinhas (06/09/2002), com parâmetros de ondas de gravidade de período de minutos (*Ripples*).

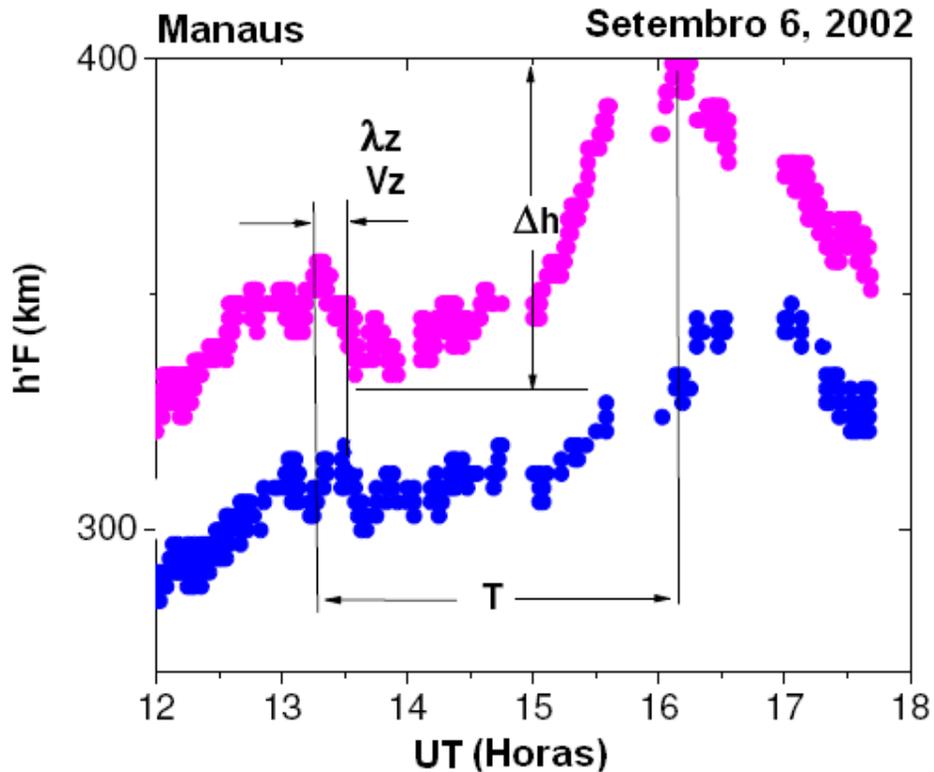


Fig. 4.9 - Em detalhe gráfico de ondas de gravidade do dia 6 de setembro de 2002, com parâmetros de ondas de gravidade de período de horas.

#### 4.3 ESTUDO DE OG EM 28 E 31 DE DEZEMBRO DE 2004 (ATIVIDADE SOLAR MÉDIA)

As investigações realizadas em 28 de dezembro de 2004, mostram que durante a madrugada (00:00 UT até 08:00 UT), concentra forte formação de “*Spread-F*”, dificultando a visualização de OG, (Fig. 4.10 B). Entre 08:00 UT e 10:00 UT, vê-se um grande realce na elevação na camada-F e em seguida um abaixamento, indicando o amanhecer que

possivelmente estejam relacionados com a rápida mudança na taxa de ionização, devido a transição entre período noturno e diurno, característicos neste horário, (Fig. 4.10). Durante o dia das 12:00 UT às 22:00 UT, são percebidas flutuações de fases, com expressiva variação de  $h'F$ , que vai de 250 km a 590 km, até as 19:00 UT, o período mostra formação de OG até 22:00 UT (Fig. 4.10 A), após o horário das 22:00 UT há um sincronismo das iso-linhas da camada-F e uma rápida elevação, induzido pelo campo elétrico do pico pré-reversão, (Fig. 4. 10 C). Comportamento idêntico é vista nas Fig. 4.11, Fig. 4.12, Fig. 4.13 e Fig. 4.14, do período solar médio, para todos os gráficos de iso-linhas estudados das figuras citadas observa-se absorção das freqüências de 3 MHz e 4 MHz, atribui-se a este fato as radiações de EUV e Raios-X, serem muito intensas nesta latitude, na região equatorial, que resulta em um aumento drástico na taxa de ionização na camada-D, durante horários ao redor do meio dia, e as ondas eletromagnéticas transmitidas pela ionossonda ao atravessarem a região D, são fortemente absorvidas. Portanto, as antenas receptoras não detetam o retorno das ondas eletromagnéticas transmitidas. Indicando que sobre a cidade de Manaus durante o dia este fenômeno é visível nos gráficos de ondas de gravidade. Também gráficos de iso-linhas são apresentados para o dia 31 de setembro de 2004, onde as características apresentadas no gráfico de iso-linhas do dia 28 dezembro de 2004, mantem-se em sua morfologia.

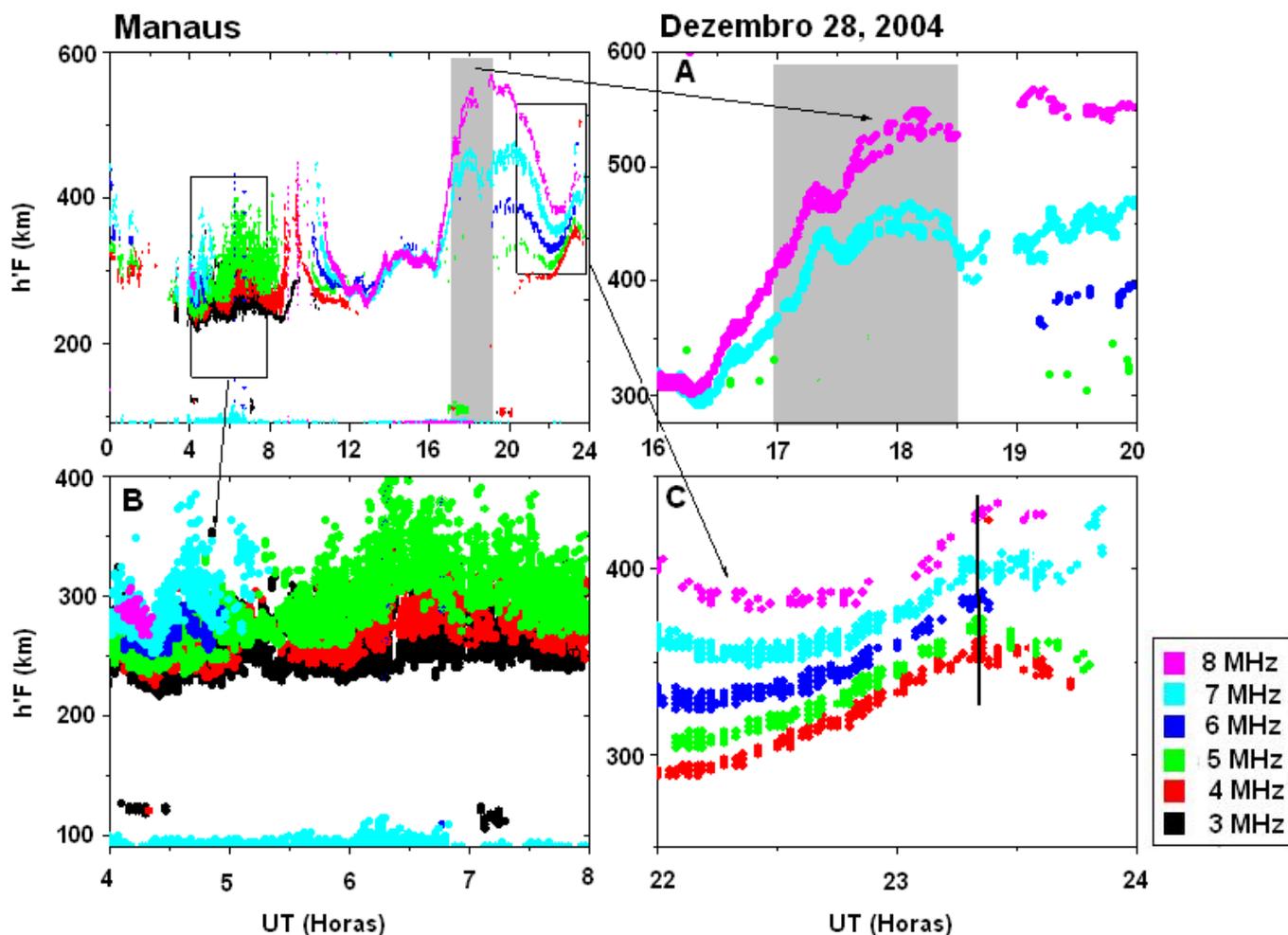


Fig. 4.10 – Variação diurna da ionosfera vista através de 6 isolinhas em 28 de dezembro de 2004 sobre Manaus. (A) – A coluna cinza indica o período de forte elevação da camada-F durante o dia. (B) – Ocorrência de irregularidade ionosférica de larga escala “*Spread-F*”. (C) – Destaque para o pico pré-reversão.

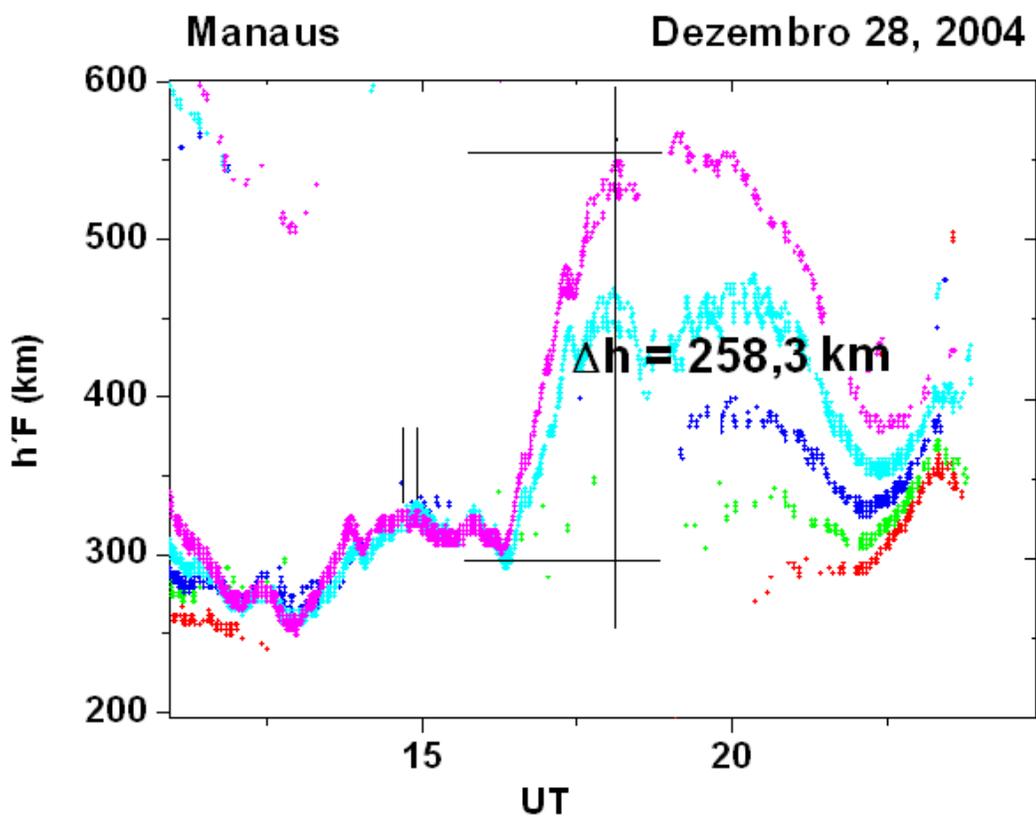


Fig. 4. 11 – Variação de h'F na formação de OG em período de atividade solar média em 28 de dezembro de 2004 em Manaus.

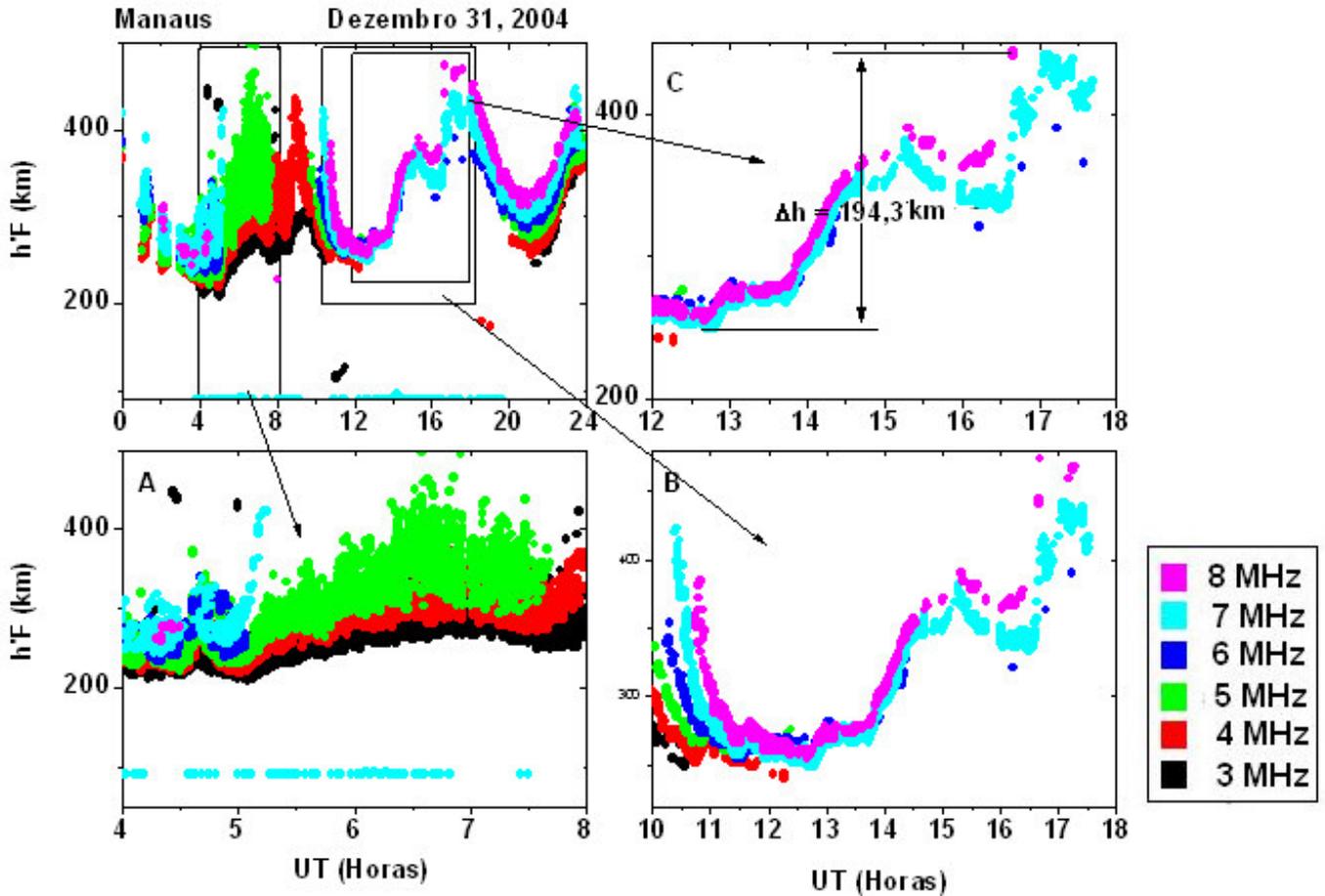


Fig. 4.12– Oscilação diurna causada pela taxa de ionização na formação da camada F em 31 de dezembro de 2004 em Manaus. (A) – Ocorrência de irregularidade ionosférica de larga escala “*Spread-F*”. (B) – Variação de  $h'F$  durante o período da manhã e da tarde. (C) – Ocorrência de grande elevação na camada-F, no período de 13:00 UT e 17:00 UT (09:00 LT e 13:00 UT).

#### **4.4 ESTUDO DE OG EM 7 DE DEZEMBRO DE 2005 E 6 DE OUTUBRO DE 2005 (ATIVIDADE SOLAR MÉDIA)**

Em atividade solar média para o ano de 2005 as OG sobre Manaus mostram-se com grandes amplitudes durante o dia (Fig. 4.13 e Fig. 4.14). Para os mesmos dias citados configuram-se para as noites formação de irregularidades de larga escala (*Spread-F*), inclusive com aparecimento da camada-Es, na noite de 7 de dezembro de 2005 e durante grande parte do dia 6 de outubro de 2005. Também é observado forte elevação da camada-F, para estes dias durante a tarde. Neste mesmo período nota-se perfeitamente que há absorção das frequências de 3 e 4 MHz, durante o período iluminado pelo Sol, este comportamento atribuído ao fato das radiações EUV e R-X serem muito intensas, conseqüentemente aumentando a taxa de ionização da camada-D. As frequências (3 e 4 MHz) emitidas pela ionossonda são fortemente absorvidas. Contudo o comportamento da rápida elevação da camada-F, em perfeito sincronismo no Terminador, induzido pelo campo elétrico do pico pré-reversão, são vistos nas figuras 4.13 e 4.14 sempre nos horários de próximo as 20:00 UT e 24:00 UT.

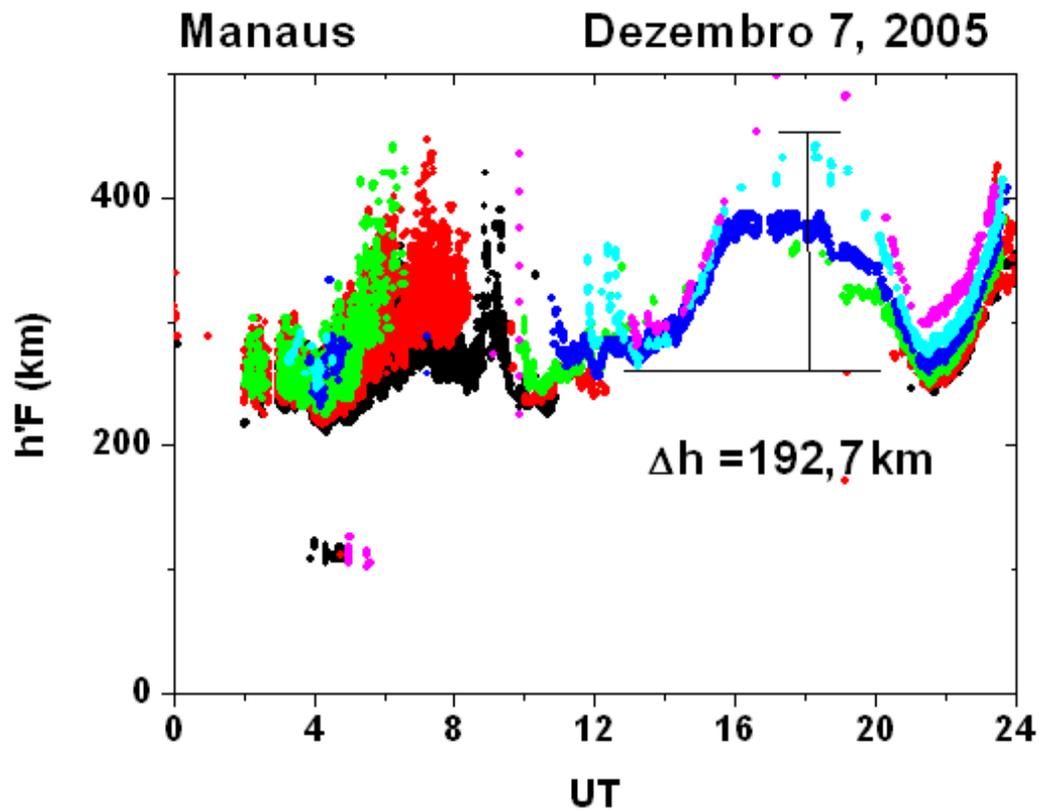


Fig. 4.13 – Ocorrência de OG durante o dia em 7 de dezembro de 2005, sobre a cidade de Manaus, em destaque a altura pico a pico da OG.

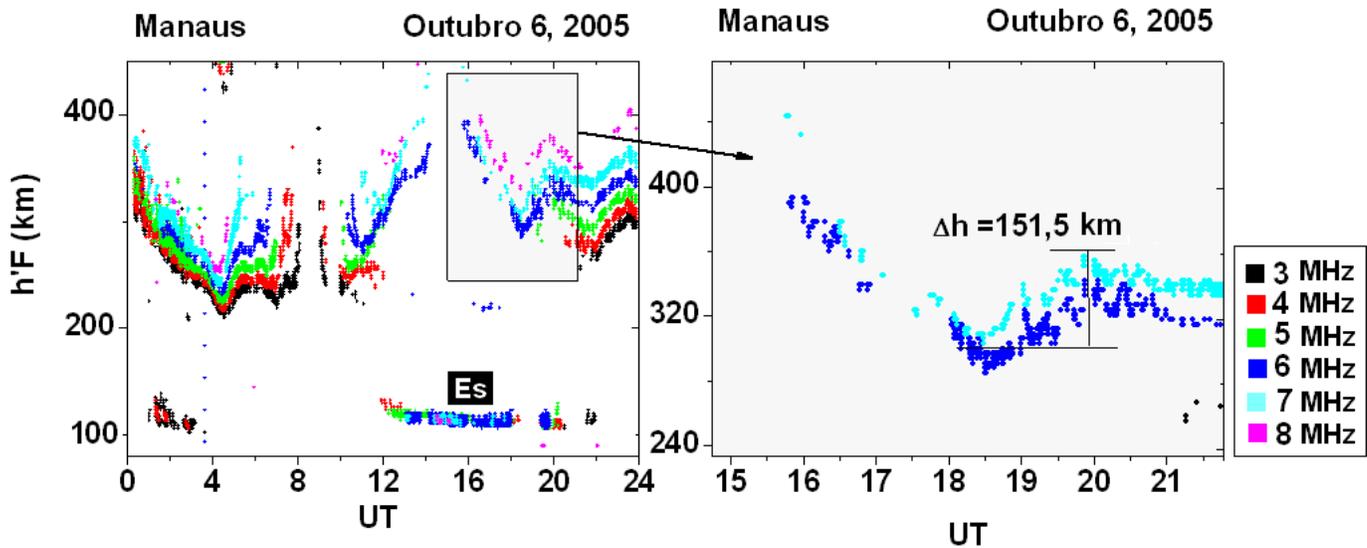


Fig. 4.14 – Formação de OG e absorção das frequências de 3 MHz e 4 MHz, durante o dia, em destaque a variação de altura da OG, em 6 de outubro de 2005, em Manaus.

#### 4.5 ESTUDO DE OG EM 2006 (ATIVIDADE SOLAR MÍNIMA)

As observações realizadas no ano de 2006 para os dias 4 de janeiro, 15 de janeiro, 4 de março e 22 de março, em período geomagneticamente calmo, ainda registram em gráficos de iso-linhas o padrão característico da região observada, formação de *Spread-F* durante a noite, rápida elevação da camada-F e em seguida um rebaixamento, indicando o amanhecer, também rápida subida da camada-F, induzida no campo elétrico do pico pré-reversão durante a chegada da noite, forte absorção

de baixas frequências da ionossonda na camada-D, durante o dia e finalmente mesmo período calmo OG de grande amplitude, (Fig. 4.15).

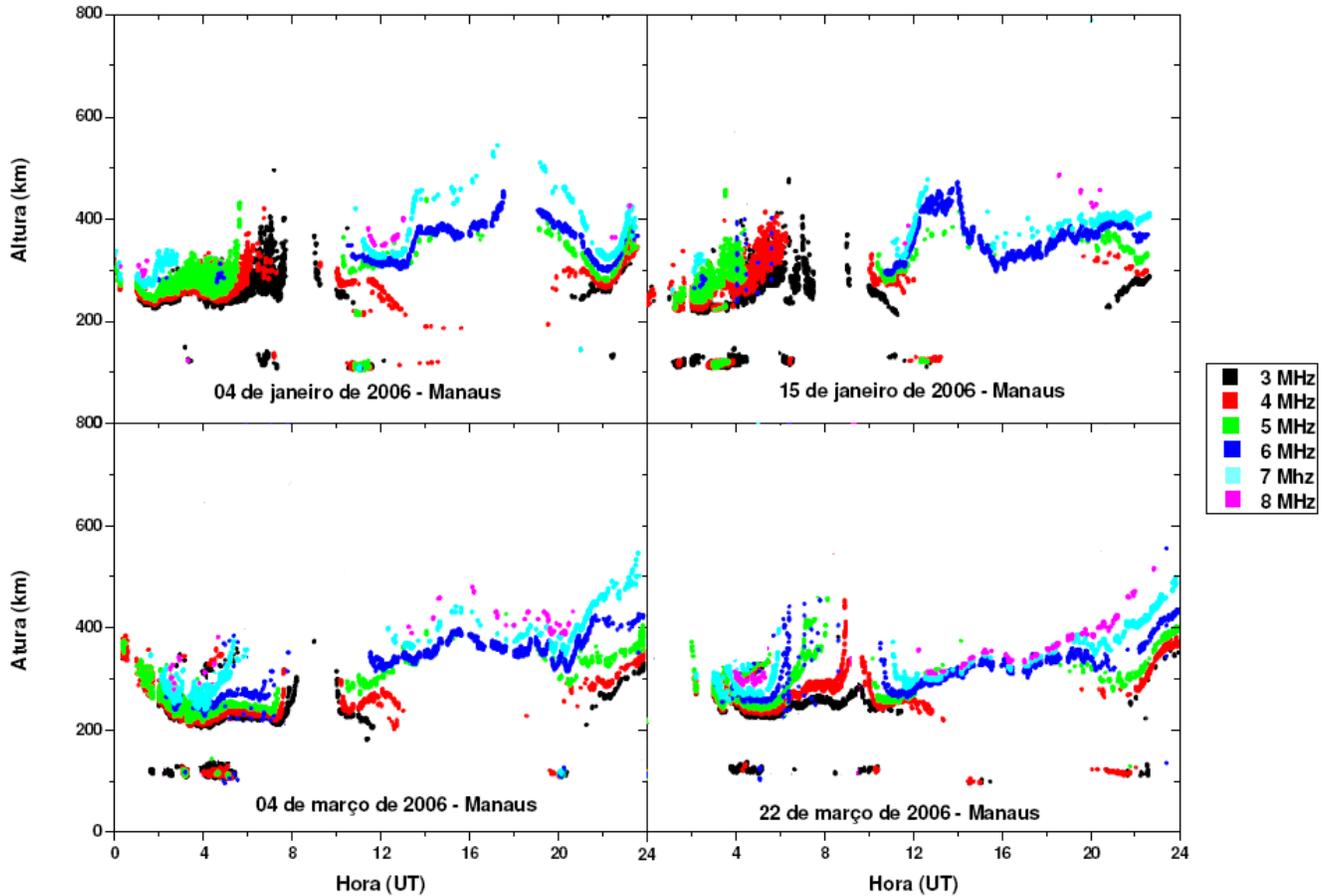


Fig 4.15 – Gráficos de ondas de gravidade em dias geomagneticamente calmos na latitude  $2,9^{\circ}$  S e longitude  $60,0^{\circ}$  W, nos meses de janeiro e março de 2006 (Manaus).

A Fig. 4.9 mostra que durante o dia (09:00 UT as 20:00 UT), as frequências 3 MHz, 4 MHz, 5MHz, são absorvidas e não são vistas nos gráficos de iso-linhas adquiridos nos dias, 4 de janeiro de 2006, 15 de

janeiro de 2006, 4 de março de 2006 e 22 de março de 2006. Vê-se em todos os gráficos acima, que entre 08:00 UT e 10:00 UT (amanhecer em hora local), ocorre pico no perfil vertical da camada-F, decorrente do início da iluminação do Sol. A partir das 20:00 UT até 24:00 UT acontece elevação da camada F na formação do pico pré-reversão, embora não tão sincronizado em todos os inícios de noite, a não sincronização deve-se, segundo Sahai, (2007) aos ventos termosféricos e variação do campo elétrico zonal, a não sincronização é visível na Fig. 4.9 (em 15 de janeiro de 2006 e 04 de março de 2006, entre 20:00 UT e 24:00 UT), observa-se para o mesmo horário, que nos dias 04 de janeiro de 2006 e 22 de março de 2006, há sincronização no pico pré-reversão.

Durante o período de observação de ondas de gravidade em período geomagneticamente calmos (ciclo 23), de 2002 a 2006 sobre a cidade de Manaus, deste estudo as médias dos períodos foram de 3,3 h, das velocidades de propagação vertical de 33,8 m/s, os comprimentos de ondas verticais de 268,5 km e as amplitudes de 108,8 km, conforme (Tab. 4.1), e incluindo as OG de pequenas oscilações (*Ripples*), (Fig. 4.16).

Tabela 4.1 – Parâmetros de OG em período geomagneticamente calmos de agosto de 2002 a dezembro de 2006 sobre Manaus (MAN).

DATA	T med (h)	Vz med (m/s)	$\lambda z$ med (km)	$\Delta h$ (km)	Obs.
<b>2002</b>					ONDAS DE GRAVIDADE - OG
4/ago	4,3	50,6	795,1	185,0	OG
6/ago	2,3	53,6	447,8	98,7	OG
6/set	0,4	176,2	305,8	26,0	OG (RIPPLE)
6/set	2,2	24,1	200,2	76,2	OG
17/set	0,3	48,1	63,4	44,8	OG (RIPPLE)
17/set	4,5	12,7	207,4	108,6	OG
<b>2004</b>					
6/out	3,6	24,8	322,7	76,4	OG
6/out	0,8	50,0	156,1	26,5	OG (RIPPLE)
13/dez	1,7	26,1	165,6	34,2	OG (RIPPLE)
13/dez	4,2	56,4	862,7	152,9	OG
28/dez	3,5	8,2	104,5	258,3	OG
<b>2005</b>					
1/jan	5,0	7,4	135,6	261,1	OG
27/jul	4,0	16,5	238,5	116,5	OG
6/out	4,5	16,1	264,9	151,5	OG
4/nov	0,3	4,8	17,0	33,6	OG (RIPPLE)
4/nov	4,5	31,0	510,8	104,9	OG
7/dez	5,9	45,2	965,0	192,7	OG
10/dez	6,2	7,6	174,5	54,4	OG
30/dez	0,4	12,5	19,8	30,5	OG (RIPPLE)
30/dez	7,6	3,9	109,3	221,5	OG
<b>2006</b>					
5/jan	1,8	10,9	72,0	85,6	OG
5/jan	0,2	129,0	110,5	26,5	OG (RIPPLE)
6/mar	1,0	15,4	57,3	49,0	OG (RIPPLE)
6/mar	8,8	11,6	109,3	156,9	OG
30/jun	3,0	52,3	573,0	192,4	OG
13/nov	4,1	8,7	130,2	123,1	OG
12/dez	4,0	8,8	129,3	125,4	OG
<b>MÉDIAS</b>	<b>3,3</b>	<b>33,8</b>	<b>268,5</b>	<b>108,8</b>	

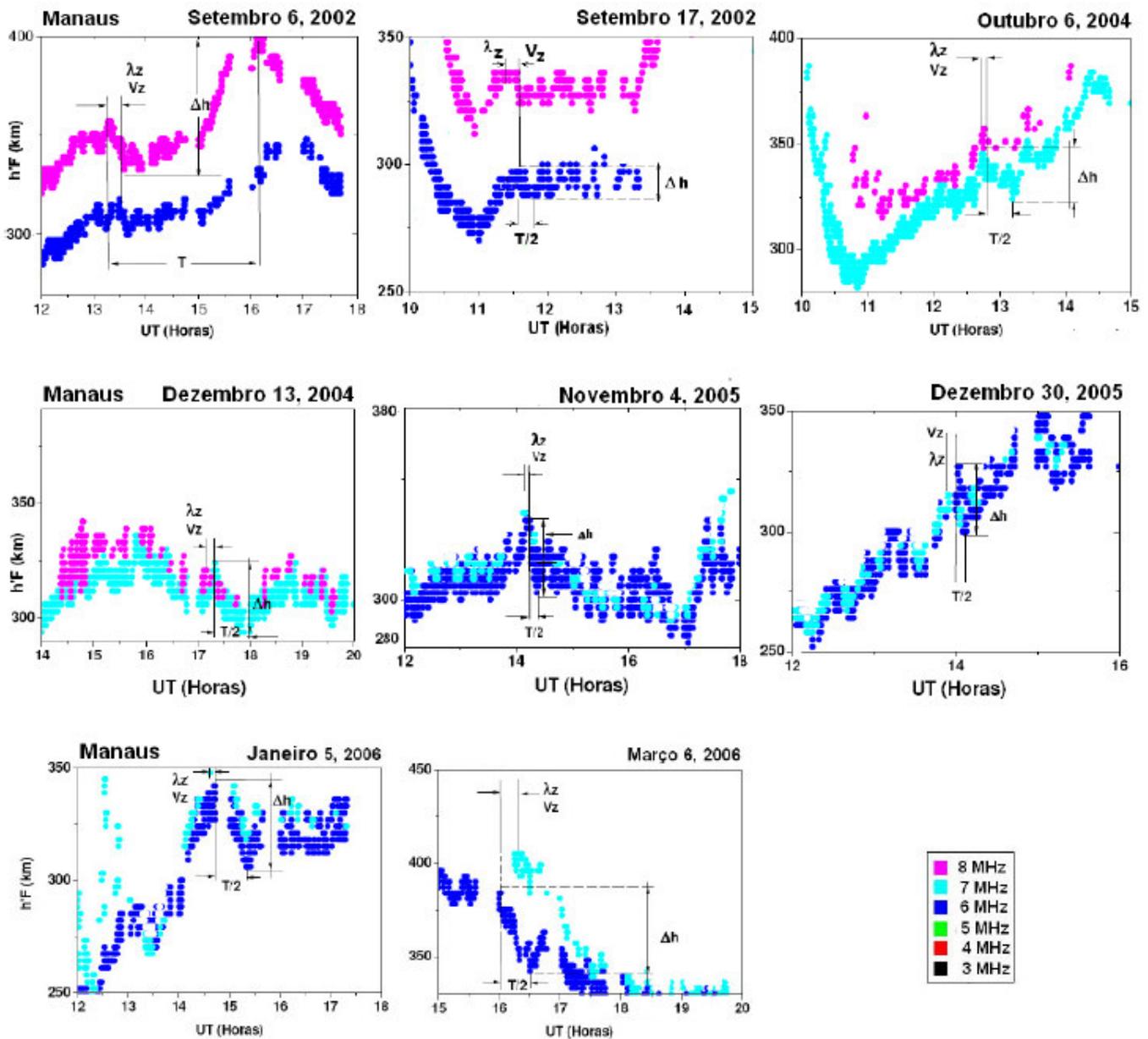


Fig. 4.16 - Variações de  $h'F$  durante os dias 6 e 17 de setembro de 2002, 6 de outubro e 13 de dezembro de 2004, 4 de novembro e 30 de dezembro de 2005, 5 de janeiro e 4 de março de 2006, observados em Manaus (MAN), Para avaliações em dias calmos de pequenas OG (*Ripples*), durante o dia.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

A análise dos resultados possibilitou a obtenção das seguintes conclusões principais:

- a) Este estudo mostra que na camada ionosférica equatorial, sobre a região de Manaus, existe a propagação de ondas de gravidade com um amplo espectro de amplitude ( $\approx 25$  km até  $> 100$  km).
- b) Os parâmetros de onda de gravidade médio para ondas de gravidade com amplitude maiores que 50 km, são:  $T = 4,4$  h;  $V_z = 23,7$  m/s;  $\lambda_z = 330,0$  km;  $\Delta h = 144,3$  km.
- c) Os parâmetros de onda de gravidade médio para ondas de gravidade com amplitude menores que 50 km, são:  $T = 0,6$  h;  $V_z = 57,7$  m/s;  $\lambda_z = 111,9$  km;  $\Delta h = 33,8$  km.
- d) Em alguns dias existe uma forte absorção de rádio frequência entre 12:00 LT e 16:00 LT. Provavelmente a absorção ocorre na Região-D, devido um excesso de ionização. Este fenômeno dificulta o estudo de propagação de ondas de gravidade.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros recomendamos mais investigações da ionosfera equatorial, com auxílio de GPS ionosférico, além de comparação dos resultados de ionogramas registrados em estações de baixa latitude, no território brasileiro.

Também é importante citar que observamos neste trabalho que na atmosfera equatorial do setor brasileiro da Amazônia, sobre a cidade de Manaus, os ionogramas adquiridos mostram quase que constantemente uma forte absorção do perfil sobre a camada F, que não acontece em outras latitudes das estações da rede UNIVAP-ULBRA, com a frequência da estação de Manaus. Pesquisadores do IP&D vêm conversando sobre um monitoramento com Riômetro, da atmosfera superior e ionosfera sobre este alvo com a finalidade de medir a absorção de EUV e R-X, na faixa de 30 MHz. Com este equipamento na estação de Manaus, abre-se um leque de opções para mais investigações da atmosfera superior e ionosfera equatorial sobre a cidade de Manaus.

## REFERÊNCIAS

**ASHKALIEV, Y. F., GORDIENKO, G. I. JACOBI, C., LITVINOV, Y. G., VODYANNIKOV, V. V., YAKOVETS, A. F. 2003.** Comparison of travelling ionospheric disturbance measurements with thermosphere / ionosphere model results. *Annales Geophysicae*. 21, 1031-1037.

**BAHCALL, J. N., BASU, S., AND PINSONNEAULT, M. H. 2003.** Solar models: structure, neutrinos and helioseismological properties; *The Dynamic Sun*. Ed. B. N. Dwivedi. Cambridge Univ. Press, 534p.

**BALAN, N. AND BAILY, G. J. 1995.** Equatorial plasma fountain and its effects. Possibility of an additional, *Journal of Geophysical Research*, 101(A11), 21, 421-21,432.

**BARTELS, J. 1940.** The three-hours-range measuring geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, v. 44, 411-415.

**BATISTA, I. S. 2006.** **Por que a pesquisa ionosférica na região brasileira é tão importante?** II Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronômica - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP, Brasil, 24 de outubro de 2006. [http://www.sbgf.org/IIsbgea\\_2006.pdf](http://www.sbgf.org/IIsbgea_2006.pdf). acesso: em janeiro de 2007

**BENCHIMOL, S. 1994.** *Manáos-do-Amazonas: Memória empresarial*. 3 volumes. Imprensa Oficial do Estado do Amazonas. Manaus – Amazonas. 374p.

**BOWLES, K. L. 1959.** *Journal of Geophysical Research*. Published in the Proceedings of the International Symposium on Fluid Mechanics in

the Ionosphere, American Geophysical Union, Washington, 64, 2164-2178.

**BURKE, W. J.; HUANG, C. Y.; GENTILE, L. C. AND BAUER, L., 2004.** Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles. *Annales Geophysicae* 22, 3089–3098.

**CHRISTENSEN-DALSGAARD, J. 2003.** *Stellar Oscillations*, 5<sup>th</sup> ed. University of Aarhus, Denmark, 363p.

**ECSS – E – 10 – 04 A. 2000** - Space engineering. Space environment (ECSS Secretariat. ESA – ESTEC, <http://www.ecss.nl>) acesso em janeiro 2007.

**ERICKSON, B., BIRNIR, B., LAVALLÉE, D. 2008.** A model for aperiodicity in earthquakes, *Nonlin. Processes in Geophys.*, 15, 1-12.

**FAGUNDES, P.R., KLAUSNER, V., SAHAI, Y., PILLAT, V. G., BECKER-GUEDES, F., BERTONI, F.C., BOLZAN, M. J. A., ABALDE, J. R. 2007.** Observations of daytime F2-layer stratification under the southern crest of the equatorial ionization anomaly region, *Journal of Geophysical Research*, vol 112 , doi:10.1029/2006JA011888.

**FAGUNDES, P.R., MUELLE, M. T. A. H., BITTENCOURT, J. A., SAHAI, Y., LIMA, W. L. C., GUARNIERI, F. L., PILLAT, V. G., BECKER-GUEDES, FERREIRA, A. S., LIMA, N. S. 2008** - Nighttime ionosphere–thermosphere coupling observed during an intense geomagnetic storm, *Advances in Space Research* 41, 539–547.

**FRIEDMAN, H. 1986.** *Sun and Earth*. Scientific American Books, Inc. New York, 123p.

**FRITTS, D. C. 1989.** A review of gravity wave saturation process, effects, and variability in the middle atmosphere. Pure and Applied Geophysical, 130, 343-371.

**GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) 2005.** Germany's National Research Centre for Geosciences. <http://.gfz.potsdam.de/> . Acesso em janeiro 2007.

**GOODMAN, J. M. 2005.** Space Weather and Telecommunications, Springer Science, New York, 380p.

**GREENHOW, J. S. AND NEUFELD. E. L. 1959.** Journal of Geophysical Research, published in the Procendings of the International Symposium on Fluid Mechanics in the Ionosphere, American Geophysical Union, Washington, v. 46, 2129-2144,.

**GREENHOW, J. S. 1959.** Journal of Geophysical Research, published in the Procendings of the International Symposium on Fluid Mechanics in the Ionosphere, American Geophysical Union, Washington, v. 64, 2085-2108.

**HARGREAVES, J. K. 1992.** The solar-terrestrial environment, Cambridge : Cambridge University Press, v.5, 420p.

**HARKRIDER, DAVID G. 1963.** Part I. Propagation of acoustical gravity waves from an explosive source in the atmosphere. Part II. Rayleigh and Love waves from sources in a multilayered elastic half-space, CalTech – California – USA. Dissertation – PhD in Geological and Planetary Sciences, 285p.

**HINES, C. O. *et al.* 1974.** The upper atmosphere in motion, Canadian Journal of Geophysical, American Geophysical Union, Washington, D.C, v.75, 2563-2586.

**HINES, C. O. 1960..** The upper atmosphere in motion, Canadian Journal of Geophysical, v.38, 1441p.

**HOOKE, W. H. 1968.** Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 30, 795-823.

**JENKINS, B., G. J. BAILEY, M. A. ABDU, I. S. BATISTA, AND N. BALAN, 1997.** Observations and model calculations of an additional layer in the topside ionosphere above Fortaleza, Brazil, Ann. Geophys., 15, 753–759.

**JUNG, T. K., LIU, J. Y. TSAI, H. F., HUANG, B. S., LIN, C. H., YU, S. B., YEH, Y. S. 2006.** Ionospheric disturbances triggered by the Mw 7.6 earthquake off the Coast of El Salvador on 13 January 2001. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 17, 345-351.

**KELLEY, M. C. 1989.** The Earth's Ionosphere Plasma Physics and Eledrodynamics, Academic Press, San Diego – USA – California, 487p.

**LYNN, K. J. W., T. J. HARRIS, AND M. SJARIFUDIN 2000.** Stratification of the F2 layer observed in Southeast Asia, J. Geophys. Res., 105(A12), 27,147–156.

**KLAUSNER, V., FAGUNDES, P. R., Y. SAHAI, Y., WRASSE, C. M. . PILLAT, V. G., BECKER-GUEDES, F. 2009.** Observations of GW/TID oscillations in the F2 layer at low latitude during high and low solar activity, geomagnetic quiet and 4 disturbed periods, J. Geophys. Res.,27 114, doi:10.1029/2008JA013448.

**KIRCHHOFF, V. W. H. 1990.** Introdução à geofísica espacial. São Paulo: Nova Stela, Edusp e FAPESP, 149p.

**KOHL, H., RÜSTER, R., SCHLEGEL, K. 1996.** Modern Ionospheric Science, Dawson Books, European Geophysical Society, Katlenburg-Lindau (Germany), FRG, 551p.

**LILLER, W. AND WHIPPLE, F. L. 1954.** Special Supplement to Journal Atmospheric and Terrestrial Physics 1, 112 .

**LOGNONNÉ, P., GARCIA, R., CRESPON, F., OCCHIPINTI, G., KHERANI, A., LAMBIN-ARTRU, J. 2007.** Seismic waves in the atmosphere. EuroPhysicsNews, 37 (4), 11-14.

**McNAMARA, L. F. 1991.** The ionosphere: communications, surveillance, and direction finding, Orbit: A Foundation Series; Krieger Publishing Company Malabar, Florida, 237p.

**MILLMAN, P. M. 1959.** Journal of Geophysical Research, published in the Procendings of the International Symposium on Fluid Mechanics in the Ionosphere, American Geophysical Union, Washington, v. 64 – 2122-2134.

**MOLCHANOV, O., FEDOROV, E., SCHEKOTOV, A., GORDEEV, E., SURKOV, V., ROZHNOI, A., ANDREEVSKY, S., IUDIN, D., YUNGA, S., LUTIKOV, A., HAYAKAWA, M., BIAGI, P. F. 2004.** Lithosphere-atmosphere-ionosphere coupling as governing mechanism for preseismic short-term events in atmosphere and ionosphere. Natural Hazards and Earth System Sciences. 92, 757-767.

**NAPPO, C. J. 2002.** An Introduction to Atmospheric Gravity Waves, Academic Press, An imprint of Elsevier Science, (USA), International Geophysics series, v. 85, 276p.

**ON – Observatório Nacional**

[http://www.on.br/institucional/geofisica/menu\\_principal.html](http://www.on.br/institucional/geofisica/menu_principal.html). Acesso em janeiro de 2007.

**PILLAT, V. G. 2006.** Comparação do Modelo Teórico Ionosférico com parâmetros Ionosférico Observados. São José dos Campos – Univap, 2006 (Dissertação de Mestrado). 178 p.

**PULINETS, S. A., DEPUEV, V. H., KARPACHEV, A. T., RADICELLA, S. M., AND DAMILKIN, N. P. 2002.** Recent advances in topside profile modeling. *Advances in Space Research*, 29(6), 815-823.

**RAWER, K., MINNIS, C., and SERAFIMOV, K., 1984.** Towards an Improved International Reference Ionosphere, *Advances in Space Research*, Volume 4, Number 1, 1984.

**RICHMOND, A. D. 1978.** Gravity wave generation, propagation, and dissipation in the thermosphere, *J. Geophys. Res.*, 83, 4131– 4145.

**RISHBETH, H., GARRIOTT, O. K. 1969.** Introduction to ionospheric physics. New York; Academic Press, v.14, 331p.

**ROTTGER, J. 1977.** Travelling disturbances in the equatorial ionosphere and their association with penetrative cumulus convection, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 39, 987– 998.

**ROTTGER, J. 1981.** Equatorial spread-F by electric fields and atmospheric gravity waves generated by thunderstorms, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 43,453– 462.

**ROW, R. V. 1967.** Acoustic gravity waves in upper atmosphere due to a nuclear and an earthquake. *Journal of Geophysical Research*, 72 (5); 1599.

**RUSSEL, C. T. 2001.** Solar wind and interplanetary magnetic field: Tutorial. Space Weather, Geophys. Monogr. Ser. Vol. 125, Ed. P. Song, H. J. Singer, G. L. Siscoe (AGU, Washington, DC), p.73-89.

**SAHAI, Y, BECKER-GUEDES, F., FAGUNDES, P. R., DE JESUS, R., DE ABREU, A. J., OTSUKA, Y., SHIOKAWA, K., IGARASHI, K., HUANG, C. –S., LAN, H. T., SAITO, A., FERREIRA, A. S., LIMA, N. S., GAURNIER, F. L., VIEIRA, L. E. A., PILLAT, V. G., BITTENCOURT, J. A. 2007.** Effects observed in the F-region in two well-separated longitudinal sectors during the intense geomagnetic disturbances in the early part of November 2004, **AOGS 2007 4<sup>th</sup> Annual General Meeting** [ST16-24-A0003](#).

**SAULI, P., and BOSKA, J. 2001.** Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 63, 945– 950.

**SCHERER, K., FICHTNER, H., HEBER, B., MALL, U. 2005.** Space Weather – The Physics Behind a Slogan. Springer – Verlag. Berlin Heidelberg. 297 p.

**SCHRIJVERAND. C. J., ZWAAN, C. 2000.** Solar and Stellar Magnetic Activity. Cambridge Univ. Press, 327 p.

**SHUNK, R. W. AND NAGY, A. 2000.** Ionospheres (Physics, Plasma Physics, and Chemistry), Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 2000, 554 p.

**SILVA, A. V. R. 2006.** Nossa estrela: O Sol, Sociedade Brasileira de Física, Ed. Liv. da Física, São Paulo. 168 p.

**SKINNER, N. J., R. A. BROWN, and R. W. WRIGHT, 1954.** Multiple stratification of the F-layer at Ibadan, J. Atmos. Terr. Phys., 5, 92– 100.

**SOHO** – <http://sohoshow.nascom.nasa.gov> (acesso em janeiro 2007).

**STERLING, D. L., W. H. HOOKE, and R. COHEN, 1971.** Traveling ionospheric disturbances observed at the magnetic equator, *J. Geophys. Res.*, 76,3777– 3782. 548

**TOLSTOY, I., HERRON, T. J. 1970.** Atmospheric gravity waves from nuclear explosions. *Journal the Atmospheric Sciences*, 27, 55-61.

**U.R.S.I. Handbook Ionogram Interpretation and Reduction, 1972.** Second Edition – Nov. 1972, 28p.

**WALKER, G. O., Y. W. WONG, J. H. K. MA, T. KIKUCHI, K. NOZAKI, Y. N. HUANG, and V. BADILLO, 1998.** Propagating ionospheric waves observed throughout East Asia during the WAGS October campaign, *Radio Sci.*, 23(6), 867–878. 555

**WHITTEN, R. C., POPPOF, I. G. 1971.** *Fundamentals of Aeronomy*, NASA, 276p.