



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

FÁBIO BATISTA PEREIRA MAIA

**MARÉS ATMOSFÉRICAS NAS MEDIDAS DE TEMPERATURA OBTIDAS
POR RADAR DE METEOROS**

**Campina Grande - PB
2021**

FÁBIO BATISTA PEREIRA MAIA

**MARÉS ATMOSFÉRICAS NAS MEDIDAS DE TEMPERATURA OBTIDAS
POR RADAR DE METEOROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de Mestre.

Linha de Pesquisa: Qualidade de Sistemas Ambientais.

ORIENTADOR: Lourivaldo Mota Lima

**Campina Grande - PB
2021**

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

M217m Maia, Fábio Batista Pereira.
Marés atmosféricas nas medidas de temperatura obtidas por radar de meteoros [manuscrito] / Fábio Batista Pereira Maia. - 2021.
51 p. : il. colorido.
Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2021.
"Orientação : Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa."
1. Maré diurna. 2. Maré semidiurna. 3. Região meteórica.
4. Sistemas ambientais. I. Título
21. ed. CDD 551.525

FÁBIO BATISTA PEREIRA MAIA

**MARÉS ATMOSFÉRICAS NAS MEDIDAS DE TEMPERATURA OBTIDAS
POR RADAR DE METEOROS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental da Universidade Estadual da Paraíba, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 29/01/2021

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima
(Orientador)-Universidade Estadual da Paraíba



Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino
Universidade Estadual da Paraíba



Prof. Dr. José Valentin Bageston

INPE-Santa Maria-RS

RESUMO

As medidas obtidas com os radares de meteoros têm proporcionado observações simultâneas de parâmetros mesosféricos nas regiões equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul, estabelecendo assim um grande potencial para o desenvolvimento de pesquisas com o objetivo de melhor entender a dinâmica da região MLT. Para estimar a temperatura da mesopausa, foram utilizados os dados do tempo de decaimento dos sinais meteóricos, $t_{1/2}$, obtidos através do radar instalado em São João do Cariri-PB (7,4°S, 36,5°O) e Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45,0°O) entre os anos de 2003 e 2018. Com a intenção de extrair informação de maré em relação à temperatura foi utilizada uma abordagem de “dia composto” e um algoritmo padrão de determinação de temperatura para obter as marés de temperatura diurna e semidiurna. Neste trabalho foram determinadas as temperaturas através do método da pressão e do gradiente, estimado as amplitudes e fases das marés diurnas e semidiurnas, e a partir delas comparados com o modelo Global Scale Wave Model (GSWM-02). O método do gradiente apresentou, em São João do Cariri – PB, gráficos mais semelhantes que o modelo de pressão quando confrontado com o modelo GSWM, reproduzindo a oscilação semianual nas marés diurnas e valores de mesma magnitude na maioria dos anos estudados.

Palavras-chave: maré diurna. maré semidiurna. região meteórica

ABSTRACT

The measurements obtained from meteorological radars have provided simultaneous observations of mesospheric parameters in the equatorial and low latitudes regions of the southern hemisphere, thus establishing a great potential for the development of research in order to better understanding the dynamics of the MLT region. To estimate the mesopause temperature, data from the meteoric signals decay time, $t_{1/2}$, obtained through the radar installed in São João do Cariri-PB (7.4°S, 36.5°W) and Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45,0°W) between 2004 and 2008 were used. Intending to acquire tide information in relation to temperature, a “compound day” approach and a standard temperature determination algorithm were used to obtain diurnal and semidiurnal tides. In this work, temperatures were determined using the pressure and gradient method, and estimated the amplitudes and phases of the diurnal and semidiurnal tides from them and compared with the Global Scale Wave Model (GSWM-02). The gradient method, in São João do Cariri – PB, presented graphs more similar than the pressure model when compared to the GSWM model, reproducing the semiannual oscillation in the diurnal tides and values of the same magnitude in most of the years studied.

KEYWORDS: diurnal tides. semidiurnal tides. meteor region

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos de pressão locais e modelo MSISE00	21
Figura 2 – Temperaturas estimadas em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O).	25
Figura 3 - Temperatura média mensal em Cachoeira Paulista (22,7° S, 45,0° O) a 90 km de altitude entre 2003 e 2018.	26
Figura 4 - Amplitudes da maré diurna em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) a 90 Km de altitude entre 2003 e 2018.	29
Figura 5 - Amplitudes da maré semidiurna em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) entre 2003 e 2018.....	30
Figura 6 - Amplitudes da maré terdiurna em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) entre 2003 e 2018.	31
Figura 7 - Temperatura média mensal em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008.	34
Figura 8 - Amplitudes da maré diurna em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008.	35
Figura 9 - Amplitudes da maré semidiurna em São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008.	36
Figura 10 - Amplitudes da maré diurna em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) a 90 km de altitude entre 2003 e 2018 - Método do gradiente.....	39
Figura 11 - Amplitudes da maré semidiurna em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) a 90 km de altitude entre 2003 e 2018 - Método do gradiente.	40
Figura 12 - Amplitudes da maré diurna em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008 – Método do Gradiente.	42

Figura 13 - Amplitudes da maré diurna em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008 – Método do Gradiente.43

Figura 14 – Amplitude diurna em São João do Cariri - Comparativo entre os dois métodos e o modelo GSWM-02 45

Figura 15 - Amplitude semidiurna em São João Do Cariri – PB - Comparativo entre os dois métodos e modelo GSWM-02..... 46

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
2.1 OBJETIVO GERAL	11
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. DINÂMICA DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS	12
3.1 TEORIA DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS.....	12
3.2 OBSERVAÇÕES DE MARÉS ATMOSFÉRICAS.....	15
3.3 MARÉS ATMOSFÉRICAS NAS MEDIDAS DE TEMPERATURA.....	16
4. DADOS E MÉTODOS	18
4.1 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA A PARTIR DE MEDIDAS POR RADAR METEÓRICO	19
<i>4.1.1 Modelos de pressão local a partir dos dados do nrlmsise-00 empirical atmosphere model</i>	<i>20</i>
4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS MARÉS NA TEMPERATURA ...	21
4.3 ESTIMATIVA DA AMPLITUDE E DA FASE DE UM SINAL	22
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
5.1 MÉTODO DA PRESSÃO.....	24
<i>5.1.1 Cachoeira Paulista - SP</i>	<i>24</i>
<i>5.1.1.1 Temperatura.....</i>	<i>24</i>
<i>5.1.1.2 Marés na temperatura</i>	<i>27</i>
<i>5.1.2 São João do Cariri – PB.....</i>	<i>32</i>
<i>5.1.2.1 Temperatura.....</i>	<i>32</i>
<i>5.1.2.1 Marés na temperatura</i>	<i>32</i>
5.2 MÉTODO DO GRADIENTE.....	37
5.2.1 Marés na Temperatura	37
<i>5.2.1.1 Cachoeira Paulista – SP</i>	<i>37</i>

5.2.1.2	São João do Cariri – PB	41
5.3	COMPARAÇÃO COM O GSWM – 02	44
5.3.1	Marés na Temperatura	44
5.3.1.1	São João do Cariri – PB	44
6.	CONCLUSÕES	47
7.	REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

As marés atmosféricas térmicas são ondas de escala global, cujos períodos são harmônicos de um dia Solar, que modulam consistentemente a região próxima a mesopausa terrestre, a qual é referida como mesosfera e baixa termosfera (Mesosphere and Lower Thermosphere - MLT region). Nessa região as marés térmicas se constituem em um dos efeitos dinâmicos mais importantes, atingindo grandes amplitudes sendo as marés diurnas (24 horas), semidiurna (12 horas) e terdiurna (8 horas) as componentes mais importantes. As marés migrantes, que são geradas principalmente devido à absorção de energia Solar pelo vapor d'água na troposfera e ozônio na estratosfera e, portanto, sincronizadas com o movimento relativo do Sol, são conhecidas como o componente de maré dominante na região MLT na zona dos trópicos.

Uma série de trabalhos relativos à dinâmica das marés atmosféricas utilizando ventos obtidos por radar de meteoros foram desenvolvidos. Em baixas latitudes, a maré diurna domina o espectro. Seu ciclo anual mostra amplitudes mínimas em torno dos Solstícios e amplitudes máximas durante os equinócios (BATISTA et al., 2004; XU et al., 2009). Em latitudes médias e altas, as marés diurnas não podem efetivamente se propagar na região MLT (CHAPMAN e LINDZEN, 1970) e o espectro é dominado pela maré semidiurna, com as maiores amplitudes nos meses de inverno e durante o outono em setembro (HOFFMANN et al., 2010; JACOBI, 2012).

A climatologia das marés também tem sido revelada a partir de observações dos ventos e da temperatura obtidas a partir de medidas por satélites (XU et al., 2009; SAKAZAKI et al., 2012), e de temperatura por LIDAR (Light Detection And Ranging) (SHE et al., 2004).

A partir de meados da década de 90, os traços meteóricos foram utilizados no estudo das flutuações e na determinação da temperatura média da mesosfera principalmente em regiões de médias e altas latitudes do hemisfério Norte (TSUTSUMI et al., 1994; JONES, 1995; HOCKING, 1999; LIMA et al., 2010). Um método para produzir parâmetros da maré na temperatura a partir de medidas por radar de meteoros foi apresentada por HOCKING e HOCKING (2002), porém, novos estudos não foram realizados com o uso do referido método. MEEK et al. (2013)

aplicaram o método da pressão para estimar a temperatura a partir de medidas por radar de meteoros e obtiveram as amplitudes mensais da maré diurna para a altitude de 90 km em 80° N.

As medidas obtidas com os radares de meteoros em 23° N e em 7,5°S, têm proporcionado observações simultâneas de parâmetros mesosféricos, como a temperatura, nas regiões equatorial e de baixas latitudes do hemisfério sul, estabelecendo assim um grande potencial para o desenvolvimento de pesquisas com o objetivo de melhor entender a dinâmica da região MLT.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estimar as amplitudes e fases mensais das marés atmosféricas identificadas na temperatura média diária da região próxima a mesopausa a partir de medidas obtidas por radar meteórico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elaborar modelos de pressão local a partir das medidas por radar e a partir dos dados do modelo NRLMSISE-00 empirical Atmosphere Model.
- Determinar as temperaturas médias diárias usando os métodos propostos.
- Estimar as amplitudes e fases das marés diurna e semidiurna a partir das temperaturas.
- Comparar os resultados das amplitudes e fases da maré com o modelo de onda de escala global GSWM (Global Scale Wave Model).

3. DINÂMICA DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS

A radiação Solar de ondas com maiores amplitudes atravessam a atmosfera até chegar à superfície onde é absorvida e armazenada em forma de energia. Dessa forma, a energia radiada pela superfície da terra será a principal fonte de aquecimento das camadas mais baixas da atmosfera terrestre.

A Troposfera é a região mais influenciada pela transferência de energia que ocorre próximo da superfície através da evaporação e condução de calor. Essa região é caracterizada pela diminuição da temperatura com a altitude, ocasionada principalmente pelo distanciamento da principal fonte de aquecimento das camadas mais baixas e pela Convecção (transporte de um fluido por consequência de sua expansão). A temperatura da atmosfera volta a aumentar na estratosfera. Essa distribuição de temperatura está associada à absorção da radiação Solar ultravioleta pelo Ozônio, tornando essa região uma fonte secundária de aquecimento das camadas mais baixas da atmosfera terrestre. (FLEAGLE, 1981; KIRCHHOFF 1991).

Esses efeitos térmicos de aquecimento periódicos devido à absorção direta da radiação solar na baixa atmosfera ocasionado pela radiação solar é o principal responsável pela formação das marés atmosféricas. De acordo com Chapman e Lindzen (1970), as marés atmosféricas são as oscilações atmosféricas produzidas (em grande escala) pelas forças gravitacionais da Lua e do Sol sobre a Terra, e principalmente pela ação térmica do Sol.

Os fenômenos de marés devido à rotação diária da Terra e do movimento aparente da lua em relação à Terra são chamados de marés solares ou lunares, sendo consideradas migrantes quando acompanham o movimento aparente do Sol, de leste para oeste e não migrantes se geradas pelo aquecimento diferencial orográfico. Os diferentes harmônicos são denominados modos ou ondas, solares ou lunares, diurnas, 24 horas, semidiurnas, 12 horas ou terdiurna, 8 horas, etc (VOLLAND, 2012) .

3.1 TEORIA DAS MARÉS ATMOSFÉRICAS

As marés atmosféricas podem ser definidas como as oscilações atmosféricas produzidas (em grande escala) pelas forças gravitacionais da Lua e do Sol sobre a

Terra, excitadas gravitacionalmente, e a ação térmica do Sol, excitadas termicamente, cujos períodos são harmônicos de um dia Solar ou lunar, podendo ser migrantes ou não migrantes (CHAPMAN E LINDZEN, 1970; VOLLAND, 2012).

As primeiras explicações pertinentes sobre as marés atmosféricas surgiram nos estudos de Newton. Em sua obra *Principia Mathematica*, onde abordou a influência das forças gravitacionais lunares e solares, que agem de acordo com suas três leis da mecânica, na dinâmica das marés oceânicas. Outro ponto da sua teoria indicava a influência Solar sobre as marés lunares, alterando as amplitudes da mesma, de acordo com as fases da Lua (CHAPMAN E LINDZEN, 1970).

Em estudos posteriores Newton observou que a dinâmica da atmosfera funciona de forma semelhante a dos oceanos, no que se refere a influência das forças de maré, que para ele, eram muito pequenas para serem determinadas.

No século XVIII surgiram novas teorias planetárias e de marés através do tratado da *Mecânica Celeste* de Laplace. Nesse documento foi elaborada uma teoria sobre as marés oceânicas, introduzindo a ideia de que em determinado oceano as marés poderiam ser diretas ou inversas, de acordo com a influência sofrida pelo “corpo forçante”, ou seja, a ocorrência de marés altas e baixas estariam sob influência gravitacional externa (Lua ou Sol). Porém, essa teoria foi formulada com a restrição ideal de profundidade uniforme, o que não ocorre nos oceanos, limitando a aplicação da mesma (CHAPMAN E LINDZEN, 1970).

Finalmente, os estudos mais avançados sobre a existência das marés na atmosfera foram mais conclusivos a partir da utilização de medidas barométricas. Através dos estudos de Laplace, as origens das marés seriam mesmo térmica, pois a maré atmosférica apresentada na forma de uma variação barométrica, possui um ciclo semidiurno. Em contra partida o seu forçante, o aquecimento Solar, possui um ciclo diurno com um máximo no meio dia, evidenciando a sua maior influência.

Os movimentos da região MLT são dominados por marés atmosféricas, ondas planetárias e ondas de gravidade, além de variações de longo prazo (anuais e semianuais).

A densidade na atmosfera tende a diminuir com a altitude, fazendo com que a amplitude das ondas aumente, através de processos naturais para a preservação da energia. As oscilações de maré originadas na baixa atmosfera e propagando-se para

cima tornam-se elementos dominantes de sistemas de movimento observáveis em altitudes acima de 80 km.

As respostas atmosféricas às perturbações globais, tanto de origem térmica, quanto gravitacional são calculadas analiticamente através da Teoria clássica das marés. Nela, é observada o movimento migrante das marés que se movem para oeste, ou migra para oeste em longitude, sobre a influencia do movimento aparente do Sol. As oscilações com períodos de maré não síncronos ao Sol, não serão objetos desse estudo.

A teoria adota algumas simplificações, como considerar a atmosfera como um gás perfeito em equilíbrio termodinâmico e hidrostático, geometricamente rasa. A elipticidade, a topografia e os efeitos dissipativos como a viscosidade molecular e turbulenta, condutividade, arraste iônico e transferência radiativa são ignoradas. As equações básicas utilizadas são as da hidrodinâmica em um sistema de coordenadas esféricas girantes com a Terra (TOKUMOTO, 2002).

Pela Teoria clássica das marés é possível extrair efeitos de maré , sendo a expressão matemática geral para uma oscilação de maré dada por:

$$A \cos(\omega t - s\lambda - \varphi) \quad (1)$$

em que:

- A é a magnitude da variação em algum campo atmosférico;
- ω é sua frequência;
- t é tempo universal;
- λ é longitude;
- s é o número de onda zonal;
- φ é a fase de maré (cristas ocorrem quando $\varphi = \omega t - s\lambda$).

A magnitude de s representa o número de cristas de onda que ocorrem ao longo de um círculo de latitude, enquanto o sinal de s indicaria a direção zonal de propagação.

A velocidade da fase horizontal da maré é dada por $c_{ph} = \omega/s$ ($s > 0$ corresponde à propagação da maré para leste e $s < 0$ corresponde à propagação da maré para oeste).

Para as marés solares, a enésima frequência harmônica é $\omega_n = n\omega$, onde n é um inteiro positivo e $\omega_1 = (2\pi/24)h^{-1}$. Quando expresso no horário Solar local, $t_L = t + \lambda/\omega_1$ e a expressão inicial é modificada para:

$$A \cos(\omega_n t_L - (s + n)\lambda - \varphi) \quad (2)$$

Para as marés solares migrantes, $s = -n$ e a expressão acima se torna:

$$A \cos(\omega_n t_L - \varphi) \quad (3)$$

Assim, as marés solares migrantes têm a mesma variação de tempo local em todas as longitudes. Se $n = 1$ e $s = -1$, a maré é diurna e se propaga para oeste ou migra para oeste em longitude com o movimento aparente do Sol na perspectiva de um observador terrestre. Se $n = 2$ e $s = -2$, a onda é uma maré semi-diurna migrante.

Duas séries de “modos” solucionam a maré síncrona do Sol, maré migrante diurna, sendo os evanescentes (externos) aprisionados a altas latitudes e com profundidades equivalentes negativas e uma série de modos de propagação vertical (internos), aprisionados a baixas latitudes com profundidades equivalentes positivas de pequeno valor (TOKUMOTO, 2002)

É necessário observar a relação entre a distribuição em latitude do aquecimento que é projetada em qualquer modo determinado, assim como a correspondência entre a estrutura vertical desse modo e à distribuição vertical do aquecimento, para se entender a resposta atmosférica a qualquer forçamento ou forçante. Em nível de excitação, para os modos aprisionados, a resposta permanecerá confinada enquanto que para os modos de propagação pode ser percebido em níveis consideravelmente mais altos na atmosfera.

3.2 OBSERVAÇÕES DE MARÉS ATMOSFÉRICAS

As marés na região MLT são bem caracterizadas nas zonas de média e alta latitudes. Nessas zonas de latitudes os modos das marés diurna são predominantemente aprisionadas, mas a maré semidiurna apresenta grandes

amplitudes na região MLT. De acordo com a teoria clássica das marés, os modos diurnos são livres para se propagarem ascendentemente nos trópicos (CHAPMAN E LINDZEN, 1970). Logo, espera-se que a região MLT nos trópicos seja dominada por marés diurnas de grandes amplitudes.

O comportamento sazonal das amplitudes da maré diurna é caracterizado por uma oscilação semianual que alcança as maiores amplitudes durante os equinócios e as menores são registradas durante os Solstícios (BATISTA et al., 2004; XU et al., 2009). Usando o Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM) para explicar a oscilação semianual na maré diurna Solar, McLANDRESS (2002) encontrou que essa oscilação pode ser devida a sazonalidade tanto do aquecimento troposférico e dos ventos médios. Usualmente, o máximo que ocorre em torno de março-abril é mais forte do que ocorre em torno de setembro-outubro (BATISTA et al., 2004), de modo que também observa-se um pronunciado componente anual no ciclo sazonal da maré diurna.

As marés semidiurna e terdiurna revelam diferentes comportamentos sazonais. Em baixas latitudes, esses modos de marés apresentam um comportamento semianual com máximas amplitudes durante os equinócios (TOKUMOTO et al., 2007, JIANG et al., 2009, DAVIS et al., 2013, YU et al., 2015).

3.3 MARÉS ATMOSFÉRICAS NAS MEDIDAS DE TEMPERATURA

A maré diurna nas medidas de temperatura da região MLT apresenta amplitudes máximas na zona equatorial e em torno da latitude de $\pm 35^\circ$ (ZHANG et al., 2006). O comportamento sazonal é dominado por uma variação anual com máximos durante os meses de verão e uma variação semianual com máximo nos equinócios, enquanto que as amplitudes da maré semidiurna na temperatura da região MLT maximizam na zona de latitudes médias ($\pm 40^\circ - 50^\circ$), com intensificações nos meses de inverno. (PANCHEVA E MUKHTAROV, 2011).

Para determinar as marés na temperatura na região da altitude em torno de 90 km, HOCKING e HOCKING (2002) propuseram um método alternativo utilizando as medidas realizadas por radares de meteoros, assumindo que a maior parte da variação diurna das temperaturas é devida a marés atmosféricas. As medições mostraram horários de máxima das marés de temperatura diurna variando

moderadamente durante a maior parte do ano, geralmente com variações entre 0h e 6h. A maré semidiurna mostra uma variação anual maior na hora de máxima, sendo de 2 a 4 horas nos meses de inverno, mas aumentando para 9 horas durante o final do verão e início do outono. Os dados obtidos por HOCKING e HOCKING (2002) mostraram propriedades semelhantes na maioria dos meses, no que se refere as fases, quando comparado com os dados do GSWM de HAGAN et al. (1995, 1999) e um conjunto detalhado de observações do radar de laser (LIDAR) em Illinois por STATES E GARDNER (2000).

MEEK et al. (2013) utilizaram dois métodos de análise de temperatura: o método do gradiente de temperatura e o método da pressão e os compara com as médias diárias das temperaturas obtidas do instrumento EOS MLS (Earth Observing System - EOS, Microwave Limb Sounder - MLS) a bordo do EOS Aura satellite. Com relação à análise das marés, as variações disponíveis da pressão diurna do modelo (CMAM-DAS e MSISE-00) e as estimativas disponíveis do MLS mostraram que o uso de uma pressão diária fixa pode levar a uma distorção significativa dos resultados da temperatura da maré.

4. DADOS E MÉTODOS

Para estimar a temperatura da mesopausa, foram utilizados os dados do tempo de decaimento dos sinais meteóricos, $\tau_{1/2}$, obtidos através do radar instalado em São João do Cariri-PB (7,4°S, 36,5°O) e em Cachoeira Paulista-SP (22,7°S; 45,0°O) entre 2003 e 2018. Estes equipamentos foram adquiridos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e os dados têm sido compartilhados e se encontram à disposição do Grupo de Física da Atmosfera do Departamento de Física da UEPB, dos quais este trabalho faz parte.

Os radares meteóricos das duas localidades estudadas, são sistemas comerciais denominados de SKiYMET, os quais possuem visada de todo céu e foram projetados para operar em alta taxa de repetição de pulso, registrando meteoros, e utilizando de algoritmos próprios para determinar quais objetos devem ser tratados. Em cada radar é utilizado uma única antena transmissora Yagi de três elementos, com cinco antenas receptoras dispostas no Solo formando uma cruz assimétrica. Esta configuração interferométrica permite a determinação da trilha meteórica no céu, reduzindo a ambiguidade no ângulo de chegada (HOCKING et al., 2001).

Há décadas que as técnicas de radar são usadas em observações de meteoros. As primeiras observações foram usadas predominantemente para propósitos astronômicos no estudo das chuvas de meteoros e para estimar a velocidade de entrada dos meteoróides. Entretanto, o uso das técnicas de radar evoluiu para a investigação da dinâmica nas regiões com altitudes que variam entre 80 e 110 km, também conhecida como alta mesosfera e baixa termosfera, através de medições da velocidade de deriva da trilha ionizada.

Previsões teóricas foram confirmadas por HOCKING (1999) em seus estudos experimentais da dependência de temperatura e pressão do coeficiente de difusão ambipolar na região da mesopausa. Através da elaboração de um algoritmo que permitia que os tempos de decaimento de meteoros sejam usados para determinar medições absolutas de temperaturas mesosféricas. A técnica utiliza o tempo de decaimento do sinal de ondas de rádio em frequências típicas que é refletido pela trilha ionizada formada em consequência da rápida passagem de um meteoróide na atmosfera.

4.1 DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA A PARTIR DE MEDIDAS POR RADAR METEÓRICO

HOCKING et al. (1997) e HOCKING (1999) propuseram dois métodos para determinar a temperatura usando dados de radar meteórico. No primeiro, HOCKING et al. (1997) utiliza a relação de Einstein para o coeficiente de difusão ambipolar, discutida por CHILSON et al. (1996), expressa através da seguinte equação:

$$\frac{T^2}{p} = \frac{q_e}{2k} \left(\frac{273,16}{1,013 \times 10^5 K_0} \right) \left(\frac{\lambda^2 \ln(2)}{16\pi^2 \tau_{1/2}} \right) \quad (4)$$

em que

- P é a pressão atmosférica neutra (Pa);
- q_e é a carga de elétrons;
- K é a constante de Boltzmann;
- K_0 é a mobilidade de íons na trilha de meteoros;
- λ é o comprimento de onda correspondente à frequência do radar;
- $\tau_{1/2}$ é o tempo de meia vida.

A estimativa da temperatura obtida através desta equação requer valores da pressão. HOCKING et al. (1997) usou dados de pressão do modelo COSPAR (Committee on Space Research) International Reference Atmosphere (CIRA-86). Contudo, o modelo fornece perfis verticais mensais fixos da pressão atmosférica, para distintas latitudes em ambos os hemisférios. Deste modo, ao considerar os valores de pressão fornecidos pelo modelo CIRA-86 na equação anterior, os resultados apresentarão sérias limitações para representarem as variações de curto período das temperaturas diárias.

O segundo método proposto por HOCKING (1999) usa o fato do $\log_{10}(1/\tau)$ ser dependente do $\log_{10}(P)$ e, que P varia com a altitude de acordo com a altura de escala, a qual depende da temperatura, para demonstrar que a inclinação (S_m) do gráfico da altitude (Z) em função de $\log_{10}(1/\tau)$ está relacionada com a temperatura média na altitude de maior ocorrência de meteoros. O método requer um número

expressivo de medidas e cada temperatura diária é estimada a partir de um ajuste de S_m .

Este modelo não necessita da informação da pressão para estimar a temperatura na altitude de maior ocorrência de meteoros (~90 km), porém, requer uma aproximação para o gradiente médio da temperatura na mesopausa (dT/dZ). HOCKING et al. (2004) usam uma aproximação para o gradiente médio de temperatura na altitude de máxima ocorrência de meteoros, a qual é baseada em dados experimentais e de modelos.

Na presente investigação, uma variante dos métodos propostos por HOCKING et al. (1997) e HOCKING (1999) será desenvolvida para estimar a temperatura a partir do tempo de decaimento do sinal meteórico, em que os valores para a pressão serão obtidos a partir das variações da altura do pico da camada de meteoros, uma vez que as variações na altura de maior ocorrência de meteoros, para um determinado radar, fornecem informações sobre a densidade da atmosfera neutra na região de ablação dos meteoroides (TAKAHASHI et al., 2002; CLEMESHA e BATISTA, 2006; LIMA et al., 2015).

Estudos usando a altura de máxima ocorrência de meteoros (H_{met}) a partir de medidas por radar propõem que as variações de H_{met} podem ser convertidas em variações da densidade em torno de 90 km de altitude (STOBER et al., 2012; 2014). Uma vez que as variações H_{met} representam bem as variações na densidade atmosférica, as mesmas podem ser convertidas em variações da pressão atmosférica em torno de 90 km de altitude.

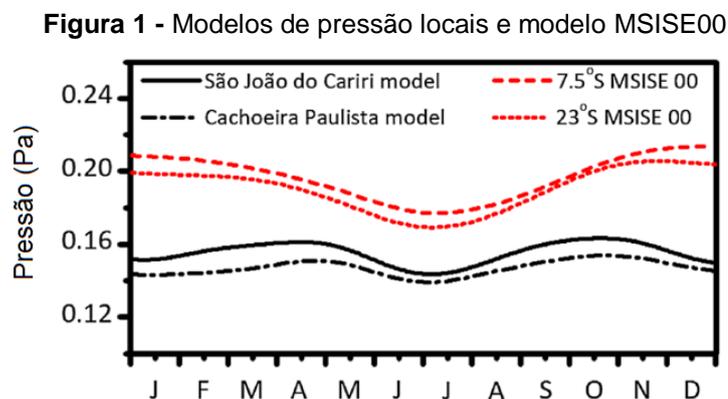
4.1.1 Modelos de pressão local a partir dos dados do nrlmsise-00 empirical atmosphere model

De acordo com equação de Clapeyron, ou lei dos gases ideais, e assumindo uma situação de equilíbrio hidrostático, podemos estimar o valor da pressão a partir das temperaturas e densidades de massa:

$$P = \frac{\rho \cdot T \cdot K_b}{M} \quad (5)$$

onde ρ é a densidade de massa, T é a temperatura, K_b é a constante de Boltzmann e M é a massa molecular. Nesse caso assume-se que a massa molecular será constante, composta de 20% de oxigênio e 80% de nitrogênio. O modelo NRLMSISE-00 empirical Atmosphere Model nos fornecem as temperaturas e as densidades de massa que foram usadas para calcular a pressão.

Os modelos de pressão locais para São João do Cariri e Cachoeira Paulista, bem como o modelo de pressão obtido a partir dos parâmetros do Modelo de Atmosfera Empírica da NRLMSISE-00 (Picone et al., 2002) estão representados na Figura 1 para 7,5° S (linha tracejada vermelha) e 23° S (linha pontilhada vermelha).



4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS MARÉS NA TEMPERATURA

Para investigar as variações de marés na temperatura estimada a partir de medidas obtidas com radar meteorológico, a técnica da sobreposição de intervalo de tempo foi utilizada na estimativa de temperaturas representativos para cada intervalo de hora e de altitude. A técnica consiste em agrupar as informações fornecidas através dos ecos meteorológicos obtidos em intervalos de 1 hora como uma função da hora do dia, usando os dados de cada mês, em cada intervalo de altitude, para estimar os valores da temperatura.

Com a intenção de extrair informação de maré em relação à temperatura foi utilizada uma abordagem de “dia composto” e um algoritmo padrão de determinação de temperatura para obter as marés de temperatura diurna e semi-diurna, porém,

como existe variação de gradiente de temperatura ao longo do dia são necessárias algumas correções importantes (HOCKING e HOCKING, 2002).

4.3 ESTIMATIVA DA AMPLITUDE E DA FASE DE UM SINAL

Através do método dos mínimos quadrados é possível isolar a parte periódica de uma onda, quando temos períodos conhecidos, ou seja, é possível estimar os valores das amplitudes e fases. Para estimar os parâmetros da onda, com uma frequência ω conhecida temos que (BLOOMFIELD, 2004):

$$x_t = A \cos(2\pi\omega t) + B \sin(2\pi\omega t) + e_t \quad (6)$$

onde o princípio dos mínimos quadrados leva a seguinte equação

$$S(A, B) = \sum_{t=0}^{n-1} [x_t - A \cos(2\pi\omega t) - B \sin(2\pi\omega t)]^2 \quad (7)$$

com ω fixo, teremos que

$$\frac{\partial T}{\partial A} = -2 \sum \cos(2\pi\omega t) [x_t - A \cos(2\pi\omega t) - B \sin(2\pi\omega t)] \quad (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial B} = -2 \sum \sin(2\pi\omega t) [x_t - A \cos(2\pi\omega t) - B \sin(2\pi\omega t)] \quad (9)$$

resolvendo as equações e igualando a zero teremos as seguintes Soluções

$$A = \hat{A} \cong \frac{1}{\Delta} \left\{ \sum x_t \cos(2\pi\omega t) \sum [\sin(2\pi\omega t)]^2 - \sum x_t \sin(2\pi\omega t) \sum \cos(2\pi\omega t) \sin(2\pi\omega t) \right\} \quad (10)$$

$$B = \hat{B} \cong \frac{1}{\Delta} \left\{ \sum x_t \operatorname{sen}(2\pi\omega t) \sum (\cos(2\pi\omega t))^2 - \sum x_t \cos(2\pi\omega t) \sum \cos(2\pi\omega t) \operatorname{sen}(2\pi\omega t) \right\} \quad (11)$$

onde

$$\Delta = \sum [\cos(2\pi\omega t)]^2 \sum [\operatorname{sen}(2\pi\omega t)]^2 - \sum [\cos(2\pi\omega t) \operatorname{sen}(2\pi\omega t)]^2 \quad (12)$$

Para encontrar os valores da amplitude R e a fase ϕ é necessário resolver as seguintes equações.

$$A = R \cos 2\pi\phi \quad (13)$$

$$B = -R \sin 2\pi\phi \quad (14)$$

Sabendo que R é um número não negativo, temos que $R = \sqrt{A^2 + B^2}$. A equação básica para ϕ é $\tan 2\pi\phi = -B/A$. Porém o resultado para $2\pi\phi = \arctan(-B/A)$ será incompleto, pois os valores para essa equação será o mesmo nos intervalos $(-A, -B)$ e (A, B) . Para obter um resultado mais completo é necessário resolver as seguintes equações para os intervalos $(-1/2, 1/2]$.

$$\begin{cases} \arctan(-B/A), & A > 0, \\ \arctan(-B/A) - \pi, & A < 0, B > 0, \\ \arctan(-B/A) + \pi, & A < 0, B \leq 0, \\ -\pi/2, A = 0, & B > 0, \\ \pi/2, A = 0, & B < 0, \\ \text{arbitrário}, & A = 0, B = 0. \end{cases}$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MÉTODO DA PRESSÃO

5.1.1 *Cachoeira Paulista - SP*

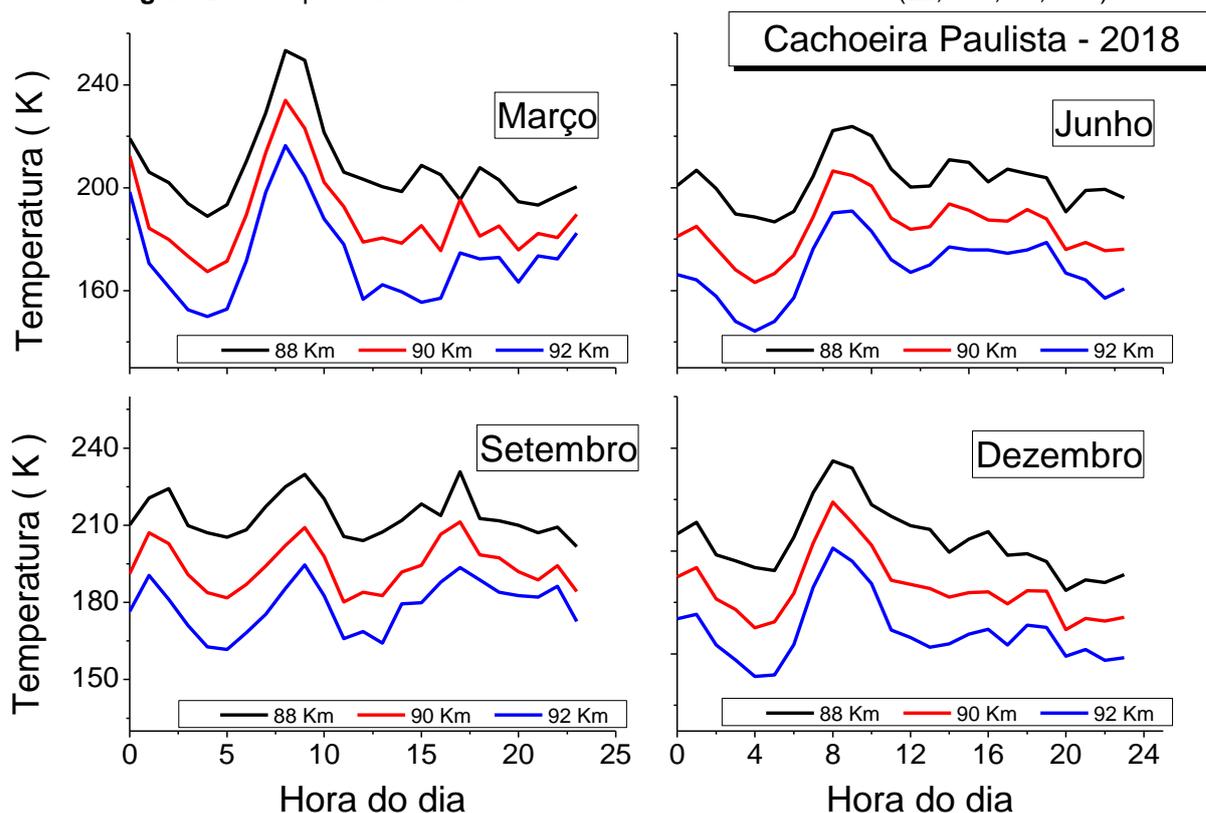
5.1.2 Temperatura

Na Figura 2 estão representadas as temperaturas obtidas usando o método da pressão para a região MLT sobre Cachoeira Paulista-SP, em três altitudes, 88, 90 e 92 km nos meses de março (outono), junho (inverno), setembro (primavera) e dezembro (verão) de 2018. Em relação à variação da altitude, podemos observar que o gradiente vertical térmico é negativo, como era de se esperar na região MLT para todos os meses observados.

Em 90 km de altitude, as temperaturas máximas ocorreram em março (227,33 K), junho (210,4 K) e dezembro (215,4 K) às 8:00h e setembro (215,4 K) às 17:00. As menores temperaturas são verificadas às 4:00h nos meses de março (168,6 K), junho (166,3 K) e dezembro (177,8 K), e às 23:00h em setembro (177,8 K).

É interessante notar que as temperaturas exibem uma variação diurna com apenas um ponto de temperatura máxima e um ponto de temperatura mínima mais definida, nos meses de março e dezembro. Em junho, é possível identificar dois pontos de máxima e dois pontos de mínima, indicando uma oscilação semidiurna, e em setembro temos três pontos bem definidos de máxima às 2:00h, 9:00h e 17:00h e três pontos de mínima às 4:00h, 11:00h e 23:00h, caracterizando como uma oscilação terdiurna.

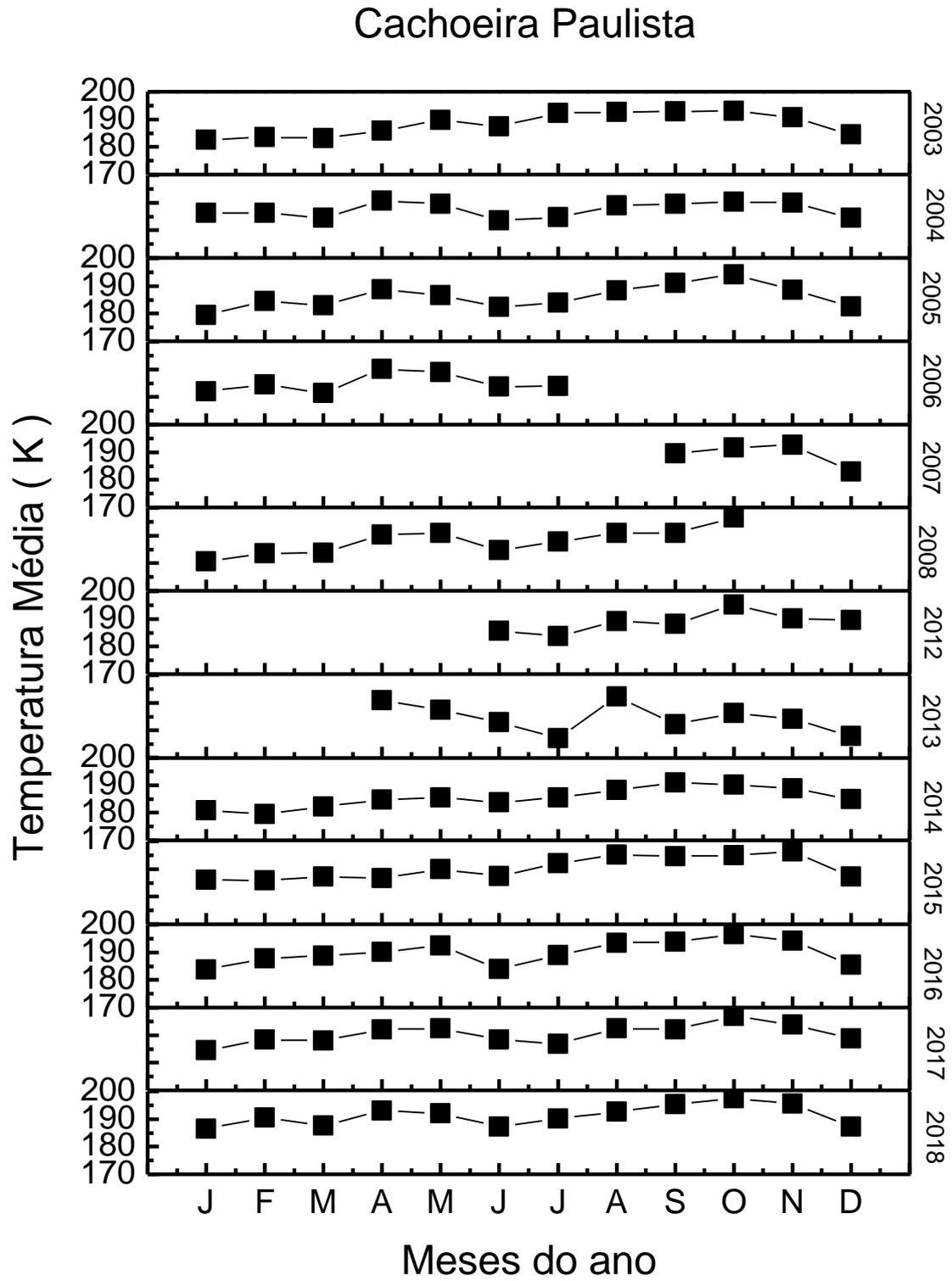
Figura 2 – Temperaturas estimadas em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O).



A média mensal das temperaturas em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) à 90 km de altitude entre os anos de 2003 e 2018 é representada na Figura 3, onde é possível identificar a presença de dois pontos de máxima e dois pontos de mínima na maioria dos anos, apresentando uma situação bem definida de oscilação semianual.

No primeiro semestre as temperaturas maiores ocorrem entre os meses de abril e maio com uma média de aproximadamente 190 K e no segundo semestre entre agosto e novembro com médias superiores a 190 K, sendo o mês de outubro com a maior média (~193,5 K). Dois pontos de mínima também são identificados, um em junho com média de 185 K e o outro em janeiro com média de 183 K. A temperatura máxima no período foi 197,45 K em outubro de 2018 e a mínima de 177,09 K em julho de 2013.

Figura 3 - Temperatura média mensal em Cachoeira Paulista (22,7° S, 45,0° O) a 90 km de altitude entre 2003 e 2018.



5.1.2.1 Marés na temperatura

O comportamento das marés diurna, semidiurna e terdiurna através do método da pressão extraídas nas medidas de temperatura na cidade de Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) a 90 km de altitude entre os anos de 2003 e 2018 estão apresentados nas Figura 4, Figura 5 e Figura 6, respectivamente.

O comportamento das amplitudes da maré diurna (Figura 4) exibiu uma variação semianual com valores de máximo na primeira metade do ano entre os meses de março, abril e maio (com exceção aos anos de 2014 e 2015 com máximos no mês de janeiro, (> 11K) (em 2006, 2007 e 2008 os dados estão incompletos devido a problemas técnicos) com uma amplitude média de aproximadamente 10 K, tendo atingido o seu maior valor em agosto de 2006 chegando a 16 K. Na segunda metade do ano os valores do pico ocorreram, na maioria dos anos analisados, nos meses de agosto, com amplitude média de aproximadamente 11 K, atingindo uma amplitude máxima de 14,5 K em agosto de 2004. Os menores valores de amplitudes foram observados no mês de fevereiro com uma média de aproximadamente 3,5 K, sendo bem inferior a média dos outros meses que foram sempre superiores a 6 K. O menor valor de amplitude da maré diurna apresentado foi de aproximadamente 0,7 K no mês de fevereiro de 2004.

Os valores máximos de amplitude da maré diurna no primeiro semestre nos meses de março, abril e maio demonstram uma forte influência da maré diurna no comportamento da temperatura, por possuir seus maiores valores no mesmo período dos anos observados. O mesmo não ocorre no segundo semestre onde os valores máximos da diurna não parecem ter influenciado na variação da temperatura.

As amplitudes da maré semidiurna (Figura 5) apresentam amplitudes máximas com característica sazonal bem definida, com dois picos principais um em cada semestre do ano. A semidiurna apresenta seu primeiro máximo entre os meses de março e abril, com médias de aproximadamente 12 e 13 K respectivamente. Os valores máximos atingidos foram de 16,7 K em abril de 2004 e 16 K no mesmo mês em 2006. Já no segundo semestre as maiores amplitudes foram observadas em outubro, com média um pouco superior a 10 K, e o maior valor alcançado ultrapassando a casa de 17 K em outubro de 2014. Esse comportamento demonstra

uma consistência com as variações semianuais da temperatura, coincidindo os momentos de máxima das temperaturas com as máximas amplitudes da maré semidiurna, indicando assim uma correspondência entre as fases. Nos outros meses dos anos as médias das amplitudes ficaram sempre abaixo de 9 K, com exceção de maio ($> 9K$) e nunca inferiores a 5 K. Em números absolutos o menor valor de amplitude ocorreu nos meses de setembro de 2008 e 2016 ($\sim 3 K$).

A maré terdiurna apresenta um comportamento pouco variável com valores de amplitudes máximas entre os meses de novembro e maio, e amplitudes mínimas entre junho e outubro, não representando comportamento compatível com as variações que ocorrem na temperatura.

Figura 4 - Amplitudes da maré diurna em Cachoeira Paulista – SP ($22,7^{\circ}$ S, $45,0^{\circ}$ O) a 90 Km de altitude entre 2003 e 2018.

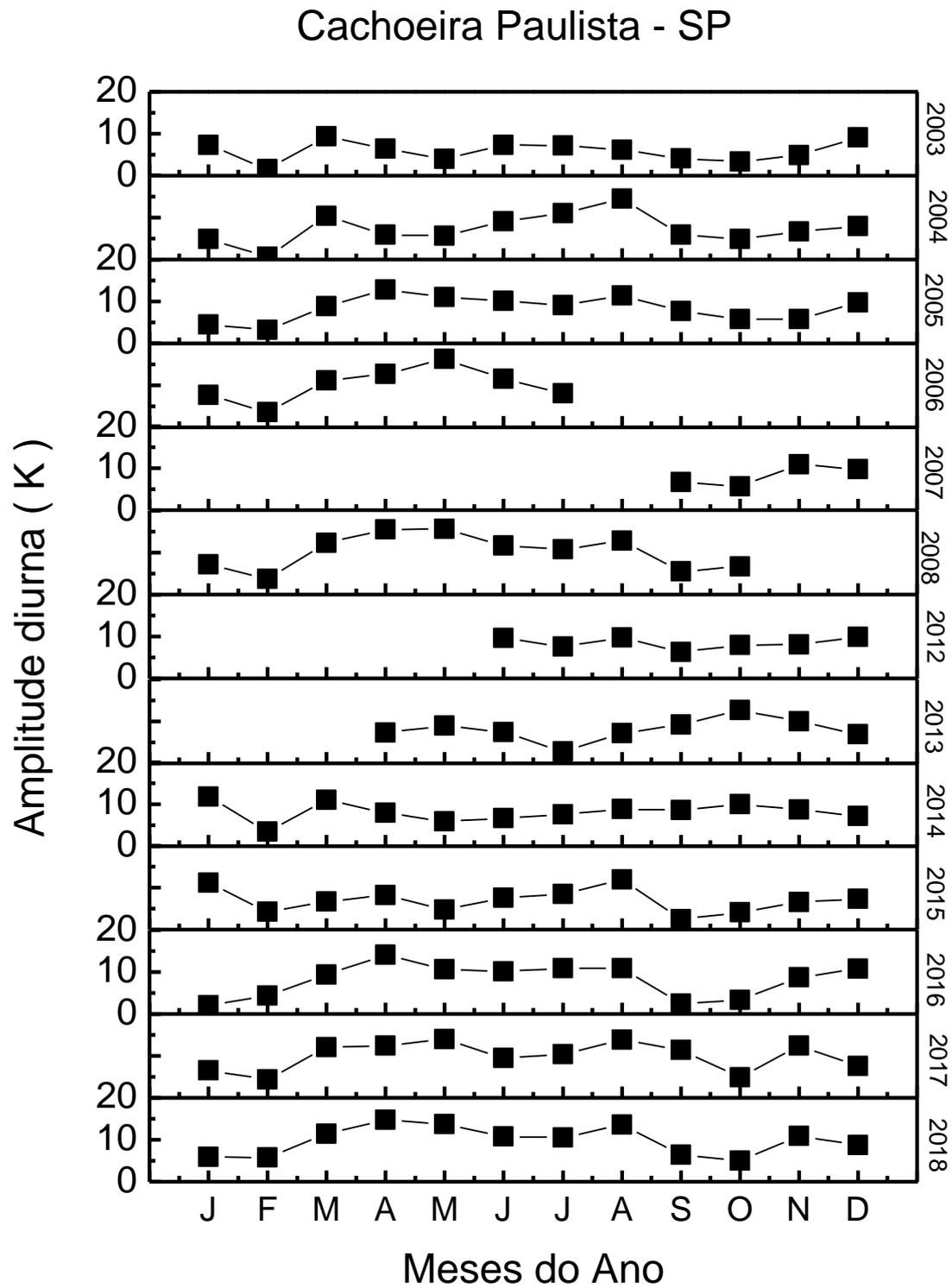


Figura 5 - Amplitudes da maré semidiurna em Cachoeira Paulista – SP ($22,7^{\circ}$ S, $45,0^{\circ}$ O) a 90 km entre 2003 e 2018.

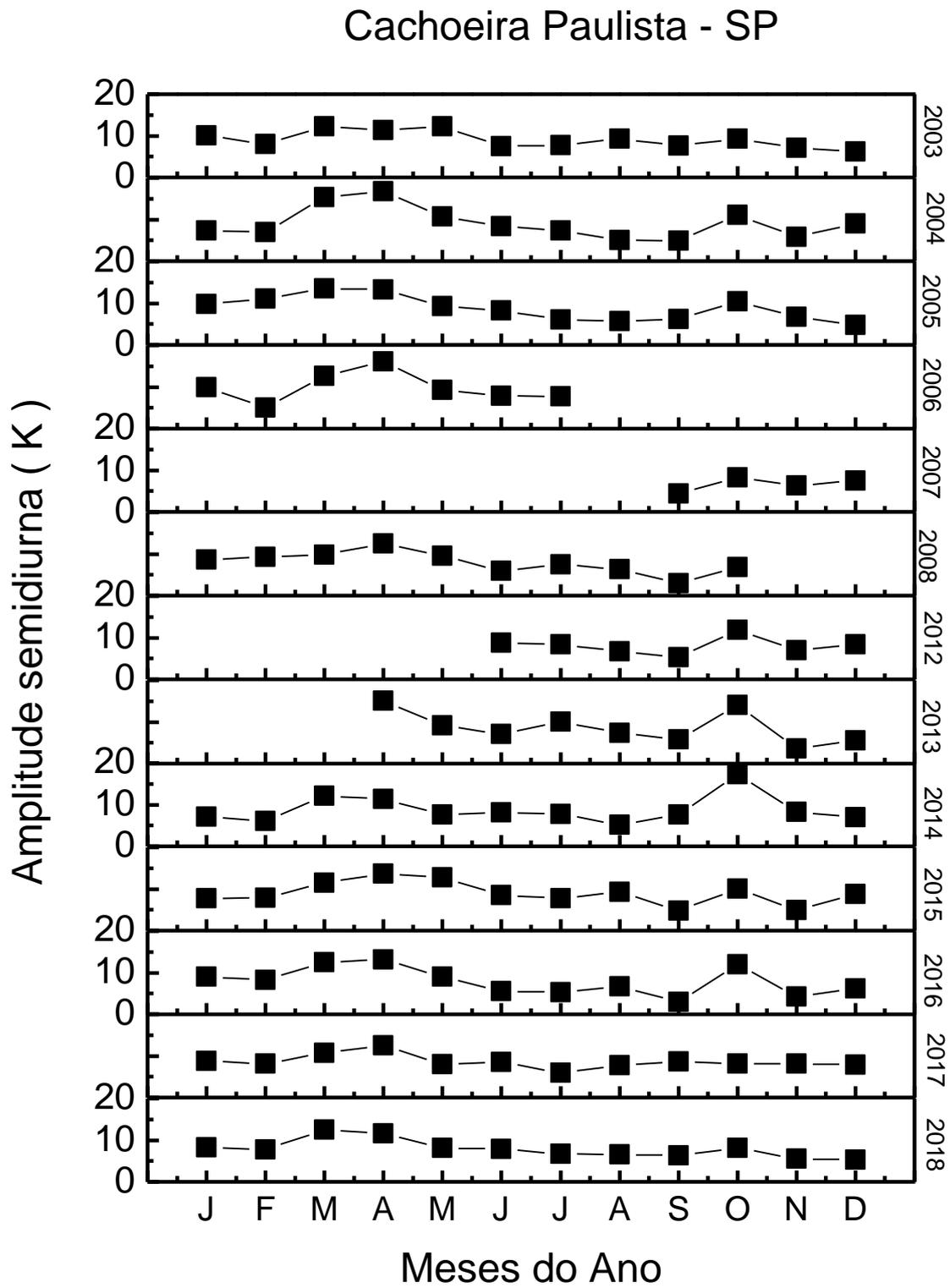
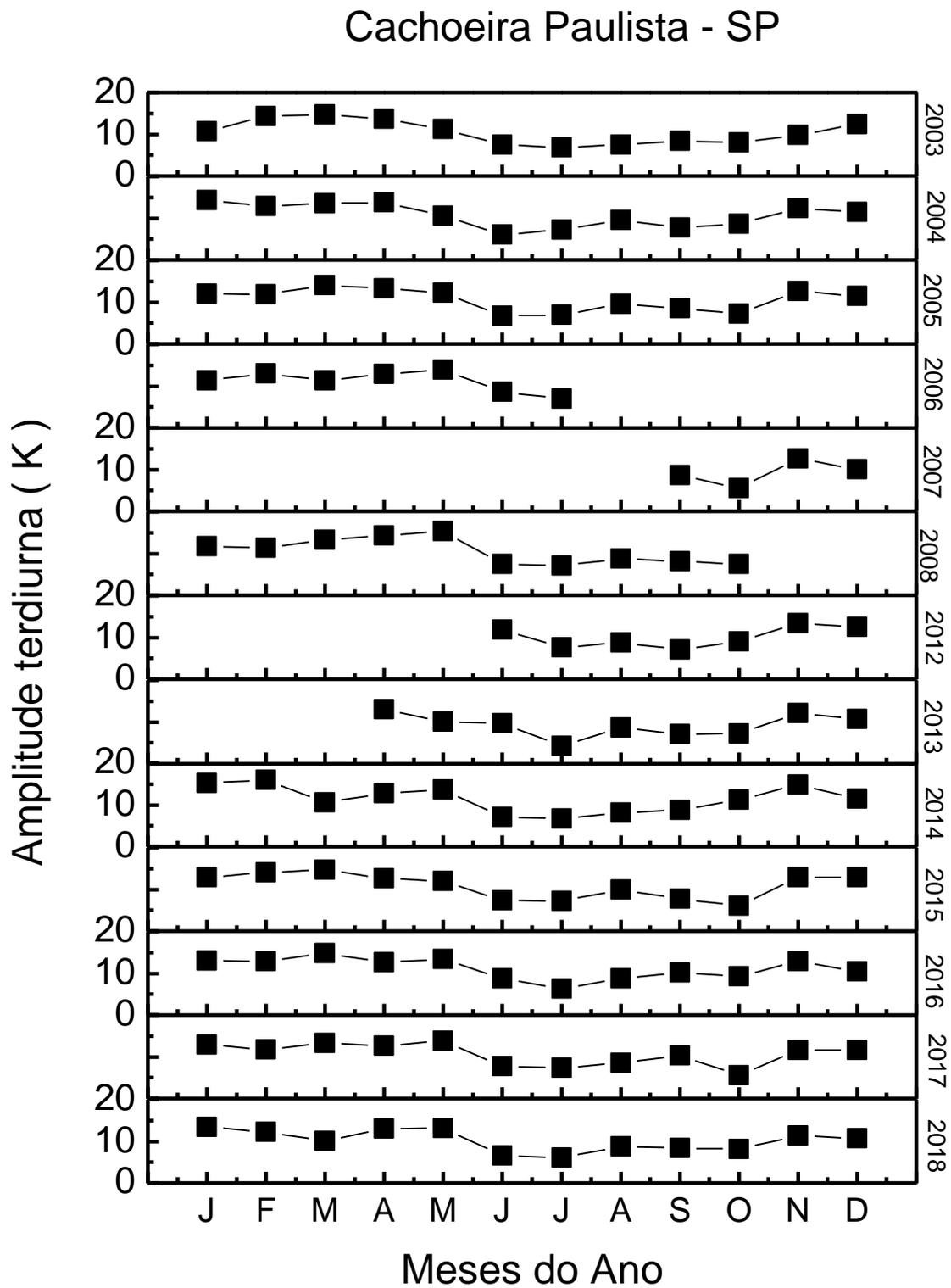


Figura 6 - Amplitudes da maré terdiurna em Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) a 90 km entre 2003 e 2018.



5.1.3 São João do Cariri – PB

5.1.3.1 Temperatura

Na Figura 7 é apresentado os gráficos da temperatura média mensal em São João do Cariri – PB ($7,4^{\circ}$ S, $36,5^{\circ}$ O) a 90 km de altitude entre os anos de 2004 e 2008. O comportamento das curvas apresentadas nos cinco anos são bem semelhantes, com dois pontos de temperatura máxima bem definidos, caracterizando uma variação semianual.

Os picos de temperatura da primeira metade do ano aconteceram sempre nos meses de abril com uma média de 215 K e atingindo seu valor máximo em 2007 (216 K). Já no segundo semestre, as temperaturas máximas ocorreram no mês de novembro, com exceção de 2005, onde o pico ocorreu em dezembro. A temperatura máxima observada foi de 218 K em novembro de 2008.

Os menores valores de temperatura foram registrados no meses de junho e julho, com médias de 191 e 195 K respectivamente, com temperatura mínima de 190 K em junho de 2005.

5.1.3.1 Marés na temperatura

Os resultados das marés diurna e semidiurna através do método da pressão extraídas nas medidas de temperatura na cidade de São João do Cariri – PB ($7,4^{\circ}$ S, $36,5^{\circ}$ O) a 90 km de altitude entre os anos de 2004 e 2008 são fornecidos na Figura 8 e Figura 9 respectivamente.

A variação apresentada pela maré diurna migrante na Figura 8 indica um máximo primário em dezembro com valores de amplitude superiores a 15 K, com exceção de 2005 (10 K) e podendo chegar a 18,5 K em dezembro de 2006, onde atingiu o maior valor entre os anos amostrados e um máximo secundário não muito bem definido variando entre os meses de abril e maio.

Os valores mínimos foram registrados durante o mês de fevereiro (a menor média entre os anos observados) e entre junho e outubro, mas de forma bem misturada, com valores inferiores a 2 K. Os menores valores registrados foram 0,8 K, 0,5 K e 0,7 K em julho de 2008, junho de 2005 e agosto de 2006, respectivamente.

A maré semidiurna é representada nos gráficos da Figura 9 onde podemos observar um máximo entre os meses de junho e julho, com valores que variam entre 12 K (julho de 2005) e 18 K (julho de 2004). Um pico secundário ocorre no mês de novembro com valores de amplitude menores, atingindo o seu maior valor em novembro de 2008 (14,5 K). Os menores valores de amplitudes ocorrem entre os meses de janeiro – março, com amplitudes geralmente inferiores a 8 k, chegando ao seu valor mínimo de 4 K em janeiro de 2005.

Figura 7 - Temperatura média mensal em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008.

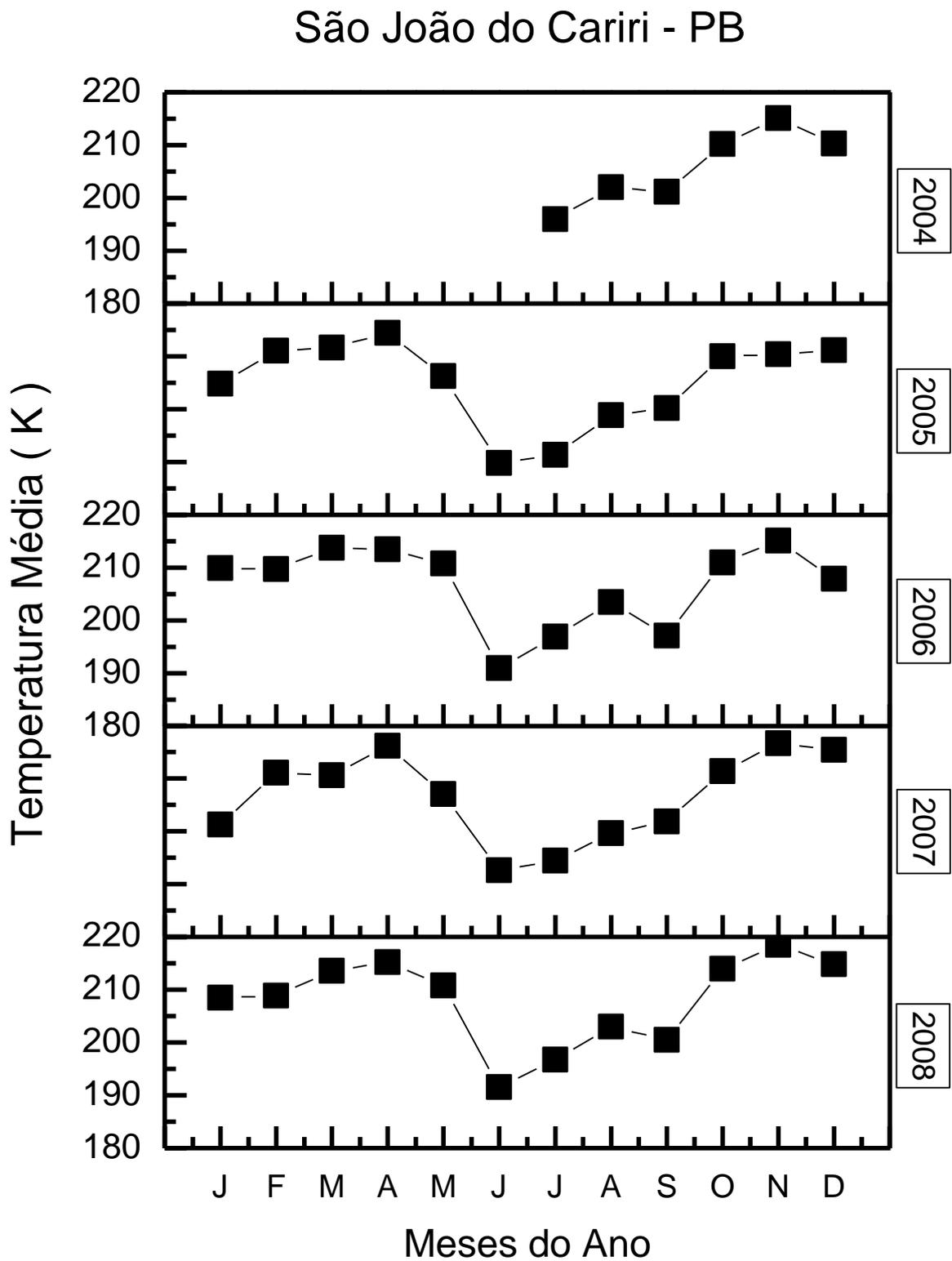


Figura 8 - Amplitudes da maré diurna em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008.

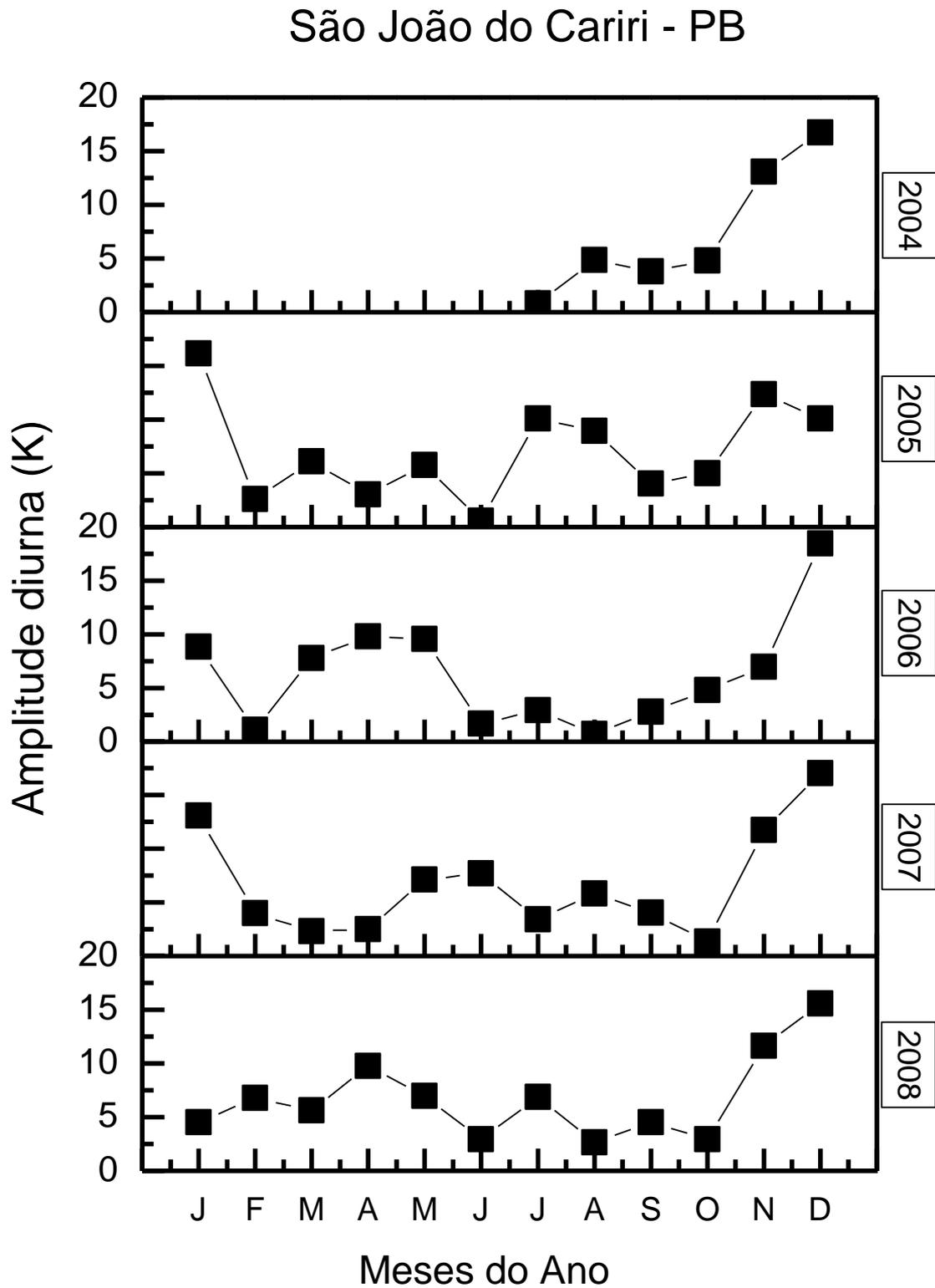
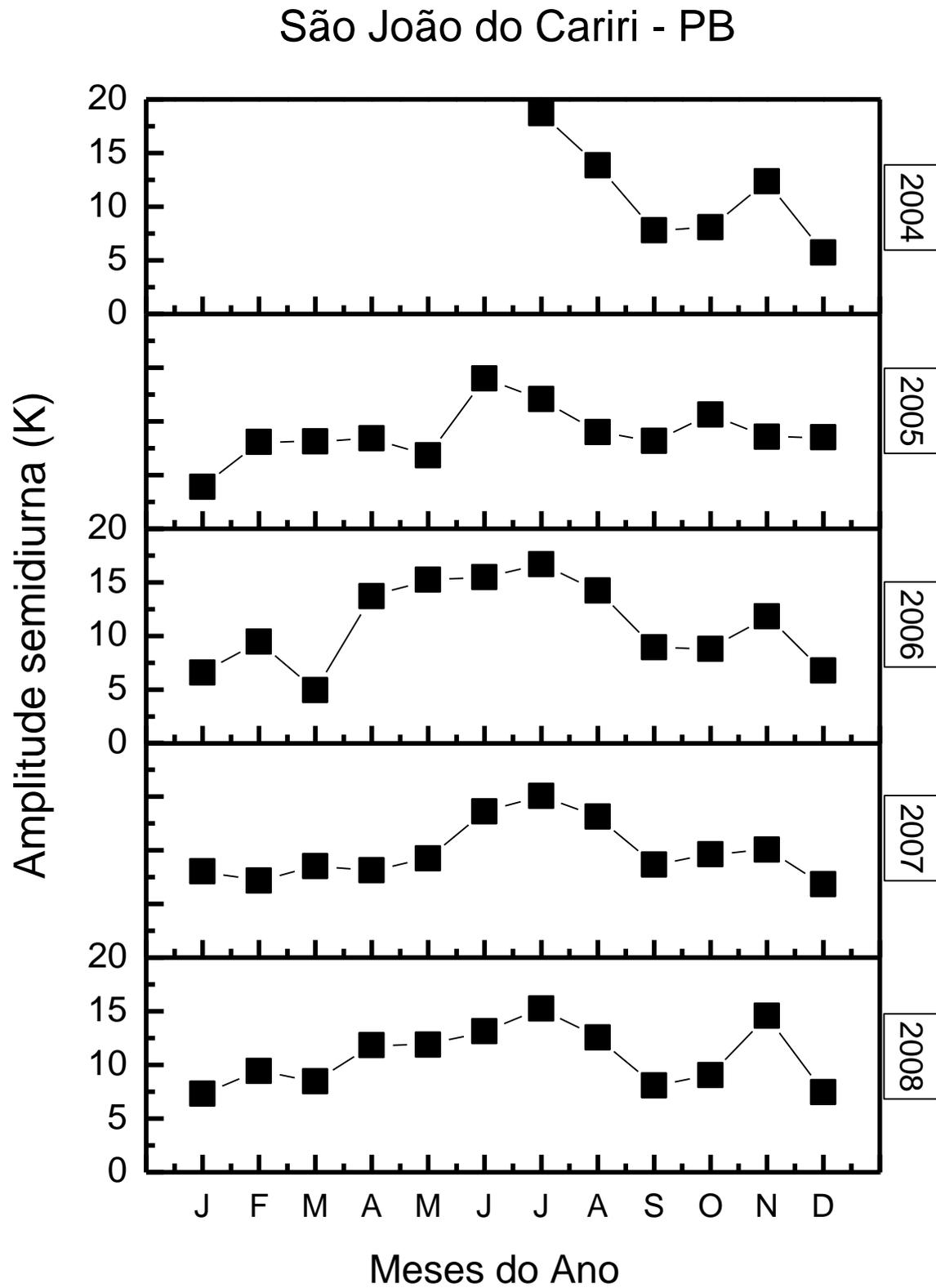


Figura 9 - Amplitudes da maré semidiurna em São João do Cariri – PB ($7,4^{\circ}$ S, $36,5^{\circ}$ O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008.



5.2 MÉTODO DO GRADIENTE

5.2.1 Marés na Temperatura

5.2.1.1 Cachoeira Paulista – SP

Através do método do gradiente foi possível obter o valor das amplitudes das marés diurna e semidiurna, Figura 10 e

Figura 11 respectivamente, extraídas da temperatura na cidade de Cachoeira Paulista – SP (22,7° S, 45,0° O) a 90 km de altitude entre os anos de 2003, 2005, 2006 e 2008.

A maré diurna (Figura 10) apresenta variação semianual com dois pontos de máxima, sendo o primeiro pico nos meses de abril e maio, e o segundo entre novembro e dezembro, onde ocorreram as maiores médias, maio (11,5 K) e novembro (12 K). O maior valor de amplitude no primeiro semestre foi apresentado no mês de março de 2005 (14,7 K), em um mês diferente do pico nos outros anos, e no segundo semestre ocorreu em dezembro de 2003 (15,6 K). Os menores valores de amplitude nesses anos são observados entre os meses de julho e setembro, com média inferior a 3 K em setembro, tendo chegado próximo à zero nesse mesmo mês em 2008.

As amplitudes da maré semidiurna (

Figura 11) apresentam amplitudes máximas com característica sazonal, com dois picos principais um em cada semestre do ano. No primeiro semestre semidiurna maximiza-se entre os meses de março e abril, atingindo o seu máximo no mês de maio com média de aproximadamente 10 K. O valor máximo atingido foi de 13,8 K em maio de 2003. Já no segundo semestre as maiores amplitudes foram observadas em outubro (10 K) e novembro (13 K), com maior valor alcançado de 24 K em

novembro de 2003, sendo esse um valor bem fora da curva entre todos os dados observados, podendo indicar um erro. Os valores mínimos (< 2 K) foram registrados em meses alternados, julho de 2003 (0,41 K), dezembro de 2007 (1,53 K) e março de 2008 (1,66 K).

Figura 10 - Amplitudes da maré diurna em Cachoeira Paulista – SP ($22,7^{\circ}$ S, $45,0^{\circ}$ O) a 90 km de altitude entre 2003 e 2008 - Método do gradiente.

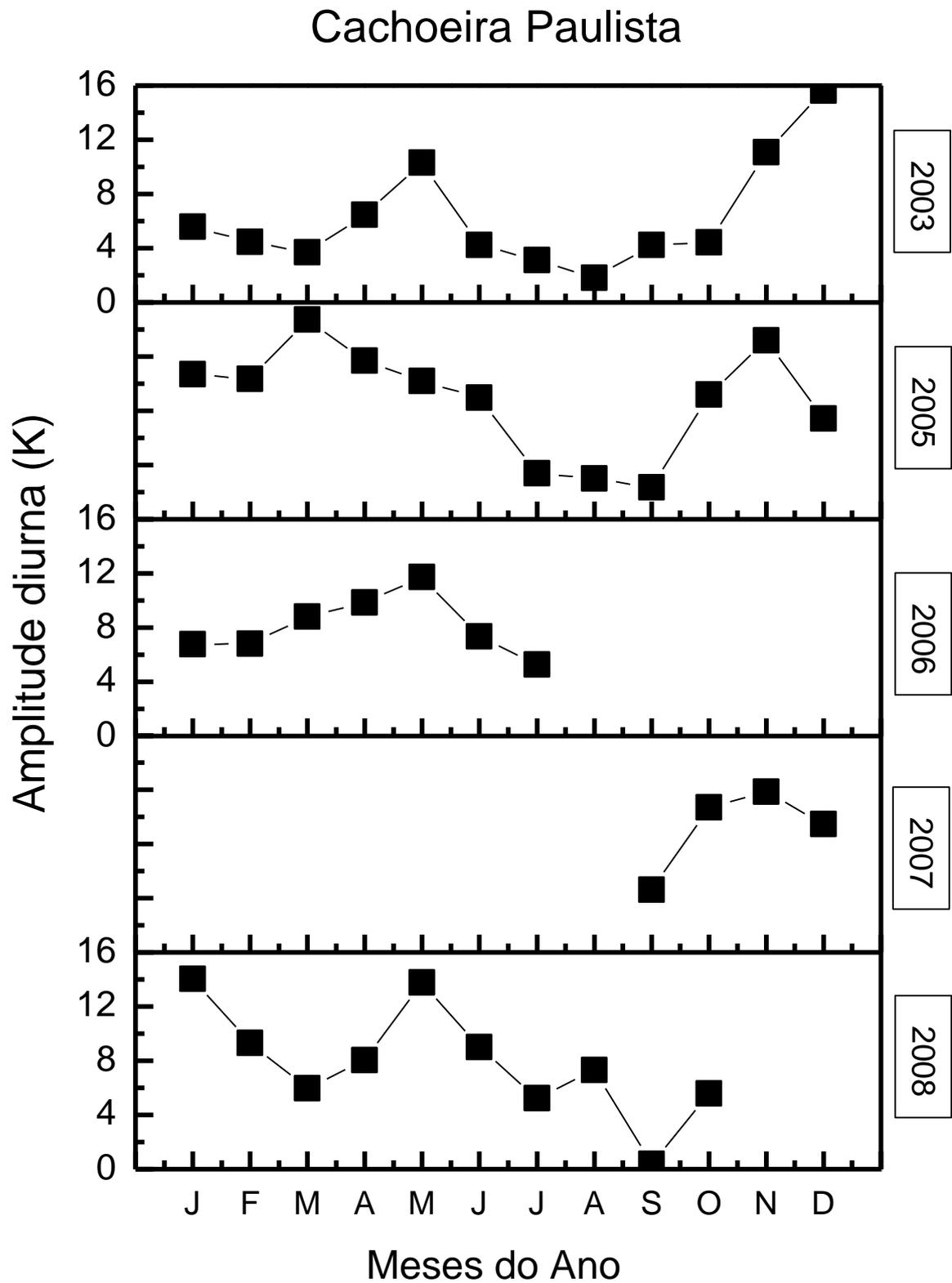
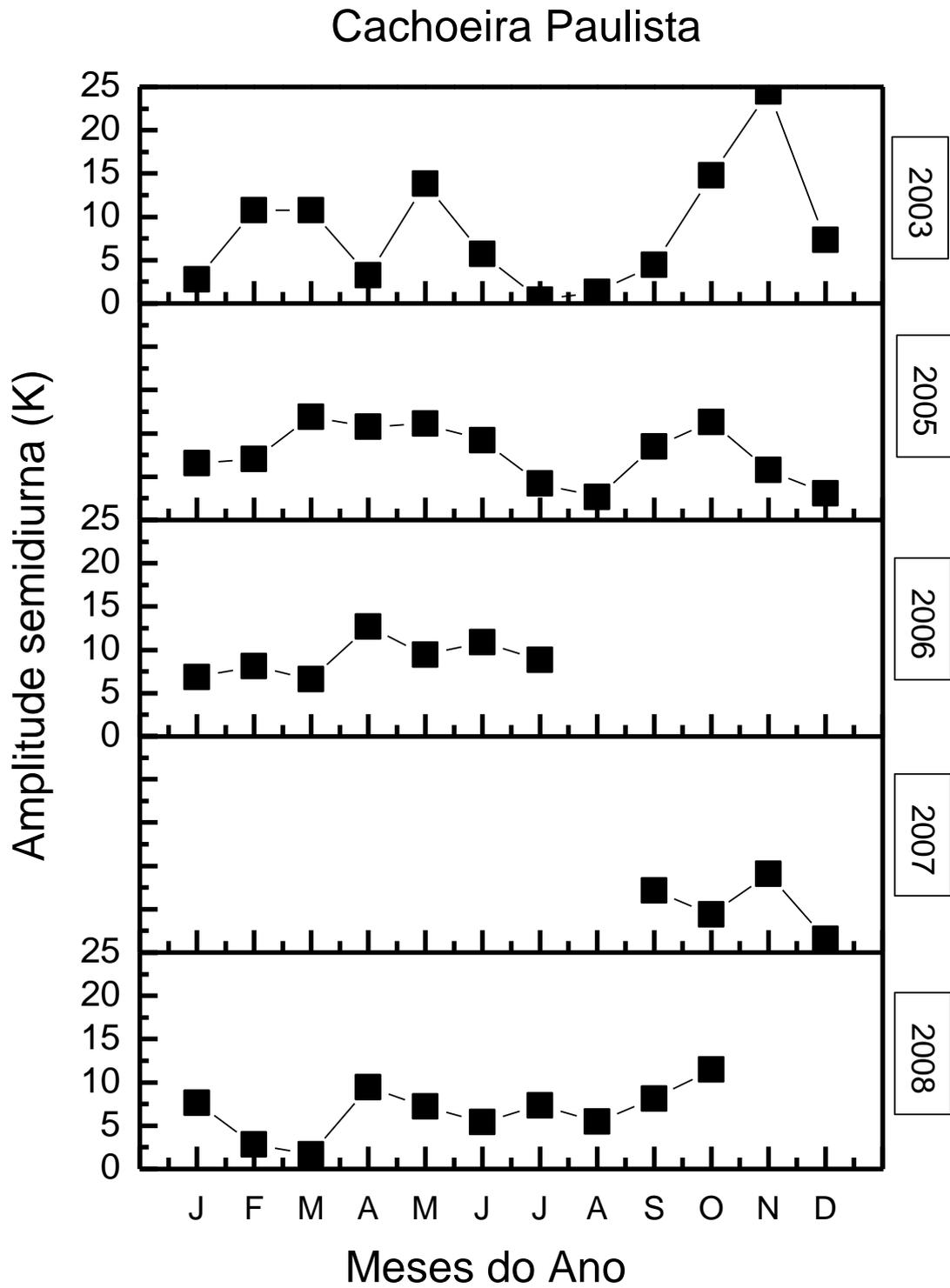


Figura 11 - Amplitudes da maré semidiurna em Cachoeira Paulista – SP ($22,7^{\circ}$ S, $45,0^{\circ}$ O) a 90 km de altitude entre 2003 e 2008 - Método do gradiente.



5.2.1.2 São João do Cariri – PB

Os resultados das marés diurnas e semidiurnas através do método do gradiente extraídas nas medidas de temperatura na cidade de São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre os anos de 2004 e 2008 são fornecidos nas Figura 12 e Figura 13, respectivamente.

A maré diurna migrante maximiza durante os meses março, abril e maio com amplitudes superiores a 22 K e chegando próximo a 37 K em abril de 2008, quando atingiu o valor máximo para o primeiro semestre dos anos amostrados. Um segundo máximo é apresentado em agosto, setembro e outubro com amplitudes entre 23,78 K em agosto de 2007 e 44 K em agosto de 2004 (valor máximo em todos os anos analisados). O mês de dezembro apresentou os menores valores de amplitude, sempre abaixo de 9 K, com exceção de 2005 quando obteve um valor equivalente aos períodos de amplitude máxima (~22 K), e chegando a seu valor mínimo (~2,4 K) em 2006.

O comportamento da maré semidiurna não ficou tão definido em relação aos pontos máximos, apresentando uma variação entre os anos, porém os maiores valores de amplitudes ocorreram na maioria no segundo semestre. Valores de amplitude superiores a 15 K podem ser observados em agosto de 2004 e 2005, mas a média desses meses no período não ultrapassa 11,5 K. Enquanto o mês de dezembro possui uma média mais alta (~12 K), mas a amplitude máxima foi de 13,7 K em 2008. Ocasionalmente amplitudes superiores a 10 K são observadas em outros meses, como em janeiro de 2005 e 2006, setembro de 2005, 2007 e 2008 e novembro de 2008.

As menores amplitudes ocorreram principalmente entre os meses de fevereiro – junho, com valores entre 0,9 e 6 K e o mês com a menor média foi maio (~3 K), mas a menor amplitude entre os anos ocorreu em janeiro de 2007 (0,8 K).

Figura 12 - Amplitudes da maré diurna em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008 – Método do Gradiente.

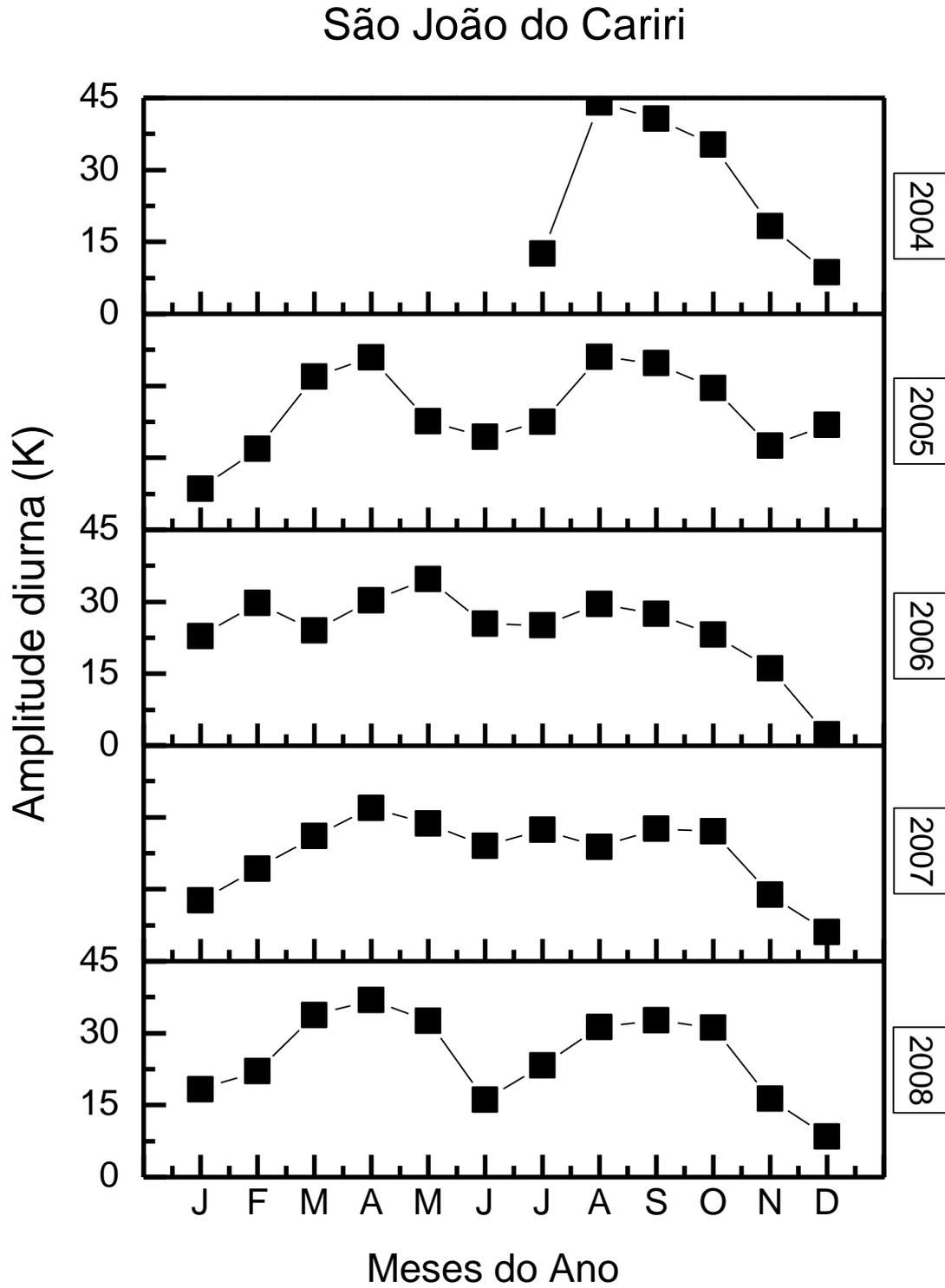
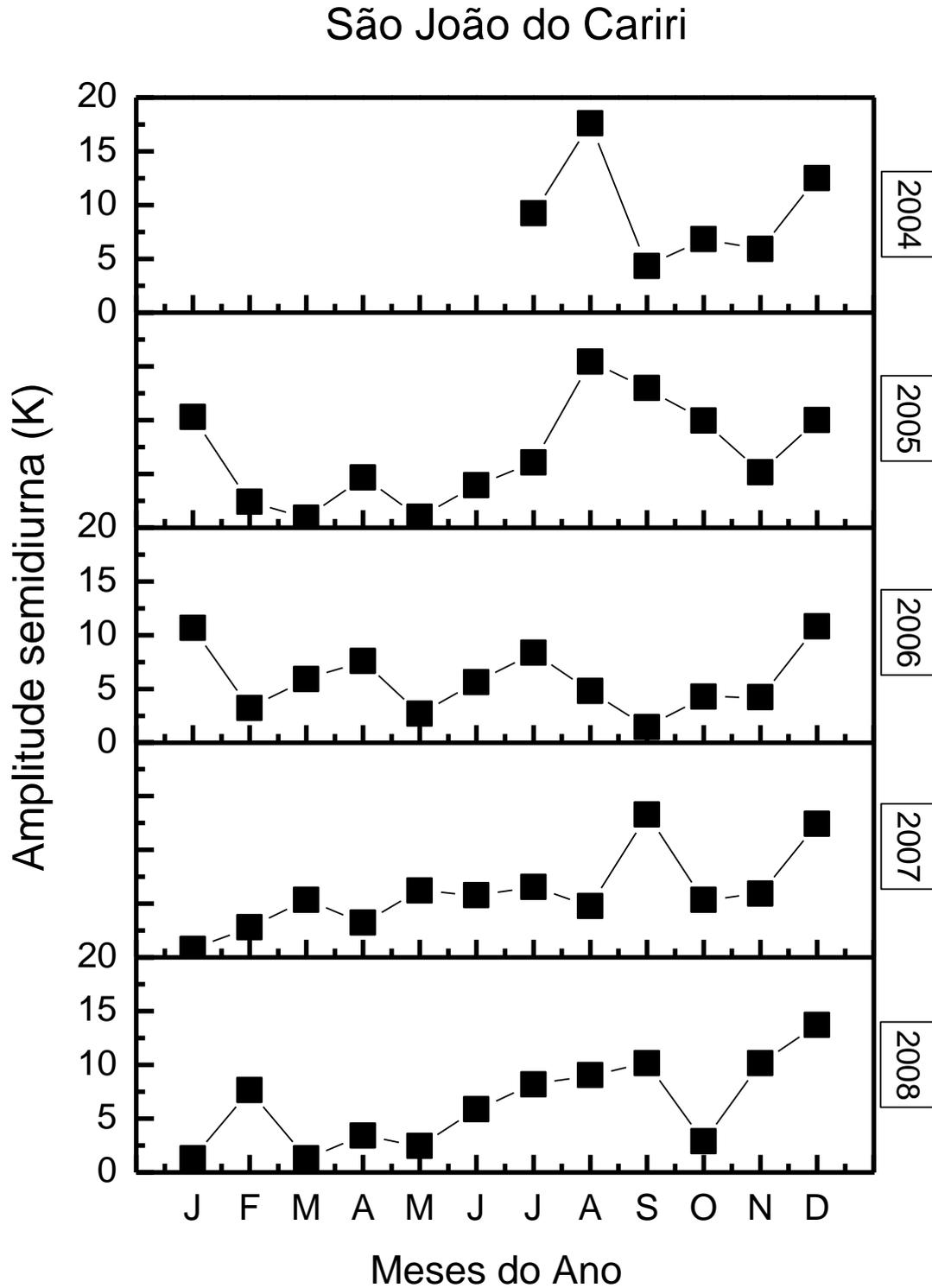


Figura 13 - Amplitudes da maré semidiurna em São João do Cariri São João do Cariri – PB (7,4° S, 36,5°O) a 90 km de altitude entre 2004 e 2008 – Método do Gradiente.



5.3 COMPARAÇÃO COM O GSWM – 02

5.3.1 Marés na Temperatura

5.3.1.1 São João do Cariri – PB

Os resultados das marés diurnas e semidiurnas extraídas nas medidas de temperatura na cidade de São João do Cariri – PB ($7,4^{\circ}$ S, $36,5^{\circ}$ O) a 90 km de altitude entre os anos de 2004 e 2008 estão apresentadas nas Figuras Figura 14 e Figura 15, comparando os dois métodos, gradiente e pressão, com o modelo GSWM-02.

Em relação com o comportamento sazonal da maré migrante diurna, os dois modelos apresentaram semianualidade bem definida, assim como o GSWM-02, mas os pontos de amplitude máxima divergiram. O método do gradiente apresentou bom acordo com o GSWM-02, com variação semianual próximos aos períodos de equinócios e amplitudes mínimas durante o verão, enquanto o método da pressão apresentou as máximas amplitudes justamente no verão, período em que o GSWM-02 apontou suas menores amplitudes. Os valores absolutos de amplitude da apresentou divergência entre os métodos, com amplitudes máximas chegando a um alcance de 44K em agosto de 2004 pelo método do gradiente e 18,5 k em dezembro de 2006 no da pressão e 29 K em maio. Apesar da discrepância dos valores máximos, o método do gradiente apresentou boa conformidade com o GSWM-02 na maioria dos pontos, com valores similares de amplitude, o que não o correu no método da pressão que apresentou valores sempre menores.

Quanto à maré migrante semidiurna, os métodos apresentaram valores bem divergentes em relação ao alcance do comprimento vertical. O modelo GSWM-02 demonstrou um comportamento sazonal com máximos em abril e agosto, que coincide com o máximo primário para o método do gradiente, mas os valores da amplitude não ultrapassam 4 K, enquanto que nos métodos do gradiente e da pressão as amplitudes máximas alcançaram valores superiores a 17K.

Figura 14 – Amplitude diurna em São João do Cariri - Comparativo entre os dois métodos e o modelo GSWM-02 a 90 Km.

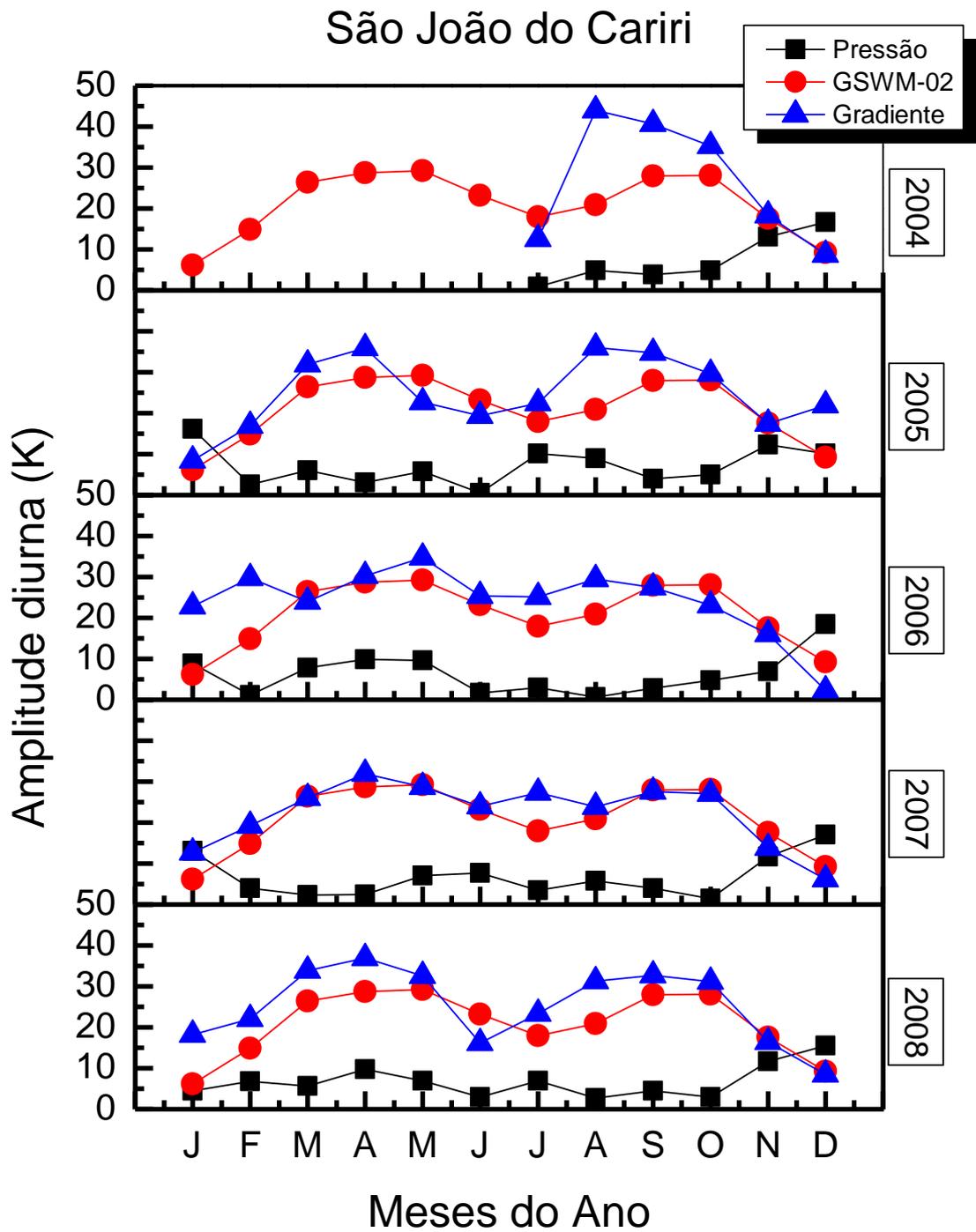
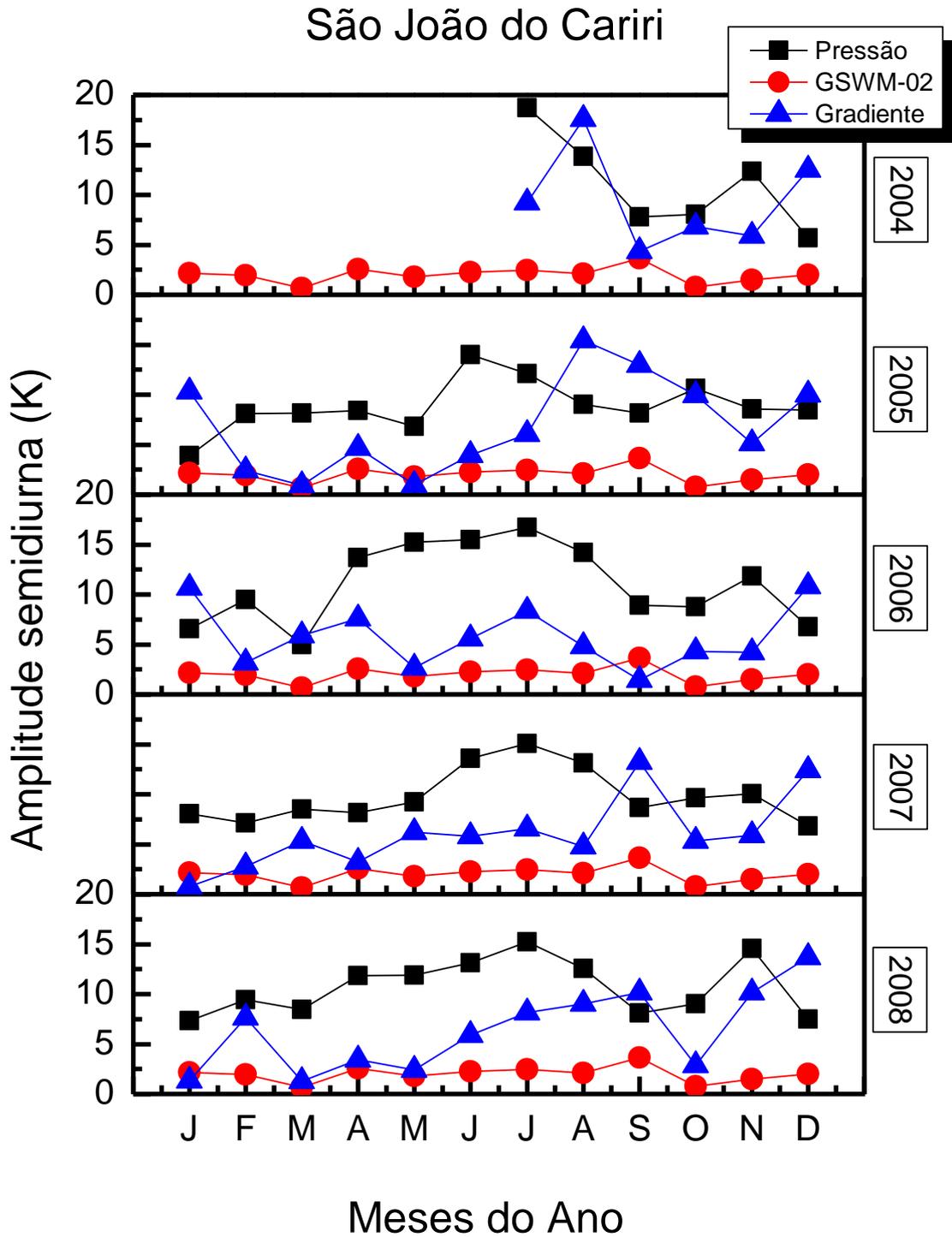


Figura 15 - Amplitude semidiurna em São João Do Cariri – PB - Comparativo entre os dois métodos e modelo GSWM-02 a 90 Km



6. CONCLUSÕES

Na presente pesquisa as temperaturas foram obtidas através do método da pressão para a região MLT sobre Cachoeira Paulista-SP (22,7° S, 45,0° O), em três altitudes, 80, 90 e 92 km entre 2003 e 2018, onde foram extraídas informações sobre as amplitudes das marés diurnas, semidiurna .

Os resultados sobre as marés demonstraram sua influencia direta na temperatura para a região estudada, principalmente em relação a oscilações semianuais que parecem dominar o espectro indicando estar em fase com as marés semidiurnas. Na maré diurna essa correlação parece ser mais influente apenas no primeiro semestre do ano onde foi possível observar uma correspondência entre os pontos máximos das amplitudes da maré diurna com os valores de pico da temperatura.

A maré diurna migrante extraída dos valores da temperatura no método do gradiente demonstrou resultado consistente com as características já apresentadas em artigos anteriores na região MLT e em baixas latitudes.

O ciclo anual apresentou variação semianual com máximos nos meses de equinócios e mínimos durante os meses de verão, apresentando boa concordância com o modelo GSWM-02.

Os dois modelos não conseguiram representar bem o comportamento da maré migrante semidiurna, com valores de amplitude bem divergentes ao do GSWM, e variação sazonal não consistente.

7. REFERÊNCIAS

BATISTA, P. P. et al. Structure of the mean winds and tides in the meteor region over Cachoeira Paulista, Brazil (22.7 S, 45 W) and its comparison with models. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6-9, p. 623-636, 2004.

BLOOMFIELD, Peter. **Fourier analysis of time series: an introduction**. John Wiley & Sons, 2004.

CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. Atmospheric tides, 200 pp. **D. Reidel, Norwell, Mass**, 1970.

CHILSON, P.B., CZECHOWSKY, P.; SCHMIDT, G. A comparison of ambipolar diffusion coefficients in meteor trains using VHF radar and UV lidar, **Geophysical Research Letters**, 23 (20), 2745-2748, 1996.

CLEMESHA, B.R., BATISTA, P.P., 2006. The quantification of long-term atmospheric change via meteor ablation height measurements. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.** **68**, 1934-1939, doi:10.1016/j.jastp.2005.12.008.

DAVIS, R.N., DU, J., SMITH, A.K., WARD, W.E., MITCHELL, N.J., 2013. The diurnal and semidiurnal tides over Ascension Island (8° S, 14° W) and their interaction with the stratospheric quasi-biennial oscillation: studies with meteor radar, eCMAM and WACCM. **Atmos. Chem. Phys.**, **13**, 9543–9564, doi:10.5194/acp-13-9543-2013.

ELFORD, W. G. Novel applications of MST radars in meteor studies. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 63, n. 2-3, p. 143-153, 2001.

FLEAGLE, Robert G.; BUSINGER, Joost A. **An introduction to atmospheric physics**. Academic Press, 1981

GURUBARAN, S. **Understanding Atmospheric Tides: Challenges to Middle Atmospheric Dynamicists**. Indian Institute of Geomagnetism Equatorial Geophysical Research Laboratory, Tirunelveli 627 011

HAGAN, M. E.; FORBES, J. M.; VIAL, Fo. On modeling migrating Solar tides. **Geophysical Research Letters**, v. 22, n. 8, p. 893-896, 1995.

HAGAN, M. E. et al. GSWM-98: Results for migrating Solar tides. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 104, n. A4, p. 6813-6827, 1999.

HOCKING, W. K.; THAYAPARAN, T.; JONES, J. Meteor decay times and their use in determining a diagnostic mesospheric temperature-pressure parameter: Methodology and one year of data. **Geophysical Research Letters**, v. 24, n. 23, p. 2977-2980, 1997.

HOCKING, W. K. Temperatures using radar-meteor decay times. **Geophysical Research Letters**, v. 26, n. 21, p. 3297-3300, 1999.

HOCKING, W. K.; HOCKING, A. Temperature tides determined with meteor radar. In: **Annales Geophysicae**. 2002. p. 1447-1467.

HOCKING, W. K.; SINGER, W.; BREMER, J.; MITCHELL, N. J.; BATISTA, P.; CLEMESHA, B.; DONNER, M. Meteor radar temperatures at multiple sites derived with SKiYMET radars and compared to OH, rocket and lidar measurements, **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics**, v. 66, n. 6-7, p. 585–593, 2004.

HOCKING, W., Fuller, B., Vandeppeer, B. Real-time determination of meteorrelated parameters utilizing modern digital technology. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics** **63** (2–3), 155–169. 2001.

HOFFMANN, P., BECKER, E., SINGER, W., AND PLACKE, M.: Seasonal variation of mesospheric waves at northern middle and high latitudes, *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 72, 1068–1079, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2010.07.002>, 2010

Jacobi, C.: 6 year mean prevailing winds and tides measured by VHF meteor radar over Collm (51.3° N, 13.0° E), *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 78, 8–18, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.04.010>, 2012

JIANG, G., XU, J., and Franke, S. J.: The 8-h tide in the mesosphere and lower thermosphere over Maui (20.75° N, 156.43° W), *Ann. Geophys.*, 27, 1989-1999, <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1989-2009>, 2009.

JONES, W. The decay of radar echoes from meteors with particular reference to their use in the determination of temperature fluctuations near the mesopause. In: **Annales Geophysicae**. Springer-Verlag, 1995. p. 1104-1106.

KIRCHHOFF, V. W. H. **Introdução a Geofísica Espacial**. Ed. Universidade de São Paulo, SP, 1991

LIMA, Lourivaldo Mota et al. Estimativa da temperatura da mesopausa equatorial a partir de medidas por radar meteórico. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 1, p. 99-107, 2010.

LIMA, L.M., ARAÚJO, L.R., ALVES, E.O., BATISTA, P.P., AND CLEMESHA, B.R.: Variations in meteor heights at 22.7°S during Solar cycle 23, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 133, 139–144, 2015.

LINDZEN, Richard S. Thermally driven diurnal tide in the atmosphere. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 93, n. 395, p. 18-42, 1967.

MCLANDRESS, C., 2002. Interannual variations of the diurnal tide in the mesosphere induced by a zonal-mean wind oscillation in the tropics, **Geophys. Res. Lett.**, 29(9), 1305, doi:10.1029/2001GL014551

MEEK, C. E., Manson, A., HOCKING, W. K., & Drummond, J. R. (2013). Eureka, 80°N, SKiYMET meteor radar temperatures compared with Aura MLS values. **Annales de Geophysique**, 31, 1267–1277. <https://doi.org/10.5194/angeo-31-1267-2013>.

PANCHEVA D., MUKHTAROV P. (2011) **Atmospheric Tides and Planetary Waves: Recent Progress Based on SABER/TIMED Temperature Measurements** (2002–2007). In: Abdu M., Pancheva D. (eds) *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*. IAGA Special Sopron Book Series, vol 2. Springer, Dordrecht

PICONE, J. M. et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 107, n. A12, p. SIA 15-1-SIA 15-16, 2002.

SAKAZAKI T, FUJIWARA M, ZHANG X, HAGAN ME, FORBES JM: Diurnal tides from the troposphere to the lower mesosphere as deduced from TIMED/SABER satellite data and six global reanalysis data sets. **J Geophys Res-Atmos** 2012., 117: doi:10.1029/2011jd017117

SHE CY, LI T, COLLINS RL, YUAN T, WILLIAMS BP, KAWAHARA TD, VANCE JD, ACOTT P, KRUEGER DA, LIU HL, HAGAN ME: Tidal perturbations and variability in the mesopause region over Fort Collins, CO (41 N, 105 W): Continuous multi-day temperature and wind lidar observations. **Geophys Res Lett** 2004., 31(24): doi:10.1029/2004gl021165 doi:10.1029/2004gl021165

SIEBERT, M. Atmospheric tides. In: Landsberg, H.E., Miechem, J. van. ed. **Advances in Geophysics**. London: Academic, 1961. v. 7, p. 105-187.

STATES, Robert J.; GARDNER, Chester S. Thermal structure of the mesopause region (80–105 km) at 40° N latitude. Part I: Seasonal variations. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 57, n. 1, p. 66-77, 2000.

STOBER, G., JACOBI, C., MATTHIAS, V., HOFFMANN, P., GERDING, M. Neutral air density variations during strong planetary wave activity in the mesopause region derived from meteor radar observations. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys**, 74, 55-63, doi:10.1016/j.jastp.2011.10.007. 2012.

STOBER, G.; MATTHIAS, V.; BROWN, P.; CHAU, J. L., Neutral density variation from specular meteor echo observations spanning one Solar cycle. **Geophysical Research Letters**. doi: 10.1002/2014GL061273, 2014.

TAKAHASHI, H., NAKAMURA, T.; SHIOKAWA, K.; TSUDA, T.; LIMA, L.M.; GOBBI, D. Atmospheric density and pressure inferred from the meteor diffusion coefficient and airglow O2b temperature in the MLT region, **Earth Planets and Space**, 56 (2), 249-258, 2004.

TOKUMOTO, A. S. **Ventos na região de 80-100 km de altura sobre Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°W), medidos por radar meteórico**. 2002. Tese de Doutorado. M. Sc. Thesis, National Institute for Space Research. 132 pp.

TOKUMOTO, A. S., BATISTA, P. P., and Clemesha, B. R.: Terdiurnal tides in the MLT region over Cachoeira Paulista (22.7° S, 45° W), **Revista Brasileira de Geofísica**, 25, 69–78, 2007. doi:10.1590/S0102-261X2007000600009.

TSUTSUMI, Masaki et al. Temperature fluctuations near the mesopause inferred from meteor observations with the middle and upper atmosphere radar. **Radio Science**, v. 29, n. 3, p. 599-610, 1994.

VOLLAND, Hans. **Atmospheric tidal and planetary waves**. Springer Science & Business Media, 2012.

XU, Jiyao et al. Seasonal and quasi-biennial variations in the migrating diurnal tide observed by Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED). **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D13, 2009.

XU, J., SMITH, A.K., LIU, H.-L., YUAN, W., WU, Q., JIANG, G., MLYNCZAK, M.G., RUSSELL III, J.M., FRANKE, S.J., 2009. Seasonal and quasi-biennial variations in the migrating diurnal tide observed by Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics (TIMED). **J. Geophys. Res.**, 114, D13107, doi:10.1029/2008JD011298.

YU, Y., W. WAN, Z. REN, B. XIONG, Y. ZHANG, L. HU, B. NING, AND L. LIU (2015), Seasonal variations of MLT tides revealed by a meteor radar chain based on Hough mode decomposition, **J. Geophys. Res. Space Physics**, 120, 7030–7048, doi:10.1002/2015JA021276.

ZHANG X, FORBES JM, HAGAN ME, RUSSELL III JM, PALO SE, MERTENS CJ, MLYNCZAK MG (2006) Monthly tidal temperatures 20–120 km from TIMED/SABER. **J Geophys Res** 111:A10S08. doi:10.1029/2005JA011504.