UNIVERSIDADE
ESTADUAL DA
PARAÍBA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

EFEITO DA MARÉ LUNAR NA REGIÃO F DA IONOSFERA

VERA YESUTOR TSALI-BROWN

CAMPINA GRANDE-PB
2018

Vera Yesutor Tsali-Brown

EFEITO DA MARÉ LUNAR NA REGIÃO F DA IONOSFERA

Linha de Pesquisa: Qualidade de Sistemas Ambientais

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba como requisito a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

.

Orientador: Dra. ANA ROBERTA DA SILVA PAULINO
Coorientador: Dr. LOURIVALDO MOTA LIMA

CAMPINA GRANDE-PB
2018

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

B877e Brown, Vera Yesutor Tsali.
Efeito da maré lunar na Região F da ionosfera [manuscrito] : / Vera Yesutor Tsali Brown. - 2018.
59 p. : il. colorido.

Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.
"Orientação : Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino, Departamento de Física - CCT."
"Coorientação: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Departamento de Física - CCT.""

1. Maré lunar. 2. Ionosfera. 3. Ionossonda.

21. ed. CDD 551.66

FOLHA DE APROVAÇÃO

Vera Yesutor Tsali-Brown

Título: Efeito da Maré Lunar na região F da ionosfera.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino.

Coorientador: Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual da Paraíba – UEPB, em cumprimento dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Aprovada em: 28 / 02 / 2018.

Banca Examinadora

Rpaulino

Profa. Dra.: Ana Roberta da Silva Paulino
Orientadora – UEPB

Prof. Dr.: Lourivaldo Mota Lima
Coorientador

Ricardo

Prof. Dr.: Ricardo Arlen Buriti da Costa
Examinador Externo - UFCG

Prof. Dr.: Fernando Celso Perin Bertoni
Examinador Interno – UEPB

Dedicatória

À minha Mãe, meu Pai e toda minha família

Agradecimentos

Meus mais sinceros agradecimentos ao Deus pela graça, favor e boa saúde durante todo o período de estudo na Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) em Campina Grande.

Agradeço à Profa. Dra. Ana Roberta Da Silva Paulino e ao Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, pela orientação, encorajamento, opiniões construtivas, supervisão e ensinamentos durante essa jornada científca.

Agradeço à minha família, especialmente minha mãe, Georgina Abra Afenyo e meu Pai, Emmanuel Tsali-Brown pelo seu amor e encorajamento

Agradeço a Dra. Nana Ama Browne-Klutse e meus amigos Prosper, Patrick, Bismark, Efua, Jéssica e Albiege pela ajuda.

À Universidade Estadual da Paraíba que, através do Departamento de Física, permitiu a realização deste curso.

Agradeço também à CAPES, pelo apoio financeiro durante todo o período de estudo e minhas pesquisas .

Agradeço a Dra. Inez Staciarini Batista do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por fonecer os dados que possibilitaram o desenvolvimento deste trabalho.

Enfm, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram e tornaram possível a elaboração deste trabalho.

Resumo

Os efeitos da maré lunar na região F da ionosfera são estudados neste trabalho utilizando medidas fornecidas pela ionossonda instalada em Cachoeira Paulista (22° S; 45° W) entre os anos de 2009 e 2011. Para identificar as variações associadas às marés lunares são utilizados os seguintes parâmetros: altura do pico de densidade eletrônica da região F (hmF2) e a freqüência crítica da região F (foF2). A influência da maré lunar na ionosfera brasileira foi obtida utilizando as medidas residuais sem a influência da maré solar. As medidas foram convertidas para o tempo lunar e submetidas à análise harmônica para obter amplitudes e fases mensais para o período de estudo. A variação sazonal das amplitudes nos parâmetros foF2 e hmF2 foi geralmente geralmente semestral. Também eram às vezes anual

Palavras-chaves: Maré lunar, Ionosfera, Ionossonda .

Abstract

The effects of the lunar tide in the F region of the ionosphere are studied in this work using measurements provided by the ionosonde installed in Cachoeira Paulista (22 ° S, 45 ° W) between 2009 and 2011. To identify the variations associated with the lunar tides, the following parameters are used: peak height of electronic density of the F region (hmF2) and the critical frequency of the F (foF2) region. The influence of the lunar tide in the Brazilian ionosphere was obtained using the residual measurements which was without the influence of the solar tide for each day, owing that all the months were converted to the lunar time and submitted to harmonic analysis to obtain monthly amplitudes and phases for the period of study. The maximum diurnal amplitude in foF2 determined was 0.41MHz and 0.42MHz in the semidiurnal component. Also the maximum diurnal amplitude in hmF2 determined was 6.25km and semidiurnal 7.76km. The seasonal variations in the amplitudes in foF2 and hmF2 were sometimes annual and semiannual in nature.

Keywords: Lunar tide, Ionosphere, Ionosonde.

Listas de Figuras

Figura 2.1: Perfis típicos da temperatura da atmosfera neutra e das densidades de plasma em função da altura. 5
Figura 2. 2: Forças exercidas pelas lua sobre a Terra 11
Figura 3.1: Lowell DGS256 um digisonde 10kW 15
Figura 3. 2: Ionograma escalado e perfil vertical da densidade eletrônica calculado pelo programa NHPC que faz parte do *SAO-Explorer*. 16
Figura 3. 3: Gráficos das medidas de foF2 (painel inferior) e hmF2 (painel superior) para Janeiro de 2009 18
Figura 3. 4: Índice Kp para o mês de janeiro de 2009 20
Figura 3. 5: Dados após a remoção de dias geomagneticamente perturbados para janeiro de 2009 22
Figura 3. 6: Periodograma Lomb-Scargle para dados de janeiro de 2009. Painel superior mostra as medidas para o parâmetro hmF2 e o painel inferior mostra as medidas para o parâmetro foF2. 23
Figura 3. 7: Análise do dia composto para os parâmetros hmF2 (painel superior) e foF2 (painel inferior) 25
Figura 3. 8: Dia composto (linha preta sólida) e o ajuste (linha vermelha) referente a hmF2 (painel superior) e foF2 (painel inferior) de Janeiro de 2009. 26
Figura 3. 9: Gráficos dos parâmetros foF2 (painel superior) e hmF2 (painel inferior) mostrando o dia composto (linha preta), o sinal reconstruído (linha vermelha) e o residual (linha azul) para o mês de Janeiro de 2009. 28
Figura 3. 10: Dia composto em tempo lunar para os parâmetros foF2 (painel superior) e hmF2 (painel inferior) para o mês de Janeiro de 2009 29
Figura 4. 1: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (linha preto) e semidiurna (linha vermelha) obtidas dos dados dos residuais dos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2009. 31
Figura 4. 2: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) nos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2010. 34

Figura 4. 3: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) nos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2011. 36
Figura 4. 4: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (painel da esquerda) e semidiurna (painel da direita) nos parâmetro ionosférico foF2 durante os anos de 2009 (linha preta), 2010 (linha vermelha) e 2011 (linha azul). 38
Figura 4. 5: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (painel da esquerda) e semidiurna (painel da direita) obtidas dos dados dos residuais do parâmetro ionosférico hmF2 durante os anos de 2009 (linha preta), 2010 (linha vermelha) e 2011 (linha azul). 39

Listas de Tabelas

Tabela 3. 1: Descrição da atividade magnética..... 20

Listas de Abreviações

º Graus

~ Quase

* Multiplicação

ºC Graus Celsius

COSMIC Constellation Observing System For meteorology Ionosphere and Climate

cm^{-3} por centímetro cúbico

foF2 Frequência crítica

HF Alta frequência

HmF2 Altura de máxima densidade

K Kelvin

km Quilômetro

m Metro

m^3 Metro cúbico

m/s Metro por segundo

MHz Mega Hertz

NmF2 Densidade eletrônica

nm Nanômetro

µm Micrômetro

SAO Standard Archival Output

sq Solar Quiet

UV Ultravioleta

UT Tempo universal

Sumário

INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVOS 2
1.1.1 Objetivo Geral 2
1.1.2 Objetivos Específicos 2
1.2 MOTIVAÇÃO 3
REVISÃO DA LITERATURA 4
2.1 Atmosfera da Terra 4
2.1.1 Atmosfera Neutra 4
2.2 Região D, E e F 7
2.3 Correntes ionosféricas e a formação de campos elétricos na ionosfera 8
2.3.1 Formação de campos elétricos na ionosfera 9
2.4 Marés Atmosféricas 9
2.4.1 Maré lunar na Ionosfera 11
INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA 14
3.1 Ionossonda 14
3.1.1 Dados 17
3.2 Índice Kp 19
3.3 Periodogramas Lomb-Scargle 23
3.4 Identificação da maré lunar 24
RESULTADOS E DISCUSSÃO 31
4.1: Maré lunar nos parâmetros hmF2 e foF2 para o ano de 2009 31
4.2:Maré lunar em hmF2 e foF2 durante 2010 33
4.3: Maré lunar em hmF2 e foF2 durante 2011 35
4.4: Comparação interanual da Maré lunar em foF2 37
4.5: Comparação interanual da Maré lunar em hmF2 38
4.6: Discussão 40
CONCLUSÕES 42
REFERÊNCIAS 43

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A ionosfera terrestre é influenciada por vários processos físicos decorrentes das variações no fluxo solar e da atividade magnética, bem como por processos dinâmicos provenientes das regiões inferiores da atmosfera, os quais podem afetar a ionosfera através de fenômenos elétricos e eletromagnéticos e/ou através da propagação ascendente de ondas da atmosfera neutra. Uma das características da ionosfera é a sua capacidade de interação com a atmosfera neutra, formando um sistema acoplado de energia eletromecânica de grande complexidade (Hargreaves, 1992; Kivelson E Russel, 1995).

O acoplamento entre a atmosfera neutra e a ionizada é um tema de bastante relevância científica atualmente. Nesse sentido, vários estudos apontam as marés atmosféricas como agente importante neste processo de acoplamento (Yigita E Medvedev, 2014).

As marés atmosféricas são oscilações periódicas e podem ser classificadas como marés solares e marés lunares. As marés solares apresentam amplitudes maiores. Porém, a maré atmosférica lunar tem se mostrado interessante por várias razões. Por exemplo, a maré lunar semidiurna pode aumentar e diminuir a amplitude do pico de pré reversão e do tempo de reversão das derivas verticais noturnas. Esses efeitos podem aumentar e diminuir a elevação da altura da região F noturna e, portanto, pode aumentar ou diminuir e alterar a amplitude da anomalia de Appleton (Stening E Fejer, 2001). O efeito da maré lunar na região F da ionosfera da Terra vem sendo tratado em pesquisas recentes (Park et al., 2012; Fejer et al., 2013).

A maré lunar é gerada na região mais densa e mais baixa da atmosfera, pela atração gravitacional da Lua sobre a Terra. Essas oscilações se propagam verticalmente para cima até a ionosfera. A maré lunar é de interesse considerável devido ao fato de seu mecanismo de geração ser conhecido com precisão, fornecendo condições ideais para comparação entre os modelos numéricos e as observações tanto na atmosfera neutra (Vial e Forbes, 1994) quanto na ionosfera (Stening et al., 1999).

Quantificar os efeitos da maré lunar na ionosfera pode conduzir a uma melhor compreensão das variações que ocorrem na densidade ionosférica. Os estudos da maré lunar na ionosfera têm focado principalmente no papel da componente semidiurna nas variações magnéticas devido às correntes ionosféricas e nas observações a partir de ionosondas (Tracy,2013). A maré lunar nas correntes ionosféricas surge devido à modulação dos campos elétricos gerados pelo dínamo (Matsushita, 1967).

As amplitudes das ondas atmosféricas aumentam à medida que a densidade atmosférica diminui, porém, as amplitudes das marés lunares permanecem baixas quando comparadas com as marés solares na atmosfera superior. Acima de 80 km de altitude as marés lunares foram detectadas nas medidas de ventos, temperatura, emissões atmosféricas e em uma série de parâmetros ionosféricos. De acordo Akmaev, 2016 quase dois séculos depois que as marés lunares atmosféricas foram preditas e observadas pela primeira vez, elas ainda são estudadas.

A maré lunar na ionosfera é um fenômeno que mostra uma correlação entre as variações ionosféricas. Os fenômenos ionosféricos que podem ser observados por ondas de rádio na ionosfera são causados pela modulação dos campos elétricos gerados pelo dínamo (Matsushita, 1967). Os efeitos da maré lunar na ionosfera vem sendo estudados utilizando diferentes medidas, como dados coletados por barômetros (Haurwitz and Cowley, 1969), ionossondas (Matshushita, 1967), magnetômetros (Bartels and Johnston, 1940; Yizengaw e Carter, 2017) radares (Paulino et al., 2012) e satélites (Forbes and Zhang, 2012;Paulino et al., 2013).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o efeito das marés lunares na região F da ionosfera através dos parâmetros medidos por ionossonda.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar as amplitudes da maré lunar nos parâmetros ionosféricos;
- Determinar as fases da maré lunar nos parâmetros ionosféricos

- Estudar a variação sazonal das marés lunares usando três anos de dados

1.2 MOTIVAÇÃO

O dos efeitos das marés lunares na região F da ionosfera de acordo com Stening e Fejer, 2001, podem aumentar e diminuir a elevação da altura da região F noturna e, portanto, pode alterar a altura da anomalia de Appleton. Esses estudos dos efeitos da marés lunares da ionosfera é importante, uma vez que permite separar os efeito das marés lunares de outros efeitos atmosféricos.Em estudos prévios foram utilizados parâmetros semelhantes aos do presente estudo, mas é necessário realizar estudos adicionais para auxiliar na obtenção de informações adicionais e comparar os resultados com aqueles já obtidos anteriormente. Nesse sentido, no presente trabalho foram usados os dados da ionossonda instalada em Cachoeira Paulista, Brasil, os quais foram obtidos ao longo de três anos [2009, 2010 e 2011]. Os parâmetros utilizados são foF2 (frequência fundamental máxima) e hmF2 (altura de máxima densidade).

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será feita uma descrição da base teórica necessária para o desenvolvimento desta dissertação. Para tanto será feita uma breve descrição da atmosfera neutra e ionizada da Terra e uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos publicados sobre a maré atmosférica lunar.

2.1 Atmosfera da Terra

2.1.1 Atmosfera Neutra

A atmosfera terrestre é um envelope gasoso que envolve a Terra, a qual se estende desde a superfície até milhares de quilômetros (Salby, 2012). As regiões da atmosfera são denominadas de acordo com vários esquemas baseados, em particular, nas variações da temperatura com altura, composição, estado de mistura, densidade de carga, etc. A classificação mais usual da atmosfera neutra é aquela que considera o gradiente vertical da temperatura, em que as regiões são as "esferas" e os limites são as "pausas", cujas camadas são a Troposfera, Estratosfera, Mesosfera e Termosfera, limitadas pelas regiões da tropopausa, estratopausa e mesopausa, respectivamente (Hargreaves,1992). A classificação da atmosfera neutra de acordo com o perfil vertical da temperatura é representado na Figura 2.1.

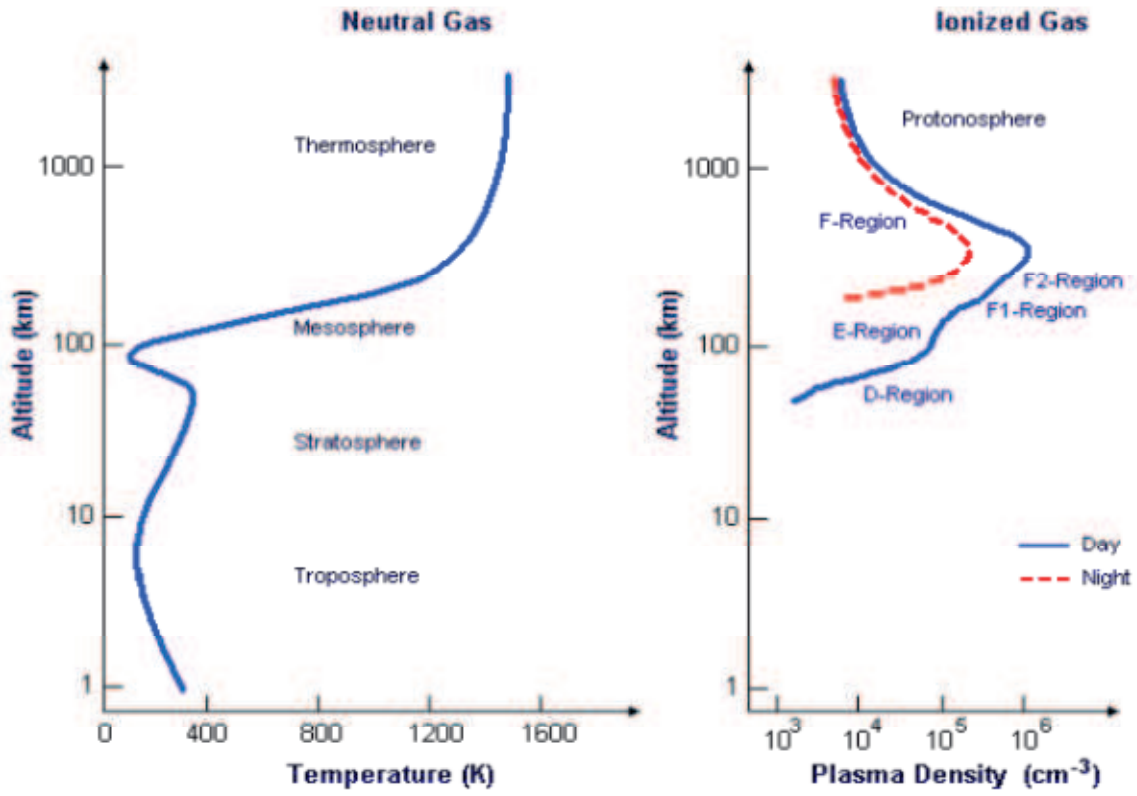

Figura 2.1: Perfis típicos da temperatura da atmosfera neutra e das densidades de plasma em função da altura.
Fonte: http://www.astrosurf.com/luxorion/Radio/atmosphere-ionosphere.gif

A troposfera estende-se desde a superfície da Terra até uma altitude de cerca de 10 km no equador e de 7 km nos polos. A temperatura nessa região diminui com a altitude. A região logo acima é a tropopausa que serve como um limite entre a troposfera e a estratosfera, onde a temperatura praticamente não muda e atinge valores abaixo 217 K (–56 °C).

Acima da tropopausa tem-se a estratosfera, a qual se estende de uma altitude de 13 km até cerca de 50 km. A temperatura nesta região aumenta com a altura. A camada de ozônio é encontrada nessa região. A camada de ozônio que contém a forma reativa de oxigênio tem a função de impedir que a radiação solar na faixa do ultravioleta, que é nociva, chegue diretamente à superfície da Terra. A região acima da estratosfera é denominada de estratopausa e é a região de transição para a próxima camada.

A mesosfera é a camada encontrada acima da estratopausa, a qual se estende desde cerca de 50 km até 85 km de altitude. A temperatura nesta região diminui com o aumento da altitude devido ao resfriamento radiativo e pode variar de 190 a 130 K (–83 a –143 °C). Isso torna a mesosfera extremamente fria. Nessa região também se observa os meteoros devido à ablação dos meteoroides que adentram na atmosfera terrestre. A região de transição entre a mesosfera e a próxima camada é chamada de mesopausa.

A termosfera é a camada encontrada acima da mesopausa, a qual se estende a partir de uma altitude de cerca de 85 km até cerca de 500 km, onde a temperatura sobe bruscamente (atingindo cerca de 1200 K) e é bastante variável. Nessa região a radiação solar em comprimentos de onda muito curtos do ultravioleta, é absorvida pelo oxigênio fazendo com que a região seja aquecida. Moléculas (O_2, CO_2, etc.) são dissociadas pela radiação solar de alta energia no ultravioleta ($\lambda < 0{,}1\ \mu m$). Devido à escassez de moléculas poliatômicas, a perda de energia no infravermelho é baixa, como consequência, a temperatura nessa região alcança valores muito elevados.

A ionosfera é uma região da atmosfera terrestre que é parcialmente ionizada pela radiação solar e cósmica e vai de cerca de 60 km a 1000 km. No gráfico à direita na Figura 2.1, estão representados os perfis verticais da densidade do plasma para as situações do dia e da noite. A região ionizada inferior é denominada de camada D que começa a partir de uma altitude de cerca de 60 km até 100 km. Acima da camada D tem-se a camada E que compreende o intervalo de altitude entre cerca de 90 km e 150 km. A região ionosférica superior é denominada de camada F que se estende de uma altitude de cerca de 150 km até cerca de 1000km. O meio ionizado também afeta ondas de rádio e, uma vez que se comporta como um plasma, pode suportar e gerar uma variedade de ondas, interações e instabilidades que não são encontradas em um gás neutro (Hargreaves, 1992).

A ionosfera é formada quando a radiação eletromagnética e a radiação de partículas do Sol e do espaço ionizam as moléculas de ar, criando plasma na atmosfera superior. Esse plasma é fracamente ionizado mesmo na altitude quando n_e alcança seu máximo.

Essas camadas não são visivelmente distintas, mas dependem das densidades e dos processos que ocorrem em cada região.

2.2 Região D, E e F

A região D da ionosfera está situada aproximadamente entre as altitudes de 60 e 100 km, mas pode descer para cerca de 50 km durante a intensa atividade solar. A composição ionizada da região D é formada na sua maior parte por íons de oxido nítrico (NO^+) como maior portador de cargas positivas, já os elétrons, O_2^- juntamente com outros íons negativos se constituem nos portadores de cargas negativas. A densidade eletrônica na região D apresenta uma variação diurna em que atinge o máximo após o meio dia local (da ordem de 10^8 e 10^9 elétrons/m^3) e valores bastante pequenos durante a noite. A camada E também é chamada de camada de Kennelly-Heaviside e está situada entre cerca de 90 km e 150 km de altitude durante o dia. De acordo com Schunk e Nagy (2009), na região E, as reações químicas básicas não são tão complicadas. A ionização na região E é principalmente causada por raios X no intervalo de comprimentos de onda 8-10,4 nm, e por radiação ultravioleta (de 80 nm a 102,6 nm), que produzem os componentes primários de íons (NO^+ e O_2^+), como também os secundários (O^+ e N_2^+). A densidade iônica total é da ordem de 10^5 cm^{-3}, enquanto que a densidade neutra é superior a 10^{11} cm^{-3}. Além dos íons positivos, a região E ainda apresenta elétrons, com uma densidade eletrônica de 10^{11} elétrons/m^3 em torno de 110 km de altitude. A camada F estende-se desde cerca de 150 km até cerca de 1000 km acima da superfície da Terra. É também referida como a camada Appleton-Barnett. Em altitudes mais elevadas, o número de íons de oxigênio diminui e íons mais leves, como hidrogênio e hélio, tornam-se dominantes. A radiação ultravioleta extrema (UV, 10-100 nm) ioniza o oxigênio atômico. A camada F consiste de uma camada à noite, mas durante o dia é composta por duas camadas; F1 e F2. A camada F1 é a parte inferior da região F e encontra-se entre 150 e 220 km de altitude. Esta camada está presente apenas durante o dia porque se funde com a camada F2 à noite. É composto por uma mistura de íons moleculares O_2^+ e NO^+, e íons atômicos O^+. Acima da camada F1, o oxigênio atômico torna-se o constituinte dominante porque as partículas mais leves

tendem a ocupar altitudes mais altas acima da turbopausa (em ~ 100 km). Este oxigênio atômico fornece os íons atômicos O^+ que compõem a camada F2. A camada F2 encontra-se de 220 a 800 km de altitude. A camada F2 é a principal camada refletora para comunicações de Alta Frequência (High Frequency - HF) durante o dia e a noite. O comportamento da camada F geralmente é dominado pelos ventos termosféricos complexos.

As partículas carregadas na alta atmosfera são afetadas pelo campo magnético terrestre externo. O campo magnético em torno da Terra é produzido principalmente por um dínamo hidrodinâmico que opera no núcleo fluídico externo terrestre. As rochas magnetizadas na litosfera têm uma contribuição secundária. Outra contribuição para o campo geomagnético é de origem externa. Os sistemas de corrente elétrica na ionosfera e magnetosfera variam rapidamente, dependendo da atividade solar.

Uma vez que a magnetosfera e a ionosfera terrestre são acopladas através do campo magnético terrestre externo e a forte interação entre partículas carregadas e as linhas de campo resultar na captura de partículas, o movimento das partículas carregadas é restrito e os processos de transporte são conduzidos por processos de difusão, ventos termosféricos e pelos campos elétricos.

2.3 Correntes ionosféricas e a formação de campos elétricos na ionosfera

Íons e elétrons encontrados na ionosfera tendem a se mover e ao fazê-lo podem transportar correntes elétricas junto com eles. O comportamento das correntes elétricas em altitudes diferentes pode ser entendido em termos do movimento de portadores atuais, íons e elétrons. Este movimento é determinado pelas forças motrizes (campos elétricos e vento neutro) e o tensor de mobilidade de cada espécie de partícula. As correntes ionosféricas horizontais, tais como os eletrojatos polares, o eletrojato equatorial e os sistemas de corrente Sq (Solar quiet) ocorrem amplamente na região E da ionosfera. Durante a noite, quando a condutividade da região E é baixa, a região F tende a desempenhar um papel muito importante, especialmente na ionosfera tropical. As linhas de campo magnético tendem a possuir seções longas dentro da região F

próxima ao equador. Acima de uma altitude de 400 km, estas linhas de campo atravessam regiões de alta densidade de plasma, referidas como anomalia de ionização equatorial ou anomalia de Appleton. A anomalia de Appleton ocorre quando o plasma equatorial denso sobe até que as forças de pressão são altas o suficiente na ionosfera de latitude média, que começa a se movimentar para baixo das linhas de campo magnético, devido à gravidade, em direção à ionosfera tropical. Este movimento descendente resulta numa região de densidade de plasma (Kelley, 2009).

2.3.1 Formação de campos elétricos na ionosfera

Um dínamo geralmente se refere a algo que gera energia. No caso do "dínamo ionosférico", significa um mecanismo que converte a energia cinética do fluido termoelétrico de fundo movendo-se contra o plasma ionosférico para a energia eletrostática, onde correntes e campos elétricos são gerados através da colisão entre o plasma e a atmosfera neutra. O dínamo ionosférico é considerado como dois estágios: primeiro, quando o fluido termosférico se move contra o plasma ionosférico com colisões entre eles na presença do campo magnético da Terra, a força de arrasto da atmosfera neutra impulsiona o movimento de deriva do plasma. A diferença resultante no movimento de deriva dos íons e elétrons faz com que a corrente flua ("corrente do dínamo"). Em segundo lugar, uma vez que a condutividade elétrica não é espacialmente uniforme na ionosfera, a divergência e a convergência da corrente do dínamo fazem com que a carga elétrica seja acumulada. O campo elétrico de polarização resultante impulsiona ainda mais a deriva do plasma. Com a colisão com a atmosfera neutra, o movimento de deriva não é único entre íons e elétrons, resultando assim em um fluxo de "corrente de polarização" (Jin, 2009).

2.4 Marés Atmosféricas

As marés atmosféricas são oscilações de escala planetária cujos períodos são frações integrais de um dia solar ou lunar. Essas oscilações se originam na atmosfera mais baixa e se propagam para a atmosfera superior.

As marés na atmosfera podem ser geradas pela ação da radiação solar (marés térmicas) como também a ação gravitacional do Sol e da Lua sobre a Terra. As marés devidas ao aquecimento solar são o tipo mais dominante de marés atmosféricas com amplitudes elevadas. A influência da força de maré gravitacional da Lua sobre a Terra é cerca de duas vezes a do Sol. As marés gravitacionais solares aparecem como uma variação dos padrões das marés lunares, ou seja, enquanto a interação entre Lua e a Terra provoca os padrões das marés diárias, a interação da atração do Sol, da Terra e da Lua provoca os padrões de maré mensais. Quando o Sol, a Lua e a Terra estão em alinhamento (na época da lua nova ou cheia), a maré solar tem um efeito aditivo na maré lunar, criando marés altas muito mais altas e marés baixas muito mais baixas.

Embora as amplitudes das marés lunares sejam baixas, os seus efeitos na atmosfera são importantes para variabilidade dia-a-dia da atmosfera. De acordo com Sanford et al. (2007), uma diferença fundamental entre solar e maré lunar é que a excitação das marés solares é altamente variável e dependente da variação das concentrações do vapor de água, ozônio, e oxigênio molecular, no tempo em várias alturas. Em contraste, o forçante gravitacional da maré lunar ocorre na atmosfera mais densa e mais baixa. Este forçante é bem especificado e praticamente constante.

As marés são oscilações que ocorrem periodicamente. Podem ocorrer como diurna (refere-se a um período de um dia), semidiurna (período de meio dia) ou mesmo terdiurna (um terço de um dia). A maré lunar atmosférica surge devido à atração gravitacional da Lua sobre o sistema Terra- Oceano-Atmosfera. Além do forçante gravitacional, a maré lunar na atmosfera é influenciada pelo movimento induzido da Terra sólida e dos oceanos (Chapman e Lindzen, 1970). A Figura 2.2 mostra um diagrama da força gravitacional exercida pela Lua sobre a Terra e da força centrífuga (inércia) da revolução em torno do centro de massa comum do sistema Terra-Lua.

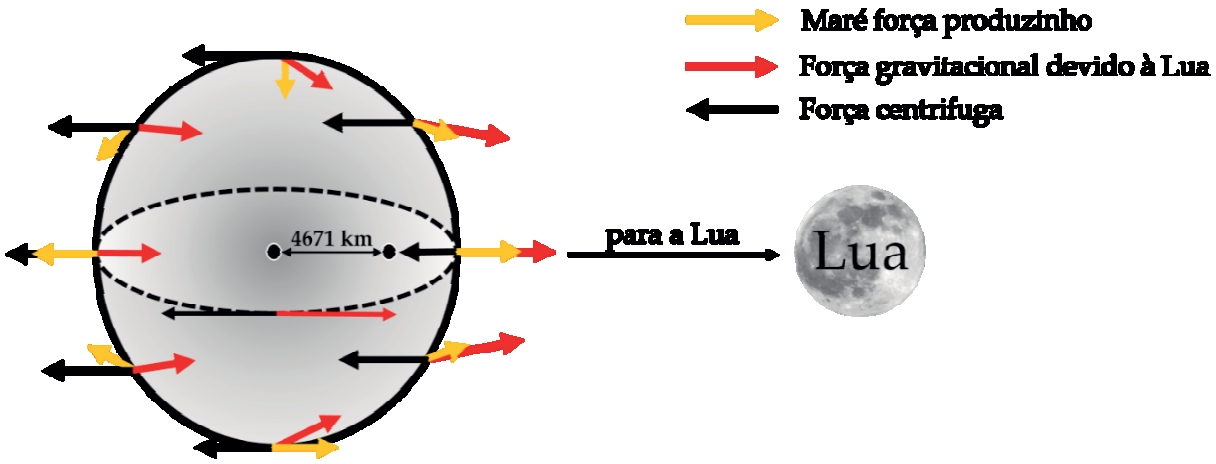

Figura 2. 2: Forças exercidas pelas lua sobre a Terra

2.4.1 Maré lunar na Ionosfera

A investigação e o estudo das marés lunares atmosféricas se remetem a Newton e Laplace, embora houvesse previsões anteriores. Newton reconheceu a existência desse fenômeno enquanto Laplace o estudou teoricamente como também através de observações de leituras barométricas. Essas oscilações que ocorrem na baixa atmosfera, são então propagadas para a atmosfera superior por um mecanismo de forçamento. A maré lunar fundamental é o modo semidiurno (2, 2), (Chapman e Lindzen,1970).

Stening (1986) estudou os efeitos das marés lunares na ionosfera. Ele determinou variações diurnas e sazonais da maré lunar na frequência crítica da camada F2, e explicou que as variações sazonais na amplitude são às vezes anuais e, às vezes, semestralmente em forma.

Stening (1999) estudou as marés lunares na camada E esporádica. Analisou os valores horários de foEs, f bEs (a frequência crítica de cobertura) e h'Es de vários observatórios para a maré lunar semidiurna. Verificou que a fase da maré em foEs foi muitas vezes cerca de 3 horas mais tarde do que para h'Es em acordo com a teoria. As variações sazonais na maré também foram analisadas com os resultados estatisticamente mais significativos (maiores amplitudes) ocorrendo normalmente no verão.

Stening e Fejer (2001) estudaram a maré lunar na velocidade vertical da deriva iônica em Jicamarca na região F equatorial. Usando o método do ajuste dos mínimos quadrados, obtiveram amplitudes de até 6 m/s, em acordo com as determinações das marés lunares de outros parâmetros físicos associados. Eles também examinaram as variações entre as estações do ano, a atividade solar e entre o dia e a noite, sendo que as amplitudes encontradas geralmente foram maiores no verão do hemisfério Sul. Os autores também encontraram que grande parte da variação de fase com a estação do ano era muito semelhante para períodos de máximo e de mínimo solar. Observou-se uma mudança de fase no inverno que foi mais distinta nas noites durante o máximo solar. Uma reversão de fase do dia para a noite também foi observada para algumas estações do ano. Uma comparação com os dados de Huancayo forneceu evidências de inversão de fase do dia-a-dia na maré lunar na altura da região F e nas variações magnéticas.

Vince et.al (2011) observaram efeitos da maré atmosférica lunar nas deriva de plasma usando a rede de sensores ionosféricos de baixa altitude. Eles examinaram a eletrodinâmica ionosférica durante condições silêncio e baixa atividade solar entre setembro e novembro de 2009. Eles observaram que as marés semidiurnas solar e lunar têm uma influência significativa na eletrodinâmica básica durante este período de mínimo solar. A influência da maré lunar na eletrodinâmica da ionosfera foi um componente importante da variação da deriva vertical durante o período de estudo geofisicamente tranquilo.

A variabilidade sazonal da maré lunar ionosférica foi investigada por Pedatella (2014), usando uma combinação de observações do Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate (COSMIC) e simulações de modelo Thermosphere-Ionosphere-Mesosphere electrodynamics general circulation model (TIME-GCM). O estudo focalizou a variabilidade sazonal da maré lunar na ionosfera e sua potencial conexão à ocorrência de aquecimentos abruptos da estratosfera polar (SSWs). As observações do COSMIC da densidade eletrônica (NmF2) e de conteúdo eletrônico total da região F, mostraram uma variação principalmente anual da maré lunar ionosférica, com amplitudes máximas ocorrendo em baixas latitudes durante

dezembro-fevereiro. Simulações da climatologia da maré lunar no TIME-GCM mostraram variabilidade anual semelhante à das observações do COSMIC.

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Nesse capítulo são descritas as principais características do instrumento utilizado para obter os dados utilizados nesta dissertação. Além disso, será descrita a metodologia utilizada para obtenção dos resultados.

3.1 Ionossonda

A ionosfera pode ser estudada a partir do solo por ondas de rádio no intervalo de frequências entre 1-20 MHz (300-15 m de comprimentos de onda). O princípio da sondagem ionosférica, uma das mais antigas e uma das mais importantes técnicas de estudos ionosféricos, é transmitir um pulso de onda de rádio verticalmente e medir o tempo decorrido entre a transmissão e a recepção do sinal refletido na altura em que a frequência do plasma da região seja igual ou superior a do pulso emitido (HARGREAVES, 1992). O tempo decorrido é então convertido em altura.

Nesta pesquisa foram utilizadas medidas da ionossonda instalada em Cachoeira Paulista, a qual é um modelo do tipo D256 e opera como um radar de alta frequência. A descrição a seguir está de acordo com Reinisch et al. (1988). A ionossonda abrange uma gama de frequências de 0,5 a 30 MHz, através de uma antena de transmissão log-periódica tipo delta, com potência de pico de 10 kW, a qual também realiza sondagens oblíquas. Para a recepção, um conjunto de sete antenas espaçadas entrelaçadas permite que a polarização e o ângulo de chegada dos ecos ionosféricos sejam medidos. O arranjo é apresentado como um triângulo equilátero com uma antena em seu centro; A abertura nominal é de 100 m. Na imagem da Figura 3.1 são apresentados os equipamentos referentes a ionosonde Lowell DGS256.

Figura 3.1: Lowell DGS256 um digisonde 10kW
FONTE: Marcel H. De Canck (2007)

A Ionosonda funciona em quatro modos diferentes: Ionograma, frequência fixa, deriva e sondagem oblíqua, tendo como base o princípio da reflexão total de ondas. Além disso, tem a capacidade digital de medir a fase, amplitude, deslocamento Doppler e o ângulo de chegada do eco dependendo da frequência do sinal transmitido (Bertoni, 2004).

A ionização na atmosfera pode ser considerada na forma de várias "camadas" horizontais e, assim, a concentração de elétrons e o índice de refração da ionosfera variam com altura. A potência no eco recebido é proporcional a concentração de elétrons no volume em que a onda foi irradiada. Isso decorre do fato de que cada elétron incoerentemente irradia de volta uma pequena quantidade da energia nele incidente. O campo elétrico na onda transmitida faz com que todos os elétrons encontrados durante o trânsito do pulso oscilem, resultando em radiação de um sinal quase na mesma frequência.

Ao transmitir um pulso de frequência e medir o tempo decorrido entre a emissão e a recepção, ao ser refletido pela camada, é possível estimar a concentração e a altura da base de cada camada de ionização. A altura virtual da base de uma camada ionosférica é então obtida de acordo com a expressão (Davies, 1965):

$$h' = \frac{1}{2}ct, \qquad \text{.....(1)}$$

sendo *c* a velocidade da onda eletromagnética no vácuo. A altura real da reflexão é sempre menor do que a altura virtual, uma vez que a velocidade do pulso depende da densidade eletrônica do meio em que se propaga e, portanto, é menor do que a velocidade da luz.

Na Figura 3.2 é apresentado um exemplo de ionograma escalado e o perfil vertical da densidade eletrônica obtido pelo programa do *SAO-Explorer.*

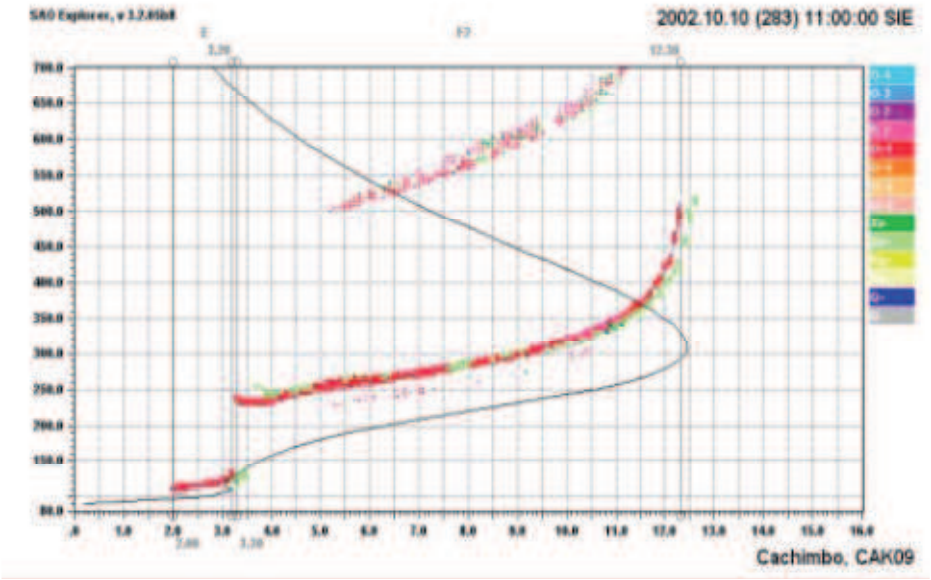

Figura 3. 2: Ionograma escalado e perfil vertical da densidade eletrônica calculado pelo programa NHPC que faz parte do *SAO-Explorer*.

FONTE: BERTONI, 2004

No processo de aquisição de dados, a ionossonda transmite fazendo uma varredura de frequências. À medida que a frequência aumenta, cada onda é menos refratada pela ionização na camada, e assim cada uma das ondas de maior frequência alcança alturas maiores antes de ser refletida. Ao se aproximar do ponto de reflexão, a velocidade de grupo da onda aproxima-se de zero e isso aumenta o tempo da viagem do sinal. Eventualmente, a frequência é tal que permite que a onda penetre na camada sem ser refletida. Para ondas no modo ordinário, isso ocorre quando a frequência transmitida é

maior do que a frequência de pico do plasma da camada. No caso de onda extraordinária, o campo magnético tem um efeito adicional, e a reflexão ocorre a uma frequência que é maior que a onda ordinária pela metade da girofrequência dos elétrons.

A frequência com que uma onda penetra uma camada ionizada é conhecida como a frequência crítica dessa camada. A frequência crítica está relacionada à densidade de elétrons pela seguinte relação:

$$f_c = 8,98\sqrt{N_e} \text{ .....(2)}$$

para o modo ordinário, e

$$f_c = 8,98\sqrt{N_e} + \frac{Bq_e}{2m_e} \text{ .....(3)}$$

para o modo extraordinário, em que f_c é a frequência crítica em Hz, N_e é a concentração de elétrons por m^3, B é a intensidade do campo magnético, q_e é a carga do elétron e m_e é a massa do elétron. As frequências transmitidas que sejam maiores do que a frequência crítica penetrarão na camada sem serem refletidas.

3.1.1 Dados

Neste trabalho são utilizados as medidas obtidas por ionossonda durante um período de 3 anos (2009-2011) na estação de Cachoeira Paulista-SP. Os parâmetros utilizados são: foF2, que é frequência crítica da componente ordinária da camada F2, e hmF2, que é a altura do pico da camada F2, correspondente à sua densidade máxima. Os dados são amostrados num intervalo de 15 minutos durante a maioria o período exceto em agosto a dezembro de 2011, que foi de 10 minutos.

Na Figura 3.3 são mostrados as medidas originais de hmF2 e foF2 obtidos pela ionossonda durante janeiro de 2009.

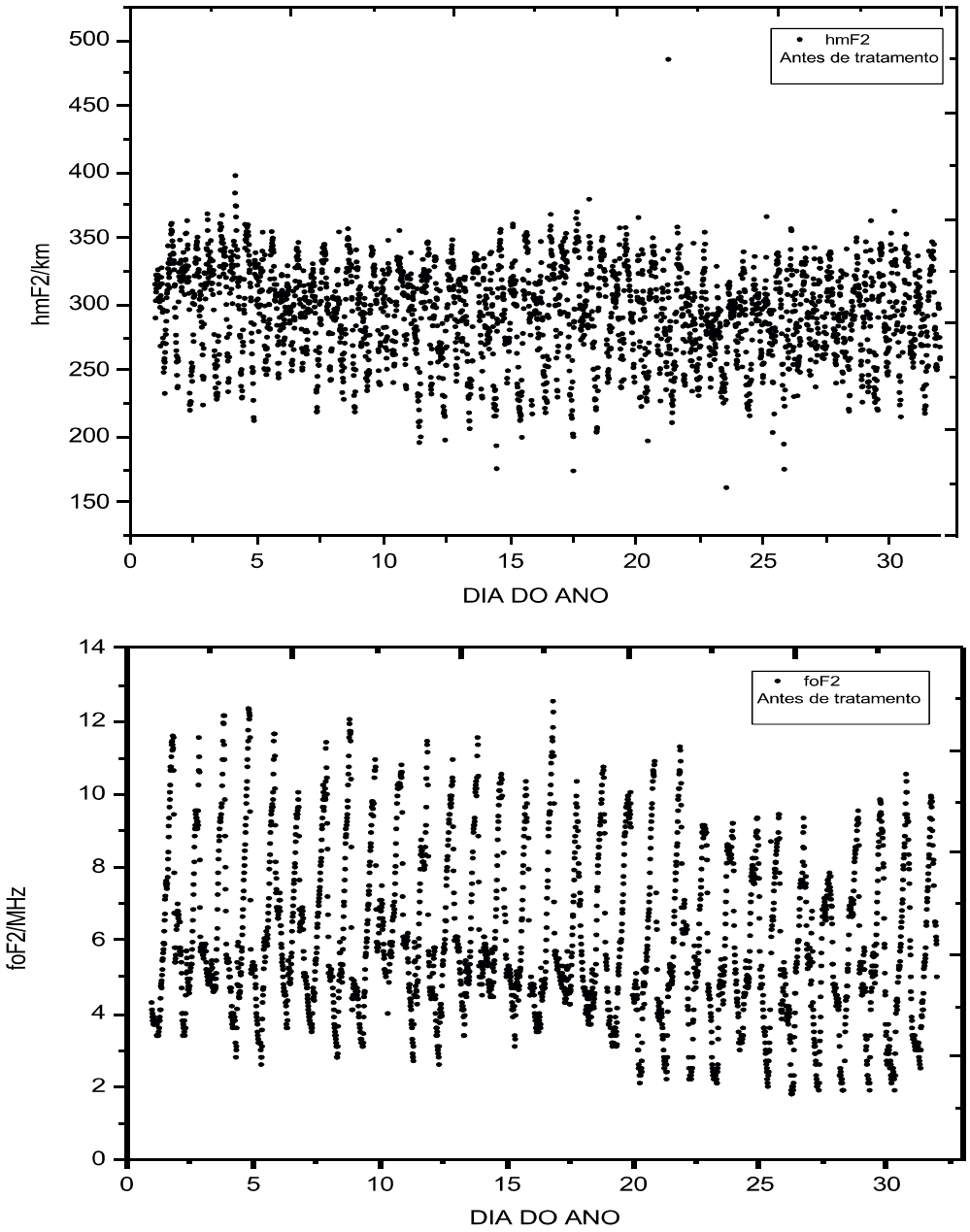

Figura 3. 3: **Gráficos das medidas de foF2 (painel inferior) e hmF2 (painel superior) para Janeiro de 2009**

O objetivo deste trabalho é estimar a influência da maré lunar nas medidas fornecidas pela ionosonda. Desta maneira, os dados foram submetidos a uma série de análises para extrair as amplitudes e as fases desta oscilação. Como os parâmetros ionosféricos são influenciados por variações nas condições magnéticas é necessário extrair os

efeitos destas variações nas medidas fornecidas pela ionossonda. Desta maneira, foram retirados os dias geomagneticamente perturbados antes de obter a influência da maré lunar. Para identificar os dias geomagneticamente perturbados, o índice magnético Kp foi utilizado.

3.2 Índice Kp

Os índices de atividade magnética descrevem a variação no campo geomagnético causada pelos sistemas de correntes irregulares. O índice K é quase logarítmico para um intervalo de três horas na atividade magnética em relação a uma curva de um dia quiescente para um único observatório geomagnético, o qual foi introduzido pela primeira vez por J. Bartels em 1938. O índice quantifica os distúrbios na componente horizontal do campo magnético da Terra com um número inteiro no intervalo de 0 a 9. Esses números inteiros indicam quão fortes as flutuações do campo magnético da Terra são causadas por tempestades geomagnéticas.

De acordo com Siebert (1971), as variações de K são todas as perturbações irregulares do campo geomagnético causadas pela radiação das partículas solares dentro do intervalo de 3 horas em questão, no tempo universal (UT).

O índice planetário Kp é o índice médio K padronizado a partir de 13 observatórios geomagnéticos entre 44° e 60° de latitude geomagnética norte ou sul. A escala é de 0 a 9. Esse índice planetário foi projetado para medir a radiação de partículas solares a partir de seus efeitos magnéticos. Na Tabela 3.1 é apresentada a classificação da atividade magnética de acordo com o índice Kp.

Tabela 3. 1: Classificação da atividade magnética de acordo com o índice Kp (GFZ,POTSDAM)

Atividade geomagnética	Índices Valor
Muito Calmo	0 a 1
Calmo	1 a 2-
Normal	2- a 3+
Perturbação	3+ a 4+
Geomagnética Tempestade	4+ a 9

Na Figura 3.4 é mostrado um gráfico do índice Kp para o mês de janeiro de 2009.

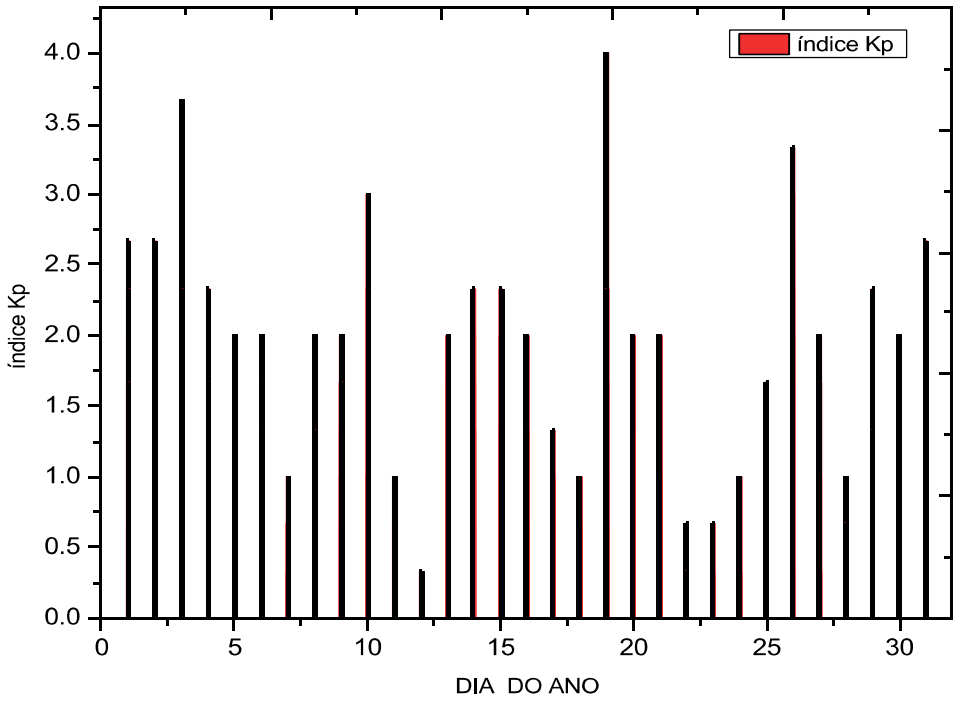

Figura 3. 4: Índice Kp para o mês de janeiro de 2009

Para investigar os efeitos da maré lunar, foram considerados os dias geomagneticamente calmos, ou seja, os dias com índice Kp maiores do que 3 foram removidos. Na Figura 3.5 são mostrados exemplos das medidas de hmF2 e foF2, apresentadas na Figura 3.3, após a remoção dos dias geomagneticamente perturbados. Os dias 3 (Kp=3,67), 19 (Kp=4,00) e 26 (Kp=3,33) foram removidos dos dados originais.

Após a retirada dos dias geomagneticamente perturbados, os dados foram submetidos a análise espectral com o objetivo de identificar as oscilações predominantes nas medidas de ionossonda, conforme descrito na seção 3.3.

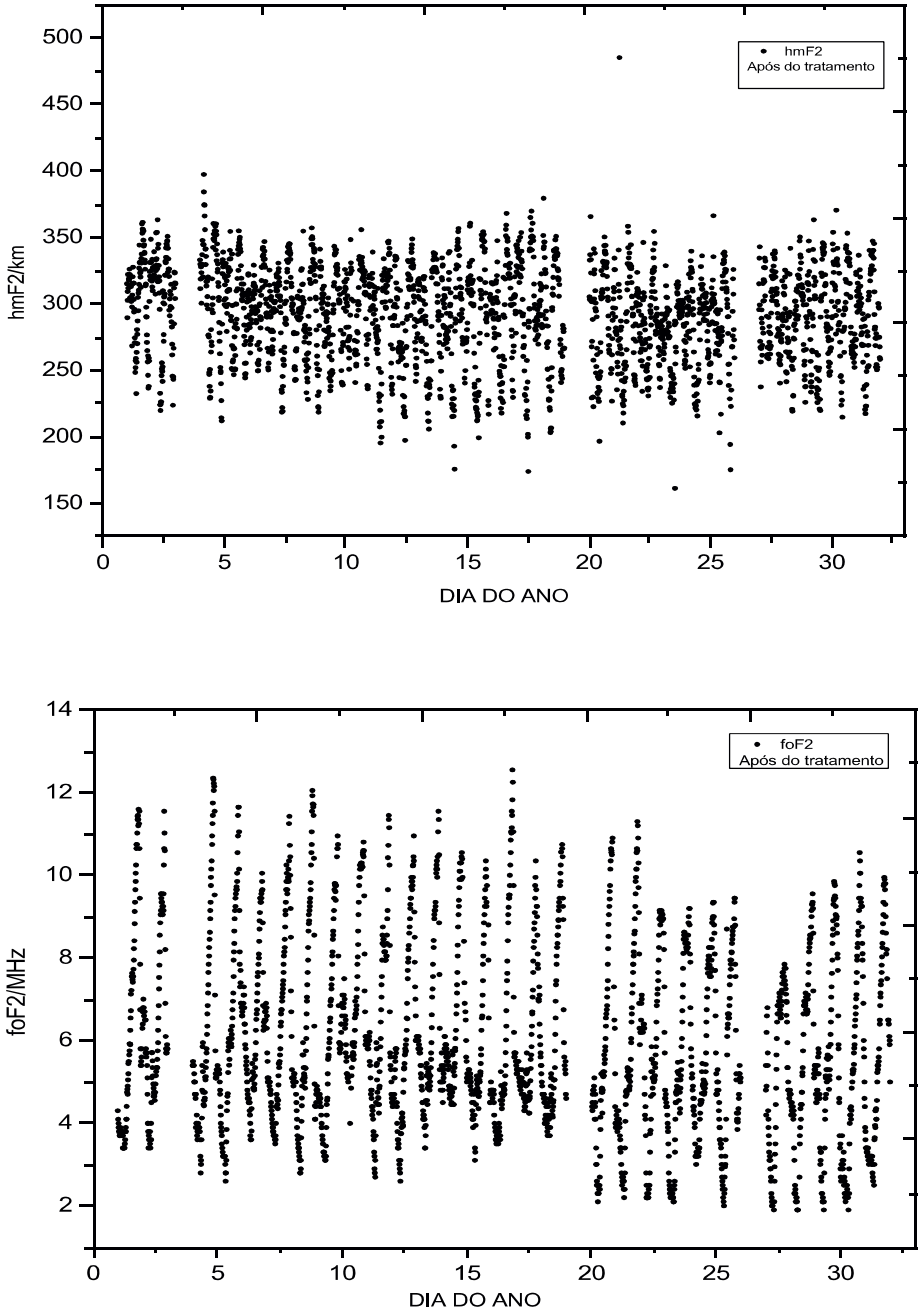

Figura 3. 5: Dados após a remoção de dias geomagneticamente perturbados para janeiro de 2009

3.3 Periodogramas Lomb-Scargle

Para identificar as oscilações predominantes nas medidas, a técnica do periodograma Lomb-Scargle foi usada, a qual é uma ferramenta estatística comumente usada para detectar sinais periódicos em observações não igualmente espaçadas. Na Figura 3.6 são mostrados os resultados do periodograma de Lomb-Scargle para os parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 obtidos das sondagens realizadas durante janeiro de 2009 em Cachoeira Paulista.

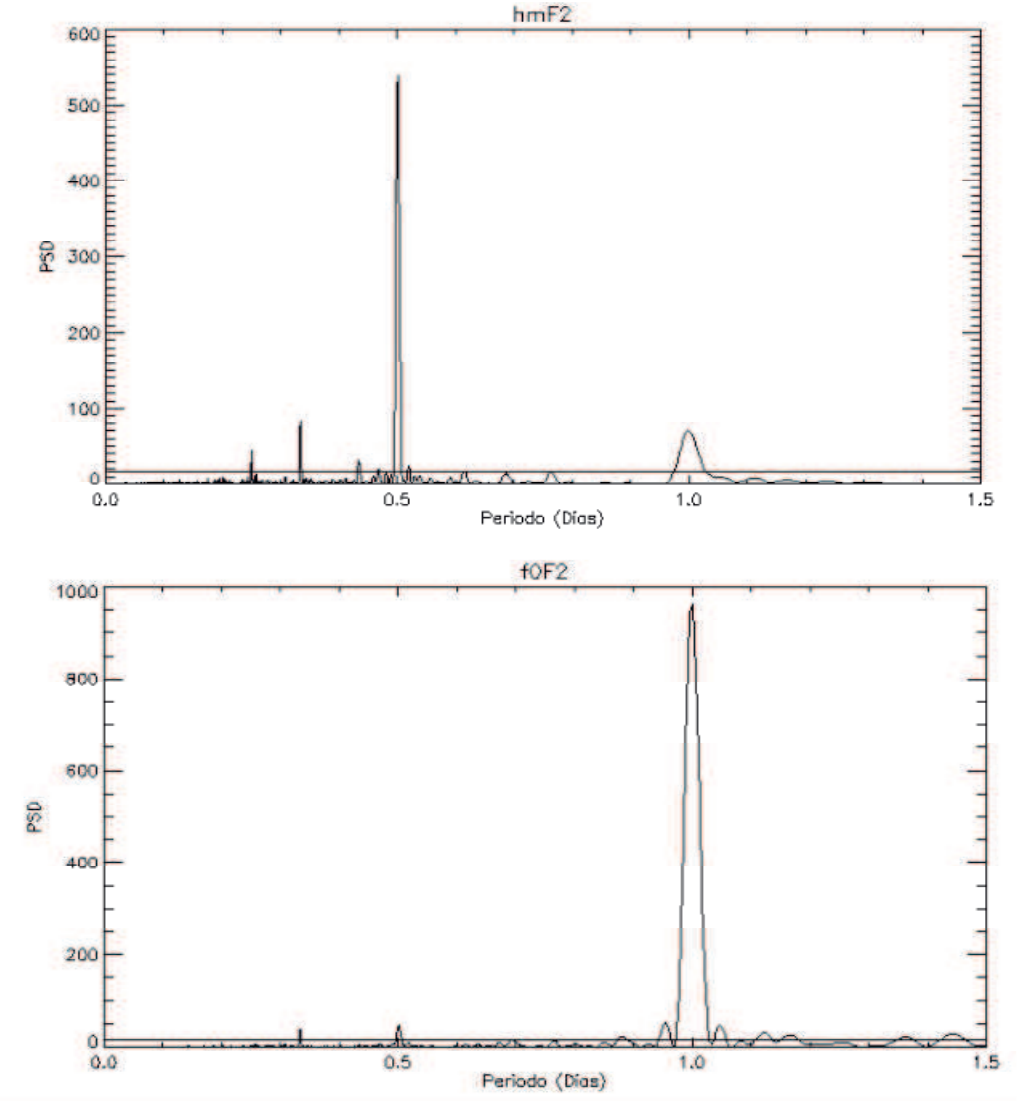

Figura 3. 6: Periodograma Lomb-Scargle para dados de janeiro de 2009. Painel superior mostra as medidas para o parâmetro hmF2 e o painel inferior mostra as medidas para o parâmetro foF2.

O periodograma Lomb-Scargle para a frquência (foF2) mostra as periodicidades dominantes com período de 1 dia e outras periodicidades significativas em torno dele. A oscilação semidiurna pode ser observada durante o período de 0,5 dias. O periodograma Lomb-Scargle para o parâmetro hmF2 mostra energia espectral referente a períodos de pico de 0,5 dias e outras periodicidades significativas em torno dele. e diurna 1 dia. O comportamento diurno da ionosfera é fortemente controlado pela energia solar. Para analisar a presença de outras periodicidades nas medições, um passo importante a ser considerado é avaliar o ciclo diurno e removê-lo dos dados originais e, assim, trabalhar com os resíduos.

3.4 Identificação da maré lunar

Na Figura 3.7 são mostrados os gráficos do dia composto para os parâmetros hmF2 e foF2 referente ao mês de janeiro de 2009.

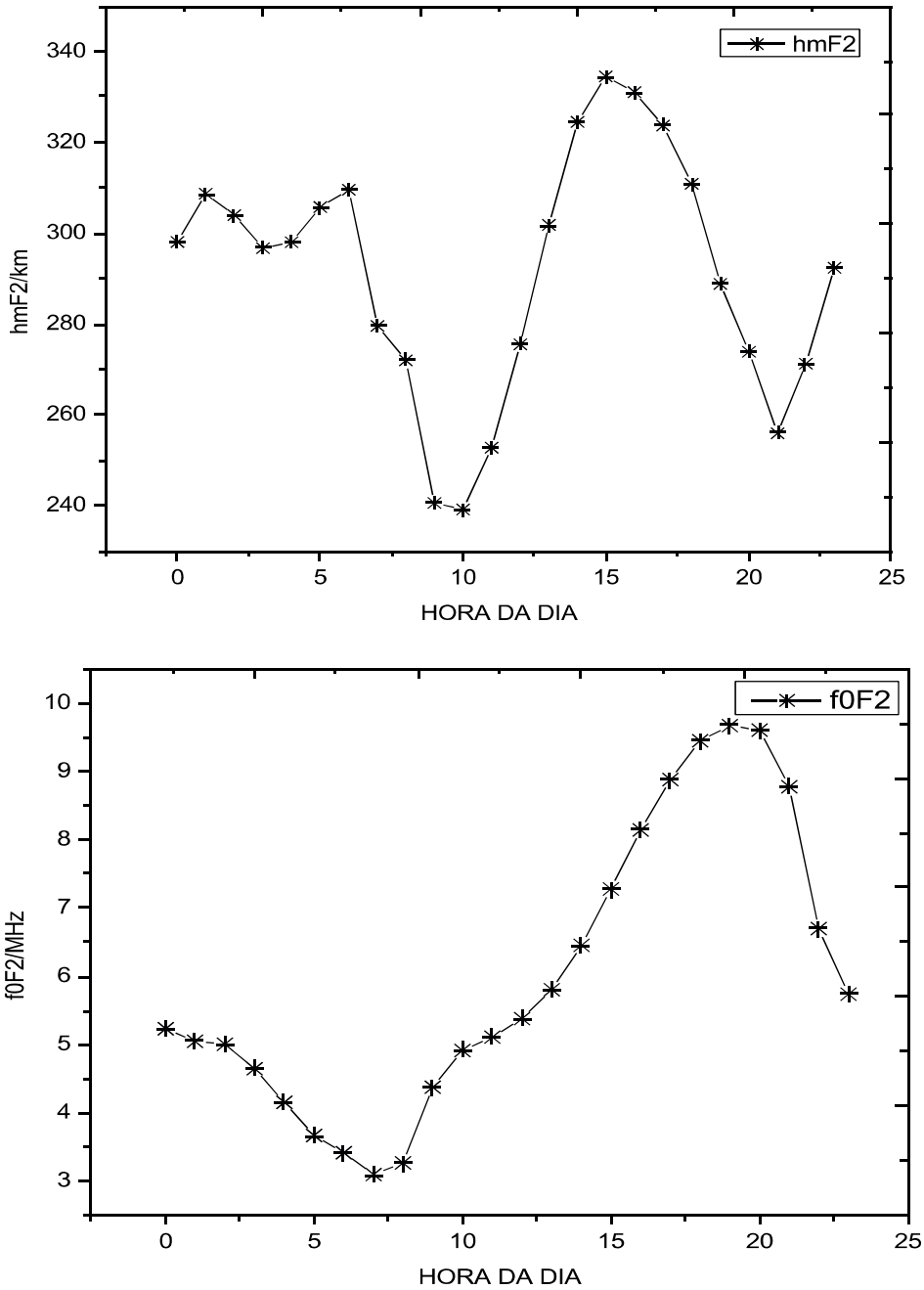

Figura 3. 7: Análise do dia composto para os parâmetros hmF2 (painel superior) e foF2 (painel inferior)

O dia composto mostra claramente o padrão de oscilação nos dados durante um período de 24 horas. O dia composto foi construído com as médias das medidas obtidas em cada hora do dia durante um mês, ou seja, a média das medidas obtidas

nos intervalos 0-1 h, 1-2 h, 2-3 h....23-24 h, durante um determinado mês. Após a obtenção do dia composto, um ajuste de mínimos quadrados foi aplicado com períodos de 24 horas, 12 horas e 8 horas para obter as amplitudes e as fases das oscilações dominantes mostradas na Figura 3.4.

Na Figura 3.8 são mostrados o dia composto (linha preta sólida) e o ajuste (linha vermelha) para a hmF2 (painel superior) e para foF2 (painel inferior).

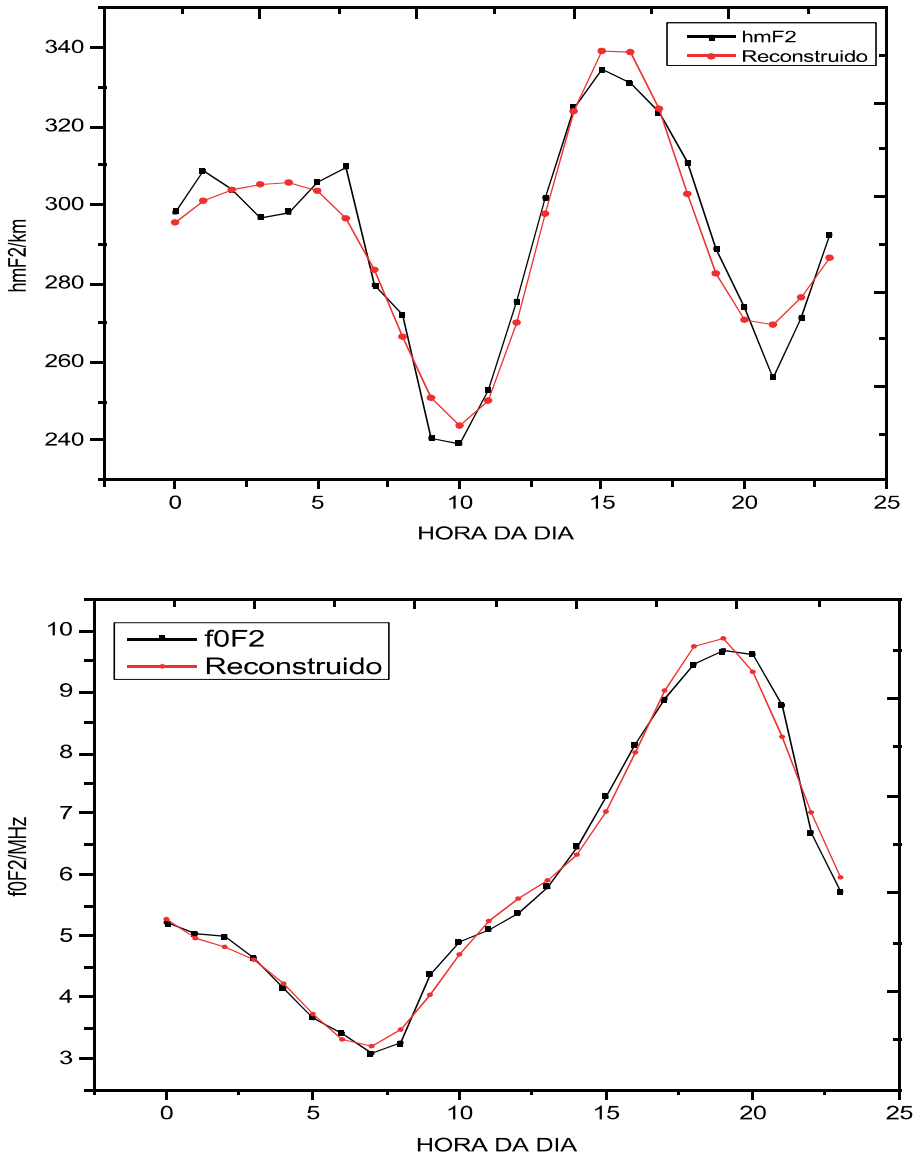

Figura 3. 8: Dia composto (linha preta sólida) e o ajuste (linha vermelha) referente a hmF2 (painel superior) e foF2 (painel inferior) de Janeiro de 2009.

Para obter os ajustes, a seguinte equação foi usada:

Y = A+B*COS((6.28/24)*X+C)+D*COS((6.28/12)*X+E)+F*COS((6.28/8)*X+G) .....(4)

Em que:

A é o nível DC (constante),

B é Amplitude para o período 24 horas,

C é Fase para o período de 24 horas,

D é Amplitude para o período de 12 horas,

E é Fase para o período de 12 horas,

F é Amplitude para o período de 8 horas,

G é Fase para o período de 8 horas

X é hora do dia.

Para a obtenção do residual das medidas dos parâmetros ionosféricos considerados, o dia composto reconstruído a partir dos parâmetros do ajuste foi subtraído do dia composto. Na Figura 3.9 são representados o dia composto (linha preto), o sinal reconstruído (linha vermelho) e o residual (linha azul) para o parâmetro foF2 (painel superior) e o parâmetro hmF2 (painel inferior).

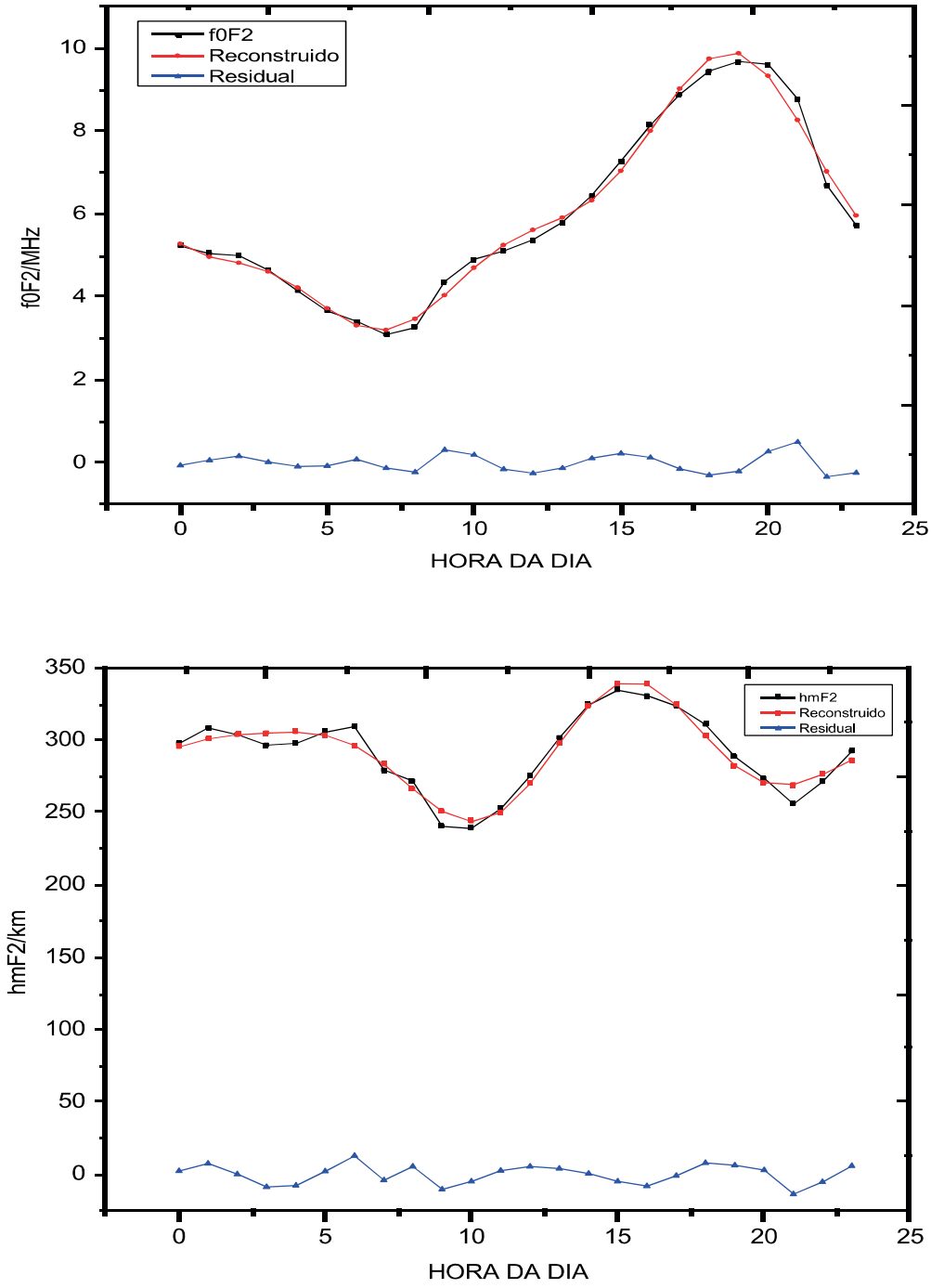

Figura 3. 9: Gráficos dos parâmetros foF2 (painel superior) e hmF2 (painel inferior) mostrando o dia composto (linha preta), o sinal reconstruído (linha vermelha) e o residual (linha azul) para o mês de Janeiro de 2009.

Na Figura 3.10 são representados o residuos (símbolos pretos), o sinal reconstruído (linha vermelha) em tempo lunar para o mês de Janeiro de 2009

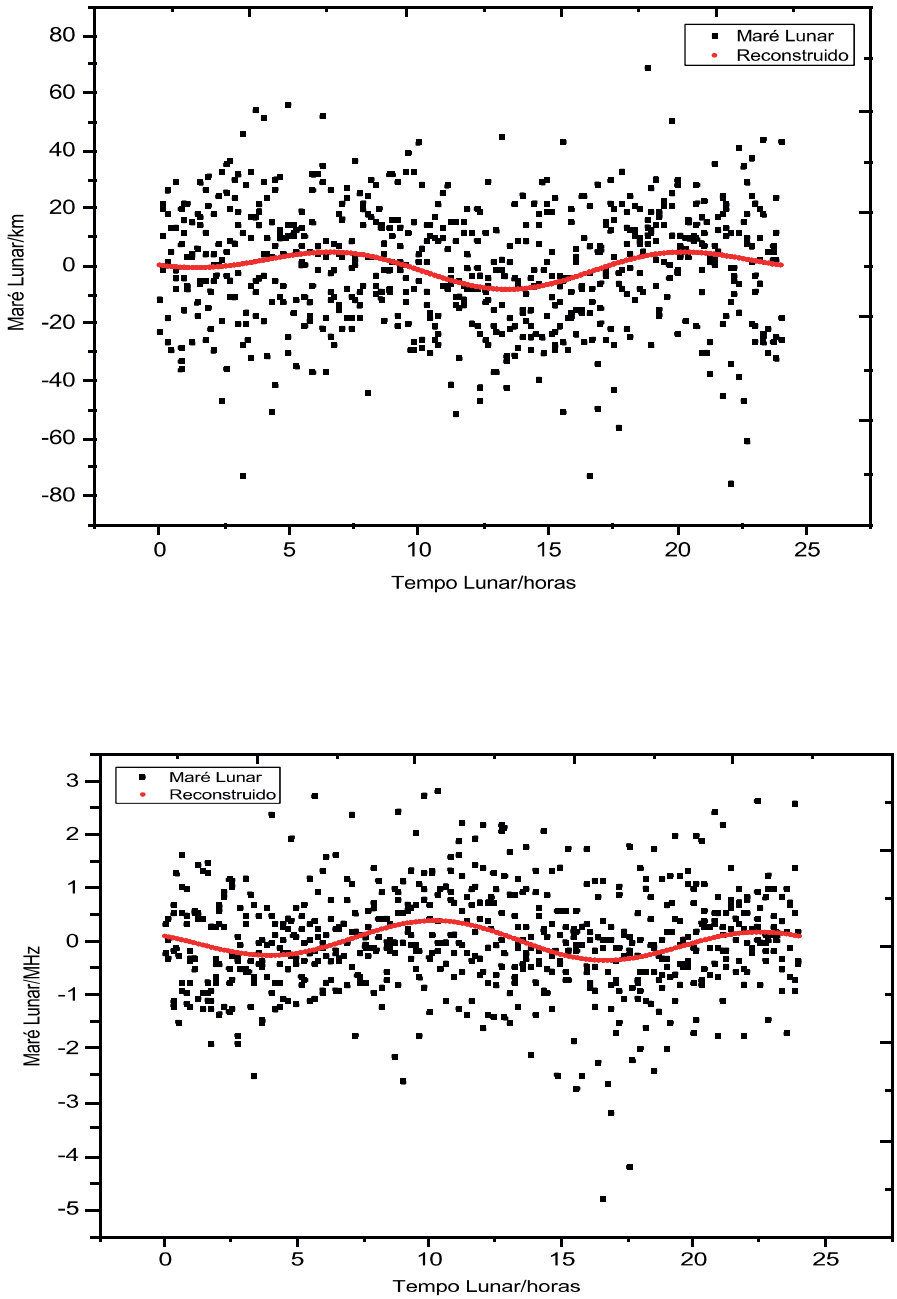

Figura 3. 10: Dia composto em tempo lunar para os parâmetros foF2 (painel superior) e hmF2 (painel inferior) para o mês de Janeiro de 2009

A Figura 3.10 mostra os resíduos (símbolo preto) e o ajuste (linha vermelha) para os parâmetros hmF2 e foF2 no tempo lunar para o mês de janeiro de 2009. Os resíduos são convertidos do tempo solar para o tempo lunar porque as marés solares acompanham o movimento aparente do Sol, o que significa suas fases são consistentes dia a dia no tempo solar local, enquanto que, as marés lunares acompanham o movimento aparente da Lua e, portanto, suas fases diminuem sistematicamente de um dia para o tempo solar local. As fases das marés lunares devem, portanto, ser medidas em relação à posição da lua (Sandford et al., 2006). O tempo lunar é convertido usando a equação (5) abaixo:

$$\boldsymbol{\tau = t - \vartheta} \quad \text{.....(5)}$$

Em que:

$\boldsymbol{\tau}$ é o tempo lunar;

$\mathbf{t}$ é a hora local solar

$\boldsymbol{\vartheta}$ é a idade da lua.

Os resíduos são então convertidos para tempo lunar e submetidos à análise harmônica para obter amplitudes e fases mensais para o período de estudo nos parâmetros hmF2 e foF2.

As amplitudes e fases das marés lunares são obtidas usando a relação (6):

Y = A+B*COS((6.28/24)*X+C)+D*COS((6.28/12)*X+E) .....(6)

Em que:

A é o nível DC (constante),

B é Amplitude para o período 24 horas,

C é Fase para o período de 24 horas,

D é Amplitude para o período de 12 horas,

E é Fase para o período de 12 horas,

X é hora do dia em tempo lunares

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e a discussão para a análise feita utilizando as medidas no período de 2009 e 2011.

4.1: Maré lunar nos parâmetros hmF2 e foF2 para o ano de 2009

Na Figura 4.1 são mostrados as amplitudes e as fases mensais para as oscilações diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) obtidas dos dados residuais dos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2009.

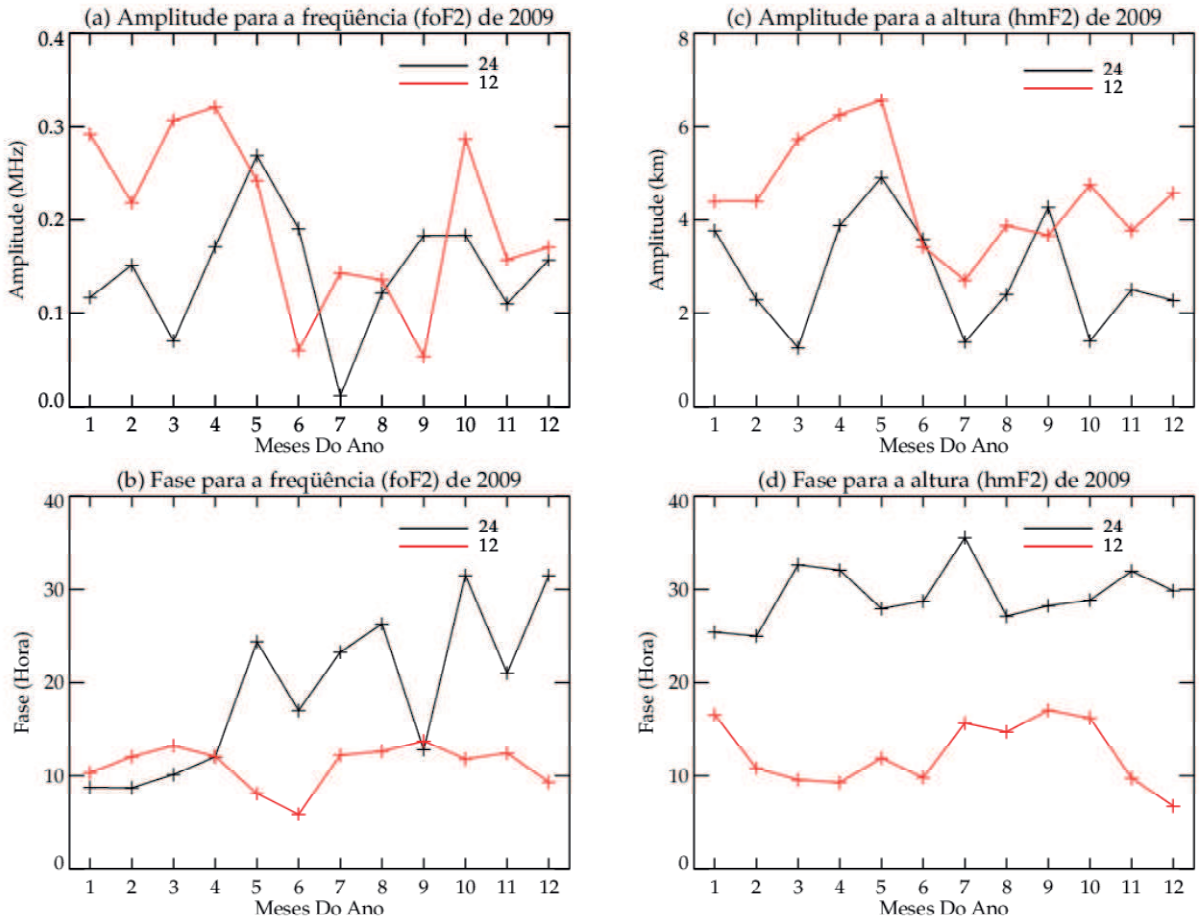

Figura 4. 1: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (linha preto) e semidiurna (linha vermelha) obtidas dos dados dos residuais dos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2009.

Na Figura 4.1 (a) são representadas as amplitudes para os componentes diurna e semidiurna para o parâmetro foF2 para o ano de 2009. A linha preta mostra o componente diurna que pode ser visto como começando com uma amplitude de 0,10 MHz em janeiro e que aumenta para uma amplitude de cerca de 0,15 MHz em fevereiro. A linha vermelha mostra o componente semidiurna A linha vermelha mostra o componente semidiurna com as amplitudes variando entre 0,22MHz e 0,32MHz de janeiro a abril. As amplitudes diurnas variaram de 0,07 MHz a 0,71MHz para o mesmo período de meses. A amplitude mínima foi de 0,05MHz em setembro para o componente semidiurnal, enquanto que, para o mesmo intervalo de meses, a amplitude mínima para o componente diurno foi de 0,01MHz em julho. A amplitude máxima para o componente semidiurnal foi de 0,32MHz em abril e o máximo para o componente diurno foi de 0,27MHz em maio. Ambos os componentes diurnos e semidiurnos mostraram uma variação semianual com máximos em maio e setembro-outubro no componente diurno e em abril e outubro para a componente semidiurna .

Na Figura 4.1 (b) as fases nos componentes diurna e semidiurna do parâmetro foF2 em 2009 são apresentadas. A linha preta representa a componente diurna enquanto a linha vermelha representa a componente semidiurna. Para a componente semidiurna a fase (a hora em que o máximo ocorre) manteve-se entre 10 e 13 horas, exceto em maio e junho (~8 e 6 horas, respectivamente). As fases para a componente diurna da maré lunar mostraram variabilidade mês a mês e, conforme o ano avança, os máximos tendem a ocorrer mais tarde (de ~ 9 horas em janeiro para ~ 017 horas em junho).

As amplitudes das marés lunares diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) no parâmetro hmF2 são mostrados na Figura 4.1(c). Pode-se ver que as amplitudes de hmF2 para a componente semidiurna aumenta de 4,39 km em janeiro para 6,57 km em maio e depois diminui acentuadamente para 2,70 km em julho. As amplitudes do hmF2 no componente semidiurno da maré lunar são maiores do que as da maré lunar diurna e apresenta uma variabilidade mês a mês ao longo do ano. As máximas amplitudes para no componente semidiurna ocorreram em maio (4,90 km) e em outubro (4,5 km) e exibindo uma variação.

A Figura 4.1 (d) mostra a fase para a componente diurna (linha preta) e componente semidiurna (linha vermelha) para hmF2 em 2009. As fases para ambos os componentes da maré lunar apresentam variabilidade ao longo do ano em que, para a maré lunar semidiurna os horários em que os máximos ocorrem oscilam em torno das 11 horas e para a maré lunar diurna oscilam em torno das 6 horas.

4.2:Maré lunar em hmF2 e foF2 durante 2010

A Figura 4.2 (a) mostra as amplitudes para a componente diurna (linha preta) e componente semidiurna (linha vermelha) para foF2 em 2010. As amplitudes para ambas as componentes apresentam variabilidade ao longo do ano em que as amplitudes da maré lunar semidiurna são máximas nos meses de abril (0,4 MHz) e outubro (0,4 Mhz), enquanto os valores mínimos foram observados em maio-junho (~0,05 MHz) e entre novembro e janeiro (~0,2 MHz), configurando-se assim num comportamento semianual com máximos em torno dos equinócios. As amplitudes da maré lunar diurna em foF2 durante 2010, assim como em 2009, também foram menores do que as da componente semidiurna, e apresentam variabilidade mês a mês em que os máximos ocorreram entre outubro e janeiro com mínimo em junho, mostrando uma variação aparentemente anual.

As fases das marés lunares diurna e semidiurna no parâmetro foF2 em 2010 são mostradas na Figura 4.2(b). Conforme pode ser visto na figura, a fase da maré lunar semidiurna é estável e pouco variável em torno das 11 horas durante todo o ano. No caso da maré lunar diurna, a fase apresenta maior variabilidade mês a mês em que os máximos ocorrem entre 0 hora e 8 horas.

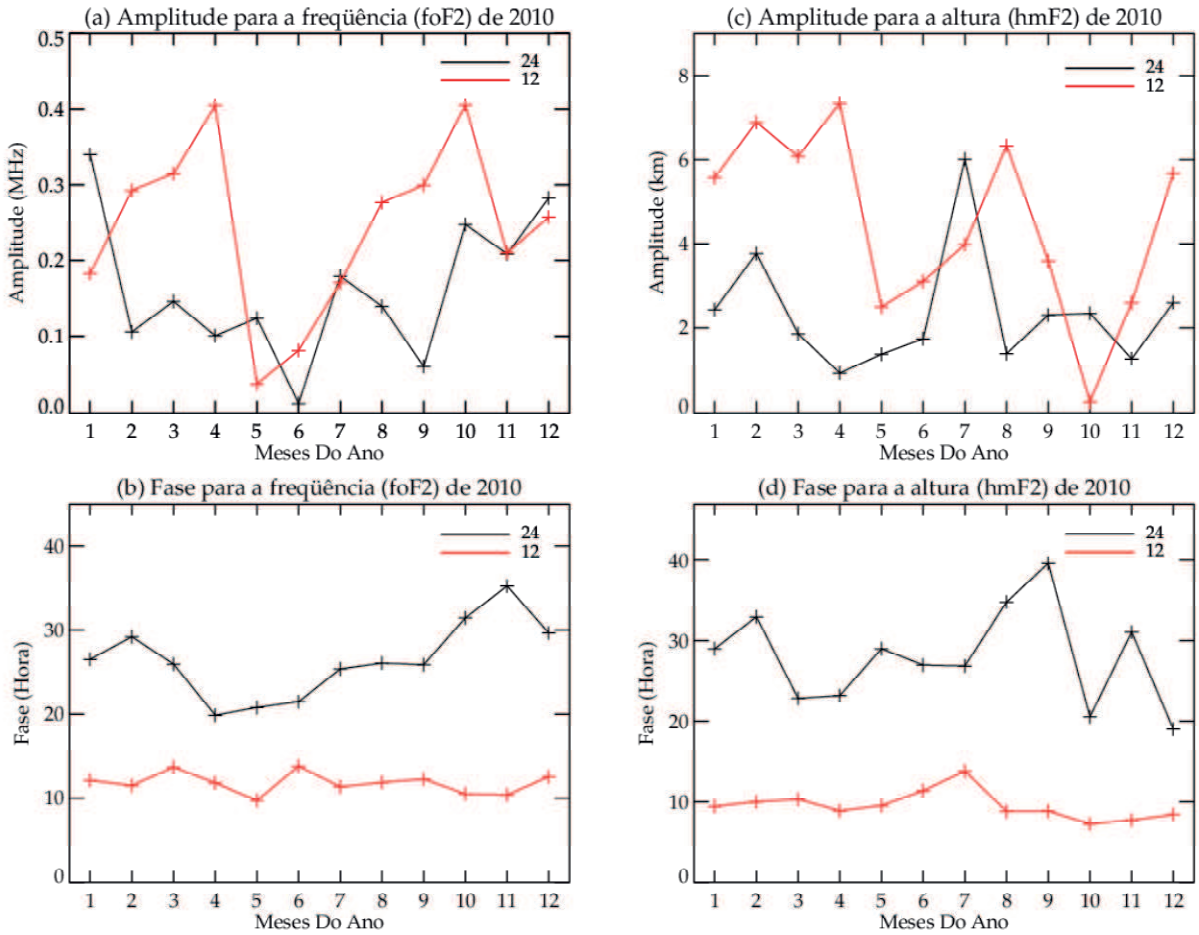

Figura 4. 2: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) nos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2010.

As amplitudes da componente diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) nas medidas de hmF2 obtidas em 2010 são mostradas na Figura 4.2(c). As amplitudes para ambas as componentes apresentam variabilidade ao longo do ano, em que a componente semidiurna tem valores maiores entre janeiro e abril (quando atinge o máximo de 7,34 km) e em agosto (6 km), enquanto as menores amplitudes foram registradas em maio (2,5 km) e em outubro (0,25 km). Em geral as amplitudes da maré lunar diurna foram menores do que as da componente semidiurna, com máximo de 6,02 km em julho. Amplitudes menores do que 2 km foram registradas entre março e junho, em agosto, e em outubro. Os comportamentos ao longo do ano para ambas as componentes não permitem associar um padrão de variação anual ou semianual.

As fases das componentes diurna e semidiurna no parâmetro hmF2 em 2010 são mostradas na Figura 4.2(d). O comportamento ao longo do tempo das fases em hmF2 para ambas as componentes lembram o comportamento das fases para o parâmetro foF2, em que a fase da maré lunar semidiurna é estável e pouco oscila em torno das 10 horas durante todo o ano, enquanto a fase da maré lunar diurna apresenta maior variabilidade mês a mês em que os máximos ocorrem entre 0 hora e 6 horas na maioria dos meses (após correção), contudo ocorrência de máximo as 16 horas também foi registrada em setembro.

4.3: Maré lunar em hmF2 e foF2 durante 2011

As amplitudes da maré lunar para a componente diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) nas medidas de foF2 obtidas em 2011 são mostradas na Figura 4.3(a). As amplitudes para ambas as componentes apresentam variabilidade ao longo do ano, em que a componente semidiurna tem valores maiores entre fevereiro e abril (~0,3 MHz) e em outubro (~0,3 MHz), enquanto as menores amplitudes foram registradas em junho-junho e entre novembro e janeiro. Em geral as amplitudes da maré lunar diurna foram maiores do que as da componente semidiurna, com máximos de 0,4 MHz em maio e em outubro. Assim como no caso da maré lunar semidiurna, as amplitudes menores foram observadas em junho-junho e entre novembro e março. Os comportamentos ao longo do ano para ambas as componentes mostram um padrão de variação semianual.

As fases para as componentes diurna e semidiurna no parâmetro foF2 em 2011 são mostradas na Figura 4.3(b). As fases da maré lunar semidiurna mantêm-se em torno das 12 horas durante todo o ano. Já as fases da maré lunar diurna apresentam maior variabilidade mês a mês em que os máximos ocorrem entre 1 hora e 17 horas.

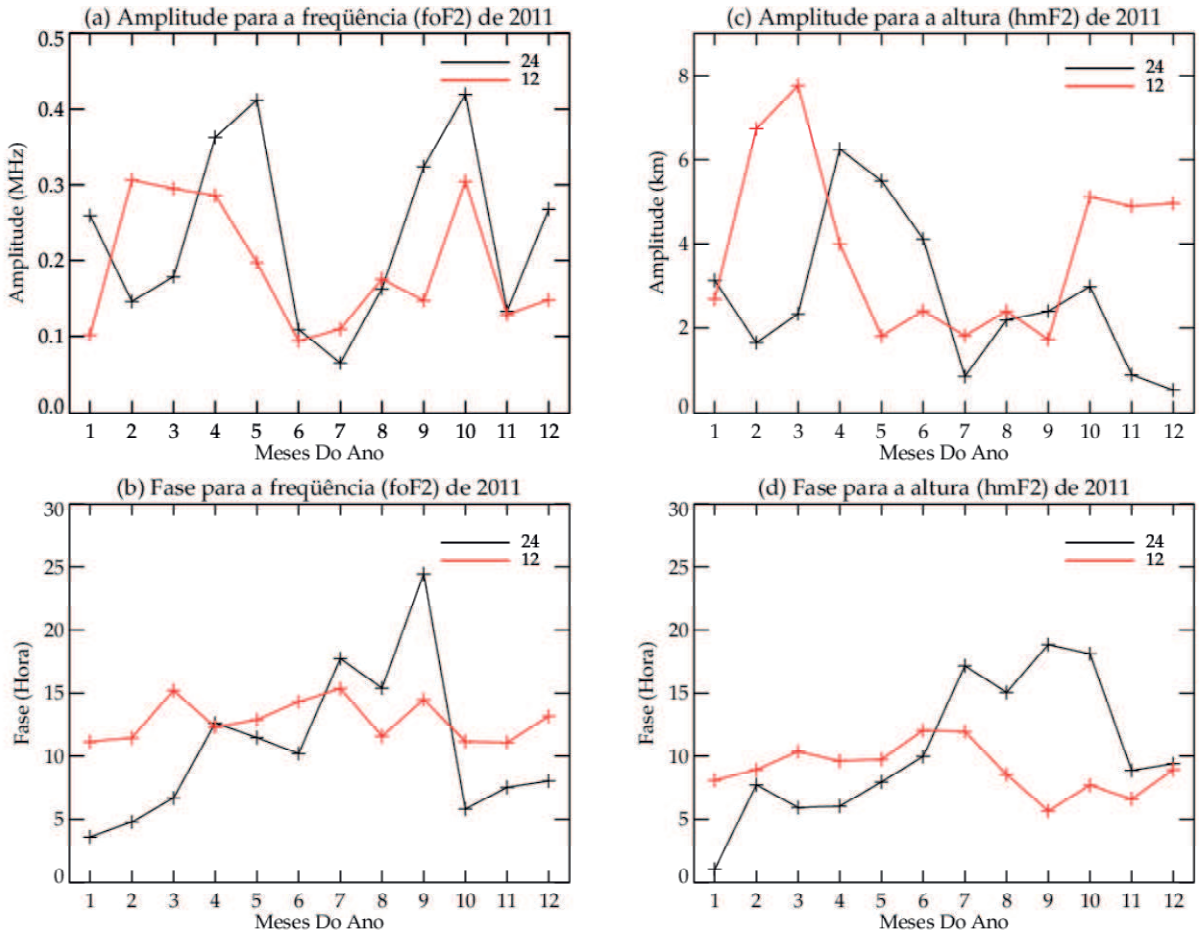

Figura 4. 3: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) nos parâmetros ionosféricos hmF2 e foF2 durante o ano de 2011.

A Figura 4.3 (c) ilustra as amplitudes para as componentes diurna (linha preta) e semidiurna (linha vermelha) para hmF2 em 2011. As amplitudes para ambas as componentes apresentam variabilidade ao longo do ano, em que a componente semidiurna tem valores maiores em fevereiro e março (quando atinge o máximo de ~8 km) e entre outubro e dezembro (~5 km), enquanto as menores amplitudes foram registradas em janeiro (~2,5 km) e entre maio e setembro (~2 km). As amplitudes da maré lunar diurna foram maiores em abril-junho (máximo de 6 km em abril) e os menores valores foram registrados em julho, novembro e dezembro. Assim como em

2010, os comportamentos ao longo do ano para ambas as componentes das marés lunares no parâmetro hmF2 não permitem associar um padrão de variação anual ou semianual.

As fases das marés lunares diurna e semidiurna no parâmetro hmF2 em 2011 são mostradas na Figura 4.3(d). As fases da maré lunar semidiurna mantêm-se em torno das 9 horas durante todo o ano. Já as fases da maré lunar diurna apresentam maior variabilidade em que os máximos ocorrem entre 0 hora e 18 horas.

4.4: Comparação interanual da Maré lunar em foF2

A Figura 4.4 (a) mostra as amplitudes para a componente diurna para o parâmetro foF2 em 2009, 2010 e 2011. A linha preta representa o ano de 2009, a linha vermelha representa 2010 e a linha azul representa 2011. Conforme pode ser visto na figura, as amplitudes da maré diurna apresentam variabilidade interanual em que as observadas em 2011 foram maiores do que nos anos de 2009 e 2010. Também é possível ver que a variação semianual observada nos anos de 2009 e 2011 apresentam máximos coincidentes em maio e outubro. As amplitudes da maré semidiurna (Figura 4.4c) também mostram variabilidade interanual, porém em menor grau do que na componente diurna. Uma variação semianual é claramente observada para todos os anos, em que atingiram maiores valores em abril e outubro, sendo os máximos registrados em 2010.

As fases mensais da maré lunar diurna para o parâmetro foF2 apresentam grande variabilidade interanual, em que os comportamentos para cada ano são distintos. No caso das fases mensais da maré lunar semidiurna é possível perceber que a variabilidade interanual existe, porém em menor grau do que da maré diurna, em que os máximos ocorrem em geral entre ~10 e ~14 horas, sendo que apenas nos meses de maio e junho de 2009 os máximos ocorrem mais cedo.

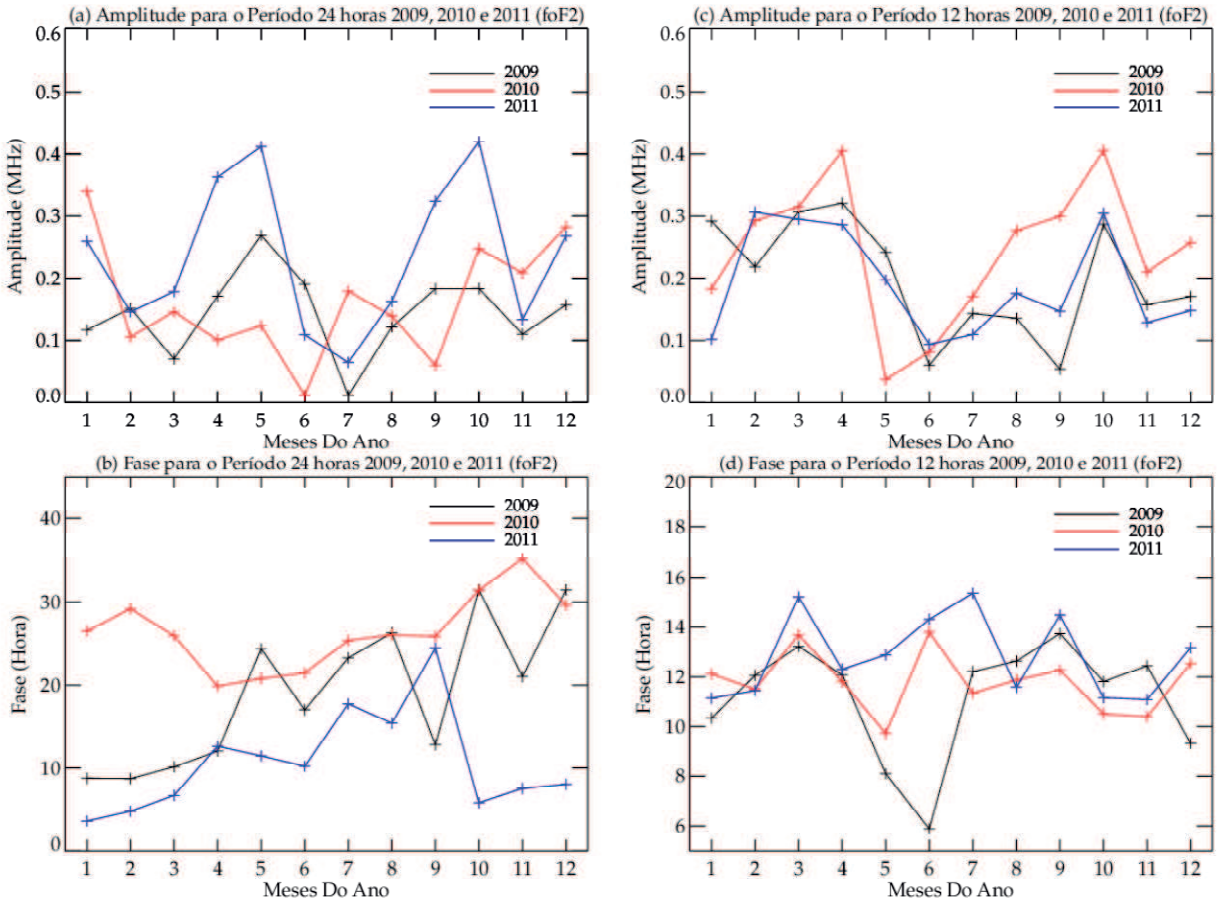

Figura 4. 4: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (painel da esquerda) e semidiurna (painel da direita) nos parâmetro ionosférico foF2 durante os anos de 2009 (linha preta), 2010 (linha vermelha) e 2011 (linha azul).

4.5: Comparação interanual da Maré lunar em hmF2

A Figura 4.5 (a) mostra as amplitudes para a componente diurna para o parâmetro hmF2 em 2009, 2010 e 2011. A linha preta representa o ano de 2009, a linha vermelha representa 2010 e a linha azul representa 2011. As amplitudes da maré diurna apresentam variabilidade interanual em que os comportamentos ao longo do tempo nos anos de 2009 e 2011 apresentam semelhanças.

As amplitudes da maré semidiurna no parâmetro hmF2 (Figura 4.5c) mostram variabilidade interanual mais acentuada do que no parâmetro foF2 (Figura 4.4c), porém em menor grau do que na componente diurna. Assim como no caso da maré lunar

diurna em hmF2, os comportamentos ao longo do tempo durante os anos de 2009 e 2011 apresentam semelhanças.

As fases mensais da maré lunar diurna para o parâmetro hmF2 apresentam variabilidade interanual, em que os comportamentos para os anos de 2009 e 2010 são parecidos. No caso das fases mensais da maré lunar semidiurna observa-se variabilidade interanual, porém os anos de 2010 e 2011 apresentam comportamentos bem parecidos, enquanto as fases no ano de 2009 se afastam das dos anos de 2010 e 2011 rm janeiro e entre agosto e novembro.

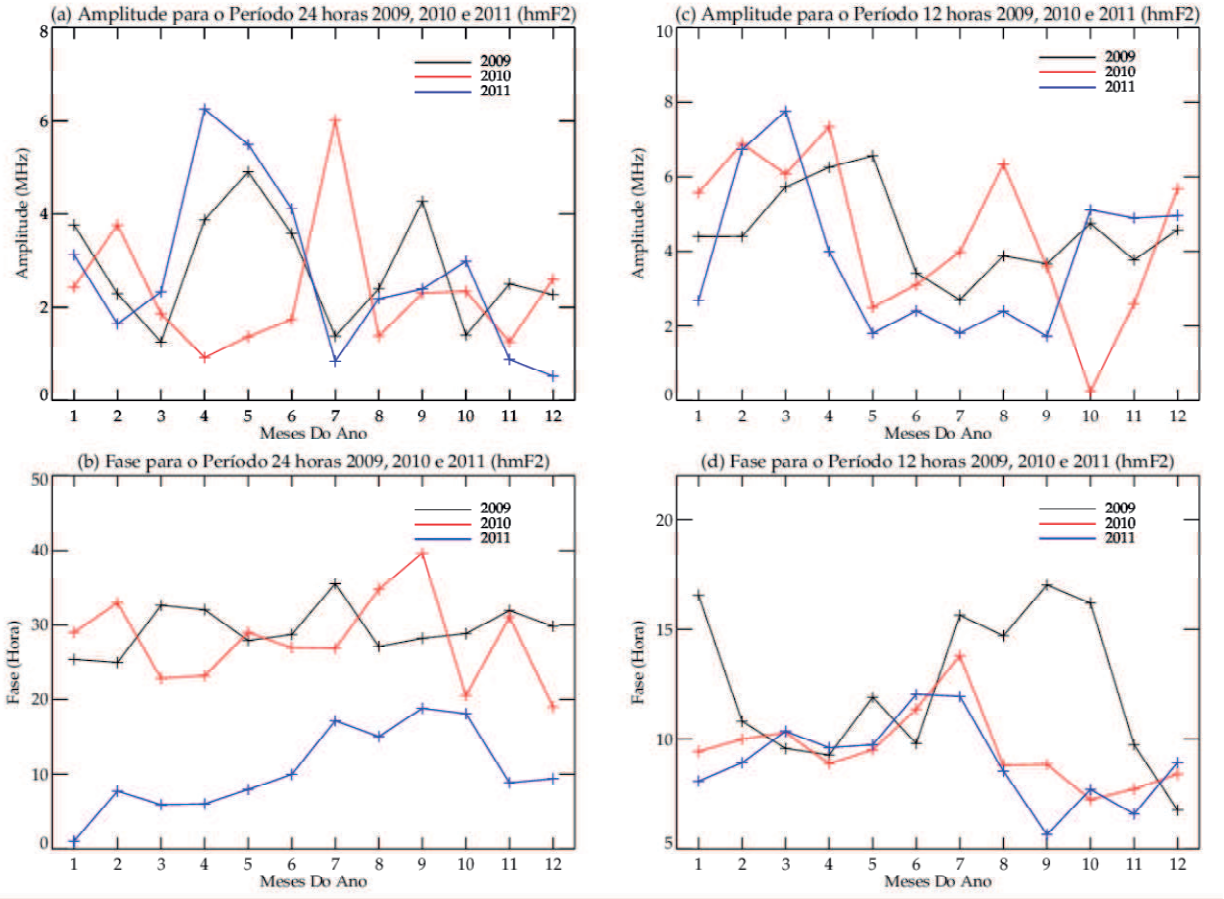

Figura 4. 5: Amplitudes e fases mensais das oscilações diurna (painel da esquerda) e semidiurna (painel da direita) obtidas dos dados dos residuais do parâmetro ionosférico hmF2 durante os anos de 2009 (linha preta), 2010 (linha vermelha) e 2011 (linha azul).

4.6: Discussão

Verificou-se que as marés lunares afetam significativamente a ionosfera com base nos resultados obtidos neste estudo e outros estudos que foram realizados [Moraes et al., 2017; Stening, 1986; Pedatella, 2011; Vince et al, 2011]. As amplitudes para a maré diurna em foF2 para 2009 variaram entre 0,01MHz e 0,26MHz, 2010 variou de 0,01 MHz a 0,34 MHz e 2011 variou de 0,06 MHz a 0,41MHz. Moraes et al. (2017) em seus estudo, a evidência da maré lunar na ionosfera registraram uma faixa de 0.1MHz a 0.24MHz em 2001. Pode-se ver que a menor amplitude neste estudo em 2009 e 2010 em comparação com Moraes et al foi menor enquanto a menor amplitude para 2011 foi mais próxima. A maior amplitude para 2009 neste estudo pode ser dita como um pouco corresponde à maior amplitude alcançada por Moraes et al, em comparação com 2010 e 2011 registrados neste estudo. As amplitudes para as marés semidiurnais em foF2 para 2009 variaram entre 0,05 MHz e 0,32 MHz, enquanto que 2010 variou de 0,03MHz a 0,42MHz e 2011 variou de 0,09 MHz a 0,31MHz. Comparando com Moraes et al, que registraram uma amplitude de 0,05 MHz a 0,26 MHz, pode notar-se que 2009 correspondeu a essa faixa, enquanto os 2010 e 2011 diferiram.Maiores amplitudes entre 0.3MHz e 0.4MHz foram registradas nos anos 2010 e 2011 para o componente diurno e 2009, 2010 e 2011 para o componente semidiurno sem parâmetro foF2 neste estudo. Como amplitudes altas podem ser devidas a uma ionização aumentada quando o Sol verao hemisferio Sul da Terra, o que é necessário aumentar parcialmente uma condução ionosférica e conseqüentemente uma amplitude das ondas maréticas lunares [Schlapp e Malin, 1979].

Tanto nos componentes diurnos quanto semi-diurno do foF2 e hmF2 para 2009, 2010 e 2011, observa-se uma variabilidade sazonal nas amplitudes e fases para os dois parâmetros ionosféricos. Pedatella e Forbes (2010) em seus estudo, "Estrutura global da maré lunar nos conteúdos de elétrons totais de ionosfera" encontrou uma variabilidade diurna sazonal no conteúdo total de elétrons e também Paulino et al. (2012) em seus estudo 'Um aprimoramento de a maré lunar na região de MLT observada no setor brasileiro 2006 o aquecimento estratosférico repentino também estudou a maré semidiurna. As diferenças na distância entre a Terra e o Sol contribuem

em parte para a variação sazonal na maré lunar [Yizengaw e Carter; 2017]. De acordo com Moraes et al (2017), esta variação foi prevista na teoria clássica e tem sido observada na pressão superficial, ventos atmosféricos inferiores, observação geomagnética e camada F ionosférico em altas latitudes [Geller e Schoeberl, 1973; Jones e Jones, 1950, 1971].

A amplitude nos componentes diurnos e semidiurnos nos parâmetros foF2 e hmF2 também apresentou variações semestrais e anuais às vezes durante os anos em estudo. Moraes e outros (2017) estudaram a evidência da maré lunar na ionosfera e encontraram uma natureza semestral para a maré lunar semidiurnal nesta área de estudo para o ano de 2001. Stening (1986) também estudou os efeitos das marés lunares na ionosfera por determinar as variações diurnas e sazonais no componente foF2 também encontrou uma natureza anual e semestral nas amplitudes.

Os anos 2009, 2010 e 2011 caíram no mesmo ciclo solar, mas a atividade solar em cada ano foi diferente. 2011, que experimentou uma alta atividade solar em relação a 2009 e 2010, experimentaram amplitudes média amplas com a média total de 0,24MHz no componente diurno. O componente semidiurnal viu o ano de 2010, que teve uma atividade solar menor registrando uma média mais alta de 0,25MHz no parâmetro foF2. Com base nos dados limitados, não está claro se a atividade solar teve algum efeito sobre as amplitudes, mas a intensificação da amplitude da maré lunar durante os períodos máximos solares pode ser devido ao aumento da condutividade ionosférica. A intensidade da corrente ionosférica depende não apenas dos ventos que conduzem o dínamo ionosférico, mas também da condutividade ionosférica, que depende da intensidade da densidade eletrônica ionosférica que é amplamente influenciada pela atividade solar [Yizengaw e Carter, 2017].

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostraram que as amplitudes para a componente semidiurnas da maré lunare na região F da ionosfera são mais fortes em relação a componente diurna. A variação sazonal da amplitude apresentaram valores menores durante as estações de outono e inverno para os três anos apresentados tanto para a componente diurna quanto para a componente semidiurno do foF2. As amplitudes apresentaram valores menores em torno do mesmo período para hmF2. As variações sazonais semestrais foram apresentadas pelas amplitudes em foF2 e hmF2 em 2009, 2010 e 2011 para o componente semidiurnal. O componente diurno para ambos os parâmetros foF2 e hmF2 apresentou um padrão de variação semestral em 2009 e 2011, mas as amplitudes tanto para foF2 como para hmF2 em 2010 não apresentaram variação semestral ou anual. Eles apresentaram uma variação indefinida. Para concluir concretamente, recomenda-se que mais dados de diferentes anos sejam analisados para determinar as fases e amplitudes e observar claramente as variações anuais das marés lunares na região F da ionosfera.

REFERÊNCIAS

Andrews, D.G, An introduction to atmospheric physics. Cambridge University Press. 2010.

Banks, P.M.; Kockarts, G. Aeronomy Part B. Academic Press New York .1973.

Bartels, J., e Johnston H. F (1940), Geomagnetic tides in horizontal intensity at Huancayo, Terr. Magn. Atmos. Electr., 45(3), 269–308, doi:10.1029/TE045i003p00269

Bertoni, F.C..P. Derivas Ionosféricas Em Latitudes Equatoriais: Observações E Modelagem. (INPE-11240-TDI/946) Tese(Doutorado em Geofísica Espacias) INPE São José dos Campos. Brasil. 551.550.535. 2004.

Bullett, T.W.; Ralls, J.A. The Digisonde 256 Ionospheric Sounder. University of Lowell Center for Atmospheric Research, USA. (1988)

Chapman, S.; Bartels, J. Geomagnetism, Oxford Univ. Press, New York. 1940

Chapman, S.; Lindzen, R. S. Atmospheric Tides: Thermal and Gravitational, 200 pp., Gordon and Breach, New York.1970.

Davies, K. Ionospheric Radio Propagation. U.S. Department of Commerce. National Bureau of Standards. 1965.

Eccles, V., D. D. Rice, J. J. Sojka, C. E. Valladares, T. Bullett, and J. L. Chau (2011), Lunar atmospheric tidal effects in the plasma drifts observed by the Low-Latitude Ionospheric Sensor Network, J. Geophys. Res., 116, A07309, doi:10.1029/2010JA016282.

Fejer, B. G.; Tracy, B. D.; PfafF, R. F.: Equatorial zonal plasma drifts measured by the C/NOFS satellite during the 2008–2011 solar minimum, J. Geophys. Res. Space Phys., 118, 3891–3897, doi:10.1002/jgra.50382, 2013.

Forbes, J.M. The Equatorial Electrojet. Reviews of Geophysics. Agu Journal. 1981.

Forbes, J. M., Zhang, X., Bruinsma, S., and Oberheide, J. (2013). Lunar semidiurnal tide in the thermosphere under solar minimum conditions. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 118(4):1788–1801.

Geller, M. A., and Schoeberl M. R.*, 1973, A calculation of the lunar diurnal atmospheric tide, Riv. Ital. Geofis., 22, 379–384*

Hagan, M. E.; Burrage, M.D.; Forbes, J. M.; Hackney, J.; Randel, W. J.; Zhang, X., GSWM-98: Results for migrating solar tides, J. Geophys. Res., 10•, 6813-6828, 1999.

Hargreaves, J.K. The solar-terrestrial environment: An introduction to geospace - the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. Cambridge University Press. 1992.

Haurwitz, B. e Crowley, A.D.,(1969): 'Lunar Semi-diurnal wind variations at Hong Kong and Upsala', Quart.j.Roy.Meteorol.Soc.95,766-770

Jin, H. Ionospheric Dynamo Process. Journal of National institute of Information and Communication Technology. Vol. 56, No. 1-4, pp. 209-221.2009.

Jones, M. W., and Jones, J. G., *1950, Tidal effects in the Ionospheric F-layer, J. Atmos. Sci., 7, 14–20.*

Kelley, M. C. The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics. New York: Academic Press, 1989.

Kelley, M. C. The Earth's ionosphere: plasma physics and electrodynamics. New York: Academic Press, 2009.

Kivelson, M. G.; Russell, C. T. Introduction to Space Physics, p. 291–292, Cambridge Univ. Press, New York.1995.

Lomb, N. R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. Astrophysics and space science, 39(2):447–462.

Matsushita, S. Lunar tides in the ionosphere, Handb. Phys., 49(2), 547. 1967.

Park, J.; Ehrlich, R., Lühr, H., Ritter, P. Plasma irregularities in the high-latitude ionospheric F-region and their diamagnetic signatures as observed by CHAMP, J. Geophys. Res., **117**, A10322, doi:10.1029/2012JA018166. 2012.

Paulino, A., Batista, P., and Clemesha, R. (2012). Lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere over cachoeira paulista (22.7° s; 45.0° w). Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 78:31–36.

Paulino, A. R., Batista P. P., Clemesha B. R., Buriti R. A., and Schuch N. *2012, An enhancement of the lunar tide in the MLT region observed in the Brazilian sector during 2006 SSW, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., 90–91, 97-103.*

Pedatella, N. M.; Forbes, J. M. Global structure of the lunar tide in ionospheric total electron content, Geophys. Res. Lett., 37, L06103, doi:10.1029/2010GL042781. 2010.

Pedatella, N. M. Observations and simulations of the ionospheric lunar tide: Seasonal variability, J. Geophys. Res. Space Physics, 119, 5800–5806,doi:10.1002/2014JA02018. 2014.

Reinisch, B.W et.,al (1995) Ionospheric electrodynamics using magnetic apex coordinates. Journal of geomagnetism and geoelectricity. Vol. 47, issue 2, pps.191-212.

Salby, M.L. Physics of the Atmosphere and Climate, Cambridge University Press. QC861.3.S257 2011 551.5–dc23 2011033950. 2012.

Sandford, D.J., Mitchell, N.J.; Vincent, R.A.; Murphy D.J. The lunar tides in the Antarctic mesosphere and lower thermosphere. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 69 (2007) 2219–2237.

Scargle, J. D. (1982). Studies in astronomical time series analysis. ii-statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. The Astrophysical Journal, 263:835–853.

Schlapp, D. M. and Malin, S. R. C.: Some features of the seasonal variation of geomagnetic lunar tides, Geophys. J. Inter., 59, 161– 170, 1979.

Schunk, R.; Nagy, A. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry Second Edition. Cambridge Atmospheric and Space Science Series. 2009.

Schwiderski, E.W. Ocean Tides II: A hydrodynamical interpolation model. J.Mar. Geod. , 1979.

Siebert,M. Masszahlen der erdmagnetischen Aktivitaet, in Handbuch der Physik, vol. 49/3, 206-275, Springer, Berlin Heidelberg, 1971.

Stening, .R.J. Lunar Effects In the F region of the Ionosphere. Journal of Geophysical Research, Vol. 91, No A4, Pages 4581-4584, 1986.

Stening, R.J.; Meek, C.E.;Manson, A.H. Lunar Tidal Winds measured in the Upper Atmosphere(78km-105km) at Saskatoon,Canada. 1987.

Stening, R. J.; Richmond, A. D.; Roble, R. G. Lunar tides in the thermosphere-ionosphere-electrodynamics general circulation model, J. Geophys. Res., vol.104, no. A1, pp.1–13. 1999.

Stening, R.J. The Lunar Tide In Sporadic E. Ann. Geophysicae 17, 1344-1351. 1999.

Stening, R.J.; Fejer, B.G. Lunar tide in the equatorial F region vertical ion drift velocity. Journal of Geophysical Research,vol. 106, No. A1, Pages 221-226, January 1, 2001.

Tracy, D.B. Lunar tidal Effects in the Electrodynamics of the Low-latitude Ionosphere. Thesis (Master of Science in Physics) Utah State University Logan, Utah. 2013.

Vial, F.; Forbes, J. M. Monthly simulations of the lunar semi- diurnal tide, J. Atmos. Terr. Phys., 56, 1951–1607. 1994.

Volland,H. Atmospheric Electrodynamics. Physics and chemistry in Space. 1984.

Yizengaw, E. e Carter, B. A.: Longitudinal, seasonal and solar cycle variation in lunar tide influence on the equatorial electrojet, Ann. Geophys., 35, 525-533, https://doi.org/10.5194/angeo-35-525-2017, 2017.