



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16680-TDI/1625

MARÉ LUNAR OBSERVADA COM RADAR METEÓRICO EM TRÊS LATITUDES NO BRASIL

Ana Roberta da Silva Paulino

Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelo Dr. Paulo Prado Batista, aprovada em 19 de fevereiro de 2010

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.04.15.32>>

INPE
São José dos Campos
2010

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

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

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

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

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

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

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

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

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



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-16680-TDI/1625

MARÉ LUNAR OBSERVADA COM RADAR METEÓRICO EM TRÊS LATITUDES NO BRASIL

Ana Roberta da Silva Paulino

Dissertação de Mestrado do curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial,
orientada pelo Dr. Paulo Prado Batista, aprovada em 19 de fevereiro de 2010

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/02.04.15.32>>

INPE
São José dos Campos
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Paulino, Ana Roberta da Silva.

P283m Maré lunar observada com radar meteórico em três latitudes no Brasil / Ana Roberta da Silva Paulino. – São José dos Campos : INPE, 2010.

xviii + 79 p. ; (INPE-16680-TDI/1625)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

Orientador : Dr. Paulo Padro Batista.

1. Maré lunar atmosférica. 2. Radar meteórico. 3. Dinâmica da média atmosfera. 4. Mesosfera. 5. Ventos de alta atmosfera. I.Título.

CDU 551.511.3(81)

Copyright © 2010 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita do INPE, com exceção de qualquer material fornecido especificamente com o propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.


Copyright © 2010 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming, or otherwise, without written permission from INPE, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Geofísica Espacial

Dr. Alexandre Alvares Pimenta


Presidente / INPE / SJCampos - SP

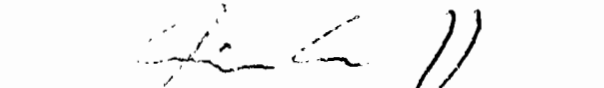
Dr. Paulo Prado Batista


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP


Dr. Barclay Robert Clemesha


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Dra. Alcía Luíza Clúa de Gonzalez Alarcon


Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Lourivaldo Mota Lima


Convidado(a) / UEPB / Campina Grande - PB

Aluno (a): Ana Roberta da Silva Paulino

São José dos Campos, 19 de fevereiro de 2010

A meu esposo Igo Paulino

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Dr. Paulo Prado Batista pela orientação e empenho no desenvolvimento desse trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq), pela concessão da bolsa de pesquisa.

A meus pais e irmãos que mesmo distante me apoiaram em todos os momentos.

A meu esposo Igo Paulino pelas palavras de incentivo, apoio e dedicação.

Aos amigos Rosangela e Valentin pelo apoio e atenção dedicada quando cheguei em São José do Campos.

Aos colegas do curso de Geofísica Espacial por todos os momentos que compartilhamos juntos.

A todos os professores pela disposição em dividir seus conhecimentos durante os cursos ministrados.

Ao banco de dados do CEDAR, em especial à Dra. Barbara Emery, por gentilmente fornecer os dados do modelo Vial e Forbes (1994) para a Maré Lunar Atmosférica Semidiurna.

RESUMO

Usando dados de radares meteorológicos de três localidades brasileiras [São João do Cariri ($7,4^{\circ} S$; $36,5^{\circ} W$), Cachoeira Paulista ($22,7^{\circ} S$; $45,0^{\circ} W$) e Santa Maria ($29,7^{\circ} S$; $53,8^{\circ} W$)] foi possível estudar a maré lunar atmosférica semidiurna na região da mesosfera e baixa termosfera para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2008. Para determinação das amplitudes e fases mensais da maré foram utilizados ventos médios horários de sete camadas com quatro quilômetros de espessura centradas em 81, 84, 87, 90, 93, 96 e 99 km de altitudes. Verificou-se que os perfis de amplitudes e fases da maré lunar semidiurna para três localidades mostraram características gerais de ondas verticalmente propagantes na atmosfera, ou seja, amplitudes crescentes e progressões de fases descendentes com a altitude. Em São João do Cariri, durante quase todo o ano, as amplitudes da componente meridional foram maiores que a componente zonal e as fases apresentaram características equatoriais de hemisfério Sul. Em Cachoeira Paulista, as amplitudes médias sobre todas as altitudes apresentaram valores maiores na componente meridional e as fases apresentar característica de hemisfério Sul durante quase todo o ano. Santa Maria apresentou valores de amplitudes entre 1,0 e 8,0 m/s para a componente meridional e entre 1,0 e 5,0 m/s para a componente zonal. Em relação à fase, observou-se características de hemisfério Sul, exceto nos meses de junho e setembro. Em alguns aspectos, as três localidades apresentaram semelhanças com o modelo de Vial e Forbes (1994) para a maré lunar atmosférica semidiurna.

LUNAR TIDE OBSERVED WITH METEOR RADAR AT THREE LATITUDES IN BRAZIL

ABSTRACT

Using meteor radar data from three Brazilian sites [São João do Cariri (7.4° S ; 36.5° W), Cachoeira Paulista (22.7° S; 45.0° W) and Santa Maria (29.7° S; 53.8° W)], the atmospheric semidiurnal lunar tide in the mesosphere and lower thermosphere was studied from January 2005 to December 2008. Monthly tidal amplitudes and phases were determined using hourly mean winds in seven layers of four kilometer thickness each, centered in 81, 84, 87, 90, 93, 96 and 99 km of height. The amplitudes and phases profiles of the semidiurnal lunar tide over the three sites showed general characteristics of vertically propagating waves in the atmosphere, in other words, the amplitudes were increasing and the phases showed progression with decreasing heights. Over São João do Cariri, during almost all year, the amplitudes of the meridional component were greater than the zonal component and the phases presented equatorial characteristics of South Hemisphere. Over Cachoeira Paulista, the mean amplitudes over all heights were greater in meridional component and the phases presented characteristics of South Hemisphere. Santa Maria presented meridional amplitudes between 1.0 and 8.0 m/s and the zonal component amplitudes were between 1.0 and 5.0 m/s. In relation the phase, characteristics of South Hemisphere were also observed, except during June and September . In several aspects, the three sites presented similarities with the Vial and Forbes (1994) atmospheric semidiurnal lunar tidal model.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Representação das Fases da Lua. Nessa Figura, a órbita que a Lua descreve em torno da Terra visualizada por um observador externo olhando para o Pólo Sul terrestre é representada ao longo da elipse. A outra parte da figura mostra a configuração da Lua visualizada por um observador no hemisfério Sul da Terra.	12
2.2 Esquema de três Luas Novas consecutivas.	15
2.3 Configuração da relação entre o tempo solar e lunar e do ângulo da fase lunar.	16
2.4 Geometria para o cálculo de potenciais de marés.	16
2.5 Esquema para a determinação do ângulo zenital.	18
2.6 Amplitudes da maré lunar atmosférica semidiurna previstas pelo modelo Vial e Forbes (1994), para a componente zonal (painel superior) e para a componente meridional (painel inferior) ao longo das latitudes e do ano.	21
2.7 Na coluna da esquerda são mostrados os comportamentos verticais das amplitudes médias sobre todas as latitude da maré lunar atmosférica semidiurna para as componentes zonal (superior) e meridional (inferior) ao longo do ano e na coluna da direita são mostradas as fases.	22
3.1 Representação do processo de formação de meteoros na atmosfera	23
3.2 Distribuição das antenas receptoras do radar meteórico instalado em São João do Cariri.	26
3.3 Esquema das antenas transmissora e receptora do radar SKiYMET. . . .	26
3.4 Esquema mostrando a altura do meteoro (Z) e o alcance (R).	28
3.5 Eco meteórico fornecido pelo Radar Meteórico instalado em Santa Maria (29, 7°S; 53, 8°W).	29
3.6 Representação das componentes da velocidade radial de uma trilha meteórica	30
4.1 Gráficos de contorno para a componente meridional da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.	38

4.2	Gráficos de contorno para a componente zonal da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.	39
4.3	Variação da amplitude da maré lunar semidiurna com a altitude. A linha preta representa as amplitudes da componente meridional, a linha vermelha da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha são a amplitude da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).	41
4.4	Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).	42
4.5	Amplitudes (painel superior) e fases (painel inferior) médias da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal, respectivamente, para São João do Cariri. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).	44
4.6	Gráficos de contorno para a componente meridional da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.	46
4.7	Gráficos de contorno para a componente zonal da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.	47
4.8	Variação da amplitude da maré lunar semidiurna com a altitude. A linha preta representa as amplitudes da componente meridional, a linha vermelha da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha são a amplitude da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).	49

4.9	Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).	50
4.10	Amplitudes médias (painel superior) e fases (painel inferior) da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal para Santa Maria. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).	52
4.11	Gráficos de contorno para a componente meridional da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.	54
4.12	Gráficos de contorno para a componente zonal da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.	55
4.13	Variação da amplitude da maré lunar semidiurna com a altitude. A linha preta representa as amplitudes da componente meridional, a linha vermelha da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha são a amplitude da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).	57
4.14	Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).	58
4.15	Amplitudes médias (painel superior) e fases (painel inferior) da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal para Cachoeira Paulista. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).	59

4.16	Comportamento médio da amplitude e fase ao longo do ano para os dados observados e o modelo. A linha preta designa amplitude e fase para São João do Cariri, a linha vermelha para Santa Maria e a linha azul para Cachoeira Paulista.	61
4.17	Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo.	67
4.18	Amplitudes médias (painel superior) e fases (painel inferior) da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal para Cachoeira Paulista. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).	68
A.1	Representação do desvio padrão da amplitude média e do vetor. Adaptado: Malin e Schlapp (1980)	79

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 MARÉ LUNAR ATMOSFÉRICA	5
2.1 Aspectos Históricos	5
2.2 Recentes Estudos da Maré Lunar na Alta Atmosfera	7
2.3 Fases da Lua	12
2.4 Período Lunar	13
2.5 Função de excitação gravitacional	16
2.6 Descrição geral do Modelo Vial e Forbes (1994)	19
3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	23
3.1 Instrumentação	23
3.1.1 Região Meteórica	23
3.1.2 Radar Meteórico	25
3.1.3 Radar Meteórico SKiYMET	25
3.1.4 Parâmetros Medidos Pelo Radar SKiYMET	28
3.2 Metodologia	30
3.2.1 Determinação do Vento	30
3.2.2 Determinação da Maré Lunar Semidiurna	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
4.1 Resultados	37
4.1.1 São João do Cariri	37
4.1.2 Santa Maria	45
4.1.3 Cachoeira Paulista	52
4.1.4 Comparação entre as três localidades	60
4.2 Discussões	62
5 CONCLUSÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
APÊNDICE A - Média Vetorial e Estimativa do Erro	77

1 INTRODUÇÃO

A maré lunar atmosférica desempenha um papel importante para os campos atmosféricos, assim como a maré oceânica para as correntes marítimas. Diferentemente da maré oceânica, a maré atmosférica lunar tem sido pouco estudada devido a dificuldade em extrair suas contribuições dos espectros dos campos atmosféricos, isto porque, a maré lunar tem frequência próxima de outros fenômenos atmosféricos.

A dinâmica da mesosfera e baixa termosfera (região da MLT, do inglês “Mesosphere and Lower Thermosphere”) é dominada pela propagação de ondas e marés, geradas em alturas inferiores. As marés podem ser geradas termicamente pelo aquecimento da atmosfera através da radiação solar e pela combinação das atrações gravitacionais solar e, principalmente, lunar.

A maré lunar atmosférica é gerada na baixa atmosfera pela atração gravitacional da Lua e de forma secundária devido a contribuição de efeitos do movimento vertical dos oceanos no limite inferior da atmosfera. Segundo [Vial e Forbes \(1994\)](#) as marés oceânicas e terrestres podem agir de duas maneiras na maré atmosférica lunar, modificando o potencial gravitacional da maré e através dos efeitos dinâmicos devido ao fato que a atmosfera está sujeita aos movimentos verticais na interface com a Terra ou oceanos.

A principal diferença entre a fonte de excitação da maré solar e lunar é a variabilidade. O aquecimento da atmosfera devido à radiação solar e a distribuição de ozônio e vapor d’água são bastantes variáveis. Por outro lado, a excitação gravitacional é bem conhecida e afeta, principalmente, os níveis inferiores onde a densidade atmosférica é maior.

A maior dificuldade em determinar a maré lunar é que as amplitudes são relativamente baixas (quando comparadas com a maré solar) e pode existir sobreposições de outras oscilações como ondas de gravidade, ondas planetárias e a própria maré solar semidiurna que possui um período bem próximo da maré lunar semidiurna. Apesar dessa dificuldade, a maré lunar atmosférica já foi detectada e caracterizada para baixas, médias e altas latitudes na região da MLT ([STENING et al., 1987](#); [STENING; VINCENT, 1989](#); [STENING et al., 1994](#); [STENING et al., 1997](#); [STENING et al., 2003](#); [NIU et al., 2005](#); [SANDFORD et al., 2006](#); [SANDFORD; MITCHELL, 2007](#); [SANDFORD et al., 2007](#)).

A maré lunar gerada na troposfera sofre modificações consideráveis pelas condições da média atmosfera. Com isso, a determinação dessa oscilação é de interesse, pois pode ajudar no entendimento de como as condições da média atmosfera agem sobre as marés a medida que estas se propagam nessa região.

A maré lunar possui vários modos, porém a que possui uma amplitude mais significativa é a maré lunar semidiurna migrante, com um período de $\sim 12,424$ h (*hora solar*) o correspondente a $\sim 1,932$ ciclos por dia. A componente diurna com um período de $\sim 24,848$ h (*hora solar*), tem uma amplitude $\sim 40\%$ da componente semidiurna (STENING; VINCENT, 1989).

Nesse trabalho será mostrado um estudo detalhado do comportamento das amplitudes e fases da maré lunar semidiurna na região da MLT, usando dados de ventos obtidos pelos radares meteorológicos instalados em São João do Cariri ($7,4^\circ$ S ; $36,5^\circ$ W), Santa Maria ($29,7^\circ$ S; $53,8^\circ$ W) e Cachoeira Paulista ($22,7^\circ$ S; $45,0^\circ$ W). O conjunto de dados analisados foi para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2008. Também serão mostrados os resultados da comparação com o modelo Vial e Forbes (1994).

Além da introdução esse trabalho possui mais quatro capítulos, os quais estão estruturados da seguinte forma:

- O Capítulo 2 tem por objetivo fazer uma descrição teórica da maré lunar atmosférica, para isto é apresentada uma breve revisão histórica dos estudos realizados com dados barométricos e os mais recentes que utilizam dados de vento medidos por radares. Além disso, são abordados conceitos básicos utilizados no estudo da maré lunar como, as fases da Lua e tempo lunar. É feita uma descrição da fonte de excitação da maré lunar e, por fim, uma descrição geral do modelo Vial e Forbes (1994).
- No Capítulo 3 são apresentadas, descrições do radar meteorológico, detalhes da determinação do vento e o método de extração da maré lunar semidiurna usando dados de radar meteorológico.
- No Capítulo 4 são apresentados os resultados e discussões, que consistem na observação da variabilidade sazonal e variações com a altitude das amplitudes e fases da maré lunar semidiurna para três localidades brasileiras.

Os resultados são comparados com modelo numérico. Nesse Capítulo também são feitas algumas discussões sobre trabalhos reportados para latitude similares, além de algumas sugestões para explicar os comportamentos observados.

- No quinto Capítulo são sumarizadas as principais conclusões do trabalho.
- No apêndice A é mostrada a descrição matemática da determinação da média vetorial e da estimativa do erro como medida do desvio padrão.

2 MARÉ LUNAR ATMOSFÉRICA

Esse capítulo aborda, na primeira seção, alguns aspectos históricos da maré lunar atmosférica. Na seção seguinte serão introduzidos alguns conceitos básico como: fases da lua, dia lunar e mês lunar ou mês sinódico. Na terceira seção será feita uma discussão sobre a função de excitação da maré lunar atmosférica e na última seção será apresentada uma descrição geral do modelo Vial e Forbes (1994).

2.1 Aspectos Históricos

Aristóteles (350 a.C.) foi um dos primeiros a associar a subida e descida do nível dos oceanos com a passagem da Lua. Posteriormente, Pytheas (320 a.C.) conseguiu perceber uma variação semidiurna em que uma das subidas estava associada com a passagem da Lua sobre o local e a outra subida estava relacionada a passagem da Lua pelo lado oposto.

Já os estudos sobre a Maré Lunar na atmosfera tiveram início com os estudos teóricos e observações barométricas realizados por Newton e Laplace. Eles tentaram determinar a Maré Lunar com oito anos de observações, fazendo quatro medidas diárias com intervalos desiguais, em um observatório em Paris. A amplitude obtida foi de $7,2 \text{ Pascal (Pa)}$, mas verificando os prováveis erros nos resultados concluíram que os cálculos não eram realísticos.

Esse cálculo foi estendido por Bouvard, para um conjunto de dados de 12 anos de 1815 a 1827, o qual obteve uma amplitude de $2,34 \text{ Pa}$, com máximo em 2 h e 14 h do período médio lunar. A grande diferença entre os valores obtidos por Bouvard e os obtidos por Laplace levou a conclusão, que em ambos os casos, os conjuntos de dados eram insuficientes para se obter resultados confiáveis.

Em 1843 Eisenlohr reiniciou os cálculos com vinte e dois anos de dados mas, não utilizou o mesmo método de Laplace (que envolve unicamente diferenças entre medidas do mesmo dia, eliminado a influência de grandes mudanças na pressão dia a dia). Em seu método Eisenlohr organizou os dados de acordo com a hora lunar, para uma grande quantidade de dados, esse método pode levar a resultados satisfatórios, mas o seu conjunto de dados não foi suficiente, pois quando fez o ajuste, os seus cálculos foram afetados pela grande variação temporal da pressão. Então ele concluiu que o seu conjunto de dados era insuficiente para determinação da maré lunar e sugeriu que as medidas de barômetro fossem horárias para que se tivesse uma longa série de

dados tornando possível a determinação da maré lunar atmosférica.

Alguns estudos da maré lunar atmosférica realizados na região tropical:

- Em 1842, Lefroy, diretor do observatório St. Helena (ilha localizada no Atlântico Sul, com coordenadas $15^{\circ}55' S$ e $5^{\circ}42' W$) usando dezessete anos de dados com medidas a cada duas horas feitas por barômetro determinou a maré lunar semidiurna, também conhecida como L_2 , para a região tropical;
- Seu sucessor Smythe junto com Sabine confirmaram a determinação para medidas horárias para mais três anos de dados e mostraram que essas marés são maiores próximo ao perigeu do que ao apogeu;
- Em 1852 o diretor do observatório de Singapura, Elliot determinou L_2 para cinco anos de dados;
- Em 1866, quando o observatório de Batávia (hoje Jakarta região equatorial da Indonésia) foi estabelecido, Bergsma e Van der Stok determinaram a maré lunar L_2 para dados barométricos horários e em 1905 determinaram para 350000 observações cobrindo quarenta anos de dados.

Alguns estudos da maré lunar atmosférica na região fora dos trópicos:

- Alguns estudiosos como Kreil (1841), Bouquet de La Grye (1841), Neumayer (1867) tentaram exaustivamente encontrar as variações da maré Lunar na atmosfera para regiões fora dos trópicos através de dados barométricos, até que Airy (1877) chegou a seguinte conclusão “nós podemos afirmar que não há traços da maré Lunar na atmosfera”.
- Bornstein (1891) analisando quatro anos de dados concluiu que não havia traço da variação semidiurna na atmosfera produzida por uma maré Lunar e sim uma variação diurna, resultado também compartilhado por Wegener (1915).
- Bartels (1927) mostrou que essas conclusões eram apenas mal interpretações e supôs que as variações diurnas lunares eram um efeito de causalidade.
- Com uma nova tentativa Chapman usando dados barométricos horários de Greenwich determinou a maré lunar semidurna, usando a teoria dos erros aleatórios.

2.2 Recentes Estudos da Maré Lunar na Alta Atmosfera

Nessa seção são apresentados alguns estudos realizados para a região da mesosfera e baixa termosfera, com o uso, em algum desses trabalhos, de dados de vento obtidos por radares meteorológicos, além de estudos da maré lunar semidiurna na ionosfera e no campo geomagnético.

Stening e Winch (1979), analisaram a variação sazonal da amplitude e fase da maré lunar em cada um das três variáveis magnéticas (H, D, e Z) para 130 estações, através da análise de Fourier. Com esse estudo encontraram grandes variações semianuais na amplitude em que o máximo anual ocorre frequentemente em fevereiro ou em agosto e algumas mudanças na fase foram observadas entre outubro e novembro, comportamento similar ao reportado para a maré solar semidiurna. Em alguns casos a esperada mudança de fase em L(H) com a latitude não foi encontrada, além disso alguns exemplos da variação da maré com a longitude foram mostrados.

Stening et al. (1987), utilizaram um conjunto de seis anos de dados de ventos, para Saskatoon (Canadá), medidos por técnica de reflexão parcial. Os dados foram analisados a cada dois anos com intervalos de 3 *km* de altura. Com essa análise uma variação sazonal mês a mês foi encontrada, com as maiores amplitudes da maré lunar ocorrendo nos meses de janeiro-fevereiro e com um pequeno máximo no verão. O comprimento de onda vertical encontrado foi longo no verão e a maré então se assemelhou a prevista pelo modo puro (2, 2). No inverno o comprimento de onda vertical alcançou 25 *km* em 81 *km* de altitude para diferentes anos.

Stening (1989), com a análise de dados geomagnéticos de algumas estações localizadas na região equatorial, verificaram que a amplitude da maré lunar semimensal frequentemente não tem a simetria esperada em torno do meio dia na sua variação diurna. Eles observaram uma tendência de grandes amplitude pela manhã e em muitos observatórios esse efeito é maior nos meses de equinócio, apesar de existir diferença regional. Análise de dados de diferentes anos confirma esse resultado. A interação entre a maré solar e lunar na média atmosfera pode ser responsável pela modulação observada.

Stening e Vincent (1989) analisaram a maré lunar semidiurna (semimensal) nos ventos medidos em Adelaide (35° S, 138° E) no intervalo de altitude de 76 à 98 *km*, para dois conjuntos de dados, um de aproximadamente dois anos e outro de um

ano. A análise desses dados mostraram que a amplitude da maré lunar geralmente tem valores máximos nos equinócios, apesar disto, houve mudanças nesse padrão entre 1984-1985 nas altitudes mais elevadas. As amplitudes médias diurna chegaram a 4 m/s e os comprimentos de onda verticais para a maré propagante foram variáveis, existindo evidências de possíveis modos acoplados e de interferência. No verão, comprimentos de onda verticais de 25 km ocorrem abaixo de 92 km de altitude e são evanescentes acima, enquanto que no inverno, grandes comprimentos foram encontrados no intervalo de 78 a 90 km de altitude, com valores pequenos acima desse intervalo. Comparações da fase com resultados obtidos em Saskatoon ($52^\circ\text{ N}, 107^\circ\text{ W}$) e Kyoto ($35^\circ\text{ N}, 136^\circ\text{ E}$) sugerem que em torno de 95 km modos antissimétricos podem ser dominantes em junho e dezembro e modos simétricos em fevereiro.

Stening et al. (1994), realizaram um estudo da maré lunar para um conjunto de dados para Adelaide e Saskatoon. A análise da variação com a altitude para a fase e amplitude da maré mostraram variabilidades consideráveis ano a ano e que variações sazonais ocorreram em altitudes particulares. As fases da maré para Adelaide e Saskatoon são comparadas a fim de estimar se a maré é simétrica ou antissimétrica, para isto o conjunto de dados foi separado em grupos. A predominância da maré simétrica durante os meses de solstício e da maré antissimétrica nos meses de equinócios foi uma surpresa, todavia o resultado está completamente de acordo com as fases da maré lunar geomagnética.

Stening et al. (1997), reportam as primeiras medidas da maré lunar na alta atmosfera com ventos para a região equatorial. Nesse estudo foram utilizadas as velocidades do vento medidas em Christmas Island ($2^\circ\text{ N}, 203^\circ\text{ E}$), no Oceano Pacífico, de 1990 à 1993 no intervalo de altitude de 82 a 98 km . Os valores horários do vento foram utilizados para deduzir a maré lunar pelo método dos mínimos quadrados. Como resultado desse estudo foram obtidos valores para amplitude de 1 a 3 m/s . Pequenas mudanças sazonais foram observadas na fase, porém uma grande mudança de fase sobre a primeira parte de 1990 foi encontrada no vento meridional. Geralmente, a diferença de fase entre o vento meridional e zonal é de aproximadamente 6 horas e uma boa concordância foi obtida com o modelo desenvolvido por Forbes (1982).

Em outro trabalho, Stening et al. (1997) usaram um modelo para maré lunar similar ao modelo de Forbes (1982) para investigar os efeitos de mudanças no vento zonal de fundo na estrutura da maré lunar na alta atmosfera. Eles encontraram que mudanças

no vento tem um efeito maior que mudanças no perfil de temperatura de fundo com a latitude. Mudanças observadas na estrutura da maré lunar ano a ano em Saskatoon podem ser explicadas pela introdução de aquecimento estratosférico no modelo.

Stening (1999), fez um estudo dos efeitos da maré lunar semidiurna na camada E esporádica baseado na teoria de cisalhamento, a qual explica a formação da camada esporádica E em médias e baixas latitudes. Com esse estudo ele verificou que o efeito da maré lunar pode modificar o comportamento do cisalhamento do vento, de uma maneira que características da maré lunar foram observadas na frequência crítica f_0Es e na altura virtual $h'Es$ da camada E esporádica. Já que, segundo a teoria, a fase da maré lunar em $h'Es$ deve ser a mesma que a fase da maré lunar no vento zonal e que a fase da maré lunar em f_0Es ocorre três horas depois. Valores horários de f_0Es , f_bEs (frequência crítica de bloqueio) e $h'Es$ para alguns observatórios foram analisados para a maré lunar semidiurna. A análise desses dados mostrou que a fase da maré lunar em f_0Es ocorre aproximadamente 3 horas depois de $h'Es$, resultado que concorda com a teoria.

Usando a velocidade de deriva vertical dos dados de Jicamarca, Stening e Fejer (2001) analisaram os efeitos da maré lunar semidiurna na camada F da ionosfera, através do método dos mínimos quadrados, considerando que a série de dados é composta por uma média, a maré solar diurna e semidiurna e a maré lunar semidiurna. Com esse estudo encontraram amplitudes acima de 6 m/s , com valores mais elevados nos meses de verão do hemisfério Sul. Com o intuito de analisar os efeitos da atividade solar dividiram o conjunto de dados em período de máximo e mínimo solar, com essa divisão observaram que o comportamento da maré lunar é semelhante nos dois períodos, embora no verão (dezembro a março) do período de máximo solar as amplitudes foram menores durante a noite. Durante a noite do máximo solar há uma inversão na fase entre o verão e o inverno. Com esse estudo foi possível concluir também que a maré lunar pode variar o tempo no qual a direção da deriva se inverte por $\pm 0,5\text{ h}$. Como a velocidade de deriva vertical e seu tempo de inversão são fundamentais na geração de spread F, concluíram que a maré lunar semidiurna pode aumentar e diminuir a amplitude do pico de pré-reversão e o tempo de reversão de subida da deriva durante a noite. Esses efeitos podem aumentar e diminuir a subida da camada F durante a noite e, conseqüentemente, podem afetar a probabilidade de ocorrência de irregularidades de plasma na região F (Spread F) equatorial e mudar a estrutura da Anomalia Equatorial de Appleton.

Stening e Rastogi (2002) analisaram a variação sazonal da maré lunar geomagnética em um grupo de estações na longitude da Índia para diferentes latitudes, ganhando com isso uma melhor percepção na variação sazonal média da maré e na variabilidade ano a ano. Nesse trabalho foi aplicada a análise de Fourier para vinte componentes usando valores horários do campo magnético. Para essas componentes a variação da amplitude e fase para maré lunar semidiurna pode ser construída para cada mês do ano e as contribuições devido o efeito magnético lunar e dos movimentos dos oceanos (nesse trabalho esse efeito é retirado) podem ser incluídos. Com essa análise, concluíram que a fase da maré varia com as estações em torno de 2 horas no equador, aumentando para 6 horas em altas latitudes, a amplitude máxima no mês de setembro em ΔH (variação da componente horizontal do campo magnético) no equador pode ser devido ao modo (2, 3). Algumas características da maré lunar geomagnética continuam sem explicações, como o máximo de inverno nos gráficos de amplitude de ΔD (variação na declinação do campo magnético) e ΔH e a diferença do comportamento em diferentes longitudes.

Mais recentemente, Stening et al. (2003), com dados de ventos obtidos por um radar localizado próximo a Jakarta ($6, 4^\circ S, 106, 7^\circ E$), no período de 1993 à 1997, analisaram a maré lunar semidiurna usando o método dos mínimos quadrados. O resultado da análise mostrou que a amplitude da maré lunar nos ventos meridionais é de 2 m/s e no vento zonal é de 6 m/s no verão. Variações da maré lunar com a altitude e com as estações são encontradas e comparadas com o modelo GSWM. Foi verificada uma boa concordância com o modelo com uma diferença de fase no vento zonal no inverno. O GSWM prevê um rápido crescimento na magnitude do vento meridional com a altura, resultado também obtido nos dados. Mudanças ano a ano foram observadas em diferentes estações do ano e, muitas vezes, as relações de fase entre os ventos meridionais e zonais, em Jakarta, apresentaram mais características de uma maré de hemisfério norte (de acordo com o que é previsto pela teoria clássica de maré).

Silva (2004) investigou o efeito da maré lunar na ocorrência da camada F_3 utilizando ionogramas registrados em Fortaleza ($4^\circ S; 38^\circ W$) para o período de outubro de 1994 a dezembro de 2001. Com esse estudo foi possível concluir que a maré lunar parece ser a principal responsável na formação da camada F_3 que ocorre frequentemente nos meses de inverno e equinócio e que a influência da maré lunar não foi identificada nos meses de verão. Identificou uma clara influência lunar nos meses de inverno e

primavera, pois os espectros de ocorrência da camada F3 apresentaram períodos que correspondem a metade do mês lunar (inverno 14,6 e primavera 14,5 dias).

Baseado em ventos horizontais na mesosfera e baixa termosfera sobre a Antártica medidos pelo radar meteórico em Rothera ($67,5^{\circ} S$; $68,0^{\circ} W$) e pelo radar MF em Davis ($68,6^{\circ} S$; $78,0^{\circ} E$), [Sandford et al. \(2007\)](#) estudaram o comportamento da maré lunar atmosférica. Foram usados 20 meses de observações obtidas durante 2005 e 2006 em Rothera e 13 anos de dados obtidos em Davis entre 1994 e 2006. Esses dados foram analisados para investigar o comportamento médio mensal da maré lunar semidiurna. Ambos os conjuntos de dados mostram claramente a assinatura da maré lunar semidiurna com período de $12,42 h$, com a amplitude atingindo valores de aproximadamente $8 m/s$ e o comprimento de onda vertical da maré lunar varia sazonalmente de aproximadamente 10 a $65 km$. Nesse estudo foi feita a comparação da fase da maré medida nos dois lugares, a qual revela que a maré observada não se assemelha ao modo puro (2, 2) migrante, podendo ser um modo não migrante.

[Sandford e Mitchell \(2007\)](#), relatam as primeiras observações para a maré lunar realizadas sobre o setor equatorial atlântico. Baseado em dados de ventos horizontais de um radar meteórico instalado em Ascencion Island ($8^{\circ} S$, $14,4^{\circ} W$). Um conjunto de dados de 5 anos no intervalo de 2001 a 2005 entre 78 e $100 km$ de altitude é considerado para investigação da maré lunar. A maré lunar semidiurna é claramente identificada, apresentando maiores amplitudes na componente meridional. Comparação do comportamento sazonal observado foi feito com o modelo de Vial e Forbes (1994), revelando boa concordância. As amplitudes observadas são geralmente maiores e há uma diferença de fase sistemática em relação ao modelo.

2.3 Fases da Lua

As fases da Lua são as diferentes formas que um observador na Terra verifica esse astro, esse fenômeno ocorre devido a Lua ser um corpo iluminado pela luz do Sol. Quando a Lua descreve sua órbita em torno da Terra mantém sempre metade da superfície voltada para o Sol e a outra metade fica do lado oposto, devido a esse movimento da Lua em torno da Terra a sua aparência para um observador terrestre depende da posição relativa do sistema Sol-Lua-Terra. Embora a porção iluminada da Lua pelo Sol varie diariamente, existem quatro fases da Lua que são bem conhecidas: Lua Nova, Quarto Crescente, Cheia e Quarto Minguante.

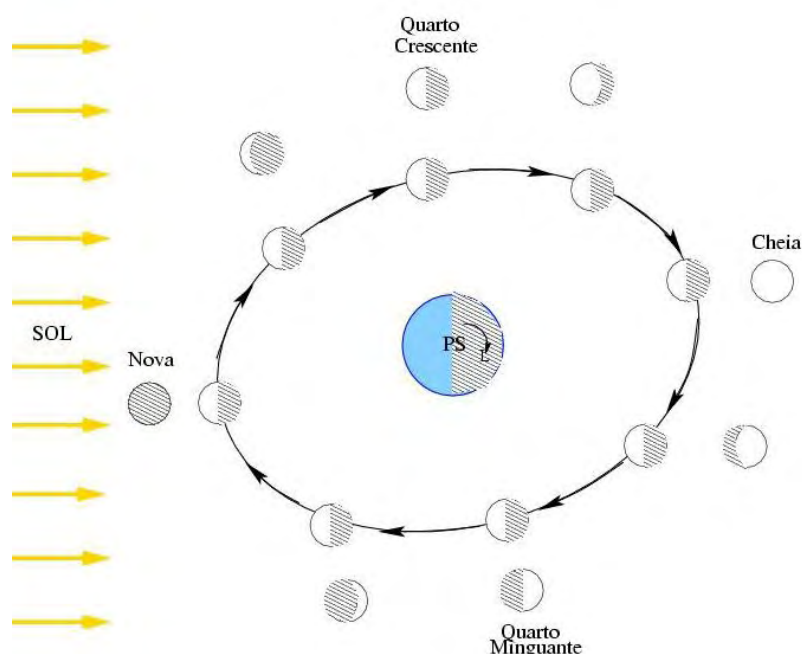


Figura 2.1 - Representação das Fases da Lua. Nessa Figura, a órbita que a Lua descreve em torno da Terra visualizada por um observador externo olhando para o Pólo Sul terrestre é representada ao longo da elipse. A outra parte da figura mostra a configuração da Lua visualizada por um observador no hemisfério Sul da Terra.

Fonte: [Saraiva et al. \(2007\)](#)

Na Figura 2.1 são ilustradas as principais fases da Lua, a parte externa representa a evolução da Lua vista por um observador no hemisfério Sul da Terra, ao longo da elipse é representada a evolução da Lua na sua órbita em torno da Terra vista por

um observador que está olhando para o polo Sul da Terra (PS), os raios solares são representados pelas setas que estão no mesmo plano do equador terrestre.

A Lua Nova ocorre quando o Sol e a Lua estão alinhados fazendo com que a face iluminada da Lua fique oposta a Terra. Nesse período a Lua nasce e se põe aproximadamente junta com o Sol. O termo crescente representa a evolução da Lua entre as fases Nova e Cheia, a fase Quarto Crescente ocorre quando 50% da parte voltada para Terra está iluminada, nesse período a Lua e o Sol estão separados em torno de 90° quando observados da Terra, e a Lua nasce ao meio dia e se põe em torno da meia noite.

A Lua Cheia representada na Figura 2.1 por um círculo completamente branco ocorre quando a parte visível da Lua está totalmente iluminada, nessa fase, a Lua e o Sol estão separados por aproximadamente 180° , e nasce com o pôr do Sol e se põe com o nascer do Sol.

Os aspectos da Lua durante o período entre a Lua Cheia e a Lua Nova é chamado de Lua minguante. Quando 50% da face visível da Lua está iluminada tem-se a fase Quarto Minguante, nesse dia a Lua e o Sol se encontram separados por aproximadamente 90° como mostrado na Figura 2.1. Durante esse período a Lua nasce próximo à meia noite e se põe aproximadamente ao meio dia. Após essa fase, a parte iluminada da Lua continua diminuindo até iniciar o novo ciclo (Lua Nova).

2.4 Período Lunar

Para se chegar a um consenso sobre a criação de um calendário foram encontradas muitas dificuldades, devido ao ano não ser múltiplo exato da duração do dia ou da duração do mês. As sociedades antigas utilizavam dois sistemas básicos para contagem de longos períodos de tempo baseados nos movimentos do Sol e da Lua.

No caso do Sol, a referência é o ano solar (período de revolução da Terra em torno do Sol com relação ao Equinócio de Primavera), enquanto que os calendários lunares são baseados no período de 12 lunações (uma lunação corresponde a um mês lunar), ou seja, 354,36708 dias. Mas, como para ocorrerem 12 lunações são necessários apenas ~ 354 dias, faltavam cerca de dez dias para o Sol ocupar a mesma posição na eclíptica. Com isso, as estações do ano iriam ocorrer a cada ano, cerca de dez dias mais cedo, ocasionando complicações para os povos que dependiam diretamente do conhecimento das estações para o plantio, a caça, a pesca, etc. Porém, algumas

civilizações utilizam até hoje o calendário exclusivamente lunar, como por exemplo os árabes. O mundo ocidental usa o calendário solar, embora possua características do antigo calendário lunar, como os 12 meses, originários das 12 lunações.

Em 1582, o papa Gregório XIII introduziu nova reforma no calendário, sob orientação do astrônomo jesuíta alemão Christopher Clavius para regular a data da Páscoa, instituindo o Calendário Gregoriano. Nessa reforma foi instituído que do ano 1582 seriam retirados 10 dias para recolocar o Equinócio de Primavera no dia 21 de março e definiu algumas regras para o anos bissextos. O ano do Calendário Gregoriano tem 365,2425 dias solares médios, onde o dia Solar corresponde ao intervalo de tempo entre duas passagens consecutivas do Sol pelo meridiano local (linha imaginária que une os pontos norte e sul passando pelo zênite), esse período é dividido em 24 horas.

O dia Sideral é o intervalo de tempo entre duas passagens sucessivas de uma estrela pelo mesmo meridiano com referencial de estrelas fixas. O dia solar e o dia sideral divergem, devido o movimento da Terra em torno do Sol (movimento de translação), pois enquanto a Terra gira em torno do seu eixo continua a se deslocar ao redor do Sol no mesmo sentido. Então para que o Sol volte para o mesmo ponto após a rotação são necessários 3 min e 56 s a mais, ou ainda, um dia sideral possui 23h 56m e 4s solares.

As quatro fases da Lua ocorrem durante o mês Sinódico ou também chamado de mês Lunar, o qual dura aproximadamente 29,53 dias. De acordo com [Silveira \(2001\)](#) o intervalo entre fases consecutivas é variável entre aproximadamente 6 e 9 dias, mas a maioria tem um intervalo entre 7 ou 8 dias, esse período médio de 7 dias entre as fases da Lua é a base da semana.

O período Sinódico da Lua é o intervalo de tempo entre duas fases iguais consecutivas, enquanto que o período sideral da Lua é o tempo necessário para que a Lua complete uma volta em torno da Terra no sistema de referência com as estrelas fixas e possui aproximadamente 27,32 dias.

Na Figura 2.2 é possível verificar que após o período entre duas Luas Novas (mês sinódico) a Lua se deslocou mais que uma volta completa em torno da Terra, por isso, existe a diferença de dias entre o mês sinódico e sideral. Ainda em seu estudo [Silveira \(2001\)](#) mostra que o mês sinódico pode variar entre 29,3 e 29,8 dias.

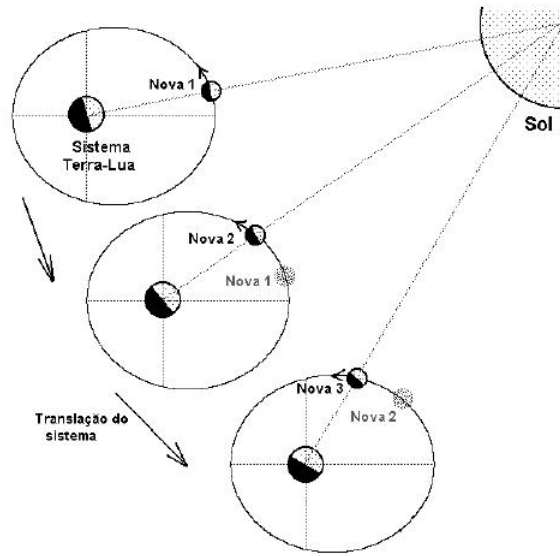


Figura 2.2 - Esquema de três Luas Novas consecutivas.
Fonte: [Silveira \(2001\)](#)

O **dia médio lunar** é o intervalo médio entre duas passagens sucessivas da lua sobre um meridiano local e é $\sim 24\ h\ 50,47\ min$. Assim, como no estudo da maré solar, em que o tempo médio solar é calculado através de um Sol fictício, para a maré lunar o tempo médio lunar também será calculado pelo movimento de uma lua fictícia, a qual é imaginada girando em torno da terra.

Baseado na Figura 2.3 e considerando ν o ângulo entre o plano que contém Terra-Sol e Terra-Lua, τ o tempo lunar e t o tempo solar, tem-se:

$$t = \tau + \nu , \quad (2.1)$$

nesse caso, t , ν e τ podem ser calculados em medidas angulares ou em horas, pois $15^\circ = 1\ h$. A idade da Lua completa um ciclo de $24\ h$ no percurso de um mês sinódico médio e cresce $0,81272\ h$ no percurso de um dia solar médio. O tempo solar denotado por t possui vinte e quatro horas e o dia lunar equivale a $1,03505$ dias solares ou $24\ h\ 50,47\ min$. Nesse trabalho será tomado com base o período Lunar para analisar a maré lunar semidiurna nos ventos obtidos das medidas do radar meteórico.

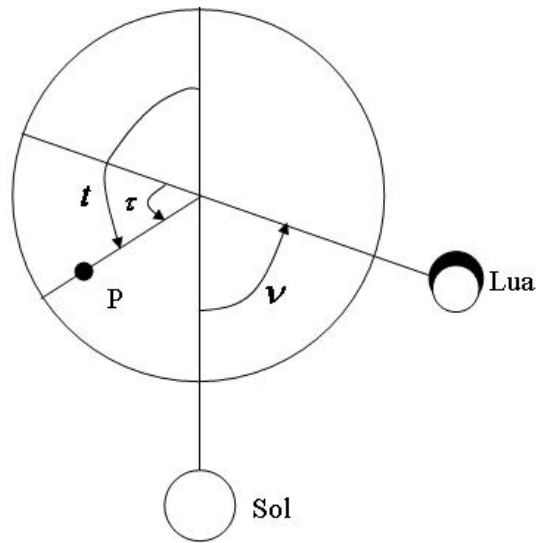


Figura 2.3 - Configuração da relação entre o tempo solar e lunar e do ângulo da fase lunar.
Fonte: [Chapman e Lindzen \(1970\)](#)

2.5 Função de excitação gravitacional

A excitação gravitacional é, principalmente, devida ao potencial gravitacional da Lua, com pequenas contribuições do potencial devido ao Sol. A análise da função de excitação segue o tratamento dado por [Lamb \(1932\)](#). A Figura 2.4 é uma configuração geométrica para auxiliar o cálculo do potencial gravitacional e nela considera-se que a Lua está no ponto C . O ponto C' é a projeção do ponto C do lado oposto da Terra, de tal modo que OC' é igual a OC .

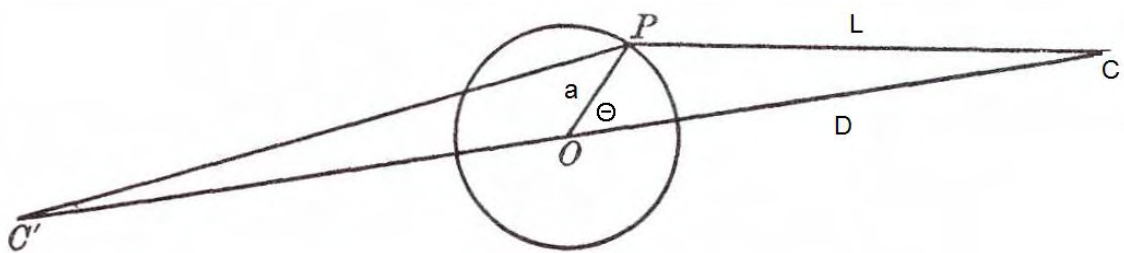


Figura 2.4 - Geometria para o cálculo de potenciais de marés.
Fonte: Adaptado: [Lamb \(1932\)](#)

Na Figura 2.4 O é o centro da Terra, C o centro do corpo perturbador (Lua ou Sol,

por exemplo). O potencial de atração da Lua em um ponto P próximo da superfície da Terra é dado por:

$$-\frac{\gamma M}{L} , \quad (2.2)$$

sendo M a massa da Lua e γ a constante gravitacional. Considerando que o ângulo entre POC é Θ , o qual corresponde ao ângulo zenital, e aplicando a lei dos cossenos no triângulo (COP), a Equação 2.2 pode ser reescrita como:

$$-\frac{\gamma M}{(D^2 - 2aD \cos \Theta + a^2)^{1/2}} . \quad (2.3)$$

Entretanto, o objetivo é determinar não o efeito da aceleração absoluta em P , mas a aceleração relativa a Terra. A aceleração que a Lua produz na massa total da Terra é:

$$\frac{\gamma M}{D^2} . \quad (2.4)$$

O potencial gravitacional de um campo de força uniforme pode ser escrito da seguinte forma:

$$-\frac{\gamma M}{D^2} a \cos \Theta . \quad (2.5)$$

O potencial total é dado pela subtração das Equações 2.3 e 2.5, ou seja,

$$\Omega = -\frac{\gamma M}{(D^2 - 2aD \cos \Theta + a^2)^{1/2}} + \frac{\gamma M}{D^2} a \cos \Theta . \quad (2.6)$$

Colocando o termo $-\frac{\gamma M}{D^2}$ em evidência, obtém-se:

$$\Omega = -\frac{\gamma M}{D} \left[\left(1 - 2\frac{a}{D} \cos \Theta + \frac{a^2}{D^2} \right)^{-1/2} - \frac{a}{D} \cos \Theta \right] . \quad (2.7)$$

Expandindo a expressão $\left(1 - 2\frac{a}{D} \cos \Theta + \frac{a^2}{D^2}\right)^{-1/2}$ em termos de $\frac{a}{D}$, o qual é nesse caso uma quantidade muito pequena devido $a \ll D$ e considerando apenas o termo mais importante encontra-se:

$$\left(1 - 2\frac{a}{D} \cos \Theta + \frac{a^2}{D^2}\right)^{-1/2} = \frac{a}{D} \cos \Theta + \frac{a^2}{D^2} \left(-\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \cos^2 \Theta\right) . \quad (2.8)$$

Substituindo a Equação 2.8 em 2.7, obtém-se:

$$\Omega \approx -\frac{\gamma M}{D} \left[\frac{a}{D} \cos \Theta + \frac{a^2}{D^2} \left(-\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \cos^2 \Theta\right) - \frac{a}{D} \cos \Theta \right] , \quad (2.9)$$

organizando,

$$\Omega \approx \frac{3}{2} \frac{\gamma M a^2}{D^3} \left(\frac{1}{3} - \cos^2 \Theta\right) . \quad (2.10)$$

Para analisar a Equação 2.10 é preciso reescrever $\cos \Theta$, considerando ϕ a longitude de P medida para Leste do meridiano fixo, α o ângulo horário de C (ponto que localiza a Lua) medido para Oeste do mesmo meridiano e θ a colatitude. A Figura 2.5 apresenta um esquema dos pontos P e C e dos ângulos mencionados.

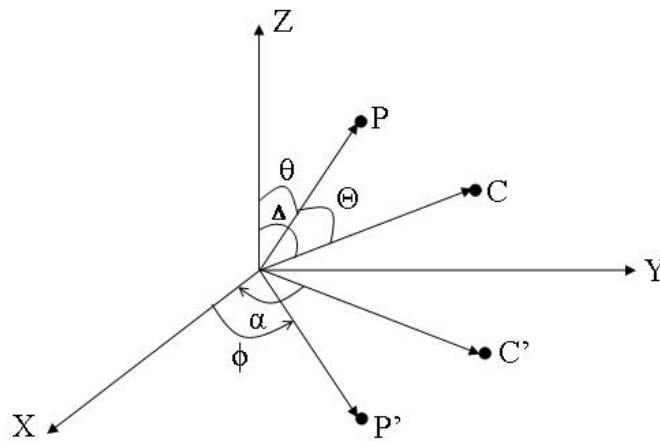


Figura 2.5 - Esquema para a determinação do ângulo zenital.

Com base na Figura 2.5 é possível determinar os vetores unitários \hat{P} e \hat{C} , ou seja,

$$\hat{P} = \text{sen}\theta \cos \phi \hat{x} + \text{sen}\theta \text{sen}\phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z} , \quad (2.11)$$

$$\hat{C} = \text{sen}\Delta \cos \alpha \hat{x} - \text{sen}\Delta \text{sen}\alpha \hat{y} + \cos \Delta \hat{z} , \quad (2.12)$$

em que \hat{x} , \hat{y} e \hat{z} são vetores unitários que apontam nas direções de X , Y e Z , respectivamente.

Sendo $\cos \Theta = \hat{P} \cdot \hat{C}$ é possível encontrar:

$$\cos \Theta = \cos \theta \cos \Delta + \text{sen}\theta \text{sen}\Delta \cos (\phi + \alpha) . \quad (2.13)$$

Como foi mostrado na Equação 2.10, o potencial gravitacional depende de γ , M , a , D (praticamente constantes) e do $\cos \Theta$. Assim, com o resultado da Equação 2.13 é possível verificar que, além das constantes, o potencial gravitacional depende também da colatitude (θ), longitude (ϕ), do ângulo horário (α) e do ângulo que localiza a Lua a partir do polo norte (Δ).

Fazendo um estudo mais detalhado pode-se obter as contribuições para o potencial gravitacional devido às componentes diurna solar, lunar e luni-solar, semidiurna solar, lunar e luni-solar.

2.6 Descrição geral do Modelo Vial e Forbes (1994)

O modelo é uma simulação numérica e foi desenvolvido por Vial e Forbes (1994) devido a necessidade de um estudo teórico para a maré lunar semidiurna motivado pelo crescimento no estudo da maré lunar com dados de radar na baixa termosfera e pela boa determinação de marés oceânicas usando dados de satélites.

Os cálculos do modelo são feitos para cada mês, do ano 1993. Os parâmetros fornecidos são as amplitudes (m/s) e fases (hora lunar) do vento neutro para componente meridional e zonal, para temperatura neutra e geopotencial, todos fornecidos para 12 altitudes entre 78 e 102 km.

Devido a Terra (corpo) e as marés oceânicas afetarem a maré lunar atmosférica, além de incluir a força gravitacional da Lua na atmosfera, foram incluídos os efeitos devido os movimentos verticais da Terra (corpo) e dos oceanos na camada limite da atmosfera. [Vial e Forbes \(1994\)](#) descrevem que a Terra e as marés oceânicas podem agir de duas maneiras na maré lunar atmosférica. (1) é modificando o potencial gravitacional da maré através da perturbação na massa da Terra e dos oceanos e (2) é através dos efeitos dinâmicos causados devido a atmosfera está sujeita aos movimentos verticais na interface com a Terra ou oceanos.

Na elaboração do modelo, a atmosfera é considerada uma fina casca esférica sobre a superfície da Terra. Esse modelo é idêntico ao descrito no artigo Forbes e Vial (1989), o qual foi desenvolvido para maré semidiurna solar, porém não são considerados os efeitos térmicos. O potencial para maré lunar semidiurna foi determinado em termos de funções associadas de Legendre considerando o modo (2,2) como o mais importante. Os efeitos da maré da Terra (corpo) sobre a maré atmosférica provêm de outros modelos (detalhados nesse artigo) e os modelos dos efeitos da maré oceânica utilizam dados de altimetria de satélite.

O uso de vento de fundo e temperatura mais realísticos, além do uso de altimetria de satélite auxiliaram esse modelo obter resultados mais satisfatórios, como por exemplo a influência da diferença entre os hemisférios sobre o estado termodinâmico da atmosfera. Na região meteórica comparações do modelo com observações mostraram um concordância razoável, porém com algumas discrepâncias para alguns locais e épocas.

Na Figura 2.6, são mostrados os comportamentos das amplitudes médias de todas as altitudes (78 a 102 *km*) para a maré lunar atmosférica semidiurna previstos pelo modelo para as componente meridional (inferior) e zonal (superior) ao longo das latitudes e ao longo do ano. No eixo horizontal são mostrados os meses do ano, no eixo vertical são dispostas as latitudes de -90° a 90° e a barra de cores indica a intensidade da amplitude. As linhas pretas tracejadas designam as latitudes correspondentes a São João do Cariri, Cachoeira Paulista e Santa Maria (de cima para baixo), respectivamente. Com essa figura pode ser visto que as maiores amplitudes para a componente zonal acontecem em latitudes médias nos meses de verão (hemisfério Norte) e verão e inverno (hemisfério Sul), para a componente meridional o comportamento é semelhante, porém existe uma região de fortes amplitudes entre maio e setembro próximo do equador.

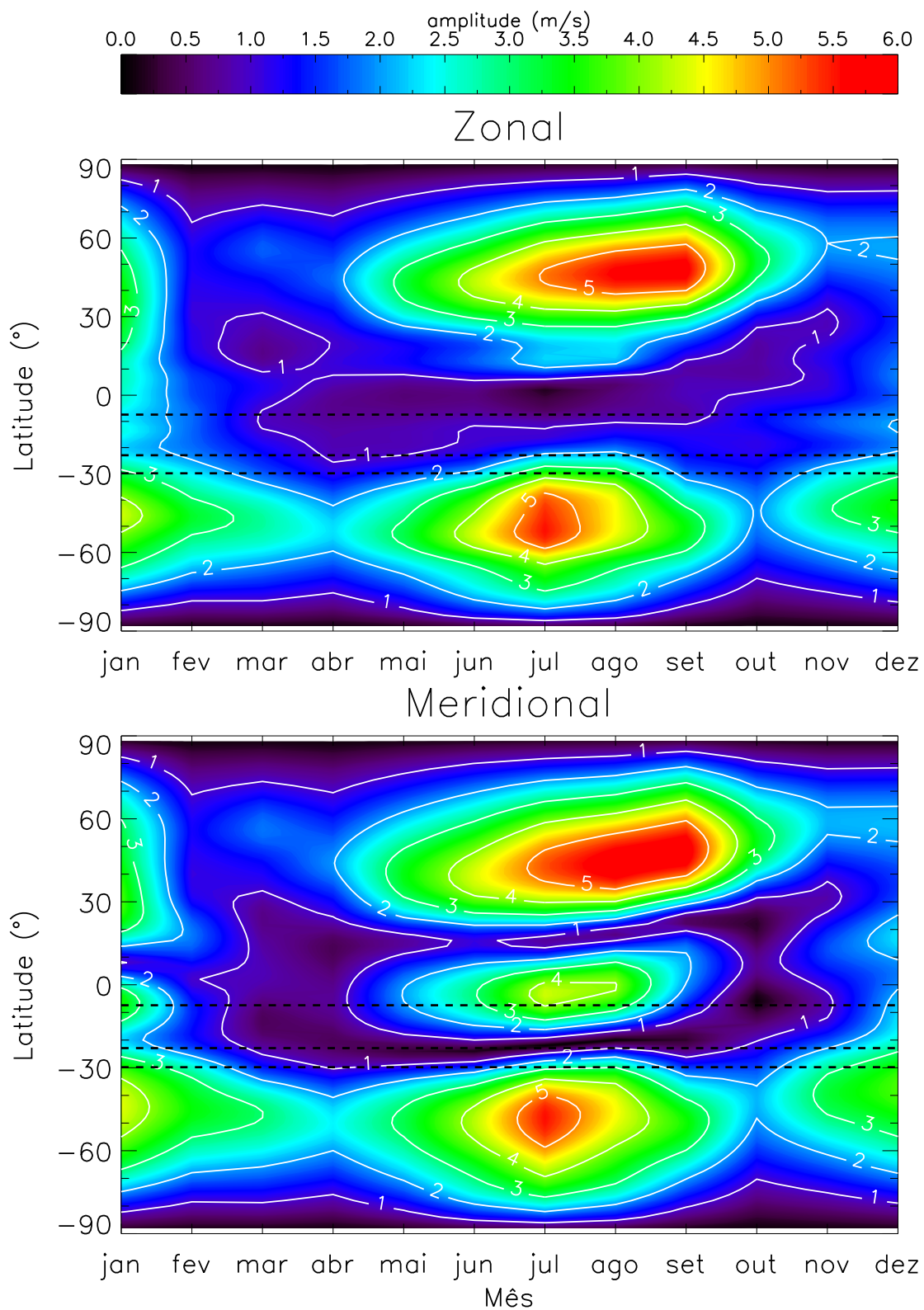


Figura 2.6 - Amplitudes da maré lunar atmosférica semidiurna previstas pelo modelo Vial e Forbes (1994), para a componente zonal (painel superior) e para a componente meridional (painel inferior) ao longo das latitudes e do ano.

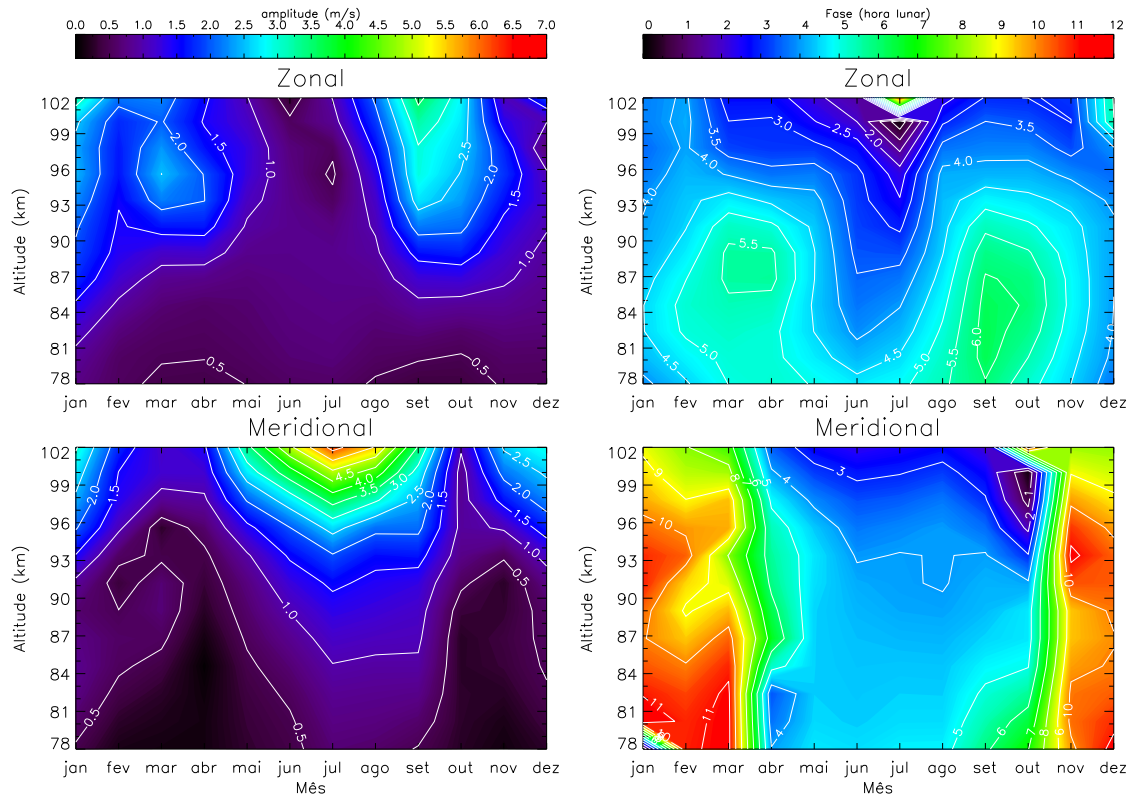


Figura 2.7 - Na coluna da esquerda são mostrados os comportamentos verticais das amplitudes médias sobre todas as latitude da maré lunar atmosférica semidiurna para as componentes zonal (superior) e meridional (inferior) ao longo do ano e na coluna da direita são mostradas as fases.

Na Figura 2.7 o lado esquerdo mostra as amplitudes médias sobre todas as latitudes para a maré lunar atmosférica semidiurna previstas pelo modelo para as componentes meridional (inferior) e zonal (superior) ao longo dos meses do ano e das altitudes e no lado esquerdo as fases previstas pelo modelo. No eixo horizontal são mostrados os meses do ano, na vertical as altitudes e a barra de cores mostra a intensidade da amplitude (lado esquerdo) e da fase (lado direito). A componente zonal mostra um comportamento semianual nas altitudes superiores a 90 km e a componente meridional também apresenta um comportamento semelhante só que para quase todas as altitudes. Além disso, as amplitudes são crescentes com a altitude em ambas as componentes. As fases apresentam quase sempre uma progressão com o decréscimo da altitude e a componente meridional mostra rápidas mudanças em torno dos equinócios.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

3.1 Instrumentação

3.1.1 Região Meteórica

A região da atmosfera da Terra compreendida, entre 70 e 110 km de altura, é atingida por uma grande quantidade de partículas de poeira do meio interplanetário diariamente, as quais recebem o nome de meteoróides. Quando os meteoróides ingressam na atmosfera terrestre sofrem um processo de ablação devido ao atrito com a atmosfera neutra produzindo uma trilha ionizada chamada de trilha meteórica ou traço meteórico ou simplesmente meteoro (popularmente conhecida como estrela cadente).

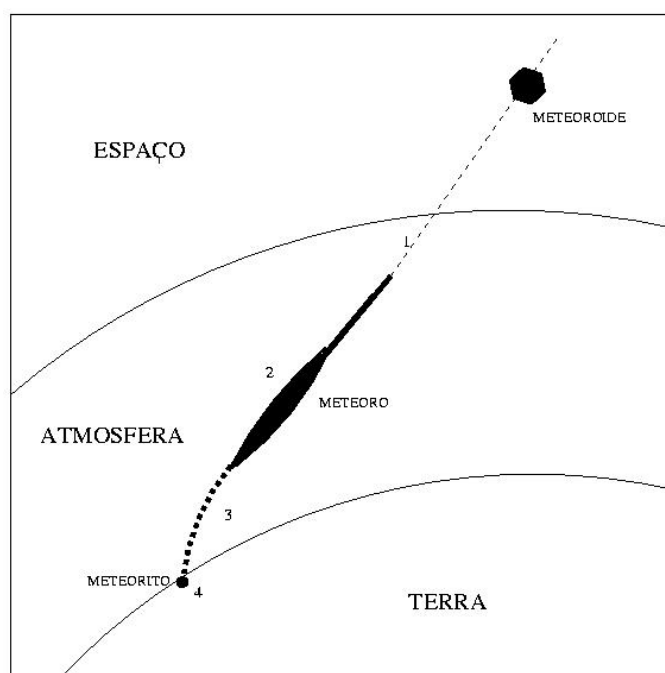


Figura 3.1 - Representação do processo de formação de meteoros na atmosfera .

Se o meteoróide conseguir resistir ao atrito com a atmosfera e chegar a atingir o solo, ele passa a ser chamado de meteorito. Na Figura 3.1 são representadas as quatro etapas que podem acontecer com uma partícula ao ingressar na atmosfera.

Uma trilha de meteoros pode ser dividida em duas classes de acordo com a densidade

linear de elétrons contida na mesma. Se a densidade de uma trilha é pequena, então esta é dita sub-densa, e as ondas de rádio penetram livremente na coluna da trilha e cada elétron atua como uma fonte espalhadora. Se a densidade de uma trilha é suficientemente grande, essa é dita sobre-densa, nessas trilhas as ondas de rádio não penetram e são completamente refletidas, pois a trilha atua como uma superfície cilíndrica especular devido à alta densidade.

Os meteoróides começam a ser pulverizados quando entram em contato com a atmosfera neutra da Terra, isto ocorre por volta de aproximadamente 110 km de altitude. A medida que os meteoróides avançam em direção ao solo, eles são consumidos até serem completamente destruídos. A maior parte dos meteoróides não tem dimensões suficientes para chegarem a menos que 70 km de altitude sem serem destruídos. Essa região compreendida entre 70 - 110 km de altitude, onde é encontrada a maior parte dos meteoros, é chamada de região meteórica. Fisicamente, a região meteórica é muito importante para estudos da atmosfera, pois ela se encontra na região da mesosfera e baixa termosfera. Nessas altitudes, a dinâmica é muito complexa e importante para compreensão de muitos fenômenos atmosféricos.

Com o traço meteórico é possível estudar a dinâmica da atmosfera nesta faixa de altitude, tendo em vista que os ventos arrastam consigo a trilha meteórica. Uma grande fonte de partículas são os cometas que, ao sofrerem ablação, deixam partículas suspensas no meio interplanetário que são capturadas durante o movimento de órbita da Terra. Os meteoros incidem na atmosfera de duas maneiras: aleatoriamente, na forma de meteoros esporádicos e de forma mais organizada e periódica, na forma de chuva de meteoros.

Nessas altitudes os efeitos do campo magnético sobre a dinâmica das partículas podem ser desprezados e, desta forma, os traços meteóricos se movimentam, principalmente, devido à ação dos ventos neutros. A translação dos elétrons produz um deslocamento Doppler no sinal refletido pelo traço meteórico. A partir deste deslocamento pode-se determinar a velocidade radial da trilha meteórica e por consequência, a posição, a velocidade e direção do vento que o transportou (mais detalhes em (TOKUMOTO, 2002)).

3.1.2 Radar Meteorico

Um radar é composto basicamente por um transmissor pulsado que alimenta uma antena transmissora e emite pulsos eletromagnéticos na faixa de frequências de rádio, por antenas receptoras e um sistema de aquisição e processamento de dados. Dependendo das características do meio pelo qual os pulsos transmitidos se propagam, esses podem ser refletidos ou espalhados. Os pulsos refletidos de forma especular são detectados pelo radar como ecos.

O radar meteorico é um instrumento utilizado para estudar o vento na região meteorica, através de trilhas meteoricas. Com esse instrumento é possível obter parâmetros atmosféricos e astronômicos. Através dos dados obtidos pelo radar meteorico é possível estudar ondas atmosféricas, ventos na alta atmosfera e calcular alguns parâmetros como a temperatura utilizando o tempo de decaimento dos sinais refletidos.

3.1.3 Radar Meteorico SKiYMET

O Radar Meteorico SKiYMET é um sistema que possui visada de todo céu e opera numa frequência de 35,24 MHz, com uma taxa de 2144 pulsos por segundo. Essa alta frequência possibilita a determinação de parâmetros como a velocidade de entrada dos meteoros na atmosfera (HOCKING et al., 2001). Em perfeitas condições de funcionamento esse radar opera ininterruptamente 24 horas por dia medindo os ecos meteoricos (entre 1000 e 5000 ecos uteis/dias), sendo assim, permite que o estudo dos ventos seja contínuo e em longos períodos. As principais medidas fornecidas pelo programa incorporado ao sistema do SKiYMET são mostradas na Tabela 3.1.

O sistema de antenas do radar é composto por uma antena transmissora Yagi de três elementos e cinco antenas receptoras dispostas em forma de cruz assimétrica. Esse arranjo é estabelecido de forma a minimizar a ambiguidade no sinal recebido. A distância entre os dois pares de antenas das extremidades e a antena central mede 2.0 e 2.5 comprimentos de onda, respectivamente. Na Figura 3.2 pode ser vista a distribuição das cinco antenas receptoras do radar meteorico instalado em São João do Cariri e na Figura 3.3 pode ser visto um esquema da distribuição das antenas transmissoras e receptoras do radar meteorico SKiYMET.



Figura 3.2 - Distribuição das antenas receptoras do radar meteorológico instalado em São João do Cariri.

Fonte: AEROLUME (2004)

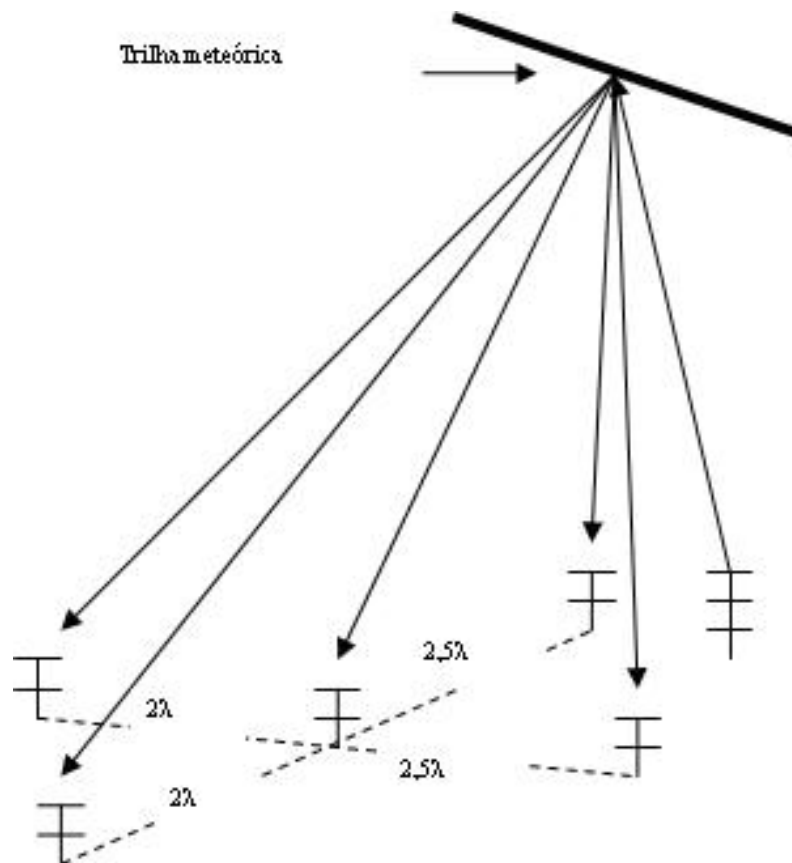


Figura 3.3 - Esquema das antenas transmissora e receptora do radar SKiYMET.

Fonte: Lima (2004)

Tabela 3.1 - Parâmetros medidos pelo Radar Meteorico SKiYMET.

DADOS	DESCRIÇÃO
Date	Data de detecção
Time	Hora de detecção
File	O nome do arquivo usado para salvar os dados brutos
Rge	O alcance da detecção
Ht	A altura corrigida acima do solo
Vrad	A Velocidade radial da trilha em m/s
DelVr	O desvio da velocidade radial medida obtida pelos 5 pares de antenas no interferômetro
Theta	O ângulo zenital de detecção em graus
Phi	O ângulo azimutal de detecção em graus medido no sentido anti-horário do leste
Ambig	O número de posições angulares aceitáveis
Delphase	O pior erro de fase entre as antenas em graus
Ant-pair	O par de antena com o pior erro de fase
IREX	O canal receptor usado na análise da qualidade de teste. É sempre "1" durante a operação normal
amax	O valor de pico da amplitude do eco do radar meteorico
Tau	Tempo de decaimento em segundos
vmet	Velocidade de entrada do meteoro em km/s
snrdb	A relação sinal-ruído do meteoro

3.1.4 Parâmetros Medidos Pelo Radar SKiYMET

Os principais parâmetros de um meteoro fornecidos pelo radar são o alcance, direção (posição angular), velocidade e o tempo de decaimento. O **Alcance** do radar é determinado pelo intervalo de tempo que o pulso transmitido leva para ir até o meteoro e voltar (T_R) dividido por dois, como se trata de um pulso eletromagnético a velocidade do pulso é igual a velocidade da luz (c), assim, o alcance (R) é expresso matematicamente da seguinte forma:

$$R = \frac{cT_R}{2} . \quad (3.1)$$

Conhecendo o alcance do eco e o ângulo zenital pode-se determinar a altura do meteoro. Baseado na Figura 3.4 pode-se, escrever que a altura do meteoro é $Z = R \cos \beta$, em que β é o ângulo zenital.

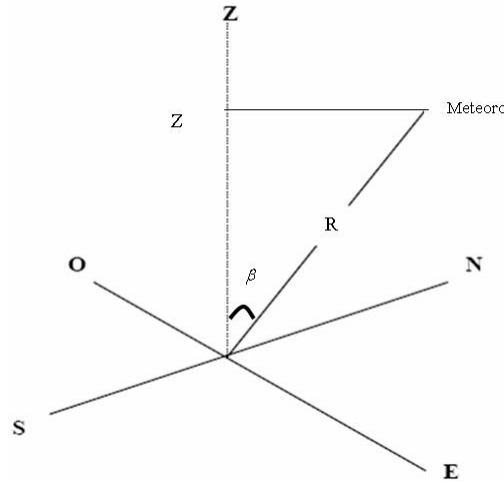


Figura 3.4 - Esquema mostrando a altura do meteoro (Z) e o alcance (R).

A posição angular do meteoro pode ser determinada a partir da direção de chegada (ou fase) da frente de onda refletida pela trilha do meteoro, na prática isso é calculado através de um sistema interferométrico.

Existem duas velocidades associadas a um meteoro, a **velocidade radial** e a velocidade geocêntrica. A primeira velocidade é determinada pela medida do deslocamento

Doppler entre o sinal transmitido e o recebido através da reflexão do sinal eletromagnético pela trilha meteórica. A segunda é a velocidade de entrada do meteoróide na atmosfera. Com a velocidade radial, o ângulo zenital e o ângulo azimutal pode-se determinar as componentes zonal (leste-oeste), meridional (norte-sul) e vertical do vento que está arrastando a trilha meteórica.

O **tempo de decaimento** é a medida do tempo que a amplitude do eco leva para chegar a um valor de $1/e$ da sua amplitude máxima.

Na Figura 3.5 pode-se observar a evolução de um eco meteórico detectado pelo Radar Meteorológico instalado em Santa Maria no dia 25 de setembro de 2009. No lado esquerdo da Figura são mostradas as amplitudes (linha vermelha) e fases (pontos azuis) do sinal captado pelas cinco antenas receptoras, no lado direito o gráfico superior mostra a amplitude média do sinal das cinco antenas e o inferior mostra a amplitude (linha vermelha) e a fase (pontos azuis) calculadas através de uma função de correlação cruzada complexa.

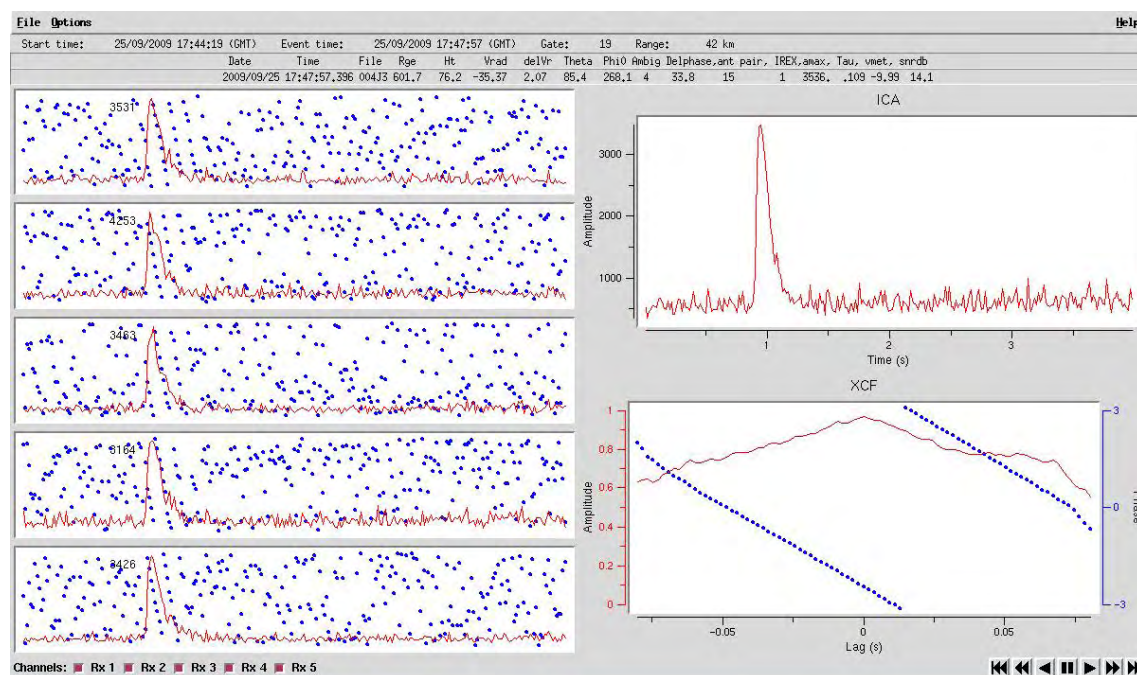


Figura 3.5 - Eco meteórico fornecido pelo Radar Meteorológico instalado em Santa Maria (29, 7°S; 53, 8°W).

3.2 Metodologia

3.2.1 Determinação do Vento

Considerando que o ponto P mostrado na Figura 3.6 localiza uma trilha meteórica no espaço em um sistema de coordenadas cartesianas em que Z é a componente que aponta para o zênite (vertical), Y a componente na direção norte-sul (Meridional) e X a componente na direção leste-oeste (Zonal), θ é o ângulo zenital e φ o ângulo azimutal (medido no sentido anti-horário a partir do leste).

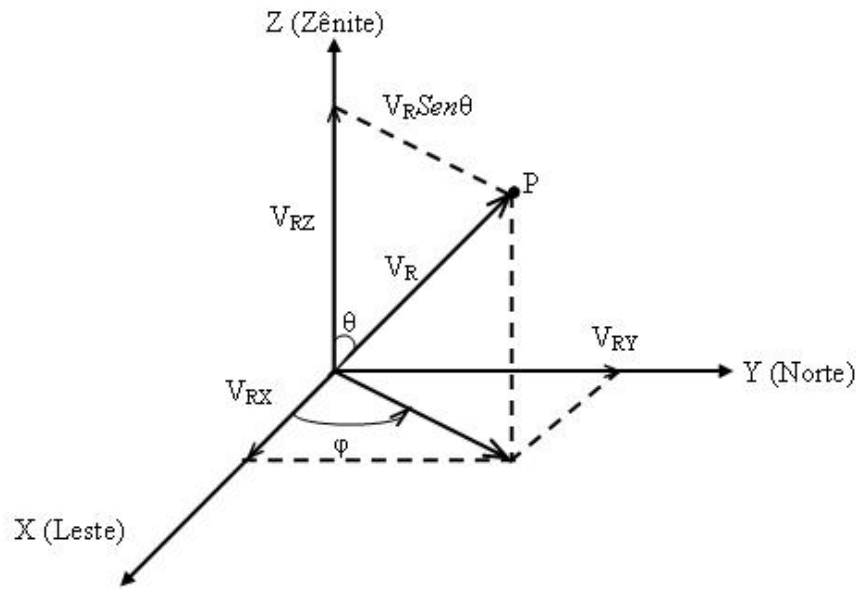


Figura 3.6 - Representação das componentes da velocidade radial de uma trilha meteórica

O vetor velocidade radial pode ser escrito da seguinte forma:

$$\vec{V}_R = V_{RX}\hat{x} + V_{RY}\hat{y} + V_{RZ}\hat{z} , \quad (3.2)$$

sendo \hat{x} , \hat{y} , \hat{z} vetores unitários. Com base na Figura 3.6 pode-se escrever as componentes da velocidade radial em função de senos e cossenos, ou seja,

$$V_{RX} = V_R \sin \theta \cos \varphi , \quad (3.3)$$

$$V_{Ry} = V_R \text{sen}\theta \text{sen}\varphi , \quad (3.4)$$

$$V_{RZ} = V_R \cos\theta . \quad (3.5)$$

Substituindo o conjunto de Equações 3.3, 3.4, 3.5 na Equação 3.2, tem-se:

$$\vec{V}_R = V_R (\text{sen}\theta \cos\varphi \hat{x} + \text{sen}\theta \text{sen}\varphi \hat{y} + \cos\theta \hat{z}) . \quad (3.6)$$

Sendo $\vec{l} = \text{sen}\theta \cos\varphi \hat{x} + \text{sen}\theta \text{sen}\varphi \hat{y} + \cos\theta \hat{z}$ pode-se reescrever o vetor velocidade radial como:

$$\vec{V}_R = V_R \vec{l} . \quad (3.7)$$

Por outro lado, o vento pode ser representado matematicamente da seguinte maneira:

$$\vec{V}_m = u\hat{x} + v\hat{y} + w\hat{z} , \quad (3.8)$$

na qual u é a componente zonal, v a componente meridional e w a componente vertical. Podemos escrever a velocidade radial como sendo a projeção do vento médio sobre o vetor \vec{l} , assim:

$$V_R = \vec{V}_m \cdot \vec{l} . \quad (3.9)$$

Realizando o produto escalar, encontra-se:

$$V_R = u \text{sen}\theta \cos\varphi + v \text{sen}\theta \text{sen}\varphi + w \cos\theta . \quad (3.10)$$

Nesse caso, a Equação 3.10 está escrita apenas para um meteoro, porém, o radar meteorológico fornece um conjunto de valores para a velocidade radial, para o ângulo zenital e azimutal, assim foi implementado um algoritmo computacional para cal-

cular as componentes do vento (u , v e w). Para determinar o vento escolhe-se um intervalo de tempo e altura e aplica-se o método dos mínimos quadrados com os meteoros compreendidos neste intervalo.

O algoritmo realiza filtragem dos dados, separa os meteoros em intervalos de tempo e altura e aplica o método dos mínimos quadrados para obter as componentes do vento. No processo de filtragem são retirados os meteoros que possuem ambiguidade maior ou igual a dois, tempo de decaimento inferior que 15 *ms*, velocidades radiais maiores que 150 *m/s* (velocidade máxima permitida) e que possuam ângulo zenital fora do intervalo admitido ($10^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$).

Além disso, é realizada uma seleção dos meteoros que ocorrem no mesmo instante de tempo e verifica se os mesmos possuem uma diferença de *alcance* inferior a 6 *km*. Sendo essa diferença menor que 6 *km* os sinais são originados do mesmo eco e toma-se o que tiver maior amplitude.

Um segundo processo de filtragem é realizado após um cálculo inicial das componentes do vento, nessa etapa é analisado se a diferença entre a velocidade radial medida pelo radar e a velocidade radial calculada com os valores das componentes encontrados pelo método dos mínimos quadrados é menor que 100 *m/s*, caso contrário, o meteoro é desconsiderado. Essa etapa é aplicada para remover os pontos que se encontram muito fora da média. Após remover esses meteoros, os cálculos são refeitos para fornecer as componentes do vento.

Para estimar as componentes do vento foi usado o método dos mínimos quadrados o qual tem como princípio a minimização do erro, nesse caso o erro é dado por:

$$\varepsilon_i = V_{Ri} - (u \sin \theta_i \cos \varphi_i + v \sin \theta_i \sin \varphi_i + w \cos \theta_i) . \quad (3.11)$$

A menor estimativa para o erro pode ser escrita da seguinte forma:

$$f(u, v, w) = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 , \quad (3.12)$$

em que f é uma função de u , v , w (componentes do vento). Para estimar os coeficientes aplica-se a definição de mínimo de uma função, ou seja,

$$\frac{\partial f(u, v, w)}{\partial u} = 0 , \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial f(u, v, w)}{\partial v} = 0 , \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial f(u, v, w)}{\partial w} = 0 . \quad (3.15)$$

Aplicando essas derivações, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n V_R A &= u \sum_{i=1}^n A^2 + v \sum_{i=1}^n BA + w \sum_{i=1}^n CA \\ \sum_{i=1}^n V_R B &= u \sum_{i=1}^n AB + v \sum_{i=1}^n B^2 + w \sum_{i=1}^n CB , \\ \sum_{i=1}^n V_R C &= u \sum_{i=1}^n AC + v \sum_{i=1}^n BC + w \sum_{i=1}^n C^2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

sendo $A = \sin\theta \cos\varphi$, $B = \sin\theta \sin\varphi$ e $C = \cos\theta$. Resolvendo esse sistema é possível encontrar as melhores estimativas para as componentes u , v , w .

3.2.2 Determinação da Maré Lunar Semidiurna

Para determinar a maré lunar semidiurna os ventos horários de cada dia foram interpolados de acordo com a quantidade de espaços sem valores de vento da seguinte maneira:

- Nos casos em que faltam dados entre valores significativos de vento, o preenchimento foi feito com a média dos valores existentes acima e abaixo. Essa interpolação foi aplicada em tempo e altura.
- Até dois espaços sem dados seguidos de valores de vento confiáveis foram preenchidos com interpolação linear.
- Para as alturas da extremidade (81 *km* e 99 *km*) foi aplicado extrapolação em altura para um espaço sem dados e em tempo para até dois espaços sem dados.
- Os dias com até 12 intervalos de tempo sem dados a interpolação foi feita

com valores aleatórios entre $M - \sigma$ até $M + \sigma$, em que M é a média dos valores do vento existente nesse dia e σ o desvio padrão (que estabelece uma ideia do quando o valor se afasta da média). Essa interpolação foi feita apenas em tempo.

Para a determinação da amplitude da maré lunar semidiurna os ventos horários interpolados de cada dia foram dispostos em sequência para compor um mês. Depois, foi considerado que esse vento é composto pelas oscilações diurna, semidiurna e terdiurna solares mais a semidiurna lunar. Matematicamente,

$$V = V_0 + A_1 \cos\left(\frac{2\pi}{24}t - \phi_1\right) + A_2 \cos\left(\frac{2\pi}{12}t - \phi_2\right) + A_3 \cos\left(\frac{2\pi}{8}t - \phi_3\right) + A_4 \cos\left(\frac{2\pi}{12}\tau - \phi_4\right), \quad (3.17)$$

com t sendo o tempo solar local, τ é o tempo lunar e V_0 o vento médio.

Para determinar $\tau = t - \nu$ calculamos quanto a idade da Lua aumenta durante um mês sinódico a cada dia solar, esse acréscimo varia em torno de 0,81272 h , segundo [Chapman e Lindzen \(1970\)](#). O intervalo exato de tempo entre a Lua nova e o dia em que se deseja calcular a amplitude (a quantidade exata de dias e horas). Assim, determinamos a idade da Lua multiplicando o intervalo de tempo e o aumento diário.

Por fim, o tempo lunar é o tempo solar menos a idade da Lua (ν). Um exemplo de como é determinado o tempo lunar pode ser observado na Tabela 3.2, onde são mostradas as datas em que acontecem a Lua Nova, o dia em que é feito o cálculo, o acréscimo a cada dia solar da idade da Lua, o intervalo entre a Lua Nova e o dia em que está sendo realizado o exemplo, a idade da Lua e, por fim, o tempo lunar. Nessa Tabela é possível observar que quanto mais próximo da Lua Nova, a diferença entre o tempo Solar e Lunar diminui, enquanto que a medida que vai se afastando a diferença torna-se maior.

Tabela 3.2 - Exemplo da determinação do tempo lunar.

Lua Nova		Dia do exemplo		Acréscimo	Intervalo		(ν)	(τ)
Data	Hora	Data	Hora		Dia	Hora		
11/12/2004	17,49	10/01/2005	7,0	0,8152	0	2,95	0,1002	6,878
10/01/2005	4,05	20/01/2005	14,0	0,8155	10	9,95	8,5	5,5

Esse método da determinação da maré lunar semidiurna tem sido usado em vários trabalhos (e.g. [Stening et al. \(1997\)](#), [Stening et al. \(2003\)](#), [Niu et al. \(2005\)](#), [Sandford et al. \(2006\)](#), [Sandford e Mitchell \(2007\)](#)). Segundo [Malin e Schlapp \(1980\)](#) o método dos mínimos quadrado é mais indicado para estudar essa oscilação por apresentar, (1) precisão e confiabilidade nos resultados, (2) simplicidade na teoria e (3) objetividade na determinação do erro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo são apresentadas análises de amplitude e fase da maré lunar semi-diurna para São João do Cariri, Santa Maria e Cachoeira Paulista. As amplitudes e fases foram calculadas utilizando ventos horários através do método dos mínimos quadrado, a descrição da metodologia usada na determinação desses parâmetros pode ser vista na Seção 3.2.2. As amplitudes e fases apresentadas nesse trabalho são médias vetoriais (a descrição pode ser vista no Apêndice A) calculadas para todo o período de observação.

4.1 Resultados

4.1.1 São João do Cariri

Os resultados apresentados nessa seção, são para os dados obtidos pelo Radar meteorológico instalado em São João do Cariri no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2008.

Na Figura 4.1 é apresentado um gráfico de contorno para as amplitudes médias mensais de todo o período observado. São designados na horizontal os meses do ano, na vertical as altitudes em quilômetros e na parte superior a barra de cores mostra a intensidade da amplitude em metros por segundo. No painel superior é mostrado a amplitude da componente meridional observada e no painel inferior a amplitude fornecida pelo modelo Vial e Forbes (1994) para mesma componente na latitude de $7^\circ S$.

No painel superior da Figura 4.1 é possível observar que a componente meridional apresenta valores elevados de amplitude entre os meses de janeiro e fevereiro a partir de $\sim 90 km$, março e abril entre 96 e 99 km , em agosto a partir de $\sim 90 km$ e entre novembro e dezembro em quase todas as altitudes.

Amplitudes com valores menores que 2,5 m/s podem ser observadas entre os meses de janeiro e fevereiro entre 81 e 87 km , março e abril nas alturas inferiores a 93 km , maio e junho entre 81 e 87 km , setembro nas alturas inferiores a 90 km e outubro em quase todas as altitudes.

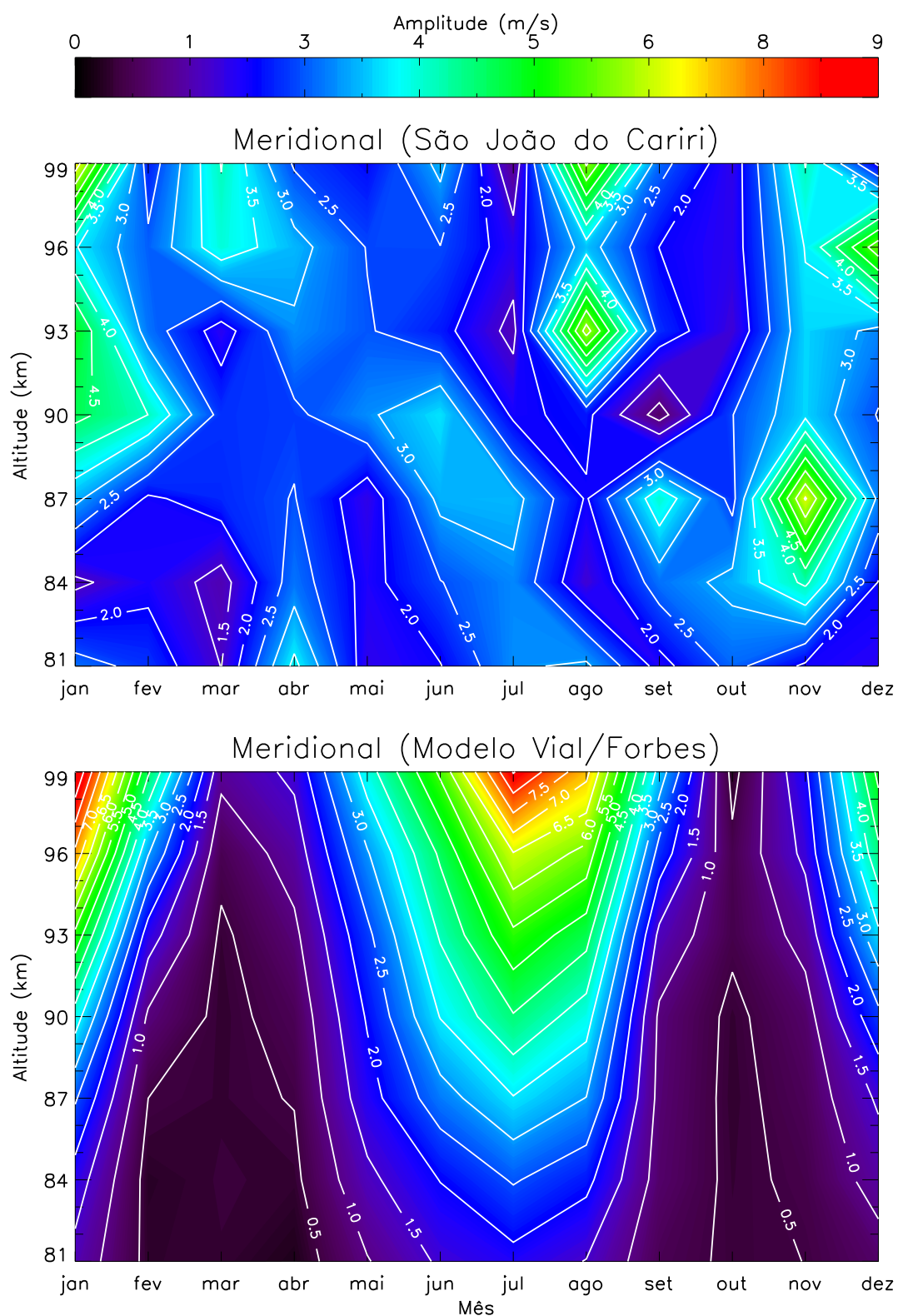


Figura 4.1 - Gráficos de contorno para a componente meridional da Maré Lunar Semi-diurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.

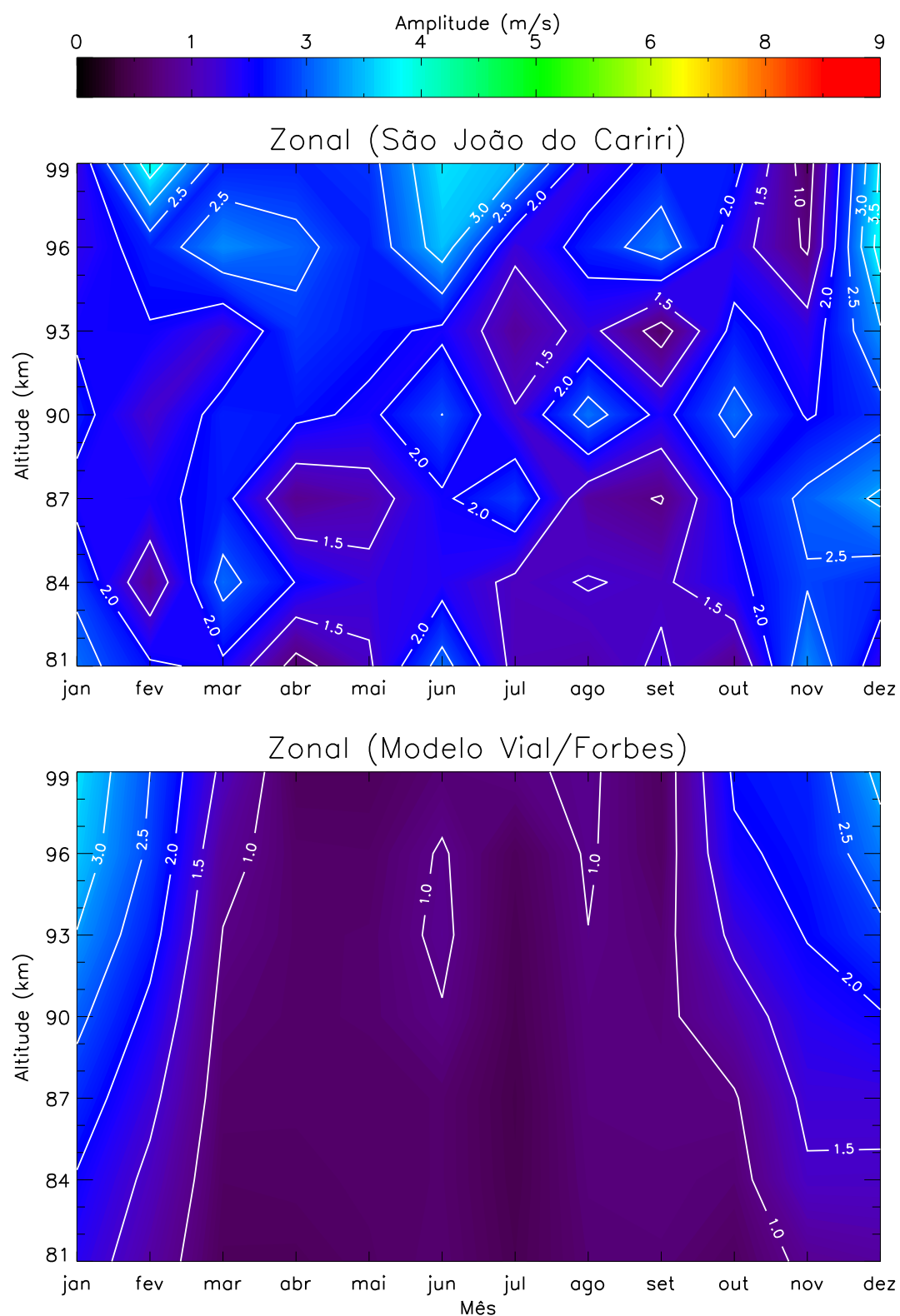


Figura 4.2 - Gráficos de contorno para a componente zonal da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.

Observando o painel inferior da Figura 4.1 verifica-se que o modelo sugere uma variação semianual nas altitudes superiores, com mínimos entre os meses de janeiro e maio, sendo que entre janeiro e fevereiro os valores mínimos se estendem apenas até $\sim 90 \text{ km}$ e entre os meses de setembro e novembro. Os valores máximos para a amplitude acontecem entre os meses de dezembro e fevereiro a partir de $\sim 90 \text{ km}$ e entre os meses de junho e agosto, a partir de $\sim 87 \text{ km}$, com dois máximos mais acentuados a partir de $\sim 96 \text{ km}$ centrados nos meses de janeiro e julho. Esse comportamento semianual não é observado. Os valores das amplitudes previstas pelo modelo variam entre $0,5$ e $8,0 \text{ m/s}$ e as amplitudes observadas entre $1,5$ e $6,0 \text{ m/s}$.

A Figura 4.2 é análoga a Figura 4.1, só que para a componente zonal, onde no painel superior é mostrada a amplitude observada e o painel inferior a amplitude do modelo para mesma componente. As amplitudes mostradas no painel superior dessa Figura variam entre $1,0$ e $2,5 \text{ m/s}$ durante a maior parte do ano, exceto nos meses de junho e dezembro nas alturas superiores, onde as amplitudes assumem valores entre $3,0$ e $4,0 \text{ m/s}$.

Analisando o painel inferior da Figura 4.2 é possível verificar que o modelo também sugere amplitudes pequenas durante boa parte do ano, embora com valores menores do que foi observado. Os valores mais elevados para a amplitude acontecem entre os meses de dezembro e janeiro, já entre os meses de abril e outubro a amplitude apresenta-se praticamente constante.

A componente zonal mostra concordância com o modelo por apresentar pequenas amplitudes ao longo de quase todo o ano, embora a amplitude observada seja mais variável. Outra concordância acontece no mês de dezembro onde é previsto um pequeno aumento na amplitude.

Para um estudo mais detalhado do comportamento da amplitude e fase da maré lunar semidiurna são analisados perfis mensais de altitude que são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4. Nos eixos verticais têm-se as altitudes em quilômetros e nos eixos horizontais as amplitudes em metros por segundo (Figura 4.3) e as fases em horas lunares (Figura 4.4).

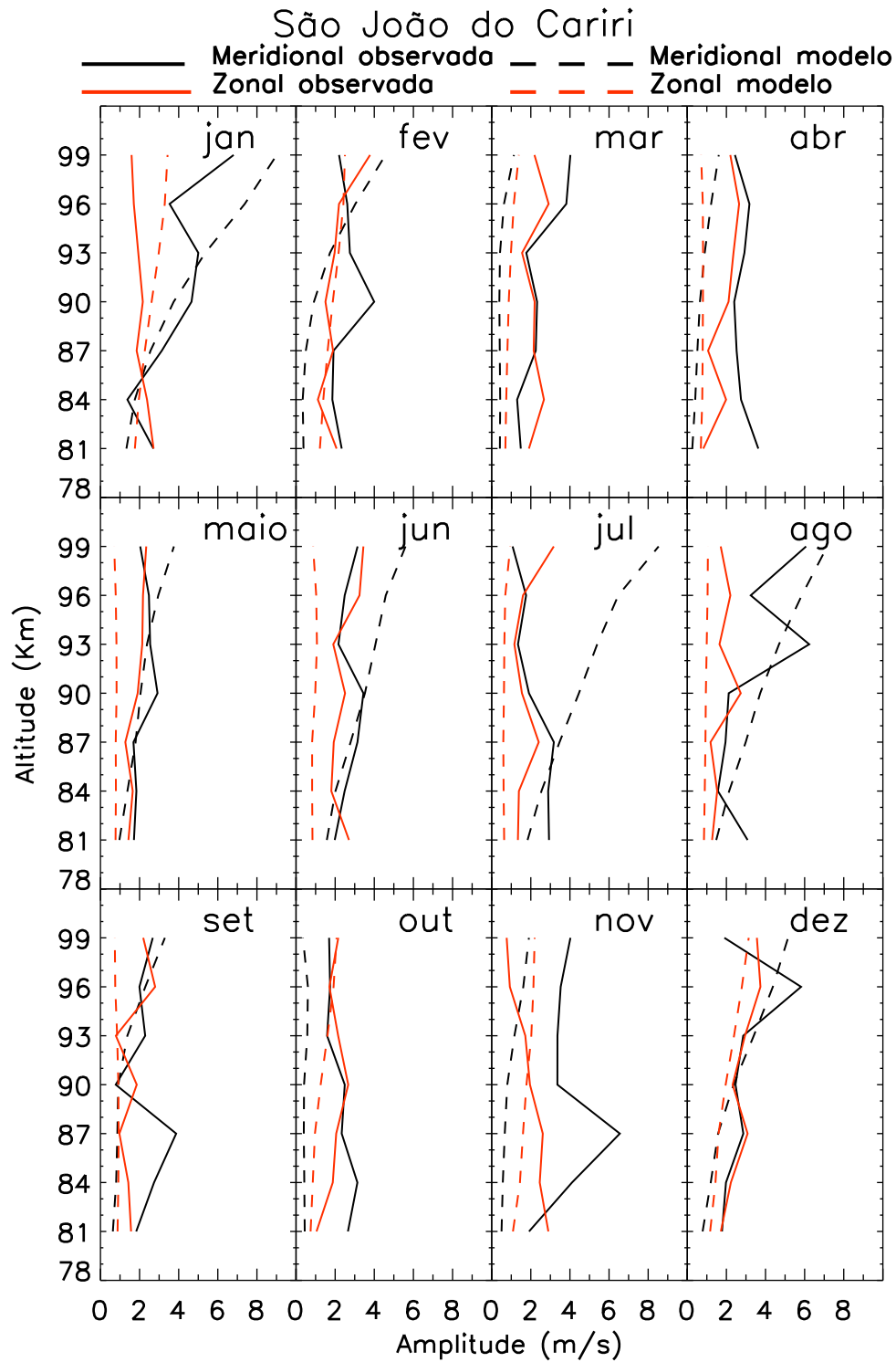


Figura 4.3 - Variação da amplitude da maré lunar semidiurna com a altitude. A linha preta representa as amplitudes da componente meridional, a linha vermelha da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha são a amplitude da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

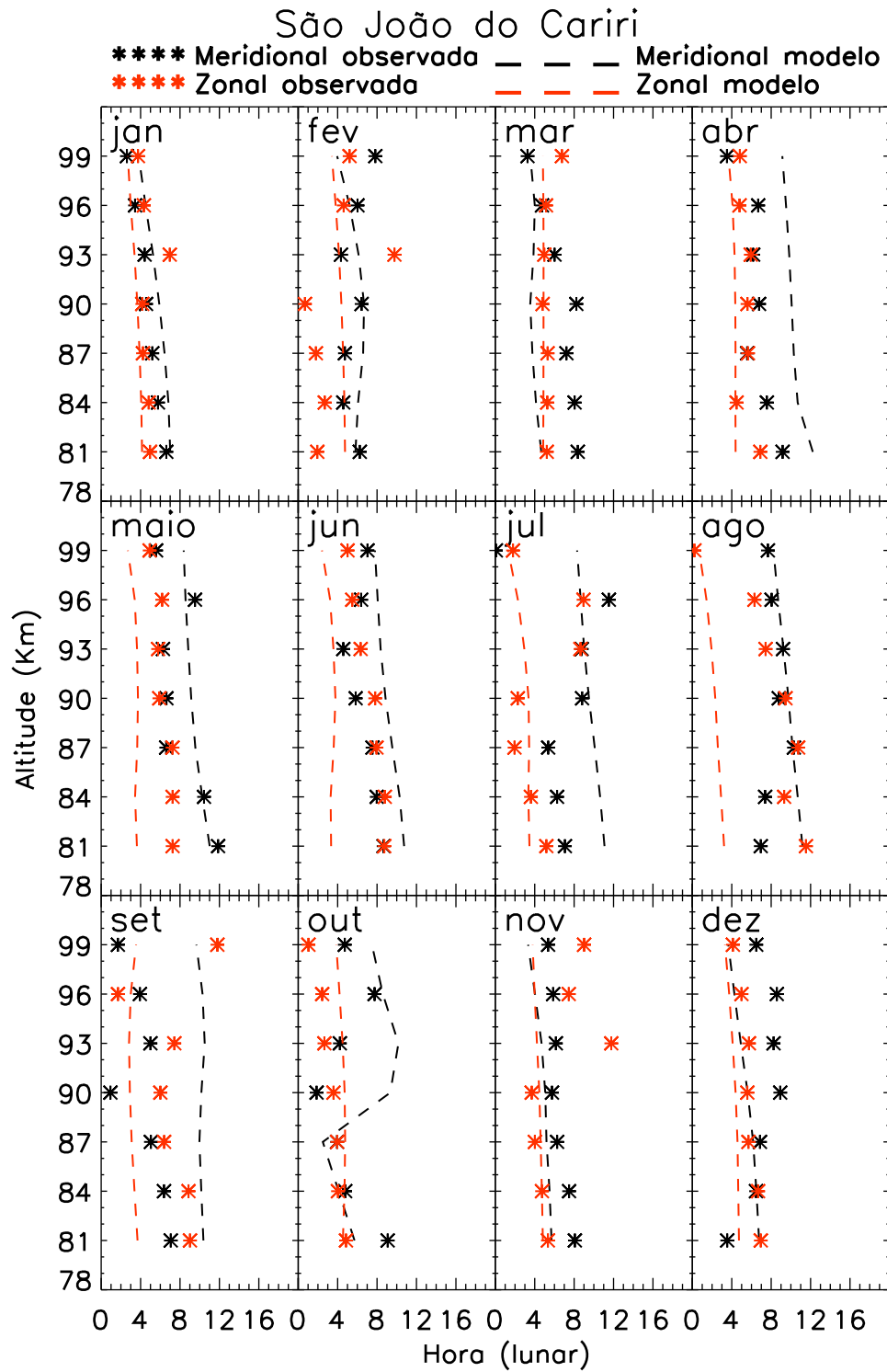


Figura 4.4 - Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

Na Figura 4.3 a linha sólida preta designa a componente meridional observada, a linha sólida vermelha a componente zonal observada, a linha pontilhada preta a componente meridional segundo o modelo e a linha pontilhada vermelha a componente zonal para o modelo. Na Figura 4.4 o símbolo preto designa a fase para a componente meridional observada, o símbolo vermelho para a componente zonal observada, a linha pontilhada preta a componente meridional do modelo e a linha pontilhada vermelha a componente zonal para os dados do modelo.

Nessa Figura é possível verificar que para alguns meses os perfis de amplitude são quase constantes ou crescentes com a altura, esse comportamento também é sugerido pelo modelo e em alguns meses é possível verificar variações com a altura. Nos meses de janeiro, maio, junho (entre 84 e 93 *km*), julho (entre 81 e 96 *km*), agosto e setembro os valores da amplitude ao longo das altitudes para componente meridional são maiores, concordando com o comportamento previsto pelo modelo. Nos meses de fevereiro, março, outubro e novembro o modelo prevê valores mais elevados de amplitude para componente zonal, enquanto que os valores observados foram maiores para componente meridional.

Analisando os perfis de fase mostrados na Figura 4.4 pode-se verificar que a fase meridional nos meses de janeiro, março, abril, maio (até 93 *km*), junho (até 93 *km*), agosto (a partir de 87 *km*), setembro e novembro e a fase zonal nos meses de janeiro, março, abril, maio, junho, agosto (até 96 *km*), setembro (até 90 *km*), outubro, novembro (até 90 *km*) e dezembro apresentam progressão com o decréscimo da altitude. Nos meses de fevereiro, julho, outubro (apenas a componente meridional) os perfis de fase são variáveis com a altitude.

A Figura 4.5 mostra a variabilidade da maré lunar semidiurna ao longo do ano, onde no painel superior é mostrada a amplitude média sobre todas as altitudes (81 a 99 *km*) e no painel inferior a fase média. No eixo horizontal estão dispostos os meses do ano e no eixo vertical a amplitude em metros por segundo (painel superior) e a fase em hora lunar (painel inferior), as linhas sólidas preta e vermelha mostram as componentes meridional e zonal observadas, respectivamente, enquanto que as linhas tracejadas preta e vermelha representam as componentes meridional e zonal do modelo. A barra de erro representa mais ou menos um desvio padrão, cuja determinação foi baseada no trabalho de Malin e Schlapp (1980) e pode ser vista no Apêndice A.

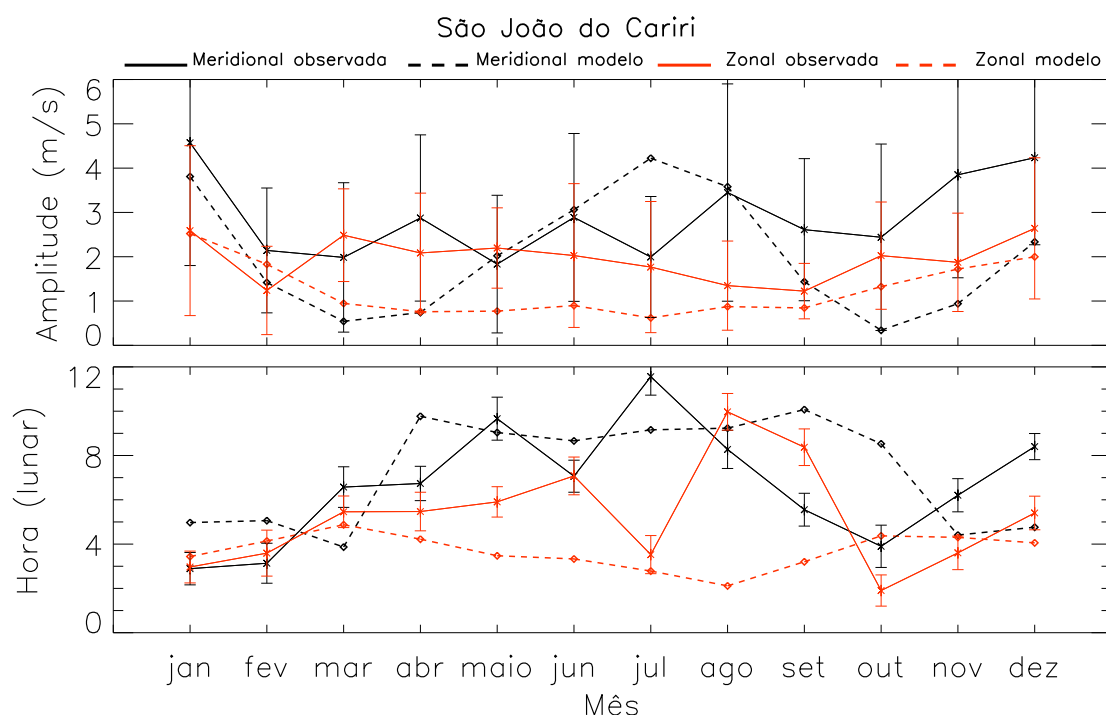


Figura 4.5 - Amplitudes (painel superior) e fases (painel inferior) médias da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal, respectivamente, para São João do Cariri. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).

No painel superior da Figura 4.5, é possível verificar que durante a maior parte do ano a amplitude média da componente meridional é maior, exceto para os meses de março e maio onde a amplitude da componente zonal passa a ser maior. É possível observar também que os valores da amplitude média para componente meridional variam entre aproximadamente 2 e 5 m/s , enquanto que os valores da componente zonal variam entre aproximadamente 1 e 3 m/s .

Os valores da amplitude para componente meridional observados nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, setembro, outubro, novembro e dezembro são maiores que os valores previstos pelo modelo, enquanto que nos meses de maio, junho e julho os valores observados são menores que os valores previstos. Os valores de amplitude observados para componente zonal são maiores que os valores previstos pelo modelo durante todo o ano, exceto nos meses de janeiro e fevereiro.

Analisando o painel inferior da Figura 4.5 pode-se observar que nos meses de março, abril, maio, julho, outubro, novembro e dezembro a fase zonal calculada encontra-se adiantada em relação a meridional, nesse período existe concordância com o modelo nos meses de abril, maio, julho e outubro, pois nos meses de novembro e dezembro as componentes do modelo encontram-se praticamente em fase e em março a fase meridional é que está adiantada em relação a componente zonal.

Nos meses de agosto e setembro a fase meridional torna-se adiantada em relação a zonal, porém nesses meses o modelo prevê a fase zonal adiantada. Em janeiro, fevereiro e junho as componentes observadas estão praticamente em fase e o modelo prevê a fase zonal adiantada.

4.1.2 Santa Maria

Os resultados apresentados nessa seção são para o conjunto de dados entre o período de janeiro de 2005 e dezembro de 2008 obtidos pelo Radar meteorológico instalado em Santa Maria (29, 7° S; 53, 8° O).

Nas Figuras 4.6 e 4.7 são apresentados gráficos de contorno para as amplitudes médias mensais de todo o período observado. O gráfico de contorno da Figura 4.6 é semelhante ao da Figura 4.1, só que no painel superior é mostrado a amplitude da componente meridional calculada para Santa Maria e no painel inferior a amplitude fornecida pelo modelo Vial e Forbes (1994) para mesma componente na latitude de 30° S.

Analisando o painel superior da Figura 4.6 é possível verificar que a componente meridional apresenta valores de amplitude mais elevados entre os meses de janeiro e fevereiro a partir de $\sim 87 \text{ km}$, entre fevereiro e abril de 81 a 87 km , em agosto em quase todas as altitudes, em outubro entre 90 e 93 km e entre novembro e dezembro a partir de $\sim 90 \text{ km}$. Amplitudes com valores menores que $2,5 \text{ m/s}$ podem ser observadas nos meses de janeiro entre 81 e 84 km , fevereiro, março e abril a partir de $\sim 90 \text{ km}$, maio, junho e julho em todas as altitudes, setembro e outubro entre 81 e 87 km e 93 e 99 km , novembro e dezembro nas alturas inferiores a 90 km . Os valores da amplitude dessa componente variam entre 1,0 e $\sim 8,0 \text{ m/s}$.

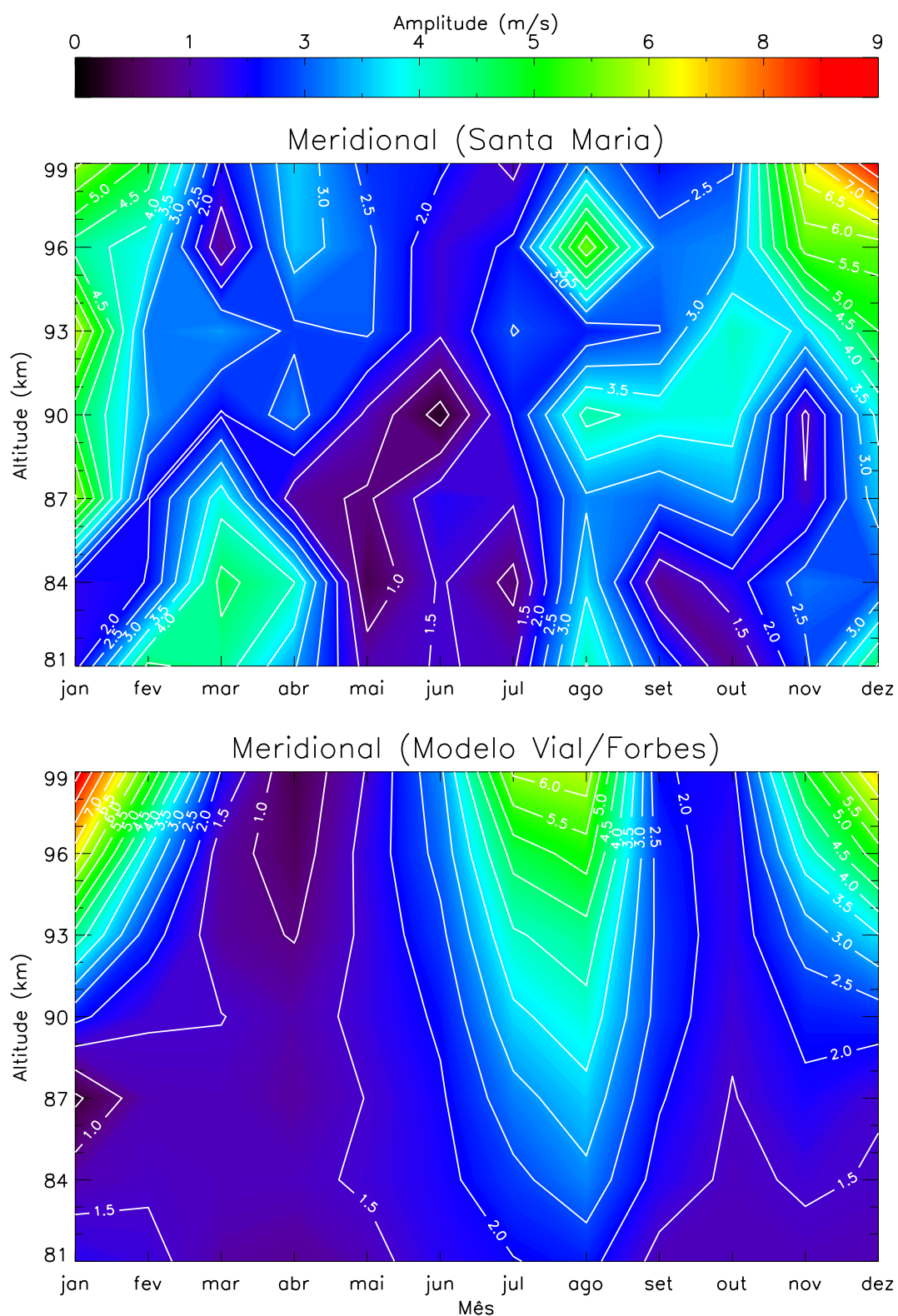


Figura 4.6 - Gráficos de contorno para a componente meridional da Maré Lunar Semi-diurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.

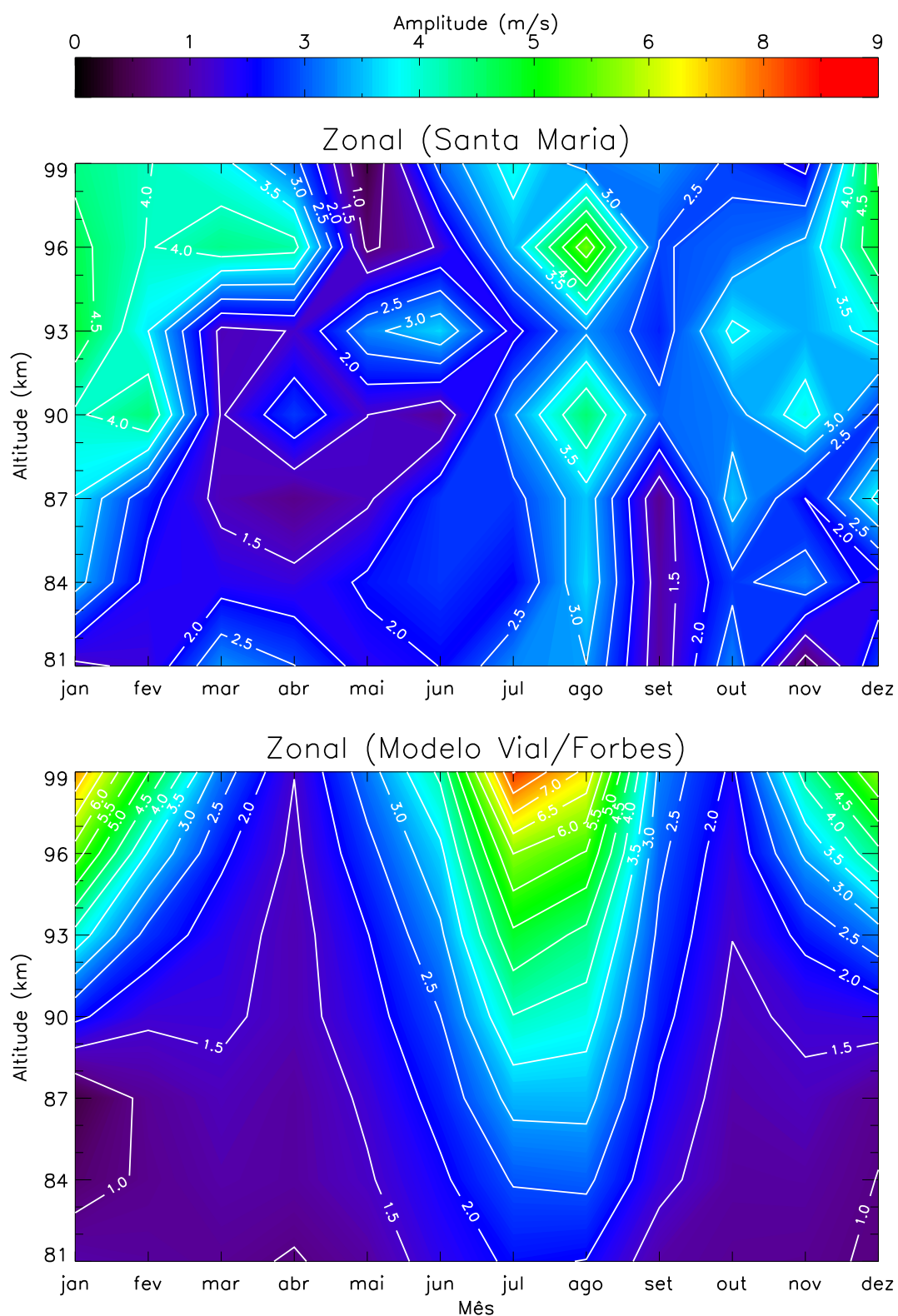


Figura 4.7 - Gráficos de contorno para a componente zonal da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.

Observando o painel inferior da Figura 4.6 verifica-se que o modelo sugere uma variação semianual com máximos entre os meses de dezembro e fevereiro a partir de $\sim 90 \text{ km}$ e entre os meses de julho e agosto a partir de $\sim 87 \text{ km}$. Os valores de amplitude previstos pelo modelo para essa componente variam entre $1,0$ e $8,0 \text{ m/s}$, esses valores também foram observados em Santa Maria.

Em relação ao modelo, existe concordância quanto aos valores observados e previstos, com os máximos entre os meses de novembro e dezembro, sendo os valores observados maiores, e entre janeiro e fevereiro, embora, o máximo observado nesse período tem início em $\sim 87 \text{ km}$.

A Figura 4.7 é análoga a Figura 4.2, só que no painel superior são apresentadas as amplitudes da componente zonal para os dados de Santa Maria e no painel inferior a amplitude prevista pelo modelo para mesma componente. A amplitude da componente zonal para Santa Maria apresenta valores mais elevados entre os meses de janeiro e fevereiro a partir de 87 km , março e abril a partir de $\sim 93 \text{ km}$, em agosto para quase todas as altitudes e entre novembro e dezembro a partir de $\sim 93 \text{ km}$.

No painel inferior da Figura 4.7 é possível verificar que o modelo sugere amplitudes mais elevadas entre novembro e março a partir de $\sim 93 \text{ km}$ e entre junho e setembro a partir de $\sim 90 \text{ km}$. As amplitudes previstas pelo modelo variam entre $1,0$ e $7,0 \text{ m/s}$, enquanto que a amplitude zonal para Santa Maria varia entre aproximadamente $1,0$ e $5,0 \text{ m/s}$. A amplitude zonal observada apresenta semelhança com o modelo no pico entre novembro e dezembro, embora o pico observado seja mais acentuado em dezembro e entre janeiro e março, porém o pico observado se estende nas alturas mais elevadas até abril.

A Figura 4.8 é análoga a Figura 4.3 só que para Santa Maria. Na análise desse gráfico é possível verificar que os perfis de amplitudes são quase constantes ou crescentes com a altitude e podem apresentar pequenas flutuações. Os meses em que as características dos perfis apresentam mais semelhança com o modelo são fevereiro, maio, junho, julho, setembro, outubro e dezembro.

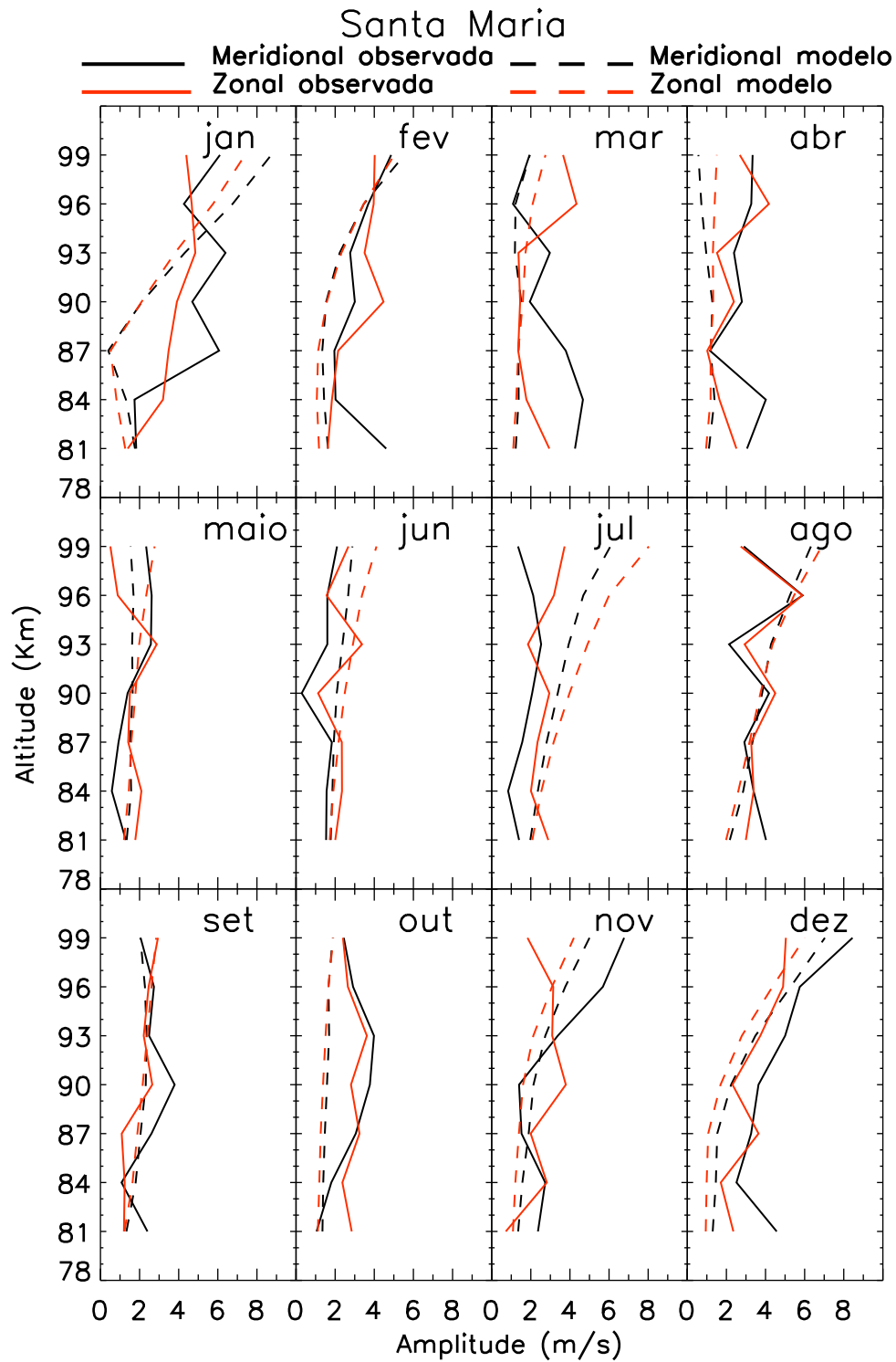


Figura 4.8 - Variação da amplitude da maré lunar semidiurna com a altitude. A linha preta representa as amplitudes da componente meridional, a linha vermelha da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha são a amplitude da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

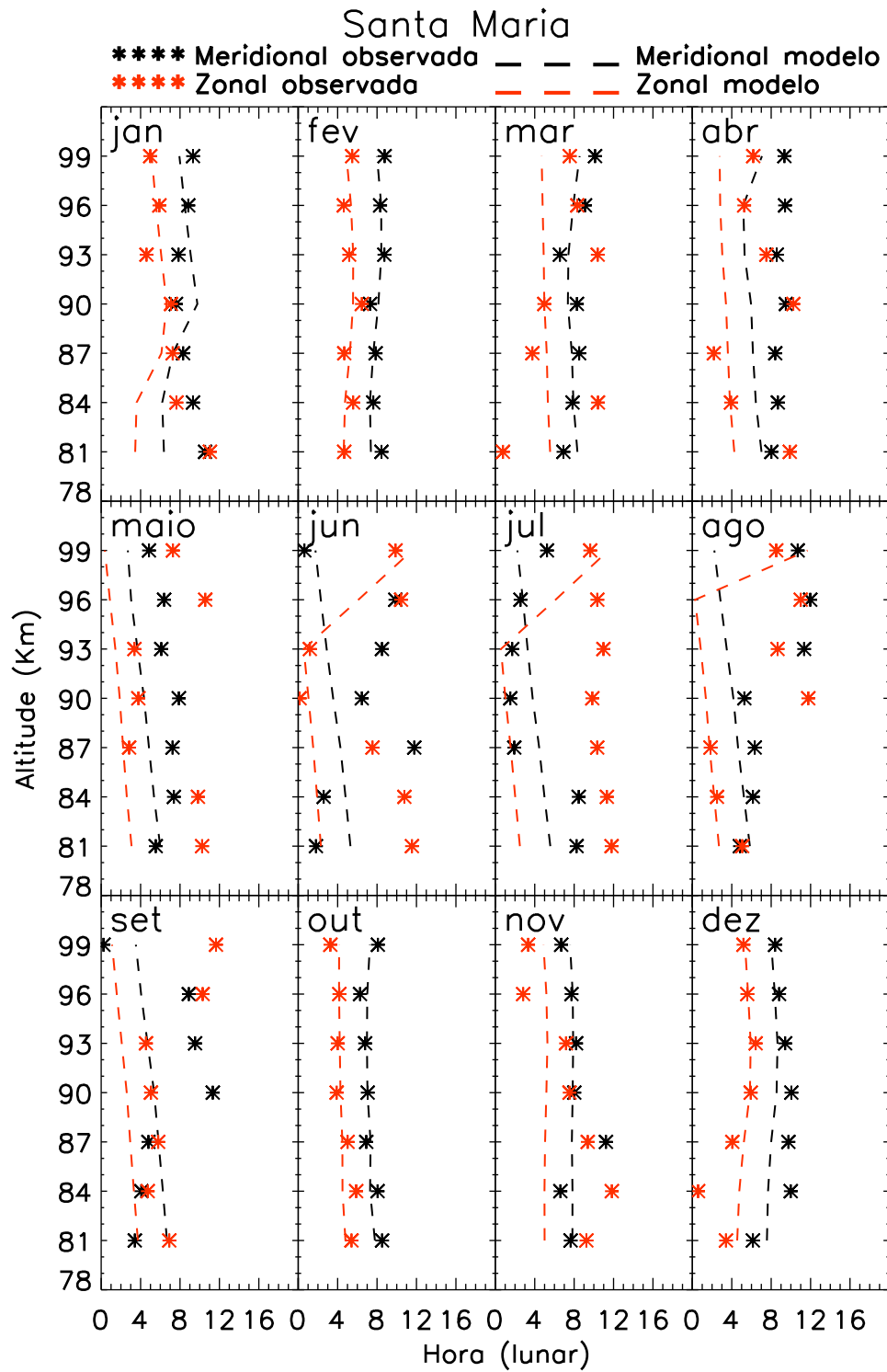


Figura 4.9 - Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

Analisando os perfis de fase mostrados na Figura 4.9 é possível verificar que as fases meridionais nos meses de janeiro, maio, agosto (até $\sim 90\text{ km}$) e dezembro e a fase zonal nos meses de janeiro, março (exceto 81, 87 e 90 km), abril (exceto 84 e 87 km), maio (até 93 km), julho, setembro (até 93 km) e novembro (entre 84 e 93 km) apresentam progressão com o decréscimo da altitude. Nos meses de fevereiro, março (apenas a componente meridional), abril (apenas a componente meridional), outubro, novembro (apenas a componente meridional) e dezembro (apenas a componente zonal) os perfis de fase são quase constantes com a altitude. Nos meses de fevereiro, março (apenas a componente meridional), outubro, novembro (apenas a componente meridional) e dezembro as fases observadas encontram-se praticamente em fase com o modelo.

A Figura 4.10 é análoga a Figura 4.5 só que para amplitude e fase de Santa Maria. No painel superior pode-se verificar que durante os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro os valores médios de amplitude da componente meridional são maiores que os valores da componente zonal. Enquanto que nos meses de maio, junho e julho os valores da amplitude zonal é que são maiores. Nos meses de agosto, setembro e outubro os valores da amplitude de ambas as componentes são muito próximos.

Nessa Figura pode-se observar que o modelo prevê valores de amplitude maiores para componente meridional nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro. Nos meses de março, abril, maio, junho, julho e agosto as amplitudes da componente zonal são maiores e, nos meses de setembro e outubro, os valores de ambas as componentes são muito próximos. Assim, o modelo diverge do comportamento observado nos meses de março e abril onde foram observadas amplitudes maiores para componente meridional e no mês de agosto em que as amplitudes observadas são muito próximas.

Os valores médios das amplitudes meridionais variam entre aproximadamente $1,0$ e $5,0\text{ m/s}$ e da componente zonal entre aproximadamente $1,0$ e $4,0\text{ m/s}$, por outro lado os valores previstos pelo modelo para componente meridional variam entre aproximadamente $1,0$ e $3,0\text{ m/s}$ e para componente zonal entre $1,0$ e $4,0\text{ m/s}$.

Analisando as fases para Santa Maria mostradas no painel inferior da Figura 4.10, pode-se observar que nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio, outubro, novembro e dezembro a fase zonal encontra-se adiantada em relação a meridional, enquanto nos meses de junho, julho, agosto e setembro a fase meridional é que está adiantada em relação a zonal. O modelo prevê a fase zonal adiantada em relação a meridional durante todo o ano, divergindo do observado nos meses de junho, julho, agosto e setembro.

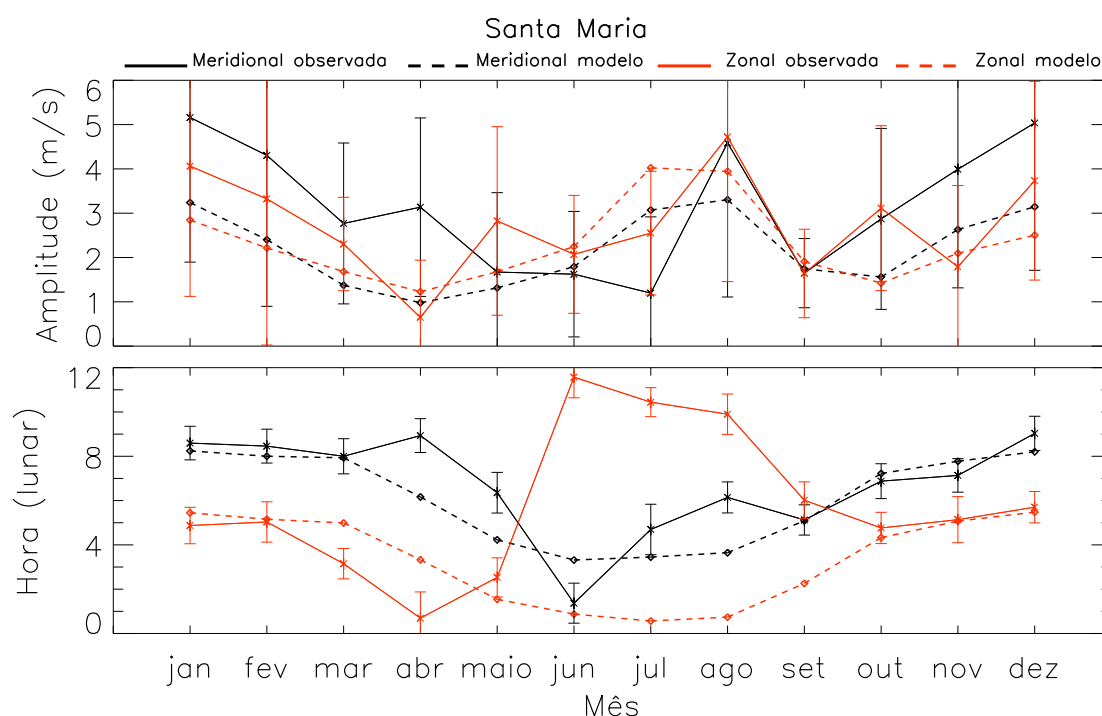


Figura 4.10 - Amplitudes médias (painel superior) e fases (painel inferior) da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal para Santa Maria. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).

4.1.3 Cachoeira Paulista

Os resultados apresentados nessa seção são para o conjunto de dados entre o período de janeiro de 2005 e dezembro de 2008 obtidos pelo Radar meteórico instalado em Cachoeira Paulista (23° S; 45° W).

Na Figura 4.11 é apresentado um gráfico de contorno para as amplitudes médias mensais de todo o período observado. Esse gráfico de contorno é semelhante a Figura 4.1, só que no painel superior é mostrado a amplitude da componente meridional calculada para Cachoeira Paulista e no painel inferior a amplitude fornecida pelo modelo Vial e Forbes (1994) para a mesma componente na latitude de 23° S.

Analisando o painel superior da Figura 4.11 pode-se verificar que a componente meridional apresenta valores de amplitude mais elevados entre os meses de janeiro e março entre 81 e 93 km, maio e junho a partir de ~ 90 km, agosto e setembro para algumas altitudes e entre novembro e dezembro a partir de ~ 90 km. Amplitudes com valores menores que 2,5 m/s podem ser observadas entre os meses de janeiro e março nas altitudes superiores, no mês de maio, julho e outubro para todas as altitudes e entre novembro e dezembro nas altitudes inferiores a 90 km. Os valores da amplitude dessa componente variam entre 1,5 e 6,0 m/s.

Observando o painel inferior da Figura 4.11 verifica-se que o modelo sugere valores baixos de amplitude durante a maior parte do ano, com um pequeno máximo entre dezembro e janeiro nas altitudes mais elevadas. As amplitudes sugeridas pelo modelo variam entre 1,0 e 2,5 durante quase todo o ano, exceto entre dezembro e janeiro nas altitudes superiores a 96 km onde pode alcançar valores de até 4,0 m/s.

A Figura 4.12 é análoga a Figura 4.2, só que no painel superior são apresentadas as amplitudes da componente zonal para os dados de Cachoeira Paulista e no painel inferior a amplitude prevista pelo modelo para mesma componente.

A amplitude da componente zonal mostrada no painel superior da Figura 4.12 apresenta valores mais elevados no mês de janeiro a partir de ~ 90 km, julho a partir de 90 km, entre os meses de outubro e novembro de 90 a 96 km e em dezembro a partir de ~ 87 km. Valores de amplitude abaixo de 2,5 m/s podem ser observadas nos meses de janeiro nas altitudes inferiores a 90 km, entre os meses de fevereiro e junho para quase todas as altitudes, no mês de julho nas altitudes inferiores a 90 km, entre agosto e setembro para todas as altitudes, em outubro nas altitudes inferiores a 90 km, em novembro para quase todas as altitudes e em dezembro abaixo de 87 km.

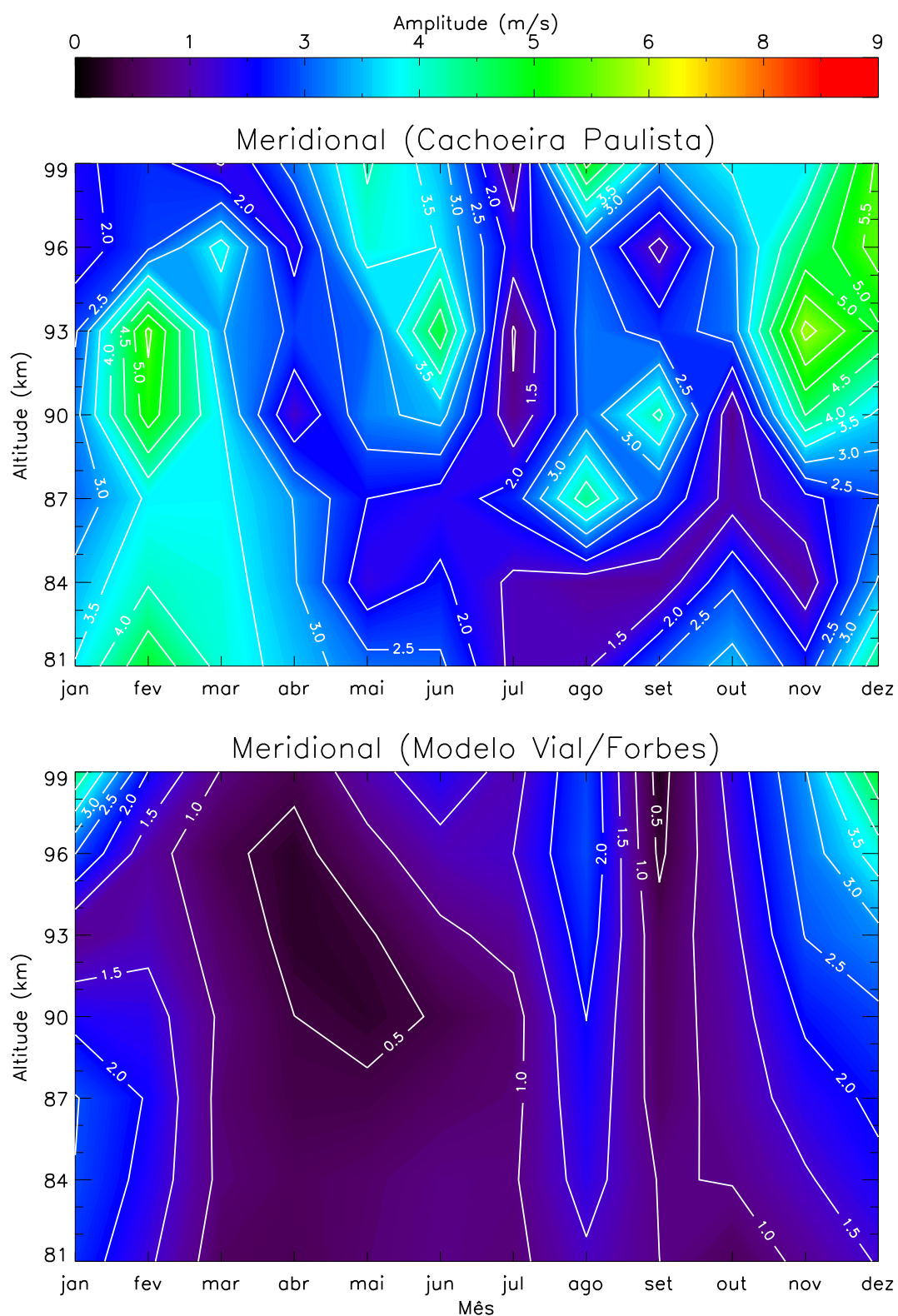


Figura 4.11 - Gráficos de contorno para a componente meridional da Maré Lunar Semi-diurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.

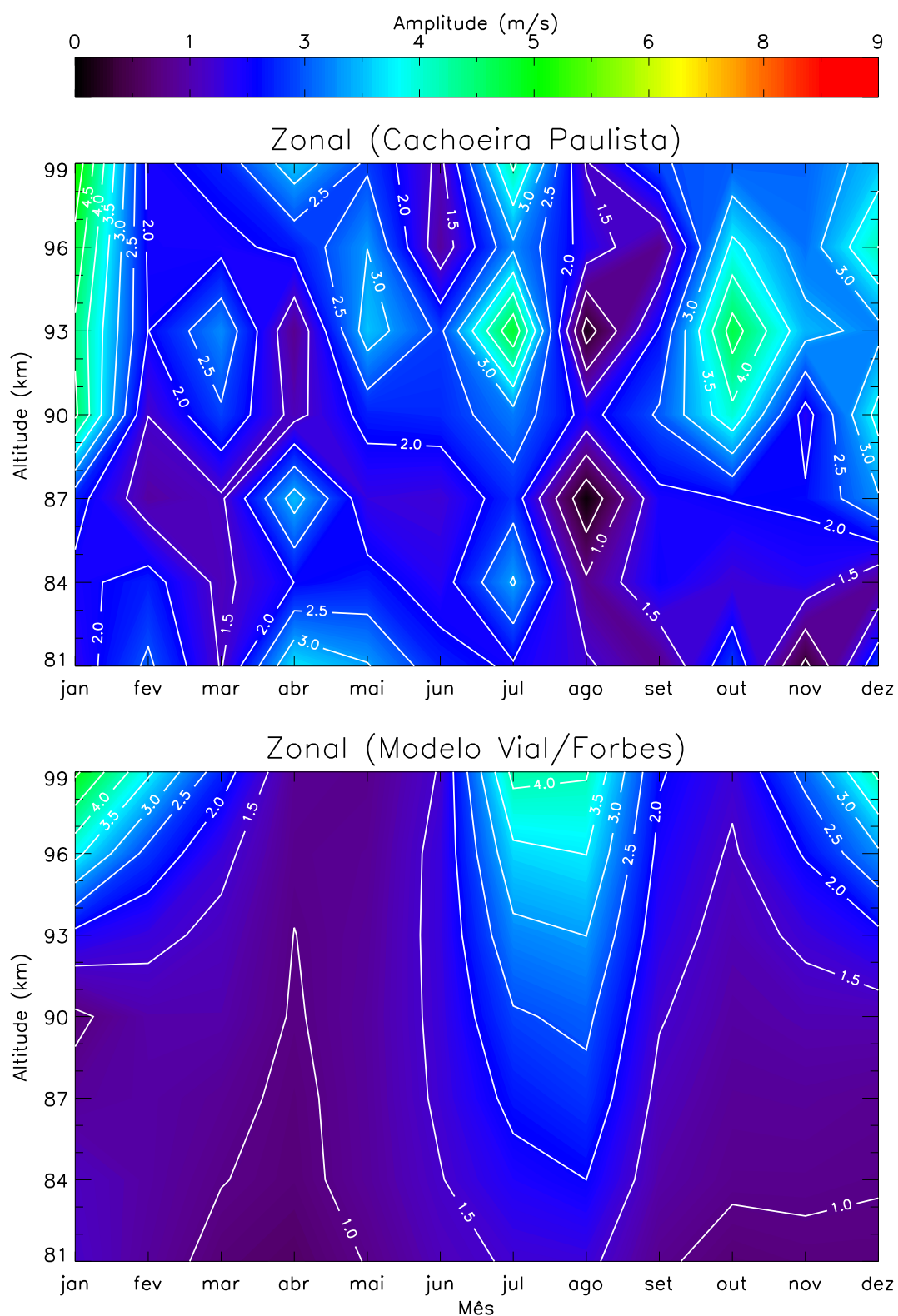


Figura 4.12 - Gráficos de contorno para a componente zonal da Maré Lunar Semidiurna, no painel superior são mostradas as amplitudes observadas e no painel inferior o modelo. A escala de cores indica a intensidade da amplitude.

No painel inferior da Figura 4.12 é possível verificar que o modelo sugere valores menores que $2,5 \text{ m/s}$ durante a maior parte do ano, exceto nos meses de dezembro e fevereiro a partir de 96 km e entre julho e agosto a partir de $\sim 93 \text{ km}$, onde atingem valores de até $4,0 \text{ m/s}$. Os valores previstos pelo modelo para essa componente variam entre $1,0$ e 5 m/s , intervalo de valores também obtido para Cachoeira Paulista.

A Figura 4.13 é análoga a Figura 4.3 só que para Cachoeira Paulista. Na análise desse gráfico é possível verificar que essa amplitude apresenta perfis de amplitude variáveis, contantes ou crescentes com a altura. Para componente meridional os meses em que os perfis de amplitude mais se assemelharam com o modelo foram fevereiro, março, maio, julho e dezembro, embora os valores observados sejam maiores. Quanto a componente zonal os meses em que os perfis mais se assemelharam com o modelo foram janeiro, fevereiro, março, maio, junho, julho, setembro e novembro, embora os valores obtidos sejam maiores e os perfis observados apresentem variações em algumas altitudes.

A Figura 4.14 mostra a fase calculada para Cachoeira Paulista e o modelo para essa latitude. Nessa Figura pode-se verificar que as fases meridionais nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, maio (a partir de 90 km), junho, julho (exceto 81 e 87 km), agosto (até 93 km), setembro (a partir de 90 km), outubro e dezembro e a fase zonal nos meses de janeiro, março, maio (exceto 84 km), julho (a partir de 84 km), setembro (até 93 km), outubro, novembro (a partir de 90 km) e dezembro apresentam perfis com características de progressão com o decréscimo da altitude ou quase constante.

Nos meses de janeiro, fevereiro (apenas a componente meridional), março, outubro (apenas a componente zonal), novembro (apenas a componente meridional) e dezembro os perfis observados encontram-se praticamente em fase com os previstos pelo modelo.

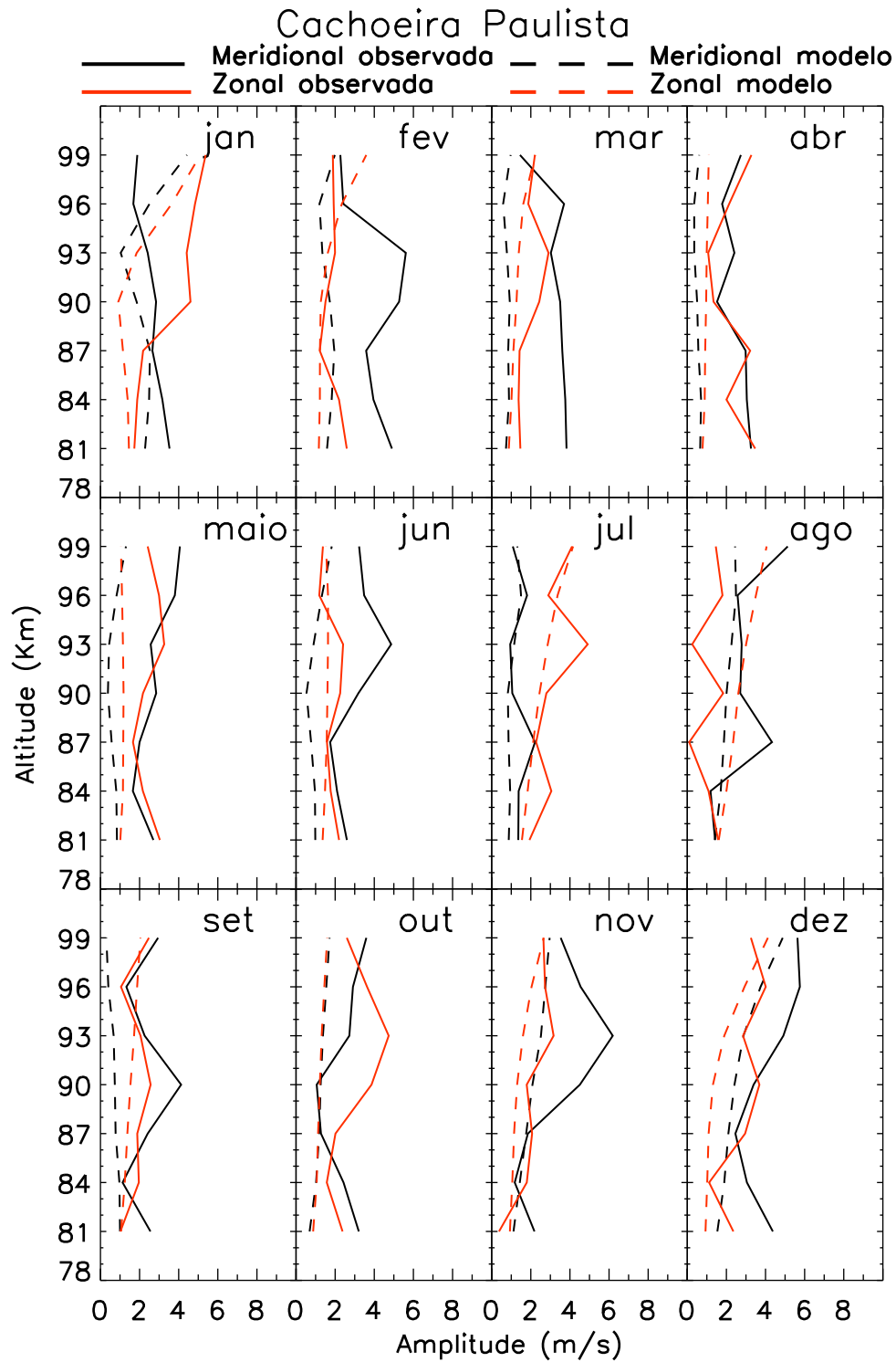


Figura 4.13 - Variação da amplitude da maré lunar semidiurna com a altitude. A linha preta representa as amplitudes da componente meridional, a linha vermelha da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha são a amplitude da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

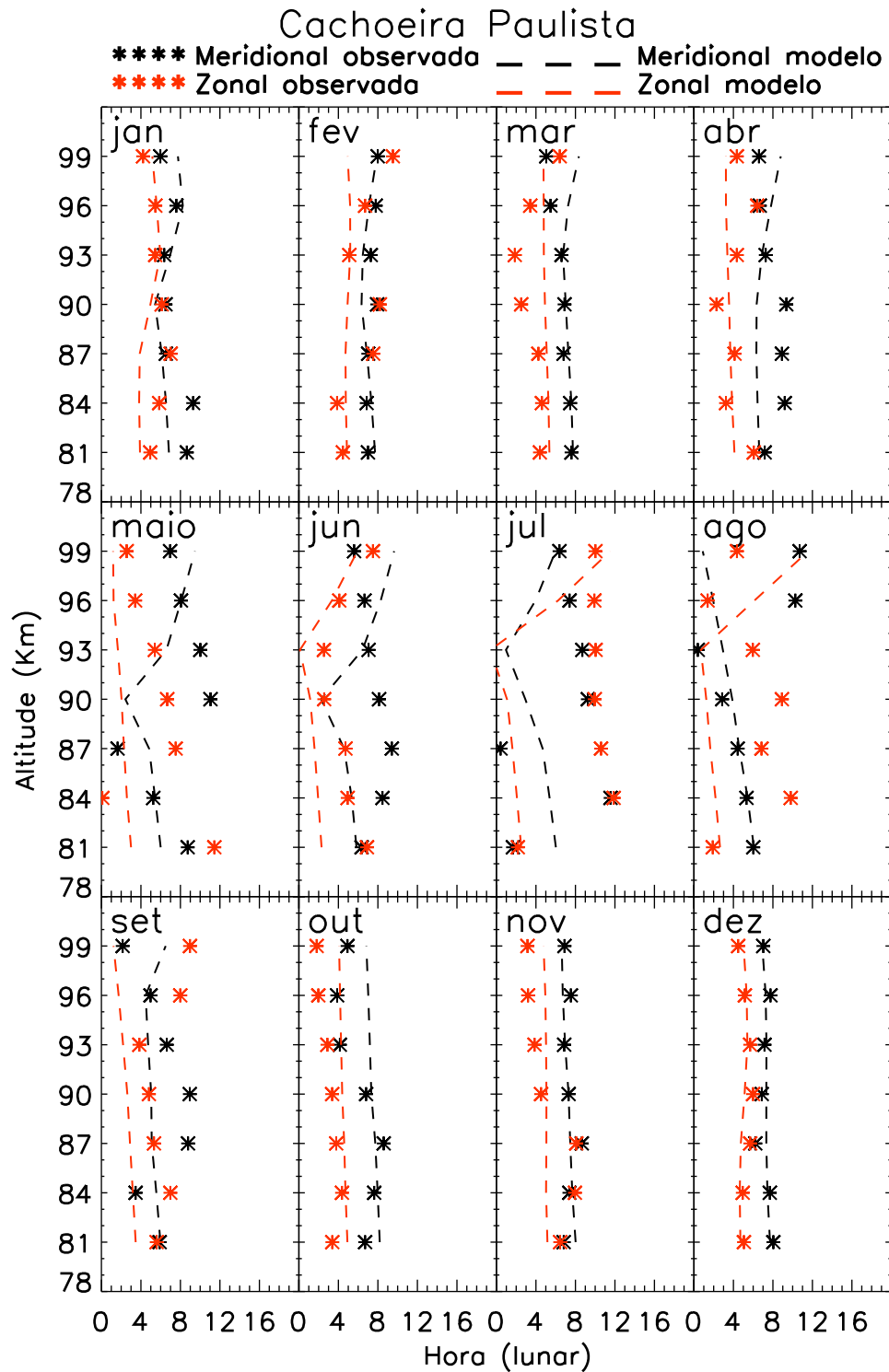


Figura 4.14 - Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

A Figura 4.15 é análoga a Figura 4.5 só que para amplitude e fase de Cachoeira Paulista. No painel superior dessa Figura pode-se verificar que nos meses de fevereiro, março, junho, agosto, outubro, novembro e dezembro os valores médios de amplitude da componente meridional são maiores que os valores obtidos para componente zonal. Enquanto que nos meses de janeiro e julho os valores médios da componente zonal é que são maiores e nos meses de abril, maio e setembro os valores médios de ambas as componentes são muito próximos.

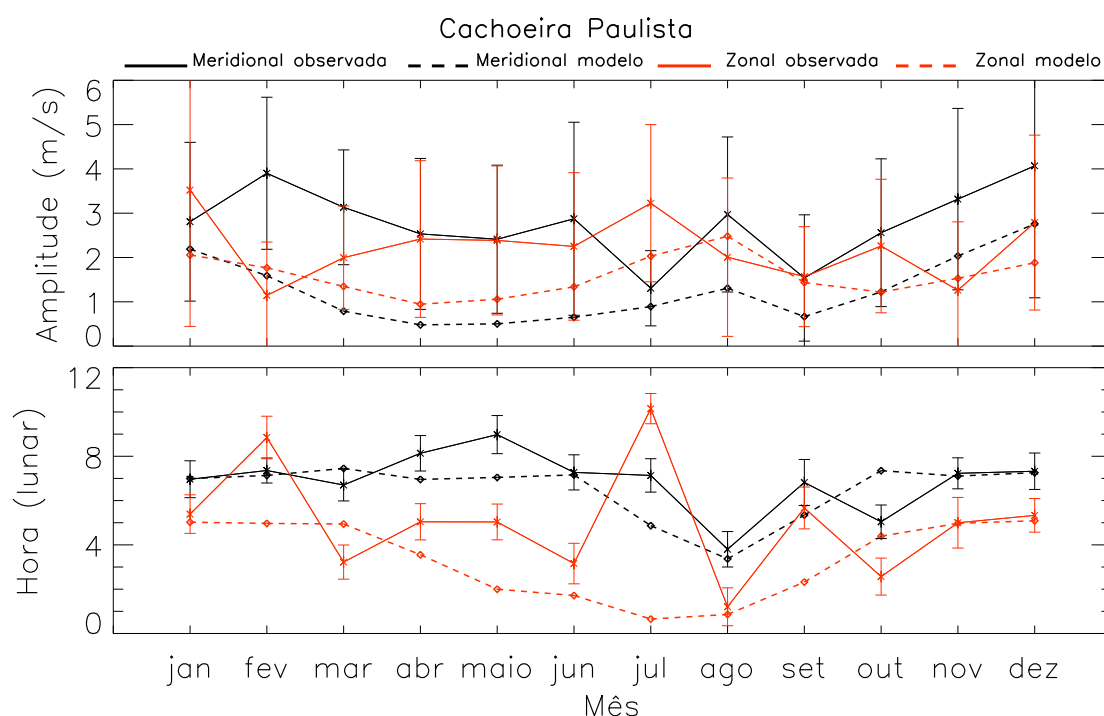


Figura 4.15 - Amplitudes médias (painel superior) e fases (painel inferior) da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal para Cachoeira Paulista. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).

Nessa Figura, observa-se ainda que o modelo prevê que entre os meses de fevereiro e setembro os valores médios de amplitude da componente zonal sejam maiores que os valores médios da componente meridional, comportamento observado apenas nos meses de janeiro e julho. Nos meses de novembro e dezembro o modelo prevê amplitudes maiores para componente meridional, comportamento que também foi observado para Cachoeira Paulista.

Os valores médios das amplitudes meridionais e zonais variam entre aproximadamente 1,0 e 4,0 m/s , por outro lado, os valores previstos pelo modelo para componente meridional variam entre $\sim 0,5$ e 3,0 m/s e para componente zonal entre 1,0 e 3,0 m/s .

Analisando as fases para Cachoeira Paulista mostradas no painel inferior da Figura 4.15 pode-se observar que nos meses de janeiro, março, abril, maio, junho, agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro a fase zonal encontra-se adiantada em relação a meridional e apenas nos meses de fevereiro e julho a fase meridional encontra-se adiantada. O modelo prevê a fase zonal adiantada em relação a meridional durante todo o ano, divergindo do observado apenas nos meses de fevereiro e julho. O comportamento da fase meridional durante o ano apresenta concordância com o comportamento previsto pelo modelo para essa componente.

4.1.4 Comparação entre as três localidades

Nessa subseção é realizada uma comparação entre as três localidades descritas nas seções anteriores, para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2008. A Figura 4.16 mostra o comportamento da amplitude e fase média sobre todas as altitudes para São João do Cariri, Santa Maria e Cachoeira Paulista. No lado esquerdo são mostradas as amplitudes e fases para a componente meridional e do lado direito para a componente zonal. A linha preta designa os parâmetros para São João do Cariri, a linha vermelha para Santa Maria e a linha azul para Cachoeira Paulista.

Nos dois painéis superiores do lado esquerdo da Figura 4.16 são mostradas as amplitudes meridionais, as observadas no primeiro e as do modelo no segundo (de cima para baixo). Fazendo a análise desses dois gráficos verifica-se que entre os meses de maio e agosto o modelo prevê menores amplitudes para a latitude de $23^\circ S$ (Cachoeira Paulista) e maiores amplitudes para a latitude de $7^\circ S$ (São João do Cariri), concordando com os resultados obtidos no mês de julho em que a maior amplitude observada foi para São João do Cariri e no mês de agosto onde o menor valor de amplitude observado é para Cachoeira Paulista. Entre os meses de fevereiro e março, o modelo prevê maiores amplitudes para a latitude de $30^\circ S$ (Santa Maria) e menores amplitudes para a latitude de $7^\circ S$, divergindo do observado apenas na maior amplitude do mês de março onde Cachoeira Paulista é que tem o maior valor de amplitude. No mês de abril, o modelo prevê a menor amplitude para a latitude de $23^\circ S$ e a maior amplitude para a latitude de $30^\circ S$, comportamento que também foi

observado e entre outubro e dezembro são previstas as menores amplitudes para a latitude de $7^\circ S$ e maiores para a latitude de $30^\circ S$, divergindo dos resultados obtidos devido a menor amplitude nos meses de novembro e dezembro ser para Cachoeira Paulista.

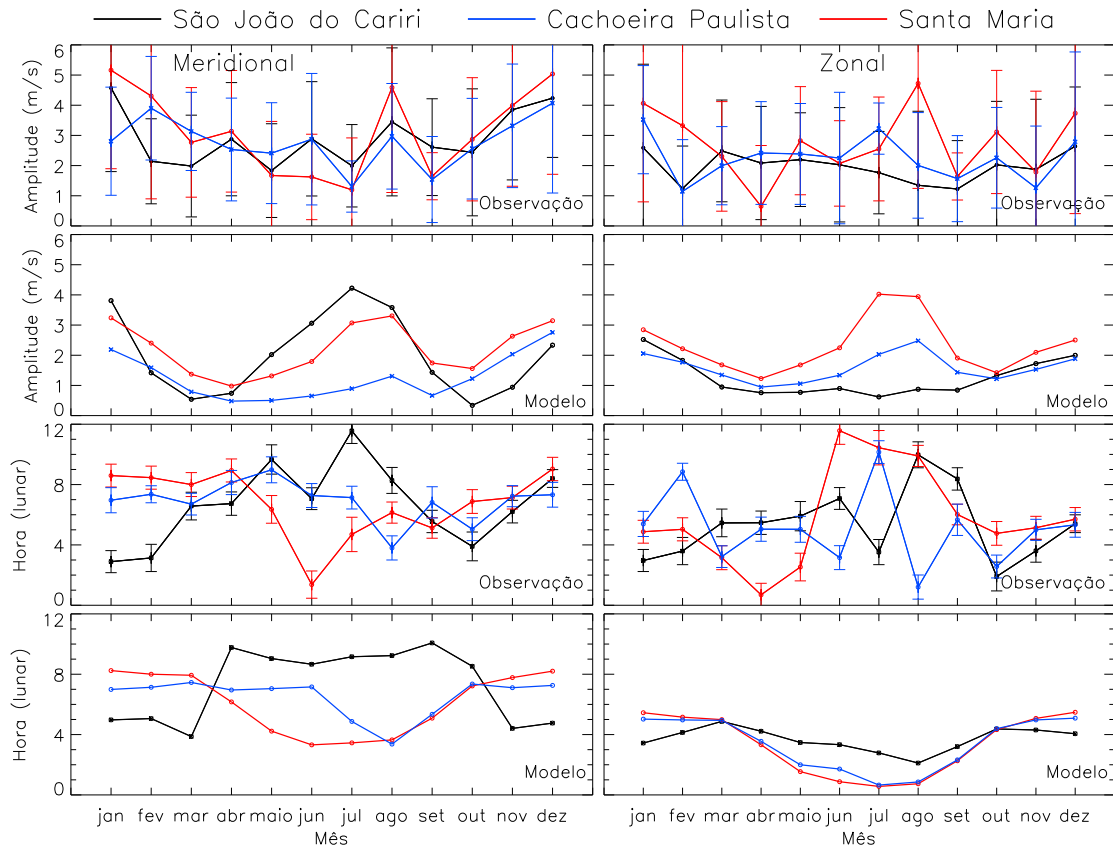


Figura 4.16 - Comportamento médio da amplitude e fase ao longo do ano para os dados observados e o modelo. A linha preta designa amplitude e fase para São João do Cariri, a linha vermelha para Santa Maria e a linha azul para Cachoeira Paulista.

Nos dois painéis inferiores do lado esquerdo da Figura 4.16 são mostradas as fases meridionais calculadas e previstas pelo modelo, respectivamente. Para essa componente de abril a julho e de setembro a outubro o modelo prevê uma propagação de fase da latitude de $30^\circ S$ para a latitude de $7^\circ S$, entre novembro e março o sentido da propagação se inverte e no mês de agosto o modelo prevê a fase se propagando da latitude de $23^\circ S$ para a latitude de $7^\circ S$. A fase observada concorda com o modelo entre os meses de janeiro e março, maio e julho e em agosto. A diferença de fase

entre as três localidades é menor do que a prevista pelo modelo.

Na Figura 4.16 os dois painéis superiores do lado direito são idênticos aos do lado esquerdo só que para a componente zonal. Para essa componente o modelo prevê amplitudes maiores para a latitude de $30^{\circ} S$ durante todo o ano, comportamento também observado com exceção dos meses de março, abril, junho, julho e novembro. Entre março e setembro o modelo prevê amplitudes menores para a latitude de $7^{\circ} S$, divergindo dos resultados apenas nos meses de março e abril.

Analisando os dois painéis inferiores do lado direito da Figura 4.16 os quais são idênticos ao do lado esquerdo só que para a componente zonal, pode-se concluir que entre novembro e fevereiro o modelo sugere uma propagação de fase da latitude de $7^{\circ} S$ para a latitude de $30^{\circ} S$, comportamento que foi observado nos meses de novembro e dezembro, pois nos meses de janeiro e fevereiro a progressão de fase observada é da latitude de $7^{\circ} S$ para a latitude de $23^{\circ} S$. Entre abril e junho, o modelo prevê uma progressão de fase da latitude de $30^{\circ} S$ para a latitude de $7^{\circ} S$, comportamento observado nos meses de abril e maio e entre os meses de julho e setembro o modelo prevê as fases das latitudes de $30^{\circ} S$ e $23^{\circ} S$ muito próximas, comportamento observado no mês de setembro.

4.2 Discussões

As amplitudes para as três localidades estudadas (no período de 2005 a 2008) em ambas as componentes (meridional e zonal) apresentam tendências de crescimento com a altitude (embora se observe algumas variações ao longo das altitudes), como pode ser observado nas Figuras 4.3, 4.8 e 4.13. Por outro lado, as fases apresentam uma tendência de progressão com o decréscimo da altitude (característica bem conhecida de ondas verticalmente propagantes na atmosfera) ou praticamente constante com a altitude (também com pequenas variações), como pode ser verificado nas Figuras 4.4, 4.9 e 4.14. Essas são características também previstas pelo modelo Vial e Forbes (1994).

Poucos estudos foram feitos para latitudes próximas de São João do Cariri. Recentemente Sandford e Mitchell (2007) analisaram dados de um radar meteorológico instalado em Ascension Island ($8^{\circ} S$, $14.4^{\circ} W$), utilizando a mesma metodologia aplicada no presente trabalho, só que para o período de 2001 a 2005. Com uma análise similar à mostrada nas Figuras 4.1 e 4.2 verificaram que as amplitudes mais elevadas para a

componente meridional aconteceram entre os meses de novembro e fevereiro, maio e junho (a partir de $\sim 90\text{ km}$), julho e setembro. A componente zonal apresentou picos entre janeiro e abril, junho e outubro para as altitudes superiores a 88 km e em dezembro, com valores de amplitude menores que a componente meridional.

A componente meridional para São João do Cariri apresenta semelhança com os resultados obtidos para Ascension Island quanto ao máximo que acontece entre novembro e fevereiro, sendo que os valores obtidos para São João do Cariri são menores. A componente zonal para São João do Cariri apresenta valores pequenos durante praticamente todo o ano, por outro lado a componente zonal para Ascension Island apresentou valores mais elevados para alguns meses.

Na análise da variação da maré com a altitude mês a mês para Ascension Island e comparação com o modelo Vial e Forbes (1994), eles encontraram perfis de amplitudes variáveis com a altitude para alguns meses, como também foi obtido para São João do Cariri. Para a maioria dos meses os perfis de amplitude para Ascension Island apresentaram tendência de crescimento com a altitude, mas em alguns meses, esses perfis foram decrescentes com a altitude, comportamentos também apresentados na Figura 4.3. Em relação a fase, Ascension Island apresentou para alguns meses fases variáveis com a altitude, progressões de fase com o decréscimo da altitude e, ainda para alguns meses, perfis com fase quase constante ao longo das altitudes (indicando altos comprimentos de onda vertical), esses comportamentos de fase também podem ser verificados na Figura 4.4. Foi obtido ainda diferença de fase que pode exceder 6 horas entre as componentes meridional e zonal de Ascension Island em relação ao modelo.

Fazendo um estudo da maré lunar semidiurna sobre todas as altitudes, similar ao apresentado na Figura 4.15, Sandford e Mitchell (2007) obtiveram amplitudes médias mensais que variam principalmente entre $\sim 1,5$ e $3,0\text{ m/s}$, enquanto que as amplitudes médias sobre todas as altitudes obtidas para São João do Cariri variam entre aproximadamente $1,0$ e $4,0\text{ m/s}$. Eles verificaram ainda que durante a maior parte do ano as amplitudes meridionais são maiores que as zonais, o que também foi observado em São João do Cariri.

Aplicando a mesma análise para fase, Sandford e Mitchell (2007) encontraram que durante a maior parte do ano a fase da componente zonal está adiantada em relação a meridional. Stening et al. (2003) analisaram dados de 1993 a 1997 de um radar

meteórico instalado próximo a Jakarta ($6, 4^{\circ}S$) e fazendo análise da amplitude média de todas as altitudes ao longo dos meses (similar a apresentada no painel superior da Figura 4.5), eles encontraram amplitudes em torno de 2 m/s , alcançando valores mais elevados nos meses de janeiro, fevereiro e dezembro. Quanto à fase, apenas em janeiro e abril a componente zonal encontra-se atrasada em relação a meridional. Características semelhantes aos dois trabalhos citados acima também foram observadas em São João do Cariri (Figura 4.5).

Stening et al. (2003) relatam que três comportamentos para a fase podem ser observados, (1) uma diferença de fase de 0 ou 6 h como características da região equatorial, (2) a fase meridional acontecendo três horas depois que a zonal designa característica do hemisfério Sul e (3) que de acordo com a teoria clássica se a fase zonal acontece três horas depois que a meridional, designa características do hemisfério Norte. Além disso, relatam ainda que diferenças de até três horas entre a fase meridional e zonal é prevista pela teoria clássica de maré.

Na Figura 4.5 é possível observar que o modelo prevê diferenças entre as componentes em torno de 0 ou 6 *horas* (características do equador), em São João do Cariri as componentes encontram-se praticamente em fase nos meses de janeiro, fevereiro e junho e a diferença de 6 h pode ser observada no mês de julho. Entre os meses de março e maio, outubro e dezembro a fase meridional acontece $\pm 3\text{ h}$ depois que a zonal que é característica do hemisfério Sul e nos meses de agosto e setembro a fase zonal acontece depois que a meridional indicando característica de hemisfério Norte. Assim, o comportamento da fase ao longo do ano em São João do Cariri apresenta consistência em relação ao previsto pela teoria. Características de hemisfério Norte na relação de fase também foram encontradas em Jakarta e segundo Stening et al. (2003) o surgimento de características de hemisfério Norte na relação de fase no verão do hemisfério Sul e entre os meses de agosto e outubro podem indicar uma invasão das condições do hemisfério de inverno através do equador nesse período e efeitos de marés antissimétricas.

Stening et al. (1994) fazendo análise da maré lunar semidiurna para Adelaide ($35^{\circ}S$) com um conjunto de dados de 1985 a 1990 encontraram perfis de amplitudes variáveis, crescente e decrescente com a altitude para alguns meses, esses comportamentos também foram encontradas em Santa Maria e podem ser observados na Figura 4.8. Em Santa Maria foram encontrados perfis de fase quase verticais, alguns variáveis com a altitude e outros têm progressão com o decréscimo da altitude, os quais po-

dem ser observados na Figura 4.9, esses comportamentos também foram observados em Adelaide.

Niu et al. (2005) analisando a maré lunar semidiurna ao longo de todas as altitudes (80-98 *km*) para Adelaide de janeiro de 2002 a outubro de 2003 obtiveram valores de amplitude similares aos obtidos para Santa Maria, embora em alguns meses as amplitudes em Santa Maria sejam maiores. Eles obtiveram durante a maior parte do ano maiores amplitudes para componente meridional, comportamento que também foi observado em Santa Maria. Quanto a fase, a componente zonal observada por eles encontra-se adiantada em relação a meridional para quase todos os meses, exceto novembro e dezembro, esse padrão também foi observado em Santa Maria (exceto em junho, julho, agosto e setembro).

Para a latitude de Santa Maria o modelo prevê a fase meridional acontecendo aproximadamente 3 *horas* depois que a fase zonal (características do hemisfério sul), esse mesmo comportamento foi observado nos dados, exceto entre os meses de junho e setembro.

O comportamento geral encontrado para as amplitudes em Cachoeira Paulista apresentam algumas semelhanças em relação ao comportamento previsto pelo modelo, embora os valores das amplitudes obtidas sejam maiores, também foram observadas progressões de fase com o decréscimo da altitude, além de perfis variáveis e quase verticais ao longo das altitudes. Na Figura 4.14 é possível observar que o modelo prevê a fase meridional acontecendo 3 *horas* depois que a fase zonal (características do hemisfério sul), comportamento também observado em alguns meses. Nos meses de fevereiro e junho a fase zonal acontece depois que a fase meridional indicando característica de hemisfério Norte.

Já é conhecido que um maior conjunto de dados melhora a precisão na determinação da maré lunar na região da MLT (e.g. Stening et al. (1994), Sandford et al. (2006)) assim, como Cachoeira Paulista é a única das três localidades que possui nove anos de dados fizemos a análise da maré lunar para esse conjunto de dados (de janeiro de 2000 a novembro de 2008) com intuito de verificar as possíveis melhoras nos resultados.

Como pode ser observado na Figura 4.17 com o conjunto de dados maior os perfis de amplitude passaram a variar menos com a altitude aproximando-se mais dos

perfis previstos pelo modelo. As fases tornaram-se menos variável com a altitude, principalmente nos meses de fevereiro, março, abril, maio, agosto e novembro (Figura 4.18).

Mudanças no vento de fundo e no gradiente de temperatura podem afetar a propagação da maré lunar na atmosfera. [Stening et al. \(1997\)](#) investigaram qual destes dois parâmetros são mais determinantes no comportamento da maré lunar. Para isto, desenvolveram um modelo em que em um primeiro teste analisaram a temperatura variando com a latitude obtida do modelo MSISE90 (do inglês “mass spectrometer-incoherent scatter extended model”), com o vento médio zonal de fundo nulo e, em outro teste, a temperatura foi mantida constante. Como resultado, concluíram que a remoção do vento causa efeitos muito grandes, modificando a estrutura da maré, além de remover a diferença de fase entre os hemisférios. Enquanto que o efeito da temperatura constante foi muito menor. Assim, embora a forçante da maré lunar seja bem definida pode-se dizer que mudanças em condições da estratosfera e mesosfera podem afetar o comportamento da maré lunar atmosférica.

Segundo [Forbes \(1982\)](#), similarmente a maré solar, a maré lunar semidiurna no período de solstício está principalmente associada ao modo (2, 2) abaixo de 70 *km* e entre 80 e 110 *km* o modo (2, 4) torna-se dominante, com contribuições secundárias dos modos (2, 2), (2, 3) e (2, 5). Acima de 120 *km* o modo (2, 2) volta a dominar com forte contribuição do modo (2, 3). Os modos acoplados devido os ventos médios mesosféricos e gradiente de temperatura meridional são tão importantes para a maré solar quanto para a maré lunar semidiurna. Assim, a região meteórica é caracterizada pela presença de no mínimo quatro modos semidiurnos, a quem atribui-se mudanças relativas a amplitude e fase com a altitude e latitude. Essas duas influências físicas (variação no vento de fundo e presença de modos acoplados na MLT) podem ser explicações para algumas diferenças entre a observação e o modelo.

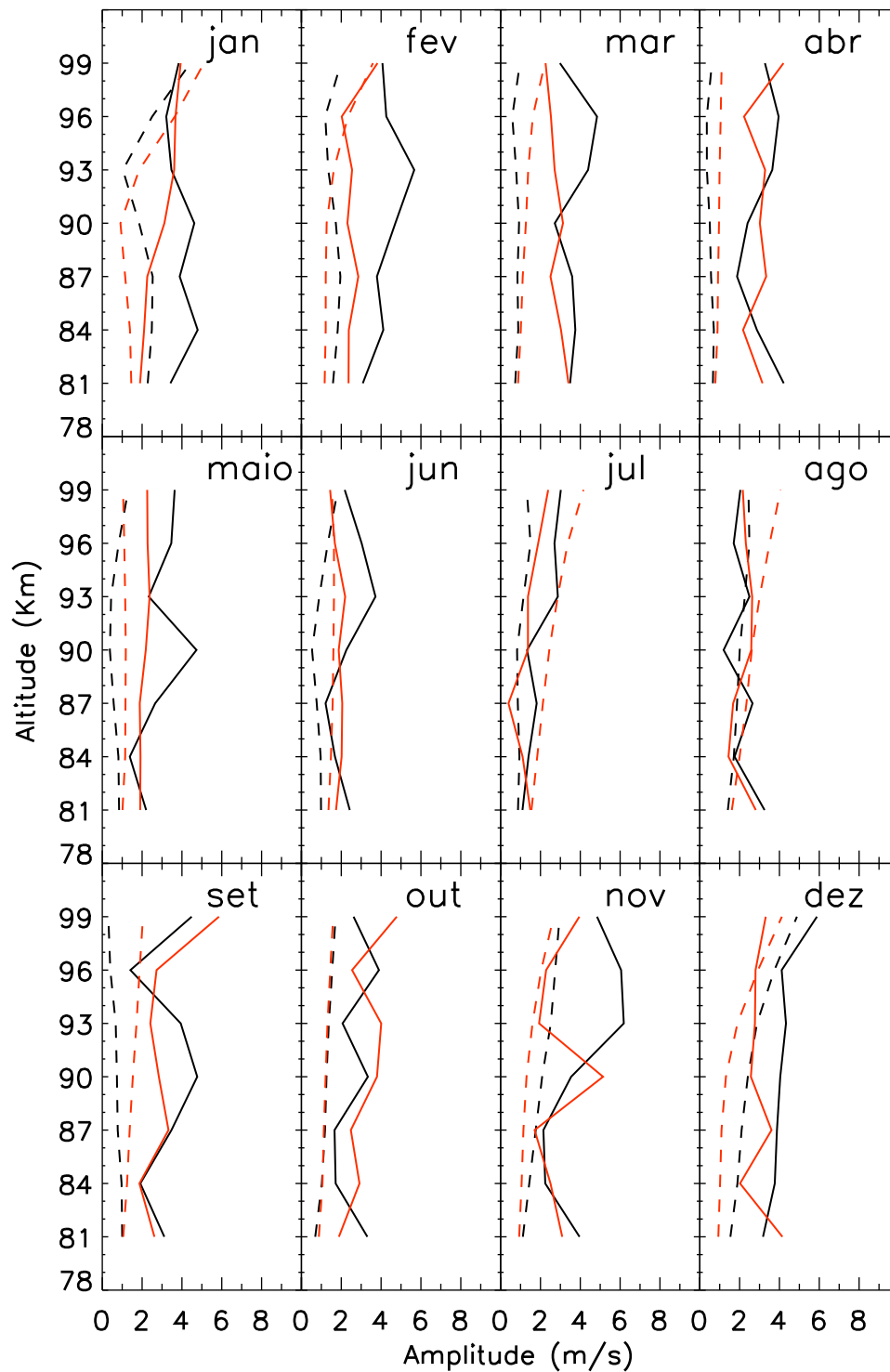


Figura 4.17 - Variação da fase da maré lunar semidiurna com a altitude. Os símbolos pretos representam as fases da componente meridional, os vermelhos da componente zonal e as linhas pontilhadas preta e vermelha designam a fase da componente meridional e zonal, respectivamente, fornecidas pelo modelo.

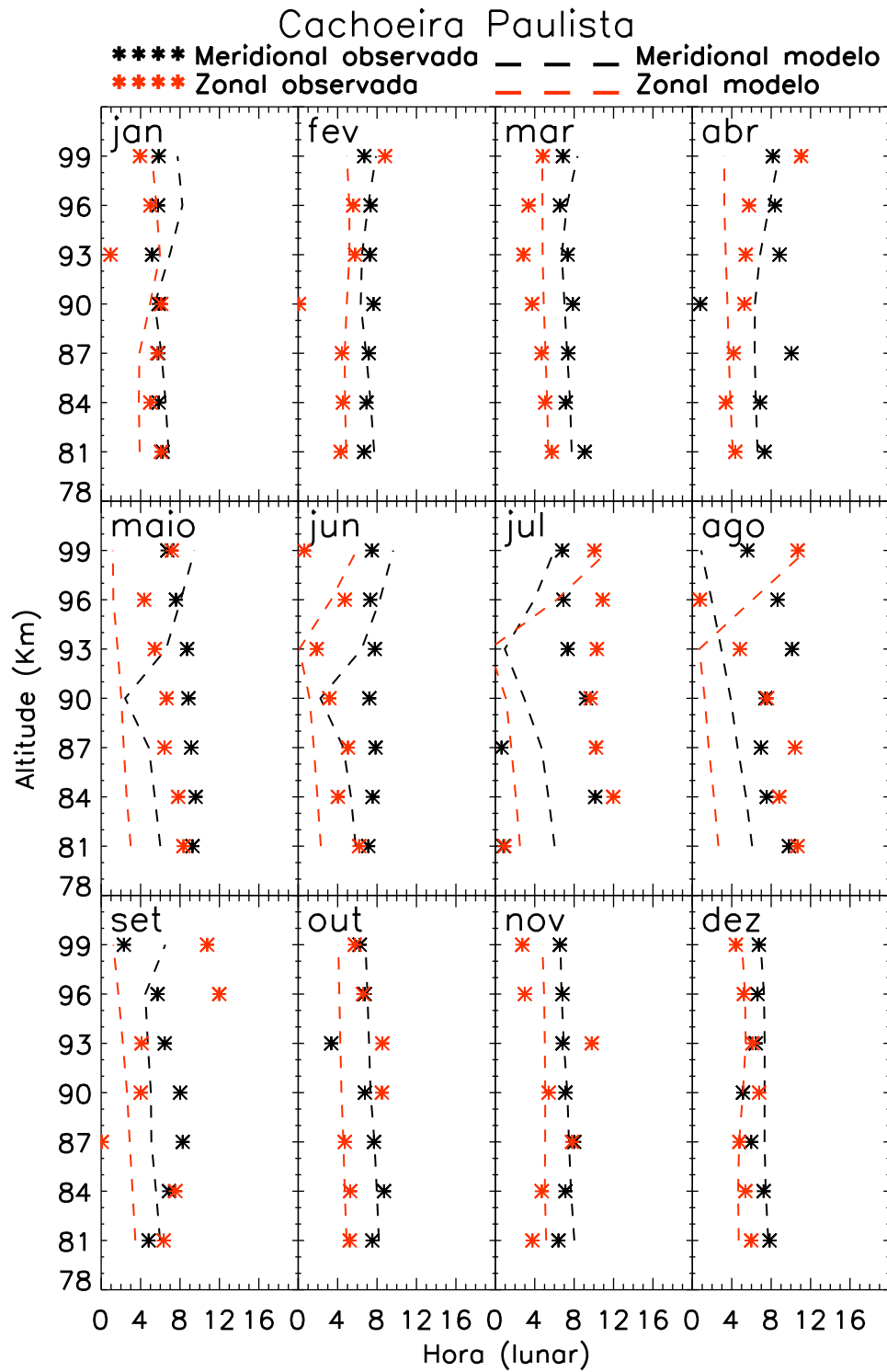


Figura 4.18 - Amplitudes médias (painel superior) e fases (painel inferior) da maré lunar semidiurna ao longo do ano. As linhas sólidas preta e vermelha designam a amplitude e fase da componente meridional e zonal para Cachoeira Paulista. As linhas tracejadas representam o modelo, componente meridional (preta) e zonal (vermelha).

5 CONCLUSÕES

Usando dados de radares meteorológicos para o período de janeiro de 2005 a dezembro de 2008 para três localidades brasileiras (São João do Cariri, Santa Maria e Cachoeira Paulista) foi possível estudar o comportamento da amplitude e fase da maré lunar atmosférica semidiurna entre 81 e 99 *km* de altitude. Com esse estudo verificou-se que os perfis de amplitude e fase da maré lunar semidiurna para essas localidades mostraram características gerais de ondas verticalmente propagantes na atmosfera, ou seja, amplitudes crescentes e progressões de fase com o decréscimo da altitude.

As principais características para São João do Cariri foram:

- As amplitudes observadas para a componente meridional apresentaram valores entre 1,5 e 6,0 *m/s*, enquanto que, a componente zonal variou entre 1,0 e 4,0 *m/s*;
- Os perfis de fase na maioria dos meses apresentaram progressão de fase com o decréscimo da altitude e alguns quase constante, porém com algumas variações;
- No comportamento médio ao longo do ano, a componente meridional apresentou amplitudes maiores que a componente zonal, exceto nos meses de março e maio. As fases apresentaram características equatoriais nos meses de janeiro, fevereiro e junho, de hemisfério Sul entre os meses de março e maio, outubro e dezembro e de hemisfério Norte nos meses de agosto e setembro.
- De uma forma geral houve concordância entre o comportamento da amplitude e fase observada e o comportamento previsto pelo modelo.

Para Santa Maria, podem ser destacadas as seguintes características:

- As amplitudes observadas para a componente meridional apresentaram valores entre 1,0 e 8,0 *m/s*, enquanto que, a componente zonal apresentou amplitudes entre 1,0 e 5,0 *m/s*. Esses intervalos de valores obtidos estão dentro dos valores previstos pelo modelo;

- Os perfis mensais verticais de amplitudes apresentaram tendência de crescimento com a altitude para a maioria dos meses, sendo que pequenas variações, ao longo das altitudes, foram observadas;
- Os perfis de fase observados apresentaram progressões, variações ou foram quase constantes com a altitude;
- No comportamento médio ao longo do ano, a componente meridional apresentou amplitudes maiores que a componente zonal, durante os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, novembro e dezembro, enquanto que, nos meses de maio, junho e julho as amplitudes zonais é que foram maiores. As fases apresentaram características de hemisfério Sul, exceto nos meses de junho e setembro;
- Ambas as componentes apresentaram algumas concordâncias com o comportamento previsto pelo modelo para esta latitude.

Em Cachoeira Paulista, pode-se destacar as seguintes características:

- A componente meridional apresentou valores entre 1,5 e 6,0 m/s , enquanto que, a componente zonal apresentou valores entre 1,0 e 5,0 m/s . O intervalo de valores obtido para componente zonal concorda com os valores previstos pelo modelo;
- Os perfis de amplitude apresentaram tendência de crescimento, com algumas variações ao longo das altitudes. Os perfis de fase mostraram-se, na maioria das vezes, descendentes ou quase constantes com a altitude;
- As amplitudes médias sobre todas as altitudes ao longo do ano foram maiores para a componente meridional para quase todos os meses, diferente do previsto pelo modelo. Os valores de amplitude obtidos para ambas as componentes foram maiores que os valores previstos pelo modelo;
- As fases médias sobre todas as altitudes observadas apresentaram características de hemisfério Sul durante quase todo o ano, além disso o comportamento da fase meridional durante o ano concordou com o comportamento previsto pelo modelo;

- Com o aumento de quatro anos de dados foi possível observar que os perfis verticais de amplitudes e fases tornaram-se menos variáveis com a altitude.

Para as latitudes observadas, os valores mensais mais elevados de amplitude dependem da época do ano, principalmente para a componente meridional, enquanto que, na componente zonal os valores mais elevados, em geral, aconteceram em Santa Maria, essa característica também é previsto pelo modelo. Quanto a fase, de setembro a fevereiro a maré lunar atmosférica semidiurna acontece primeiro para as latitudes mais próximas do equador, enquanto que, entre os equinócios é observado uma característica praticamente oposta.

Como sugestões de trabalhos futuros é possível investigar:

- A presença da maré lunar atmosférica semidiurna na camada E esporádica usando dados de ionossonda da estação de Fortaleza do INPE em um período coincidente com os dados de São João do Cariri, com o intuito de investigar os resultados obtidos entre essas duas localidades. Pois, de acordo com a teoria da camada E esporádica espera-se que a fase da maré lunar na altitude virtual da camada E esporádica seja a mesma que a fase encontrada na componente zonal da maré lunar nos dados de vento e que a fase da maré lunar na frequência crítica da camada esporádica seja três horas adiantada (trabalho semelhante a este foi feito por [Stening \(1999\)](#)).
- Os efeitos da maré lunar na velocidade vertical de deriva de plasma da região F usando também dados de ionossonda de Fortaleza e comparar com resultados obtidos em outras localidades (e.g. [Stening e Fejer \(2001\)](#)).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. **Atmospheric tides**. Newark, N. J.: Gordon and Breach, 1970. 16, 34
- FORBES, J. M. Atmospheric tides. I - Model description and results for the solar diurnal component. II - The solar and lunar semidiurnal components. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, p. 5222–5252, 1982. 66
- GRUPO DE PESQUISAS DA ALTA ATMOSFERA DA UFCG. **Vista panorâmica do radar meteórico de São João do Cariri**. São João do Cariri, 2004. Disponível em: <<http://aerolume.df.ufcg.edu.br>>. Acesso em: 20 jun. 2008. 26
- HOCKING, W. K.; FULLER, B.; VANDEPEER, B. Real-time determination of meteor-related parameters utilizing modern digital technology. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, p. 155–169, 2001. 25
- LAMB, H. **Hydrodynamics**. New York: New York: Dover Publications, 1932. 16
- LIMA, L. M. **Observações de ondas planetárias na região da mesopausa equatorial e de baixas latitudes do Hemisfério Sul**. 245 p. (INPE-12346-TDI/995). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2004/03.17.10.49>>. Acesso em: 08 fev. 2010. 26
- MALIN, S. R. C.; SCHLAPP, D. M. Geomagnetic lunar analysis by least-squares. **Geophys. J. R. Astron. Soc.**, v. 60, p. 409–418, 1980. xvi, 35, 43, 79
- NIU, X.; XIONG, J.; WAN, W.; NING, B.; LIU, L.; VINCENT, R. A.; REID, I. M. Lunar tidal winds in the mesosphere over Wuhan and Adelaide. **Advances in Space Research**, v. 36, p. 2218–2222, 2005. 1, 35, 65
- SANDFORD, D. J.; MITCHELL, N. J. Lunar tides in the mesosphere over Ascension Island (8° S, 14.4° W). **Annales Geophysicae**, v. 25, p. 9–12, 2007. 1, 11, 35, 62, 63
- 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**, v. 69, p. 2219–2237, 2007. 1, 11

SANDFORD, D. J.; MULLER, H. G.; MITCHELL, N. J. Observations of lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere at Arctic and middle latitudes. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 6, p. 4117–4127, 2006. 1, 35, 65

SARAIVA, M. d. F. O.; AMADOR, C. B.; KEMPER, r.; GOULART, P.; MULLER, A. As fases da lua numa caixa de papelão. **Revista Latino-Americana de Educação em Astronomia**, v. 4, p. 9–26, 2007. 12

SILVA, A. M. **Estudo do efeito da maré lunar e das atividades solar a magnética na formação da camada F3 sobre Fortaleza**. 89 p. (INPE-10552-TDI/940). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/06.30.13.15>>. Acesso em: 08 fev. 2010. 10

SILVEIRA, F. L. As variações dos intervalos de tempo entre as fases principais da Lua. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, p. 300–307, 2001. 14, 15

STENING, R. J. A diurnal modulation of the lunar tide in the upper atmosphere. **Journal of Geophysical Research**, v. 16, p. 307–310, 1989. 7

_____. The lunar tide in sporadic E. **Annales Geophysicae**, v. 17, p. 1344–1351, 1999. 9, 71

STENING, R. J.; FEJER, B. G. Lunar tide in the equatorial F region vertical ion drift velocity. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 221–226, 2001. 9, 71

STENING, R. J.; FORBES, J. M.; HAGAN, M. E.; RICHMOND, A. D. Experiments with a lunar atmospheric tidal model. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 13465–13471, 1997. 8, 66

STENING, R. J.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E.; VINCENT, R. A. Lunar tidal winds at Adelaide and Saskatoon at 80 to 100 km heights: 1985-1990. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, p. 13273, 1994. 1, 8, 64, 65

STENING, R. J.; MEEK, C. E.; MANSON, A. H. Lunar tidal winds measured in the upper atmosphere (78-105 km) at Saskatoon, Canada. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 44, p. 1143–1151, 1987. 1, 7

STENING, R. J.; RASTOGI, R. G. Variations of the lunar geomagnetic tide in the Indian region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 64, p. 471–477, 2002. [10](#)

STENING, R. J.; SCHLAPP, D. M.; VINCENT, R. A. Lunar tides in the mesosphere over Christmas Island (2° N, 203° E). **Journal of Geophysical Research**, v. 102, p. 26,239–26,245, 1997. [1](#), [8](#), [35](#)

STENING, R. J.; TSUDA, T.; NAKAMURA, T. Lunar tidal winds in the upper atmosphere over Jakarta. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 108, p. 1192, 2003. [1](#), [10](#), [35](#), [63](#), [64](#)

STENING, R. J.; VINCENT, R. A. A measurement of lunar tides in the mesosphere at Adelaide, South Australia. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, p. 10121–10129, 1989. [1](#), [2](#), [7](#)

STENING, R. J.; WINCH, D. E. Seasonal changes in the global lunar geomagnetic variation. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 41, p. 311–323, 1979. [7](#)

TOKUMOTO, A. S. Ventos na região de 80-100 Km de altura sobre Cachoeira Paulista (22,7°S ; 45° W) medidos por radar meteorológico. 132 p. (INPE-9126-TDI/815). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1905/2005/08.03.21.19.56>>. Acesso em: 08 fev. 2010. [24](#)

VIAL, F.; FORBES, J. M. Monthly simulations of the lunar semi-diurnal tide. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 56, p. 1591–1607, 1994. [1](#), [2](#), [19](#), [20](#)

APÊNDICE A - Média Vetorial e Estimativa do Erro

Seja um conjunto de N vetores bidimensionais representados por $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \dots, \vec{v}_N$, com base no conceito de média (valor da variável multiplicado por sua probabilidade e somado sobre todas as possibilidades, ou seja, $Media = \sum_i x_i P_i$) e supondo que o conjunto de vetores têm a mesma probabilidade, pode-se escrever o vetor médio por

$$\vec{v}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v}_i . \quad (\text{A.1})$$

Como os vetores são bidimensionais, tem-se:

$$\vec{v}_i = v_{ix}\hat{x} + v_{iy}\hat{y} , \quad (\text{A.2})$$

e ϕ_i o ângulo entre o vetor e o eixo x , tem-se ainda que:

$$v_{ix} = v_i \cos \phi_i , \quad (\text{A.3})$$

$$v_{iy} = v_i \text{sen} \phi_i , \quad (\text{A.4})$$

substituindo as Equações A.2, A.3, e A.4 na Equação A.1, obtém-se:

$$\vec{v}_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i \cos \phi_i \hat{x} + v_i \text{sen} \phi_i \hat{y}) . \quad (\text{A.5})$$

O módulo do vetor médio e a fase média podem ser escritas matematicamente por:

$$v_m = \frac{1}{N} \sqrt{\left(\sum_{i=1}^N v_i \cos \phi_i \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^N v_i \text{sen} \phi_i \right)^2} , \quad (\text{A.6})$$

$$\phi_m = \arctan \left(\frac{\sum_{i=1}^N v_i \sin \phi_i}{\sum_{i=1}^N v_i \cos \phi_i} \right) . \quad (\text{A.7})$$

O desvio padrão é a medida de quanto os valores se afastam da média e usualmente é associado a medida do erro da média. Considerando v_x ($\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ix}$) e v_y ($\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{iy}$) como sendo a média das componentes dos vetores nas direções x e y , respectivamente, o desvio padrão é dado por:

$$\sigma_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (v_{ix} - v_x)^2}{N(N-1)} \right]^{1/2} , \quad (\text{A.8})$$

$$\sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (v_{iy} - v_y)^2}{N(N-1)} \right]^{1/2} . \quad (\text{A.9})$$

A amplitude e fase representam um vetor bidimensional, assim a incerteza neste vetor pode ser especificado por:

$$\sigma = (\sigma_x^2 + \sigma_y^2)^{1/2} . \quad (\text{A.10})$$

Mas, este ainda não é o desvio padrão da amplitude é apenas o desvio padrão do vetor. O desvio padrão da amplitude é representado matematicamente da seguinte forma:

$$\sigma_{amp} = \left[\frac{(v_x^2 \sigma_x^2 + v_y^2 \sigma_y^2)}{(v_x^2 + v_y^2)} \right]^{1/2} . \quad (\text{A.11})$$

O desvio padrão da fase é obtido baseado na Figura A.1, a qual mostra uma repre-

sentação da amplitude média (v_m) o seu desvio padrão (σ_{v_m}), o quanto a fase média pode variar ($\Delta\phi$), o desvio padrão do vetor (σ), a amplitude média na direção x (v_x) e na direção y (v_y).

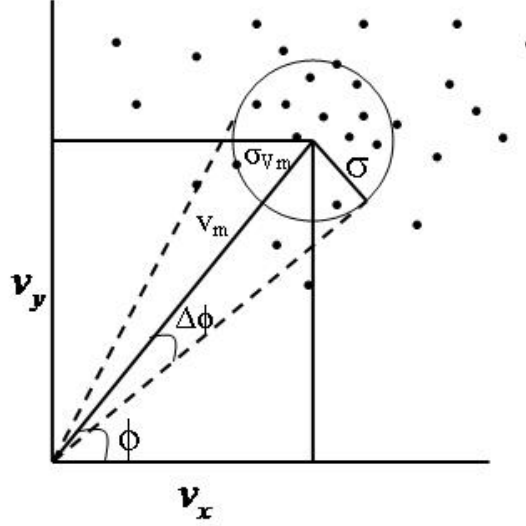


Figura A.1 - Representação do desvio padrão da amplitude média e do vetor. Adaptado: [Malin e Schlapp \(1980\)](#)

Portanto, o desvio padrão da fase é representado matematicamente da seguinte forma:

$$\sigma_{fas} = \arctan \left(\frac{\sigma}{v_{medio}} \right) . \quad (A.12)$$

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

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

Programas de Computador (PDC)

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

Pré-publicações (PRE)

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