



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CENTRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL**

FABIANO DA SILVA ARAÚJO

**VARIABILIDADE NA AMPLITUDE DA MARÉ LUNAR NO CONTEÚDO
ELETRÔNICO TOTAL SOBRE O BRASIL**

CAMPINA GRANDE - PB

2020

FABIANO DA SILVA ARAÚJO

**VARIABILIDADE NA AMPLITUDE DA MARÉ LUNAR NO CONTEÚDO
ELETRÔNICO TOTAL SOBRE O BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, em cumprimento às exigências parciais para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Linha de Pesquisa: Qualidade de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino

CAMPINA GRANDE – PB

2020

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.

A659v Araújo, Fabiano da Silva.
Variabilidade na amplitude da maré lunar no conteúdo eletrônico total sobre o Brasil [manuscrito] / Fabiano da Silva Araújo. - 2020.
58 p.
Digitado.
Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 2020.
"Orientação : Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino, Departamento de Física - CCT."
1. Maré Lunar. 2. Ondas planetárias. 3. Marés atmosféricas. 4. Conteúdo Eletrônico Total. I. Título
21. ed. CDD 551.524 6

FABIANO DA SILVA ARAÚJO

**VARIABILIDADE NA AMPLITUDE DA MARÉ LUNAR NO CONTEÚDO
ELETRÔNICO TOTAL SOBRE O BRASIL**

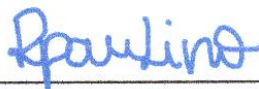
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental - PPGCTA, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Linha de Pesquisa: Qualidade de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino

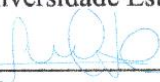
Aprovada em 30 de julho de 2020.

BANCA EXAMINADORA



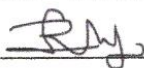
Profa. Dra. Ana Roberta da Silva Paulino

(Orientadora – Universidade Estadual da Paraíba)



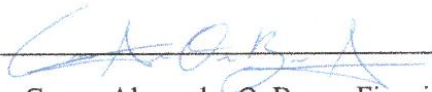
Prof. Dr. Lourivaldo Mota Lima

(Examinador interno – Universidade Estadual da Paraíba)



Profa. Dra. Luciana Rodrigues de Araújo

(Examinador externo – Universidade Estadual da Paraíba)



Prof. Dr. Cosme Alexandre O. Barros Figueiredo

(Examinador externo – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)

*Aos meus pais José Carlos de Araújo e Marinalva da
Silva Araújo.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela vontade de vencer e de seguir com meus sonhos e conseguir alcançar meus objetivos e poder ajudar minha família.

A toda minha família, meus pais José Carlos de Araújo e Marinalva da Silva Araújo, meus irmãos Fabiana Araújo da Silva Diniz, Fabiula da Silva Araújo, Fábio da Silva Araújo, e a minha namorada Irlânia Manoela de Lima Alcântara, que juntos me ajudaram em todos os aspectos e sempre acreditaram e acreditam no meu potencial.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilização dos dados do conteúdo eletrônico total.

Em especial a minha orientadora Ana Roberta pelos ensinamentos, pela paciência e por ter confiado e acreditado na minha capacidade para juntos desenvolvermos esta pesquisa.

Aos examinadores que aceitaram participar da avaliação da minha defesa final. Cosme Alexandre Oliveira Barros Figueiredo, Lourivaldo Mota Lima e Luciana Rodrigues de Araújo.

“Guarda-me, ó Deus, porque em ti confio!”

Salmos 16:1

RESUMO

Usando dados de Conteúdo Eletrônico Total (Total Electron Content - TEC) para quatro anos de dados de 2011 a 2014 foi possível investigar a dinâmica da alta atmosfera, mais especificamente a ionosfera. Os dados de TEC foram fornecidos pelo programa de clima espacial, EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e apresentam resolução temporal de 10 minutos, permitindo estudar a Maré Atmosférica Lunar com boa precisão. Este trabalho utiliza medidas de TEC para investigar a variabilidade da amplitude da Maré Lunar nos quatro anos de dados nas latitudes magnéticas fixas de 10° , 0° , -10° e -20° . O objetivo desta pesquisa foi observar a modulação da Maré por ondas de escala planetária e verificar o efeito dos eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar (Sudden Stratospheric Warming SSW). Como resultado observou-se que a variabilidade na amplitude da Maré é vista nos quatro anos de dados tanto para a componente diurna, quanto para a componente semidiurna. Os maiores valores de amplitudes são vistos para a Maré diurna em todas as latitudes estudadas. Os menores valores de amplitudes se concentraram para o equador magnético. As oscilações de curto período observadas na amplitude da Maré concentraram-se entre 8, 9, 10, 11 e 13 dias. Entre as oscilações com períodos longos, destacam-se as modulações vistas em 180, 260 e 360 dias, onde essas oscilações podem apresentar relação com ondas de escala planetária. Na Maré semidiurna é possível observar um comportamento de oscilação anual em todas as latitudes, já para a diurna, nota-se um comportamento de oscilação semianual nas latitudes de 0° , -10° e -20° . O efeito do evento de SSW foi mais efetivo na Maré semidiurna em janeiro de 2013, promovendo um aumento na amplitude da Maré em todas as latitudes estudadas.

Palavras-chave: Conteúdo Eletrônico Total. Modulação da Maré Lunar. Ondas Planetárias.SSW.

ABSTRACT

Using Total Electron Content (TEC) data for four years of data from 2011 to 2014 it was possible to investigate the dynamics of the upper atmosphere more specifically the ionosphere. TEC data were provided by the space climate program, EMBRACE (Brazilian Space Climate Study and Monitoring) from INPE (National Institute for Space Research) and have a 10-minute temporal resolution, allowing studying the Lunar Atmospheric Tide with good accuracy. This work uses TEC measurements to investigate the variability of the Lunar Tide amplitude in the four years of data in the fixed magnetic latitudes of 10° , 0° , -10° and -20° . The aim of this research was to observe the Tidal modulation by waves of planetary scale and to verify the effect of the abrupt warming events of the polar stratosphere (Sudden Stratospheric Warming SSW). As a result, it was observed that the variability in Tide amplitude is seen in the four years of data for both the diurnal component and the semidiurnal component. The highest amplitude values are seen for the diurnal tide in all studied latitudes. The lowest amplitude values were concentrated for the magnetic equator. The short period oscillations observed in Tide amplitude were concentrated between 8, 9, 10, 11 e 13 days. Among the long period oscillations, the modulations seen in 180, 260 and 360 days highlight, where these oscillations may be related to waves of a planetary scale. In the semidiurnal Tide, it is possible to observe an annual oscillation behavior in all latitudes, while for the diurnal one, there is a semiannual oscillation behavior in the latitudes of 0° , -10° and -20° . The effect of the SSW event was more effective in the semidiurnal Tide in January 2013, promoting an increase in the Tide amplitude in all studied latitudes.

Keywords: Total Electron Content. Lunar Tidal Modulation. Planetary Waves. SSW.

LISTA DE FIGURAS

Figura 4. 1. No painel (A) é visto a temperatura à 90° norte, linha preta, e entre 60° e 90° norte, linha vermelha. No painel (B) observa-se o vento zonal à 60° norte.....	22
Figura 4. 2. No painel (A) é visto a temperatura à 90° norte, linha preta, e entre 60° e 90° norte, linha vermelha. No painel (B) observa-se o vento zonal à 60° norte.....	22
Figura 5. 1. Sistema GPS.....	24
Figura 5. 2. Rede brasileira de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS.	26
Figura 5. 3. Caminhos do sinal GPS até o receptor em Solo.....	27
Figura 5. 4. Geometria para calcular o TEC vertical.....	31
Figura 5. 5. Variação do TEC ao longo de um dia para três localidades diferentes: (23,5°S, 45°O); (7,4°S, 36,5°O) e (29,7°S, 53,7°O).	32
Figura 5. 6. Variação do TEC para o mês de janeiro de 2011 em Cachoeira Paulista.....	32
Figura 5. 7. Mapa do TEC sobre a América do Sul às 22:50 UT (hora universal, 19:50 hora local a 45° W) em 24 de dezembro de 2013.....	33
Figura 5. 8. Gráfico para os valores originais de TEC linha (Preta), sinal reconstruído, linha (Vermelha) e sinal residual, linha (Azul).	35
Figura 5. 9. Periodograma de Lomb-Scargle.....	36
Figura 6. 1. O painel (A) representa os dados de amplitude para a latitude de 10°, o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para a latitude de -10°, e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20°	37
Figura 6. 2. O painel (A) representa a amplitude para latitude de 10°, o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para latitude de -10°, e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20°.....	38
Figura 6. 3. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10°, o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10°, e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20°.	39
Figura 6. 4. O painel (A) representa a periodicidade para 10°, o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10°, e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20°.....	40
Figura 6. 5. O painel (A) representa a periodicidade para 10°, o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10°, e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20°.....	41

Figura 6. 6. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20°	43
Figura 6. 7. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20°	44
Figura 6. 8. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20°	45
Figura 6. 9. O painel (A) representa a periodicidade para 10° , o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10° , e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20°	46
Figura 6. 10. O painel (A) representa a periodicidade para 10° , o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10° , e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20°	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA	15
3. OBJETIVOS	16
3. 1. Objetivo Geral	16
3. 2. Objetivos Específicos	16
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
4. 1. MARÉS ATMOSFÉRICAS	17
4. 2. ESTUDOS SOBRE A MARÉ LUNAR NO SETOR BRASILEIRO	17
4. 3. MODULAÇÃO NA AMPLITUDE DA MARÉ ATMOSFÉRICA POR ONDAS DE ESCALA PLANETÁRIA.....	19
4. 4. ESTUDOS SOBRE MARÉ LUNAR E EVENTOS DE SSW NA IONOSFERA.....	21
5. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA	24
5.1. SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GLOBAL POSITIONING SYSTEM - GPS).....	24
5. 2. DADOS	25
5. 3. CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL	26
5. 3. 1. Obtenção do TEC a partir das pseudodistâncias	27
5. 3. 2. Obtenção do TEC por diferença de fase	29
5. 3. 3. Determinação do TEC vertical	30
5. 3. 2. Dados de TEC.....	33
5. 7. 1. Cálculo da Maré.....	34
5. 7. 2. Dados originais de amplitude da Maré diurna e semidiurna	35
5.7. 3. Função Butterworth	36
5.7.3. Periodograma de Lomb-Scargle	36
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
6. 1. VARIAÇÃO NA AMPLITUDE DA MARÉ SEMIDIURNA LUNAR	37
6. 1. 2. Dados originais de amplitude da Maré semidiurna Lunar	37
6. 1. 3. Filtro passa baixa e passa alta nos dados de amplitude da Maré semidiurna	38
6. 1. 5. Periodograma de Lomb-Scargle nos dados do filtro passa baixa e passa alta.....	40
6. 2. VARIAÇÃO NA AMPLITUDE DA MARÉ DIURNA	42
6. 2. 1. Dados originais de amplitude da Maré diurna	42

6. 2. 2. Filtro passa baixa e passa alta nos dados da Maré diurna	43
6. 2. 4. Periodograma de Lomb-Scargle nos dados do filtro passa baixa e passa alta.....	46
6. 3. DISCUSSÃO	48
7. CONCLUSÕES.....	51
8. REFERÊNCIAS.....	53

1. INTRODUÇÃO

A revolução industrial foi um fator essencial para o aperfeiçoamento das atuais tecnologias que envolvem os sistemas de informações geográficas, obtidas por meio de satélites lançados na alta atmosfera, as informações oriundas dos mesmos são coletadas pelo Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System - GPS) e pelo Sistema de Navegação Global por Satélite (Global Navigation Satellite System – GNSS), onde na maioria das vezes apresentam erros de relógio, gerados por fatores presentes na atmosfera, mais especificamente na camada ionizada, a ionosfera.

A atmosfera terrestre é uma camada gasosa que envolve a terra, de acordo com o comportamento vertical do gradiente de temperatura, as quais são separadas por regiões de transição referidas como pausas. A ionosfera é uma região da atmosfera que apresenta uma extensão aproximada de 50 a 1000 km de altura, sendo ionizada pela radiação Solar e carregada de elétrons livres. Na camada F da ionosfera é onde se encontra o maior número de íons durante o período da noite, sendo uma região de bastante interesse para estudos característicos por apresentar uma grande variabilidade (BROWN, 2005).

Estudos da dinâmica da atmosfera terrestre mais especificamente na região da ionosfera nos dados do Conteúdo Eletrônico Total (Total Electronic Content - TEC) que são coletados por sistema de GNSS-GPS, fornecidos pelo programa EMBRACE, são bastante evidenciados nessa região, servindo de base para se observar a variabilidade da Maré nos dados de TEC e os efeitos dos eventos de Aquecimento Abrupto da Estratosfera Polar (Sudden Stratospheric Warming – SSW) (PAULINO et al., 2017; TAKAHASHI et al., 2014; TAKAHASHI et al., 2016; PEDATELLA E FORBES, 2010).

Estudar a Maré Lunar e sua variabilidade nos dados de TEC é de certa forma um pouco delicado, pois a sua amplitude em relação à Maré Solar é menor. A observação na variabilidade ao longo dos quatro anos de dados de 2011 a 2014, se fez através de definições de períodos de tempos definidos para verificar se nesses intervalos existe a presença de uma onda de escala planetária modificando a amplitude da Maré Lunar.

Alguns autores já estudaram a Maré Lunar na ionosfera com o intuito de entender as modulações causadas nesse meio. Matsushita (1967) definiu que as oscilações periódicas da altura e densidade ionosféricas plotadas no tempo Lunar têm sido chamadas de Maré Lunar ionosférica, cujo nome vem das oscilações análogas dos oceanos.

Pedatella e Forbes (2010) estudaram a Maré Lunar nos dados de TEC e observaram que o componente dominante é geralmente a Maré semidiurna Lunar. No entanto, uma variação

diurna significativa também é observada em alguns casos. As observações revelaram uma variabilidade longitudinal significativa na Maré semidiurna lunar proeminente entre novembro e fevereiro, a presença de uma variação longitudinal revela a existência de componentes não migrantes, além da Maré semidiurna migrante. A Maré Lunar pode ser responsável por significativa variabilidade no dia a dia ou semana a semana; a quantificação da Maré Lunar dentro da ionosfera pode assim levar a uma melhor previsão de densidades ionosféricas.

Eccles et al (2011) usaram dados da rede de sensores ionosféricos de baixa latitude para examinar a eletrodinâmica ionosférica durante condições de baixa atividade Solar. Observaram que as Marés semidiurnas migrantes Solar e Lunar têm uma influência significativa na eletrodinâmica de fundo durante esse período de extremo mínimo Solar. A influência da Maré Lunar da eletrodinâmica da ionosfera é um grande componente da variação da deriva vertical durante o período de estudo para baixa atividade Solar.

Paulino et al (2013) estudaram a Maré semidiurna Lunar usando 10 anos de dados de temperatura coletados da região da mesosfera e baixa termosfera como os dados do satélite TIMED do instrumento SABER. Observaram uma assinatura clara de 12,42 h referente a Maré semidiurna Lunar. As melhores condições de propagação para a Maré semidiurna Lunar são alcançadas na região da baixa termosfera. A assimetria entre os hemisférios e a variabilidade sazonal são observadas nas amplitudes da Maré. Também são observadas variações longitudinais, o que revela a existência de componentes não migrantes, além da Maré Lunar migratória dominante.

Paulino et al (2015) através das observações do radar meteórico em São João do Cariri (7,4 ° S; 36,5 ° W), Cachoeira Paulista (22,7 ° S; 45 ° W) e Santa Maria (29,7 ° S; 53,7 ° W) estimaram os ventos na mesosfera e baixa termosfera sobre o setor brasileiro. Observaram que a Maré Lunar atinge amplitudes altas de 8 m/s. Em geral, a amplitude aumenta com a altura e a fase diminui, correspondendo a uma propagação ascendente da Maré.

No conteúdo eletrônico total também já foi observado que durante eventos de SSW a Maré Lunar sofre modificações influenciando a eletrodinâmica da ionosfera (Paulino et al, 2017). Pedatella et al (2010) estudaram a estrutura global da Maré Lunar na ionosfera com base em observações do TEC proporcionada por GPS. A análise da média de vários anos de 1999-2008, identificaram que o componente dominante é geralmente a Maré semidiurna Lunar. No entanto, existem alguns pontos em aberto sobre os efeitos da Maré Lunar na ionosfera durante os eventos de aquecimentos estratosféricos. Paulino et al (2017) usando dados do sistema GNSS, do conteúdo eletrônico total da ionosfera, realizaram o cálculo das amplitudes e fases da Maré diurna e semidiurna Lunar, sendo que a amplitude da Maré diurna mostrou uma

variação semestral com o máximo nos meses de equinócio para quase todas as latitudes, enquanto a amplitude da semidiurna era maior em dezembro e janeiro, podendo estar relacionada a eventos de aquecimento abrupto da estratosfera polar. Nogueira (2013) investigou a presença e a amplitude da Maré Lunar no TEC de uma estação sobre o equador geomagnético. Neste trabalho foi verificado que a amplitude mais significativa corresponde a componente da Maré Lunar semidiurna migrante, com um período de aproximadamente 12,424 horas, o que corresponde a cerca de 1,932 ciclos por dia. Desta maneira, a proposta deste trabalho é estudar a variabilidade na amplitude da Maré Lunar nos dados de TEC da ionosfera sobre o Brasil e verificar se as oscilações de curto período em entre 8 e 13 dias estão modulando a amplitude da Maré sendo responsável por tal variabilidade. Para isto, serão utilizadas as medidas de conteúdo eletrônico total no período de 2011 a 2014.

Além da introdução este trabalho possui mais 6 capítulos, que são os seguintes:

- O capítulo 2 apresenta uma justificativa acerca da importância do trabalho;
- No capítulo 3 são apresentados os objetivos geral e específicos;
- O capítulo 4 apresenta um conceito sobre Maré Lunar. Também é apresentado um referencial teórico que aborda alguns trabalhos sobre a Maré Lunar na ionosfera no setor brasileiro e sobre a modulação da Maré por ondas de escala planetária;
- O capítulo 5 apresenta os dados do sistema GNSS-GPS, as características dos dados de TEC e como é possível determinar a Maré Lunar nos dados do conteúdo eletrônico total;
- No capítulo 6 são apresentados e discutidos os resultados obtidos no trabalho, que consistem na observação da variabilidade da Maré Lunar para os quatro anos de dados de TEC;
- No capítulo 7 são sumarizadas as principais conclusões obtidas neste trabalho de dissertação;
- No capítulo 8 são apresentadas todas as referências usadas neste trabalho.

2. JUSTIFICATIVA

O presente estudo se mostra importante pois visa compreender as modificações que ocorrem na atmosfera da terra, analisando a variabilidade da Maré Lunar nos dados do conteúdo eletrônico total da ionosfera, camada ionizada que apresenta fenômenos que afetam os serviços de comunicações, causando erros de posicionamento baseados em sistemas GNSS-GPS. Sendo assim, é de suma importância adquirir informações sobre esse setor da atmosfera terrestre no hemisfério sul do Brasil, com o propósito de prever influências nas atividades tecnológicas e econômicas, no meio agrícola, como na agricultura de precisão.

3. OBJETIVOS

3. 1. Objetivo Geral

Analisar a variabilidade na amplitude da Maré Lunar no TEC sobre o Brasil para os quatro anos de dados de 2011 a 2014.

3. 2. Objetivos Específicos

- Analisar a variação na amplitude da Maré nos seus dados originais em cada latitude estudada;
- Verificar os períodos com curtas oscilações entre 8 e 13 dias e com longas oscilações próximas de 180, 260 e 360 dias;
- Comparar os períodos de oscilação observados na pesquisa com outras pesquisas já realizadas;
- Verificar em qual ano e latitude o efeito do evento de SSW foi mais efetivo no aumento da amplitude.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4. 1. MARÉS ATMOSFÉRICAS

De acordo com Chapman e Lindzen (1970) estudos sobre as Marés tiveram início com as Marés oceânicas, as quais foram explicadas por Newton. As Marés oceânicas originam-se devido às forças gravitacionais geradas pela Lua e pelo Sol e obedecem às leis da mecânica de Newton. O mesmo considerou que a mecânica das Marés oceânicas poderia ser aplicada a um meio fluido como o meio atmosférico, por exemplo.

As Marés atmosféricas são oscilações em escala global, produzidas por uma combinação das ações gravitacionais do Sol e da Lua sobre a Terra e pela ação térmica do Sol, cujos períodos são sub harmônicos de um dia Solar ou Lunar, e ainda podem ser migrantes ou não migrantes (CHAPMAN E LINDZEN, 1970).

Diariamente o Sol emana para Terra uma enorme quantidade de energia, a qual é responsável pela vida em nosso planeta e essa energia liberada pelo Sol também é responsável pelo aquecimento da atmosfera. O aquecimento da atmosfera devido a radiação Solar produz um efeito de Maré na atmosfera da Terra, o qual é muito mais intenso do que o causado pela ação da força gravitacional. As Marés Solares migrantes acompanham o movimento aparente do Sol, e constituem-se no fenômeno dinâmico mais regular e distinto observado na alta mesosfera e baixa termosfera, as quais contribuem para a dinâmica desta região (TSUDA et al., 1999).

Uma diferença fundamental entre Maré Solar e a Maré Lunar é que a excitação da Maré Solar é altamente dependente da concentração atmosférica, vapor de água, ozônio, e oxigênio molecular, que variam com a altura. Enquanto que, a força exercida pelo campo gravitacional da Lua ocorre predominantemente na região mais densa da atmosfera, a ionosfera. Esta força é bem especificada e a princípio constante. Qualquer variabilidade observada na Maré Lunar será, portanto, principalmente devido as alterações nas características desta oscilação à medida que esta se propaga através da atmosfera a partir da sua região de origem (SANDFORD et al., 2007).

4. 2. ESTUDOS SOBRE A MARÉ LUNAR NO SETOR BRASILEIRO

Paulino et al (2017) utilizando dados dos receptores de dupla frequência dos sistemas GNSS, estudaram a Maré Lunar nos dados do conteúdo eletrônico total sobre o Brasil durante os anos de dados de 2011 a 2014. Onde perceberam que ambos os componentes não apresentaram variação longitudinal significativa, podendo ser devido ao curto intervalo de

longitude. As amplitudes da Maré diurna eram basicamente uniformes ao longo do território brasileiro, enquanto que as amplitudes da Maré semidiurna apresentaram alguns picos sobre a crista de anomalia de ionização equatorial e valores mínimos próximos ao equador magnético.

De Moraes et al (2017) usando dados coletados por um digisonde DPS-04 localizado em Cachoeira Paulista - SP, identificaram a Maré Lunar na ionosfera. Onde ambos os parâmetros apresentaram variação sazonal na fase e amplitude. Para a Maré semidiurna Lunar, a máxima amplitude foi de 0,25 MHz em agosto para fof2 e 4,5 km para hmF2 em junho. Também observaram uma variação semestral.

Paulino et al (2012) usando dados de um radar de meteoro localizado em Cachoeira Paulista (22,7 ° S; 45,0 ° W), estudaram a Maré semidiurna Lunar atmosférica na mesosfera e na baixa termosfera entre janeiro de 2000 a outubro de 2008. Onde observaram vários perfis de amplitude e fase da Maré semidiurna Lunar sobre Cachoeira Paulista. Notaram também que as amplitudes médias em todas as alturas foram maiores no componente meridional do vento em janeiro, fevereiro, maio, junho, julho, agosto, novembro e dezembro.

Paulino et al (2015) através das observações de um radar de meteoro em São João do Cariri (7,4 ° S; 36,5 ° W), Cachoeira Paulista (22,7 ° S; 45 ° W) e Santa Maria (29,7 ° S; 53,7 ° W), usando ventos horizontais da mesosfera e baixa termosfera, estudaram a Maré semidiurna Lunar sobre o setor brasileiro simultaneamente de janeiro de 2005 a dezembro de 2008 para os três locais. Em geral, a amplitude aumenta com a altura e a fase diminui com a altura, correspondendo a uma Maré de propagação ascendente. Observaram também comportamentos diferentes nas amplitudes, fases e comprimentos de onda verticais em cada local, indicando uma variação latitudinal.

Paulino et al (2018) usando as medidas de ionosonde coletadas em Cachoeira Paulista (22,7 ° S; 45,0 ° W) e São Luis (2,6 ° S; 44 ° W) de 2001 a 2009 com uma resolução temporal de 15 minutos, estudaram a Maré Lunar diurna e semidiurna na mesosfera-termosfera-ionosfera em diferentes setores longitudinais e usando diferentes técnicas e simulações observacionais. Onde observaram que a Maré semidiurna Lunar é dominante em comparação com a maré diurna.

Tsali-Brown et al (2020) estudaram as variações do campo geomagnético em 2018 devido as Marés Solar e Lunar no setor brasileiro com dados fornecidos por magnetômetros instalados em São José dos Campos (23,21°S, 0345,97°W), Eusébio, Ceará (3,89 ° S, 38,46 ° W) e São Luís, Maranhão (2,53 ° S, 44,30 ° W). Onde observaram que a amplitude máxima da Maré Solar diurna registrada foi de 23,96nT em março, em Eusébio, enquanto a amplitude da Maré terdiurna mínima foi de 0,45nT registrada em dezembro em São José dos Campos.

Alguns estudos já evidenciaram sobre os efeitos e a variabilidade da Maré Lunar nas regiões da ionosfera, mas não relataram sobre a sua modulação. Os efeitos da Maré Lunar nas regiões E e F da ionosfera respectivamente podem ser visto em (por exemplo, MATSUSHITA, 1955; STENING, 2011) e (por exemplo, CHAU et al., 2009; ECCLES et al., 2011; FEJER et al., 2011; PAULINO et al., 2020).

Martyn (1947) usou dados de três anos para as alturas e frequências críticas das regiões F1 e F2 em Huancayo, Peru, para estudar a Maré Lunar. Onde verificou que a variação da Maré Lunar na região F2 depende do tempo Solar na fase e na amplitude.

Yamazaki et al (2017) utilizando medidas de campo magnético do satélite CHAMP durante julho de 2000 a setembro de 2010 e dos dois satélites Swarm durante novembro de 2013 a fevereiro de 2017 determinaram a climatologia sazonal-longitudinal completa da variação da Maré semidiurna Lunar. Observaram também que a variabilidade longitudinal significativa é encontrada na variação da amplitude da Maré Lunar, enquanto que a variabilidade longitudinal na fase é pequena.

4. 3. MODULAÇÃO NA AMPLITUDE DA MARÉ ATMOSFÉRICA POR ONDAS DE ESCALA PLANETÁRIA

Com o intuito de entender melhor como acontece a modulação na amplitude da Maré atmosférica por ondas de escala planetária, nesta seção serão apresentados alguns estudos sobre a modulação por ondas de escala planetária e estudos sobre oscilação usando medidas de TEC.

As ondas planetárias são oscilações de escala global e períodos da ordem de dias, as que apresentam mais destaques são: onda de quase 2 dias, de 5-7 dias, de quase 8 dias e de quase 16 dias. Elas possuem estrutura horizontal da ordem da circunferência da Terra. A ação da força de Coriolis no vento zonal age sobre a atmosfera como uma força externa, resultando em ondas horizontalmente transversais. Embora as origens das ondas planetárias não estejam bem esclarecidas, processos convectivos, instabilidades baroclínicas e barotrópicas, interações não lineares entre marés atmosféricas e ondas de gravidade ou entre modos diferentes de ondas de marés, variações isoladas na topografia, e aquecimento diferencial entre continentes e oceanos têm sido apontadas como principais fontes de ondas planetárias (BEER, 1974).

Alguns estudos sobre ondas de 2, 5-7, 10 e 16 dias já foram publicados. Nas ondas de 2 dias (por exemplo, CRAIG e ELFORD, 1981; MULLER e NELSON, 1978; THAYAPARAN et al., 1997). Nas ondas de 5 dias (por exemplo, MADDEN e JULIAN, 1972), de 10 dias (por exemplo, HIROOKA e HIROTA, 1985). As de 16 dias (por exemplo, KINGSLEY et al., 1978). Estudo sobre a sazonalidade das ondas planetárias pode ser visto (por exemplo, ARAÚJO,

2012).

A modulação na amplitude da Maré atmosférica foi estudada por MAYR et al (1999). Observaram que as variações sazonais e modulação de ondas planetárias de Marés diurnas influenciadas por ondas de gravidade. Notaram também que, as Marés são moduladas com períodos relacionados às ondas planetárias geradas por processos dinâmicos na mesosfera.

Laštovička e Šauli (1999) estudaram as oscilações do tipo de onda planetária na região F2 com os dados das estações da Europa central Juliusruh e Pruhonice. Estas oscilações são comparadas com as Marés inferidas a partir de medições de vento em uma estação próxima a Collm para verificar a hipótese de modulação de ondas planetárias de Marés de propagação ascendente em alturas mais baixas da atmosfera como um mecanismo responsável por oscilações do tipo de onda planetária nas alturas da camada F2. Os resultados mostram que esse mecanismo não desempenha um papel dominante, mas pode contribuir para tais oscilações.

Chshyolkova (2007) estudou a propagação vertical de ondas planetárias da troposfera superior para a mesosfera aplicando a análise de número de ondas e ondas de Morlet nos campos assimilados estratosféricos do MetO (Gabinete de Meteorologia do Reino Unido). Os resultados mostram que a propagação das ondas planetárias para o leste é evidente na tropopausa e em baixas alturas estratosféricas, por outro lado, a propagação para o oeste se torna comparável ou até mais forte na estratosfera superior e acima durante os meses de inverno. Também existem fortes dependências sazonais da atividade de ondas planetárias em cada uma das regiões estratosféricas e mesosféricas atribuídas a influência do vento de fundo na propagação de onda. É demonstrado que em condições favoráveis, ondas planetárias com períodos de 10, 16 e 25 dias penetram no hemisfério oposto.

Chen e Li (2007) investigaram a modulação da relação entre a atividade de ondas planetárias estacionárias troposféricas e o clima de inverno do leste asiático pelo vento de oscilação quase bienal (QBO) tropical na estratosfera. A relação entre os ventos tropicais de QBO na estratosfera e o efeito da atividade de ondas planetárias estacionárias troposféricas no clima de inverno do Leste Asiático no Hemisfério Norte foi explorada. Indicando que no campo de pressão ao nível do mar, as ondas planetárias podem ser significativamente moduladas pelos ventos tropicais de QBO.

Lean et al (2016) estudaram os padrões espaciais distintos da resposta do conteúdo eletrônico total da ionosfera a influências Solares, sazonais, diurnas e geomagnéticas a partir de observações TEC a cada duas horas de 1998 a 2015. A variabilidade solar e geomagnética, a oscilação semestral e as oscilações diurna e semidiurna impactam principalmente o TEC em baixas latitudes magnéticas, onde o próprio TEC maximiza, com diferentes graus de longitude.

4. 4. ESTUDOS SOBRE MARÉ LUNAR E EVENTOS DE SSW NA IONOSFERA

Esta seção apresenta um breve conceito a respeito do que é aquecimento abrupto da estratosfera polar e alguns estudos que envolvem a Maré Lunar e eventos de SSW na ionosfera.

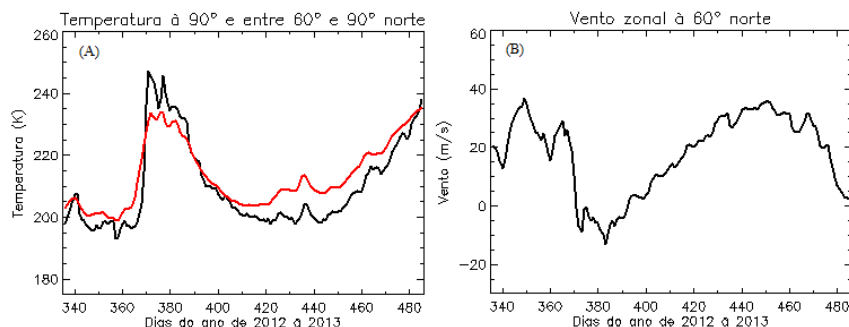
A energia liberada durante a interação entre as ondas de Rossby e o vórtice polar é responsável por um aumento abrupto da temperatura estratosférica além de uma mudança na dinâmica dos ventos. Este processo provoca uma diminuição dos ventos e ou reversão da circulação do vento estratosférico polar, que inicialmente escoava no sentido oeste-leste. A reversão do vento deve-se à quebra das ondas planetárias e a consequente deposição de energia na região em questão. Esta atividade de deposição de energia quando atinge sua máxima atividade pode, num período de poucos dias, elevar a temperatura da estratosfera polar em até cerca de 50 K. Este fenômeno descrito é conhecido como Aquecimento Abrupto da Estratosfera Polar (MATSUMO, 1971).

Os eventos de SSW são classificados tipicamente em quatro categorias identificados como: aquecimento de baixa intensidade, aquecimento de alta intensidade, aquecimento canadense e aquecimento final, onde o aquecimento canadense apresenta características únicas, sua estrutura e evolução a diferem das demais (PAES, 2012).

Existem critérios para identificar a ocorrência de um SSW (minor ou major), entretanto de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM) um evento de SSW é considerado “major” (intenso) se na altitude caracterizada pelo nível de pressão de 10 hPa, a temperatura latitudinal aumenta abruptamente a partir de 60-65°N em direção ao polo, num curto período de dias, acompanhada de uma desaceleração do vento médio zonal, o qual escoava na direção para leste e sofre uma reversão na circulação do vento médio zonal, passando a escoar na direção para oeste (KUTTIPPURAT, 2012; SCHOEBERL, 1978; ANDREWS et al., 1987).

Na Figura 4. 1 são exibidos gráficos para temperatura e vento. Onde o painel (A) da esquerda representa a temperatura à 90° e entre 60° e 90° norte. O segundo painel (B) da direita representa o vento zonal à 60° norte. As medidas de temperatura e vento foram coletadas para o intervalo entre dezembro de 2012 e abril de 2013, período de inverno do Hemisfério Norte, à um nível de pressão de 10hPa.

Figura 4. 1. No painel (A) é visto a temperatura à 90° norte, linha preta, e entre 60° e 90° norte, linha vermelha. No painel (B) observa-se o vento zonal à 60° norte.

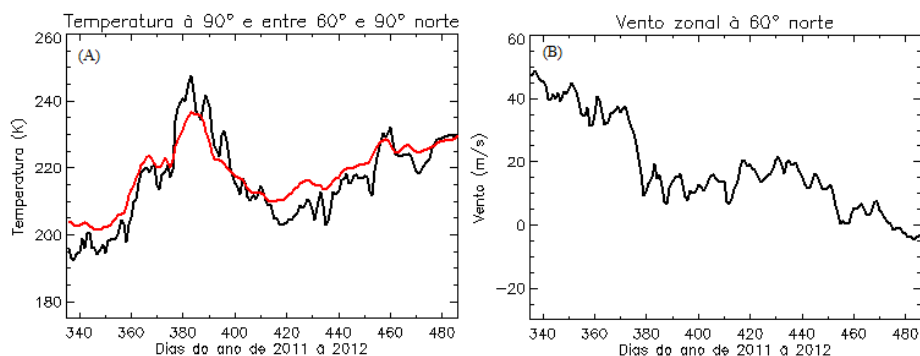


Fonte: Próprio autor.

Como mostrado na Figura 4. 1 quando acontece o aumento na temperatura nos dias corridos entre 370 e 380 dias , tanto para 90°, quanto para 60° e 90° norte, visto no painel (A), a mudança no comportamento do vento também é observado no painel (B), percebendo que o mesmo ficou abaixo de zero, mudando sua direção, caracterizando um evento de forte intensidade (major).

A Figura 4. 2 foi construída usando a mesma metodologia da 4. 1, sendo que os dados foram para os anos de 2011-2012.

Figura 4. 2. No painel (A) é visto a temperatura à 90° norte, linha preta, e entre 60° e 90° norte, linha vermelha. No painel (B) observa-se o vento zonal à 60° norte.



Fonte: Próprio autor.

Como observado na Figura 4. 2 no intervalo onde ocorre o aumento na temperatura nos dias corridos entre 380 e 390 dias, visto no painel (A), não ocorre a mudança no sentido do vento, visto no painel (B), onde esse aumento de temperatura não foi suficiente para promover a mudança de direção do vento, caracterizando assim, como um evento de fraca intensidade (minor). Quando o aumento da temperatura média não conduzir a uma reversão de vento zonal médio, ou até mesmo reverter o gradiente de temperatura, mas não resultar numa reversão da circulação no nível de pressão à 10 hPa, o SSW é classificado como minor fraco (MOHANAKUMAR, 2008).

Fejer et al (2011) verificaram que as variações eletrodinâmicas e de densidade de plasma em larga escala na ionosfera de baixa latitude tem sido associadas recentemente a eventos de SSW. Os modelos propostos por Fejer et al (2011) indicam que a amplitude e a variação na Maré Lunar semidiurna são fortemente locais e dependem do fluxo Solar, com maiores valores durante os períodos de baixo SSW do fluxo Solar da manhã.

Park et al (2012) investigaram a relação entre eventos de SSW e assinaturas da Maré Lunar na ionosfera tropical. Utilizando dados coletados pelo satélite CHAMP (Challenging Minisatellite Payload), no período de 2001 a 2009, analisaram o eletrojato equatorial e a intensidade de corrente de pico. Seus resultados mostraram que a combinação dos eventos de SSW e as ondas planetárias intensificaram a amplitude da Maré semidiurna Lunar.

Sabe-se que os SSWs corroboram na variabilidade do conteúdo eletrônico total da ionosfera. Com isso, percebe-se que a influência da Maré Lunar é, no entanto, dependente da fase da Lua em relação ao momento de SSW (PADATELLA e LIU, 2013).

Yamasaki (2013) utilizando dados de magnetômetro localizado em Addis Abeba para os anos de 1958 a 2007 determinou a intensidade da Maré semidiurna Lunar no eletrojato equatorial durante os eventos de aquecimento estratosférico para diferentes estações do ano e detectou-se que ao utilizar os dias em que ocorreram aquecimentos estratosférico, a amplitude da Maré é maior durante o inverno do hemisfério norte. No entanto, quando foram utilizados apenas os dados de inverno em que não continham dias com aquecimentos estratosféricos, a amplitude durante o inverno do norte não foi significativamente maior do que durante as outras estações. Ele observou que a amplitude da Maré semidiurna Lunar durante eventos de aquecimento estratosférico é aproximadamente 3 vezes maior que nos invernos em que não ocorreram aquecimento estratosférico e, também, aumenta consideravelmente a amplitude da Maré Lunar média durante inverno do hemisfério norte.

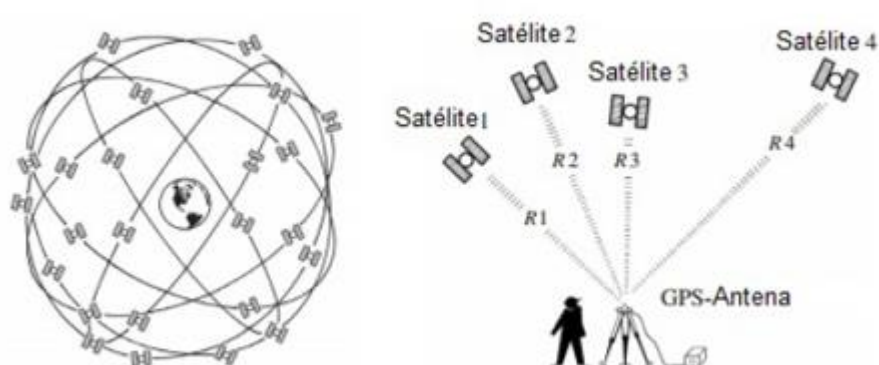
5. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

5.1. SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL (GLOBAL POSITIONING SYSTEM - GPS).

O GPS é dividido em segmento espacial, de controle e de usuário. O segmento espacial é formado por 32 satélites ou mais, equidistantes, em planos de orbitas diferentes. Dessa forma pode-se garantir, que pelo menos 4 satélites possam ser rastreados em qualquer lugar da superfície da Terra, em qualquer hora do dia (MONICO, 2008).

A Figura 5. 1 ilustra o sistema de constelação GPS, onde o mesmo apresenta os princípios básicos da trilateração para obter o sinal emitido pelos satélites até a antena receptora.

Figura 5. 1. Sistema GPS.



Fonte: Adaptada de Seeber (2003).

Cada satélite GPS transmite duas ondas portadoras de frequência L1, L2 e um novo sinal, L5. As frequências são geradas ao mesmo tempo para os usuários, onde o uso das duas frequências mitiga os efeitos do atraso ionosférico, e corrigem grande parte dos efeitos provocados pela ionosfera (MONICO, 2008).

A técnica básica de navegação GPS é a utilização de um caminho percorrido pela onda eletromagnética que varia a partir dos satélites na visada, que por sua vez, também transmite as suas posições estimadas, através de uma geometria apropriada, determinada pela latitude, longitude, altitude e um relógio de correção do usuário. O sistema GPS usa um sistema chamado de triangulação pra determinar a localização do receptor na Terra, a triangulação funciona da seguinte forma: três satélites enviam o sinal para o receptor, que calcula quanto tempo cada sinal demorou a chegar nele (MONICO, 2008).

Cada satélite transmite continuamente um sinal de rádio constituído de frequências portadoras, dois códigos digitais e uma mensagem de navegação. Quando um receptor GPS é ligado, capta o sinal por meio da antena. Em síntese, o receptor de GPS requer apenas três distâncias de três satélites que são visíveis simultaneamente. Neste caso, o receptor vai encontrar todos. É preciso então de um quarto satélite, devido ao erro do relógio. Com esta geometria é possível obter a informação do posicionamento (MONICO, 2008).

5. 2. DADOS

Os dados usados na pesquisa foram fornecidos pelo programa de clima espacial EMBRACE/INPE, onde o mesmo monitora os efeitos solares, no meio interplanetário, na magnetosfera, na ionosfera e atmosfera neutra. Esse monitoramento ajuda os usuários com informações técnicas e científica para proteção contra fenômenos que podem prejudicar os setores de navegação (GPS, aviação), sistemas de segurança de voo, sistemas energéticos de grande dimensão, sistemas de proteção e de controle de atitude de satélites, entre outros (INPE, 2014).

A Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS, disponível no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) fornece um conjunto de estações geodésicas, equipadas com receptores GNSS de alto desempenho, que proporcionam uma vez por dia ou em tempo real, os dados dos observáveis dos satélites GPS, utilizados para calcular o conteúdo eletrônico total (IBGE, 2020).

A RBMC está disponibilizando desde o dia 21/12/2017 todas as observáveis rastreadas pelos receptores, ou seja, dependendo do modelo do receptor o arquivo de observação poderá conter todas as observáveis rastreadas das constelações GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU e SBAS (IBGE, 2017).

A Figura 5. 2 ilustra alguns pontos receptores dos sinais de GPS distribuídos sobre o Brasil. Com mais de 100 locais de observação em todo território brasileiro.

Figura 5. 2. Rede brasileira de monitoramento contínuo dos sistemas GNSS.



Fonte: Adaptado de IBGE, 2020.

5. 3. CONTEÚDO ELETRÔNICO TOTAL

A ionosfera apresenta variações no espaço (baixas, médias e altas latitudes) e no tempo (atividade solar, variações sazonais e diurnas), e durante tempestades magnéticas. Na região da ionosfera é onde acontecem os atrasos do sinal GPS que são proporcionais ao TEC ao longo do caminho do satélite GPS até um receptor em solo. O TEC é um parâmetro chave na mitigação dos efeitos ionosféricos no sistema de rádio YA'ACOB et al (2010).

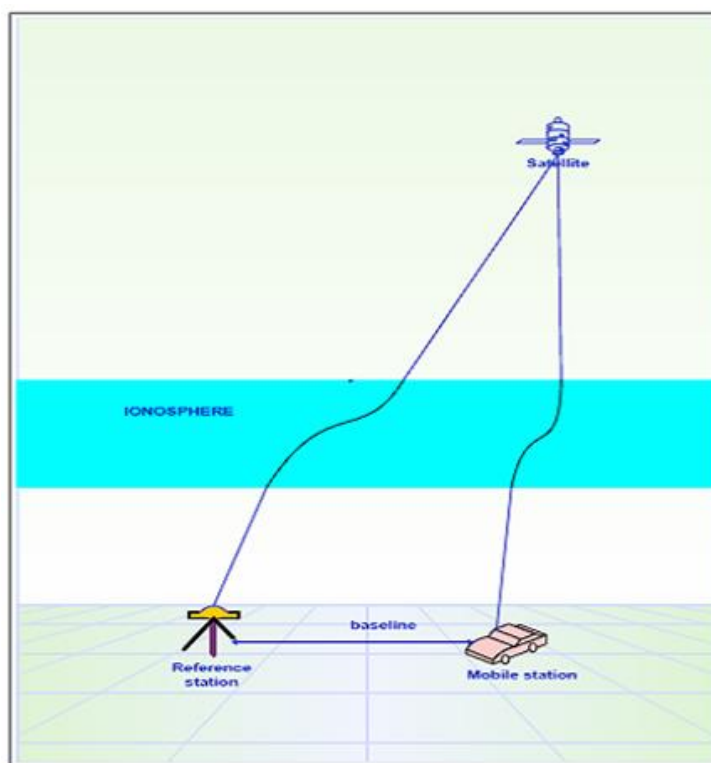
O TEC corresponde à densidade eletrônica ionosférica integrada ao longo do caminho entre o receptor situado no solo e o satélite do sistema GNSS, em uma coluna cuja área da base é unitária. A unidade de medida do TEC é o TECU (10^{16} elétrons/m²). O TEC serve como indicador da variabilidade ionosférica derivada do sinal GPS modificado por meio de elétrons livres PARKINSON et al (1996).

Fazendo uso do sistema GNSS, é possível determinar o TEC, a partir das observações por GPS, algo que é bastante usado pela comunidade científica para estudos da ionosfera, principalmente nas regiões equatoriais e de baixas latitudes como por exemplo a presença da Anomalia de Ionização Equatorial (Equatorial Ionization Anomaly – EIA) (ABREU et al., 2016).

5. 3. 1. Obtenção do TEC a partir das pseudodistâncias

A obtenção do TEC é realizada usando um comportamento físico da propagação de ondas eletromagnética (ondas de rádio) na ionosfera. Quando a onda de rádio se propaga na ionosfera, a mesma desvia o seu caminho (o efeito de refração), alterando o caminho geométrico entre o satélite GNSS e o receptor, conhecido como atraso ionosférico (INPE, 2011). Os elétrons livres que povoam esta região da atmosfera afetam a propagação dos sinais, mudando sua velocidade e direção de propagação, conforme visto na Figura 5. 3.

Figura 5. 3. Caminhos do sinal GPS até o receptor em Solo.



Fonte: Yaacob et al (2010).

Grandes variações temporais e espaciais no TEC causam erros de posicionamento. Se um receptor GNSS terrestre utiliza uma única frequência e correção para o intervalo da ionosfera não é realizado, o erro de posicionamento se torna significativo (KARIA e PATHAK, 2011).

Para obter o TEC, sem inclusão de outros erros, utiliza-se uma técnica de observação de duas frequências f_1 e f_2 , por exemplo: o sistema de GPS, utiliza as frequências $f_1=1575.42$ MHz, $f_2=1227.60$ MHz.

O modelo utilizado para o cálculo do TEC é derivado do algoritmo de Otsuka et al (2002). A partir das medidas das pseudodistâncias e das diferenças de fase, e considerando erros devido à refração ionosférica, é possível calcular o TEC (SILVA, 2017).

As pseudodistâncias (P_1 e P_2) são calculadas multiplicando o tempo de propagação dos sinais, durante suas trajetórias satélite-receptor, pela velocidade da luz no vácuo. Este tempo de propagação corresponde ao intervalo de tempo necessário para que ocorra a chegada e a decodificação do sinal pelo receptor. Entretanto, o tempo de propagação dos sinais multiplicado pela velocidade da luz no vácuo não resultam na distância satélite-receptor em razão da refração atmosférica (ionosfera e troposfera), efeitos de multicaminhos (SILVA, 2017). A Equação 5. 1 e 5. 2 expressam matematicamente a metodologia utilizada para calcular as pseudodistâncias.

$$P_1 = \rho + c\Delta t + I_1 + T + b_{1r}^P + b_{1s}^P + m_1^P + \xi_1^P, \quad (5. 1)$$

$$P_2 = \rho + c\Delta t + I_2 + T + b_{2r}^P + b_{2s}^P + m_2^P + \xi_1^P. \quad (5. 2)$$

Onde:

$P_{1,2}$ são as pseudodistâncias correspondentes à L1 e L2, respectivamente;

ρ é a distância geométrica satélite-receptor;

c é a velocidade da luz no vácuo;

Δt é o desvio dos relógios do satélite e do receptor em relação ao sistema de tempo do GNSS;

$I_{1,2}$ são os atrasos devido à ionosfera;

T é o atraso devido à troposfera;

$b_{1,2r}^P$ e $b_{1,2s}^P$ são os atrasos instrumentais do receptor e do satélite, respectivamente, correspondentes à L1 e L2;

$m_{1,2}^P$ são os efeitos devidos aos multicaminhos correspondentes à L1 e L2;

$\xi_{1,2}^P$ referem-se ao ruído térmico do receptor correspondentes à L1 e L2.

Partindo da definição do atraso ionosférico (OTSUKA et al., 2002), dada por:

$$I_{1,2} = -\frac{40,3}{f_{1,2}^2} TEC \quad (5.3),$$

e substituindo-a na diferença entre as Equações 5. 1 e 5. 2, obtém-se:

$$P_2 - P_1 = I_2 - I_1 + \delta_1^P + \delta_2^P = 40,3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) TEC_P \delta_1^P + \delta_2^P, \quad (5.4)$$

$$TEC_P = \frac{1}{40,3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) - (\delta_1^P + \delta_2^P)]. \quad (5.5)$$

Onde $\delta_{1,2}^P = b_{1r,2r}^P + b_{1s,2s}^P + m_{1,2}^P + \xi_{1,2}^P$ representam os erros devidos aos atrasos instrumentais, à multicaminhos e à ruídos térmicos correspondentes à L1 e L2. Assim, o TEC a partir das pseudodistâncias pode ser obtido reescrevendo a equação (5. 4).

$$TEC_P = \frac{1}{40,3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(P_2 - P_1) - (\delta_1^P + \delta_2^P)]. \quad (5.6)$$

Onde f_1 e f_2 são as frequências das portadoras L1 e L2, respectivamente.

5. 3. 2. Obtenção do TEC por diferença de fase

As diferenças de fase (Φ_1 e Φ_2) ocorrem devido às diferenças entre os sinais emitidos pelos satélites e os sinais de referência gerados pelo receptor. Os sinais gerados pelo receptor têm uma frequência constante, enquanto que os sinais emitidos pelo satélite sofrem variações devido ao movimento do satélite com relação ao receptor. Além disso, o número de ciclos ocorridos desde a emissão dos sinais pelo satélite até a chegada ao receptor é desconhecido. Esta incógnita é conhecida como ambiguidade (N) (SILVA, 2017). As Equações 5. 7 e 5. 8 expressam matematicamente a metodologia utilizado para calcular as diferenças de fase.

$$\Phi_1 = \rho + c\Delta t + I_1 + T + b_{1r}^{\phi} + b_{1s}^{\phi} + \lambda_1 N + m_{\phi_1} + \xi_{\phi_1}, \quad (5.7)$$

$$\Phi_2 = \rho + c\Delta t + I_2 + T + b_{2r}^{\phi} + b_{2s}^{\phi} + \lambda_2 N + m_{\phi_2} + \xi_{\phi_2}. \quad (5.8)$$

Onde:

$\Phi_{1,2}$ são as diferenças de fase correspondentes à L1 e L2, respectivamente;

ρ é a distância geométrica satélite-receptor;

c é a velocidade da luz no vácuo;

Δt é o desvio dos relógios do satélite e do receptor em relação ao sistema de tempo do GNSS;

$I_{1,2}$ são os atrasos devido à ionosfera;

T é o atraso devido à troposfera;

$b^{\Phi}_{1,2r}$ e $b^{\Phi}_{1,2s}$ são os atrasos instrumentais do receptor e do satélite, respectivamente, correspondentes à L1 e L2;

$\lambda_{1,2}$ são os comprimentos de onda correspondentes à L1 e L2, respectivamente;

N é a ambiguidade da fase;

$m^{\Phi}_{1,2}$ são os efeitos devidos aos multicaminhos correspondentes à L1 e L2;

$\xi^{\Phi}_{1,2}$ referem-se ao ruído térmico do receptor correspondentes à L1 e L2.

Substituindo a Equação 5. 4 na diferença entre as Equações 5. 7 e 5. 8, têm-se:

$$\Phi_2 - \Phi_1 = 40,3 \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) \text{TEC}_{\Phi} + \delta_1^{\Phi} + \delta_2^{\Phi} + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2). \quad (5. 9)$$

Onde $\delta^{\Phi}_{1,2} = b^{\Phi}_{1r2r} + b^{\Phi}_{1s2s} + m^{\Phi}_{1,2} + \xi^{\Phi}_{1,2}$ representam os erros devidos aos atrasos instrumentais, à multicaminhos e à ruídos térmicos correspondentes à L1 e L2. Assim, o TEC para a diferença de fase pode ser obtido reescrevendo a Equação 5. 9. Encontra-se:

$$\text{TEC}_{\Phi} = \frac{1}{40,3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} [(\Phi_2 - \Phi_1) - (\delta_1^{\Phi} + \delta_2^{\Phi}) - (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2)]. \quad (5. 10)$$

5. 3. 3. Determinação do TEC vertical

As medidas do TEC_P são consideravelmente afetadas pelos atrasos instrumentais, ruídos térmicos e pelos efeitos de multicaminho. Por outro lado, as medidas de TEC_{Φ} são medidas mais precisas, entretanto, contém o termo da ambiguidade (OTSUKA et al., 2002).

A ambiguidade pode ser removida a partir da média da diferença entre o TEC_P e TEC_{Φ} . A partir desta média, pode-se calcular o TEC relativo (TEC_R) (SILVA, 2017), visto na equação abaixo:

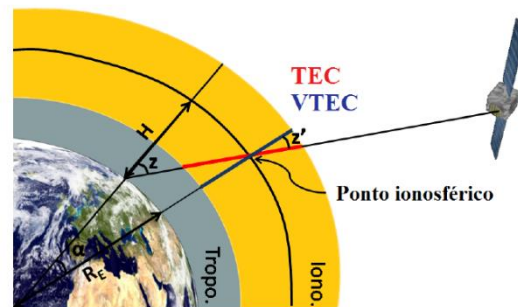
$$\text{TEC}_R = \text{TEC}_{\Phi} + (\text{TEC}_P - \text{TEC}_{\Phi}). \quad (5. 11)$$

O TEC_R fornece uma medida sem ambiguidade, porém, inclui erros devidos aos atrasos instrumentais, efeitos devido aos multicaminhos e ruídos térmicos PARKINSON et al (1996).

Para obter o TEC absoluto, deve-se incluir no cálculo do TEC_R os termos referentes aos erros $\delta_{1,2}$. Entretanto, o cálculo de $\delta_{1,2}$ requer utilização de modelos complexos e podem ser encontrados em Otsuka et al (2002).

Com isso, a determinação do TEC vertical (TEC_v) é feita a partir das medidas do TEC absoluto ao longo da trajetória satélite-receptor. O TEC_v é calculado pela projeção do TEC absoluto sobre o ponto ionosférico (JAKOWSKI, 1996).

Figura 5. 4. Geometria para calcular o TEC vertical.



Fonte: Adaptada de ROB (2017).

Em termos de equação têm-se:

$$TEC_v = TEC \cdot \cos(z'). \quad (5. 12)$$

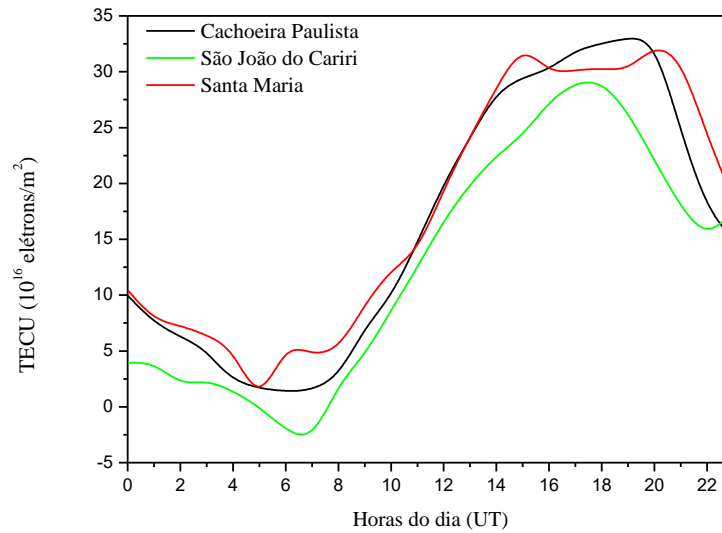
Onde z' representa o ângulo zenital no ponto ionosférico, definido na equação abaixo:

$$z' = \sin^{-1} [(R_E/R_E + H) \sin(z)]. \quad (5. 13)$$

Sendo R_E o raio médio da Terra, H a altura média do pico de densidade eletrônica da ionosfera e z o ângulo zenital do satélite.

A Figura 5. 5 ilustra o comportamento do TEC ao longo de um dia para três localidades diferentes, Cachoeira Paulista (23,5°S, 45°O), São João do Cariri (7,4°S, 36,5°O) e Santa Maria (29,7°S, 53,7°O), percebe-se no gráfico que o comportamento do TEC é semelhante para as três localidades, onde o mesmo sempre apresenta um valor mínimo no início do dia, próximo das 6 horas, e um valor máximo entre as 15 e 16 horas local. Os valores negativos não são reais, isso ocorre devido ao ajuste de mínimos quadrados que é realizado.

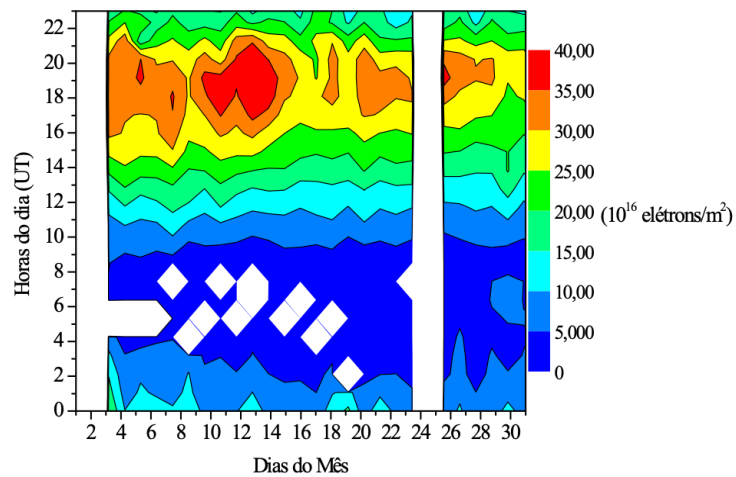
Figura 5. 5. Variação do TEC ao longo de um dia para três localidades diferentes: (23,5°S, 45°O); (7,4°S, 36,5°O) e (29,7°S, 53,7°O).



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5. 6 representa o gráfico de contorno do TEC para o mês de janeiro de 2011 para Cachoeira Paulista (23,5°S, 45°O). Os espaços em branco no gráfico estão relacionados à ausência de valores de TEC, em relação a escala dos valores do mesmo, observa-se que os maiores índices são ocorrentes entre às 16 e 20 horas, e com os menores valores entre às 0 e 8 horas.

Figura 5. 6. Variação do TEC para o mês de janeiro de 2011 em Cachoeira Paulista.



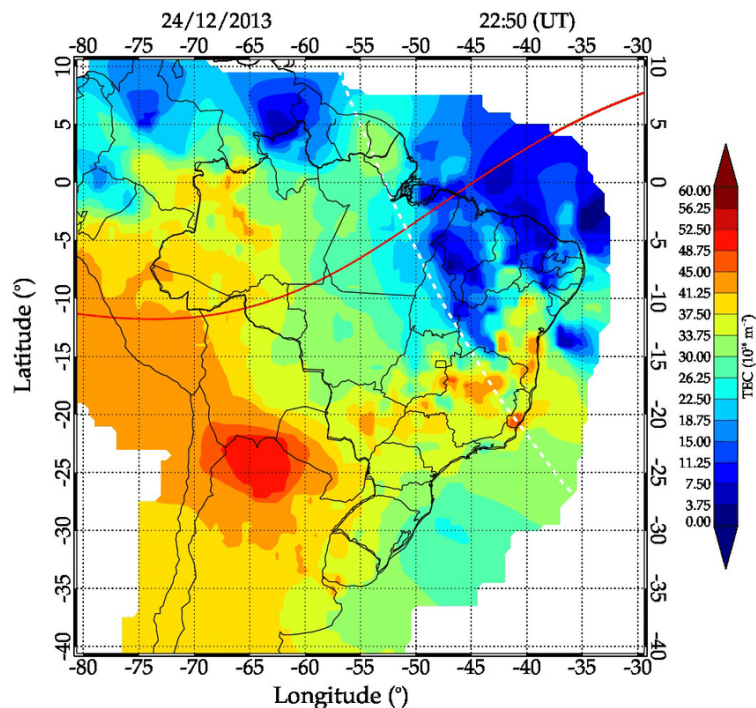
Fonte: Próprio autor.

5. 3. 2. Dados de TEC

As características sobre os dados de TEC podem ser vistas em TAKAHASHI et al (2014). Os autores monitoraram o conteúdo eletrônico total na ionosfera equatorial e de baixa latitude no Brasil em duas dimensões usando dados de 2011 da rede receptora do sistema (GNSS). Foi possível monitorar as variações espaciais e temporais no TEC sobre o Brasil continuamente durante dia e noite com intervalo temporal de 10 minutos.

Barros et al (2018) usaram dados de mapas de TEC, para o período entre novembro de 2012 e janeiro de 2016, uma rede terrestre de receptores GNSS foi usada para monitorar bolhas de plasma equatorial. Com intuito de estudar o TEC, os autores produziram um mapa de TEC sobre a América do Sul às 22:50 UT (horário universal, 19:50 horário local a 45° W) na noite de 24 de dezembro de 2013.

Figura 5. 7. Mapa do TEC sobre a América do Sul às 22:50 UT (hora universal, 19:50 hora local a 45° W) em 24 de dezembro de 2013.



Fonte: Barros et al (2018).

Na Figura 5. 7 é possível observar que o TEC apresenta uma grande variação espacial; a barra de cores varia de 0 a 60 TECU. A linha vermelha indica o equador geomagnético a 350 km de altitude e a linha branca tracejada representa a linha do terminador solar a 296 km de altitude Barros et al (2018).

TAKAHASHI et al (2016) observaram que a variabilidade da densidade do plasma espacial e temporal, não causa apenas o erro de posicionamento, mas também cintilações de ondas de rádio. O monitoramento destes fenômenos pelo mapeamento do TEC torna-se uma questão importante para a preocupação de tempo espacial para sistemas de posicionamento de alta tecnologia e telecomunicações.

5. 7. 1. Cálculo da Maré

A determinação da Maré Lunar nos dados de TEC seguiu a metodologia adotada por Pedatella e Forbes (2010) a análise de Fourier foi usada para calcular os sub-harmônicos do dia solar (diurna, semidiurna e terdiurna). A FFT (Fast Fourier Transform) é um método para calcular de forma eficiente a transformada discreta de Fourier em dados de séries temporal. A análise de Fourier apresenta a relação entre um sinal do seu domínio original do tempo para uma representação no domínio da frequência de sinais discretos. A FFT opera decompondo um sinal no domínio do tempo do ponto N em sinais do domínio no tempo N, cada um composto por um único ponto. O segundo passo é calcular os espectros de frequência N correspondentes a estes sinais no domínio do tempo N. Por fim, os espectros de N são sintetizados em um único espectro de frequência COCHRAN et al (1967).

Com a aplicação da FFT foi possível encontrar as amplitudes e fases das componentes diurna, semidiurna e terdiurna, onde para cada amplitude e fase, tem-se uma frequência atrelada. Em seguida, reconstruiu-se o sinal aplicando os valores de amplitude, fase e frequência na equação abaixo:

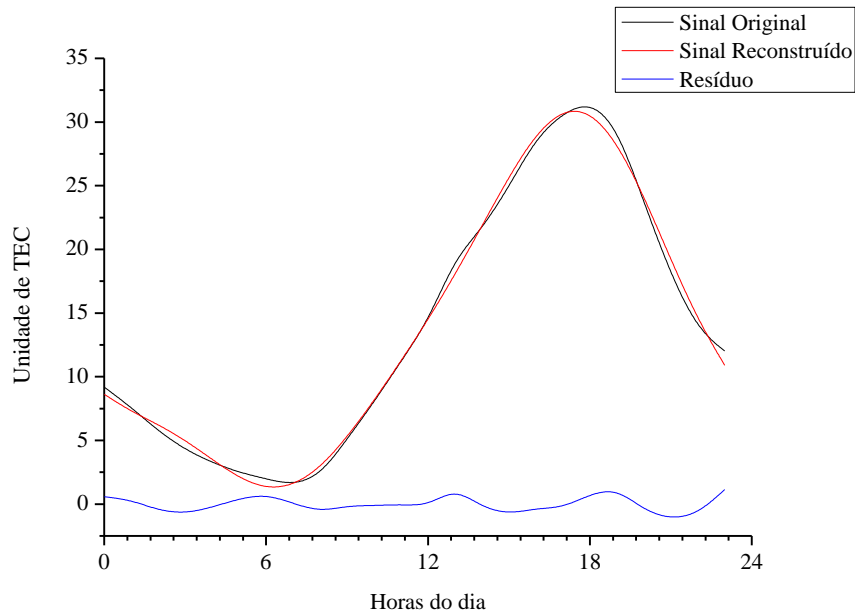
$$x(t) = A\cos(2\pi ft + \phi). \quad (5. 14)$$

Onde A e ϕ são amplitude e fase respectivamente, f é a frequência e t o tempo.

Após a reconstrução do sinal foi possível encontrar o sinal residual, fazendo a diferença entre o sinal original e o sinal reconstruído e a partir do residual determinar as componentes da Mare lunar.

O gráfico da Figura 5. 8 foi construído usando um mês de dados de TEC para Cachoeira Paulista (23,5°S, 45°O). No painel (A) é exibido o sinal original do TEC, o sinal reconstruído é visto no painel (B) e o sinal residual painel (C).

Figura 5. 8. Gráfico para os valores originais de TEC linha (Preta), sinal reconstruído linha (Vermelha) e sinal residual linha (Azul).



Fonte: Próprio autor.

Utilizando o resíduo e convertendo o tempo para o tempo Lunar foram calculadas as componentes diurna e semidiurna da Maré Lunar.

Tempo Lunar:

$$\tau = t - v \quad (5.15).$$

Onde:

t= tempo Solar

v= idade da Lua

5. 7. 2. Dados originais de amplitude da Maré diurna e semidiurna

Com os dados originais de amplitude da Maré Lunar diurna e semidiurna no TEC, foram gerados os gráficos para analisar a variabilidade na amplitude das Marés nos quatro anos de dados de 2011 a 2014. Logo após aplicou-se o filtro Butterworth, com intuito de retirar alguns ruídos e deixar o sinal mais limpo, sendo possível verificar melhor a variabilidade da Maré.

5.7. 3. Função Butterworth

O objetivo de usar a função Butterworth foi para deixar o sinal mais limpo e com menos ruídos, definindo os parâmetros desejados para se estudar. É uma função usada na filtragem de frequência de dados de séries temporais, retornando a uma matriz que contém o valor absoluto do kernel Butterworth low-pass. A forma do filtro é dada pela seguinte equação:

$$\text{Filtro} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\Omega}{\Omega_c}\right)^{2N}}} \quad (5.16).$$

Onde Ω é a frequência, Ω_c é a frequência de corte e N é a ordem.

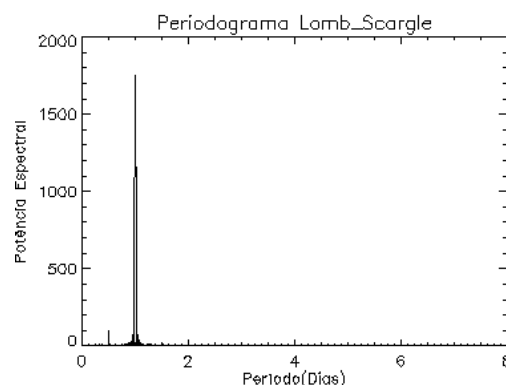
Depois de aplicar o filtro passa banda nos dados de amplitude para os quatro anos de dados 2011 a 2014, usou-se o periodograma de Lomb-Scargle, para identificar os períodos de oscilação e a modulação na amplitude da Maré nos dados de TEC.

5.7.3. Periodograma de Lomb-Scargle

O periodograma Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) é um algoritmo muito utilizado para detectar e caracterizar periodicidade em séries temporais em que ocorre ausência de dados, sendo amplamente utilizado na comunidade astronômica. O periodograma de Lomb-Scargle, surge como um método que permite o cálculo eficiente de um estimador de espectro de potência do tipo Fourier a partir de dados não igualmente espaçados no tempo, resultando em um meio intuitivo de determinar o período de oscilação. O objetivo de usar o periodograma foi para identificar os períodos de oscilações na amplitude da Maré Lunar nos dados de TEC.

A Figura 5. 9 ilustra o periodograma de Lomb-Scargle, como um método usado para identificar o período de oscilação em uma série temporal. Onda a linha pontilhada vista no gráfico, representa o nível de significância de 95%.

Figura 5. 9. Periodograma de Lomb-Scargle.



Fonte: Próprio autor.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos para análise da variabilidade da Maré Lunar nas medidas de conteúdo eletrônico total utilizando os anos de dados de 2011 a 2014.

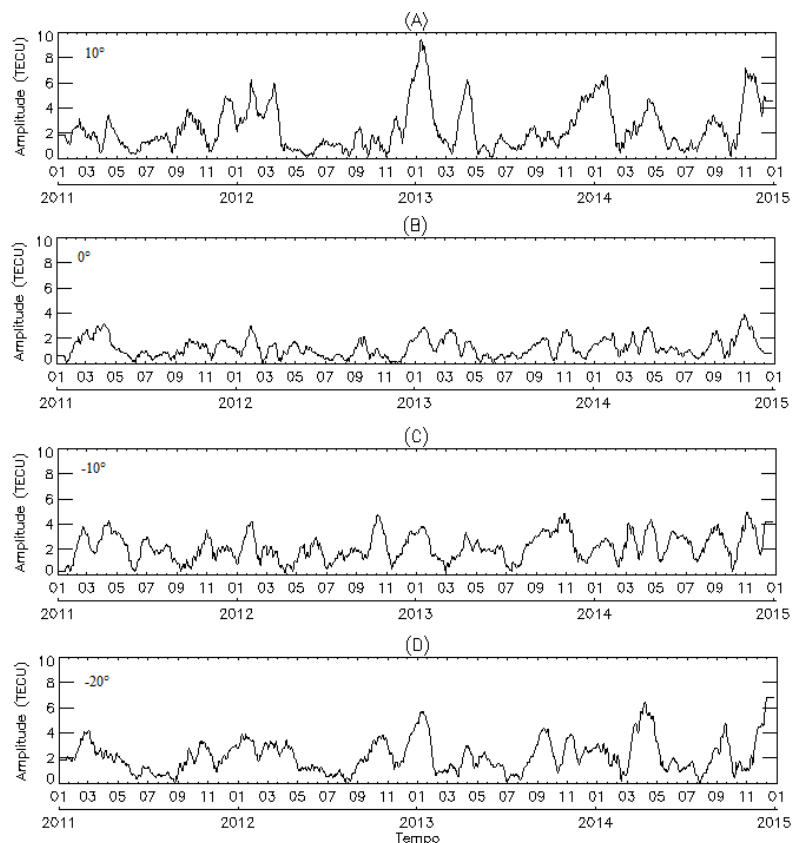
6. 1. VARIAÇÃO NA AMPLITUDE DA MARÉ SEMIDIURNA LUNAR

Abaixo serão apresentados os gráficos construídos para amplitude da Maré semidiurna nas latitudes magnéticas de 10° , 0° , -10° e -20° , para seus valores originais, e para as frequências obtidas após a utilização dos filtros passa baixa e passa alta e para os periodogramas de Lomb-Scargle. As faixas de latitudes magnéticas mencionadas anteriormente, cobrem grande parte do território brasileiro.

6. 1. 2. Dados originais de amplitude da Maré semidiurna Lunar

Na Figura 6. 1 estão representados os dados originais de amplitude da Maré semidiurna Lunar para as latitudes magnéticas de 10° , 0° , -10° e -20° . No eixo x são mostrados os anos de dados e no eixo y são os valores de amplitude da Maré nos dados de TEC.

Figura 6. 1. O painel (A) representa os dados de amplitude para a latitude de 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para a latitude de -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20° .

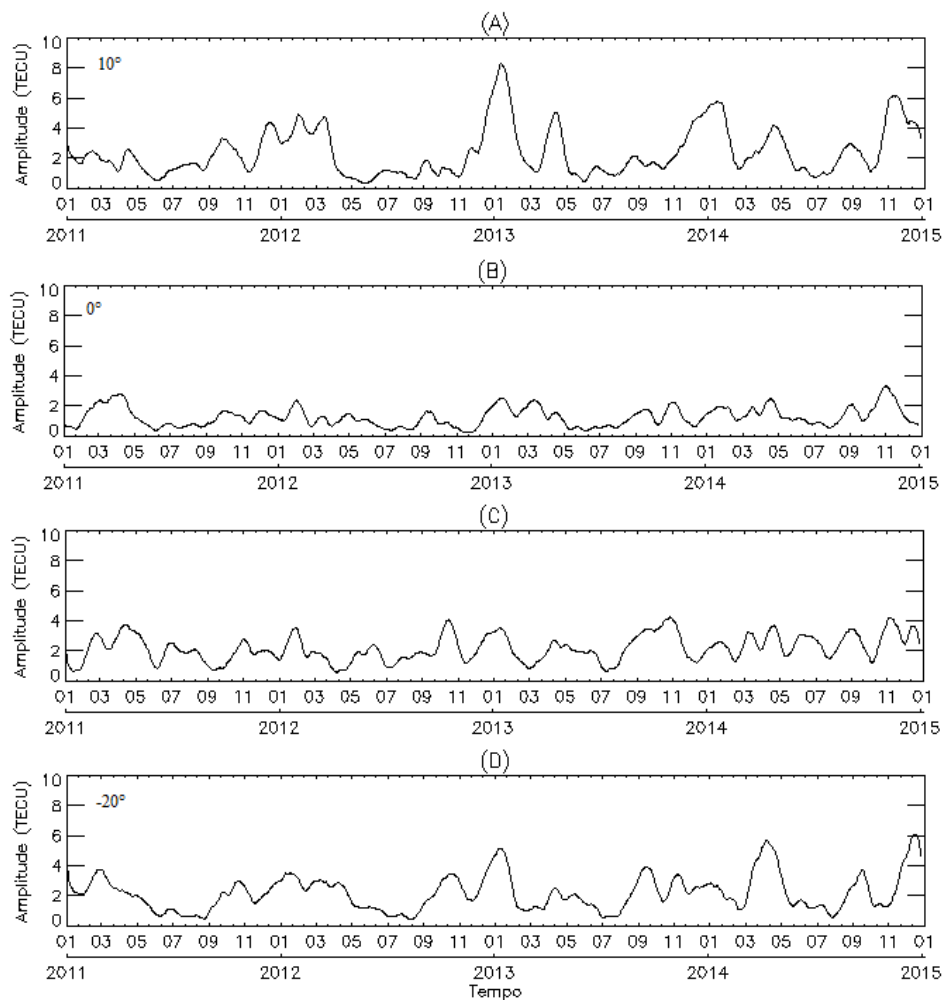


Como mostrado na Figura 6. 1, o comportamento na amplitude da Maré para as latitudes usadas é diferente. Analisando cada painel é possível notar que para todas as latitudes aconteceu um pico em janeiro de 2013, com destaque para a latitude de 10° . Para o equador magnético foram observados os menores valores de amplitude, na latitude de -10° a variação na amplitude da Maré acontece durante os quatro anos de dados. Já para a latitude de -20° os valores são baixos durante 2011 e até dezembro de 2012, sendo possível notar um pico em janeiro de 2013 e entre março e maio de 2014. De modo geral, a variabilidade na amplitude da Maré pode ser observada em todas as latitudes nos quatro anos de dados.

6. 1. 3. Filtro passa baixa e passa alta nos dados de amplitude da Maré semidiurna

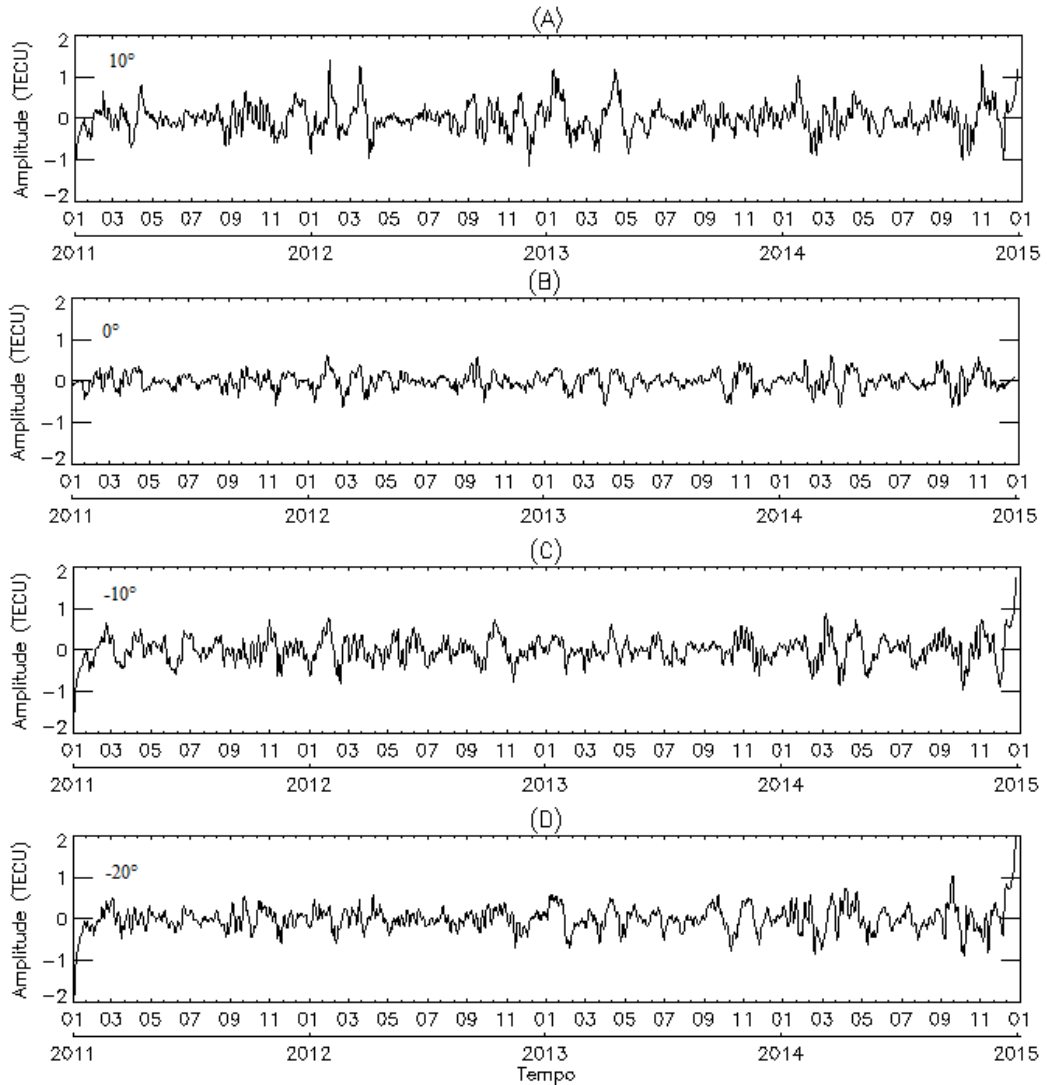
A Figura 6. 2 exhibe o resultado do uso do filtro passa baixa nos dados originais de amplitude da Maré semidiurna para as latitudes de 10° , 0° , -10° e -20° .

Figura 6. 2. O painel (A) representa a amplitude para latitude de 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para latitude de -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20° .



A Figura 6. 3 exibe o resultado do uso do filtro passa alta nos dados originais de amplitude da Maré semidiurna para as mesmas latitudes usadas nos dados do filtro passa baixa.

Figura 6. 3. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20° .



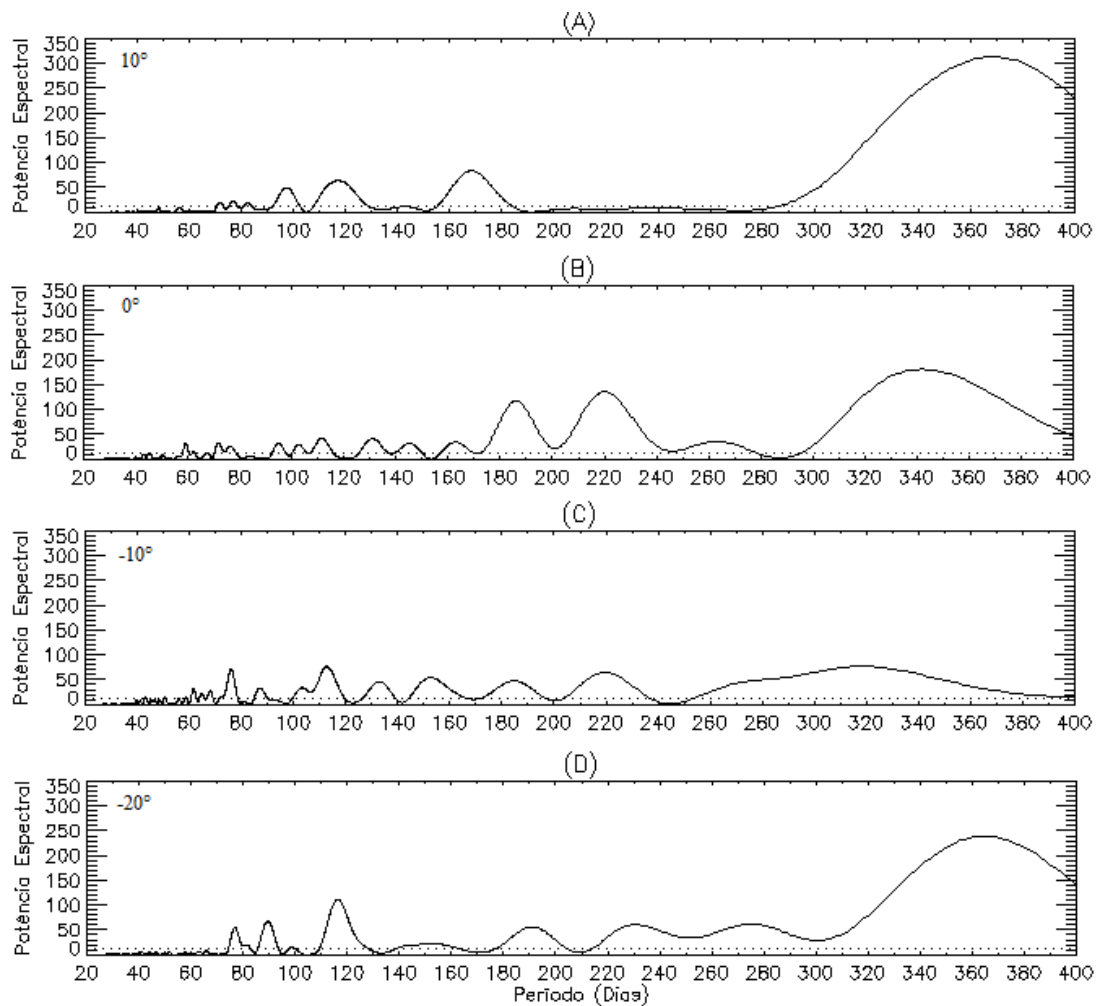
O uso dos filtros nos dados da Maré semidiurna foi realizado com objetivo de filtrar algumas frequências no tempo e conseqüentemente deixar o sinal mais limpo de ruídos. Após aplicar o filtro nos dados é possível notar uma diferença significativa nos dados de amplitude, para os filtros passa baixa e passa alta. No equador magnético os valores de amplitudes são baixos. Os picos vistos para janeiro de 2013 em todas as latitudes nos dados originais ainda são perceptíveis para os filtros passa baixa. Já para os valores do filtro passa alta, acontece uma redução nos valores de amplitude e uma maior frequência, os maiores valores de amplitude são observados para a latitude de 10° , valores próximos de 2, para as demais latitudes é possível

notar uma variação ao longo dos quatro anos, sendo que para a latitude de 0° é possível ver uma variação com valores baixos.

6. 1. 5. Periodograma de Lomb-Scargle nos dados do filtro passa baixa e passa alta

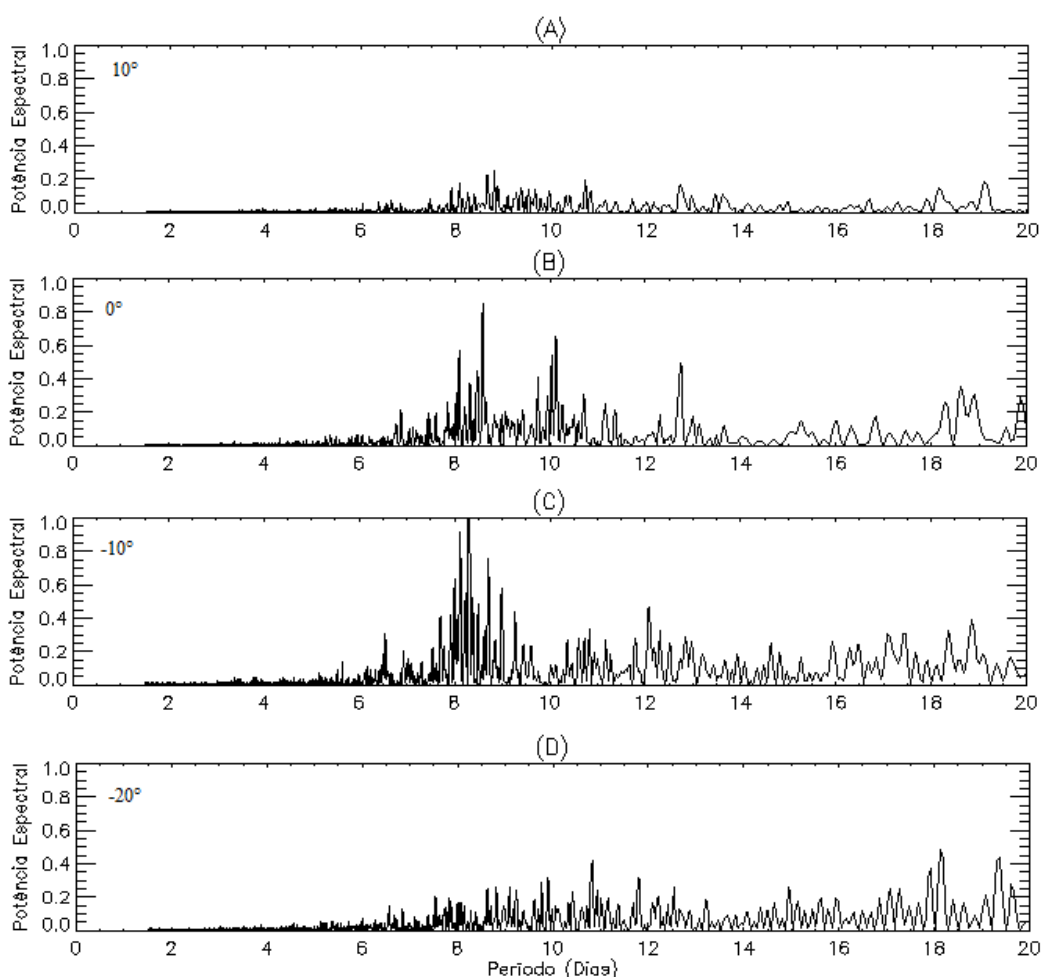
O periodograma foi usado nos dados após aplicar os filtros passa baixa e passa alta, para identificar os períodos de oscilação nos picos significativos nas amplitudes da Maré semidiurna, os intervalos para estudar a periodicidade foram definidos entre 20 e 400 dias. A Figura 6. 4 exibe o periodograma aplicado nos dados do filtro passa baixa para as latitudes magnéticas de 10° , 0° , -10° e -20° . A linha pontilhada vista no gráfico, representa o nível de significância que foi de 95%.

Figura 6. 4. O painel (A) representa a periodicidade para 10° , o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10° , e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20° .



A figura 6. 5 exibe o resultado do periodograma para os dados do filtro passa alta para as mesmas latitudes usadas nos dados do filtro passa baixa. O intervalo aplicado para o filtro passa alta para analisar a periodicidade foi de 1.5 e 20 dias. Para este gráfico não é possível observar o nível de significância como foi visto no gráfico da Figura 6. 4, pois os valores de energia espectral são menores para os dados do filtro passa alta, e como são muitos dados, os valores que caracterizam uma oscilação são significativos.

Figura 6. 5. O painel (A) representa a periodicidade para 10° , o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10° , e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20° .



Analisando os periodogramas para os dados do filtro passa baixa e passa alta, é possível notar diferenças entre os gráficos. Nos dados do filtro passa alta, percebe-se que os valores de energia espectral são baixos em relação aos dados do filtro passa baixa, não é possível notar nenhum período com oscilação significativa entre 1.5 e 6 dias, os períodos mais significativos foram vistos próximos de 8, 9, 10, 11 e 13 dias, sendo que para as latitudes de 0° e -10° foram vistos os maiores valores de energia espectral e os períodos mais significativos próximo de 8 e

9 dias. Já para os dados do filtro passa baixa, são observados maiores valores de energia espectral próximos de 360 na latitude de 10° . Os menores valores de energia espectral são observados para as latitudes de -10° , é possível notar um comportamento de oscilação anual bem acentuado para as latitudes de -10° , 0° e -20° . Os valores próximos de zero entre 180 e 300 dias vistos na latitude de 10° , podem está relacionado com a ausência de receptores GPS.

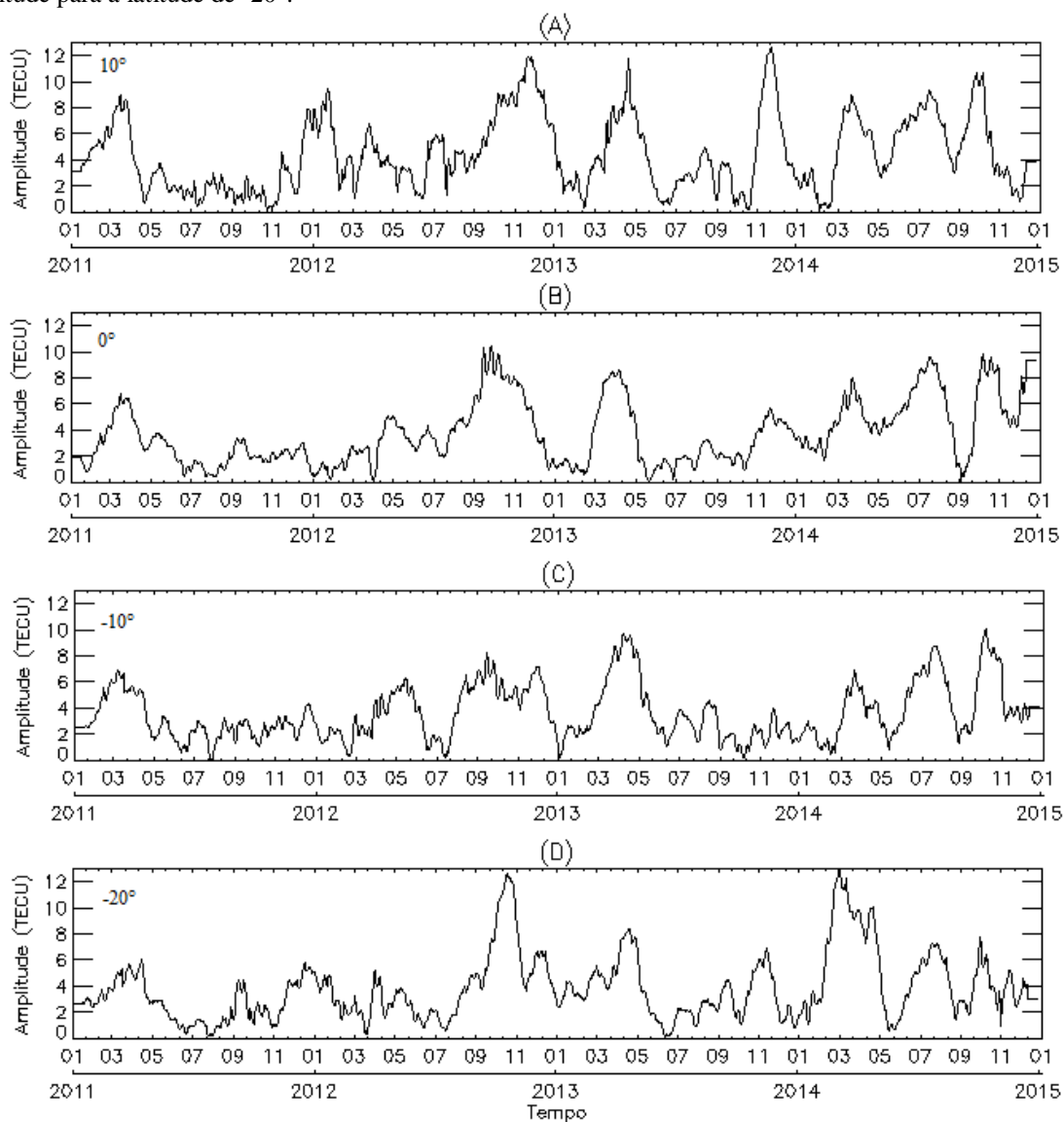
6. 2. VARIAÇÃO NA AMPLITUDE DA MARÉ DIURNA

Abaixo apresentados os gráficos construídos para os dados da Maré diurna aplicando a mesma metodologia usada para semidiurna.

6. 2. 1. Dados originais de amplitude da Maré diurna

O gráfico da Figura 6. 6 exibe a variabilidade nos quatro anos de dados originais de amplitude da Maré diurna nas latitudes de 10° , 0° , -10° e -20° . Onde é possível notar um comportamento diferente da semidiurna, os maiores valores de amplitude são observados para as latitudes 10° e -20° . Na latitude de -10° observa-se um valor mínimo de amplitude para janeiro de 2013, sendo que para esse mesmo mês, aconteceu um máximo para a latitude de 10° na componente semidiurna. No equador magnético os valores de amplitude são maiores do que para a semidiurna, com máximos entre setembro e outubro de 2012, na latitude de -10° é possível observar valores mais elevados próximos de março e maio de 2013 e setembro e novembro de 2014, também foi observado um aumento nos valores de amplitude entre março e maio de 2014 para a latitude de -20° , onde esse aumento na amplitude também ocorreu para os dados da semidiurna, na mesma latitude magnética. De modo geral, a variabilidade na amplitude da Maré diurna é vista para os quatro anos de dados, apresentando valores de amplitude maiores do que a semidiurna em todas as latitudes definidas.

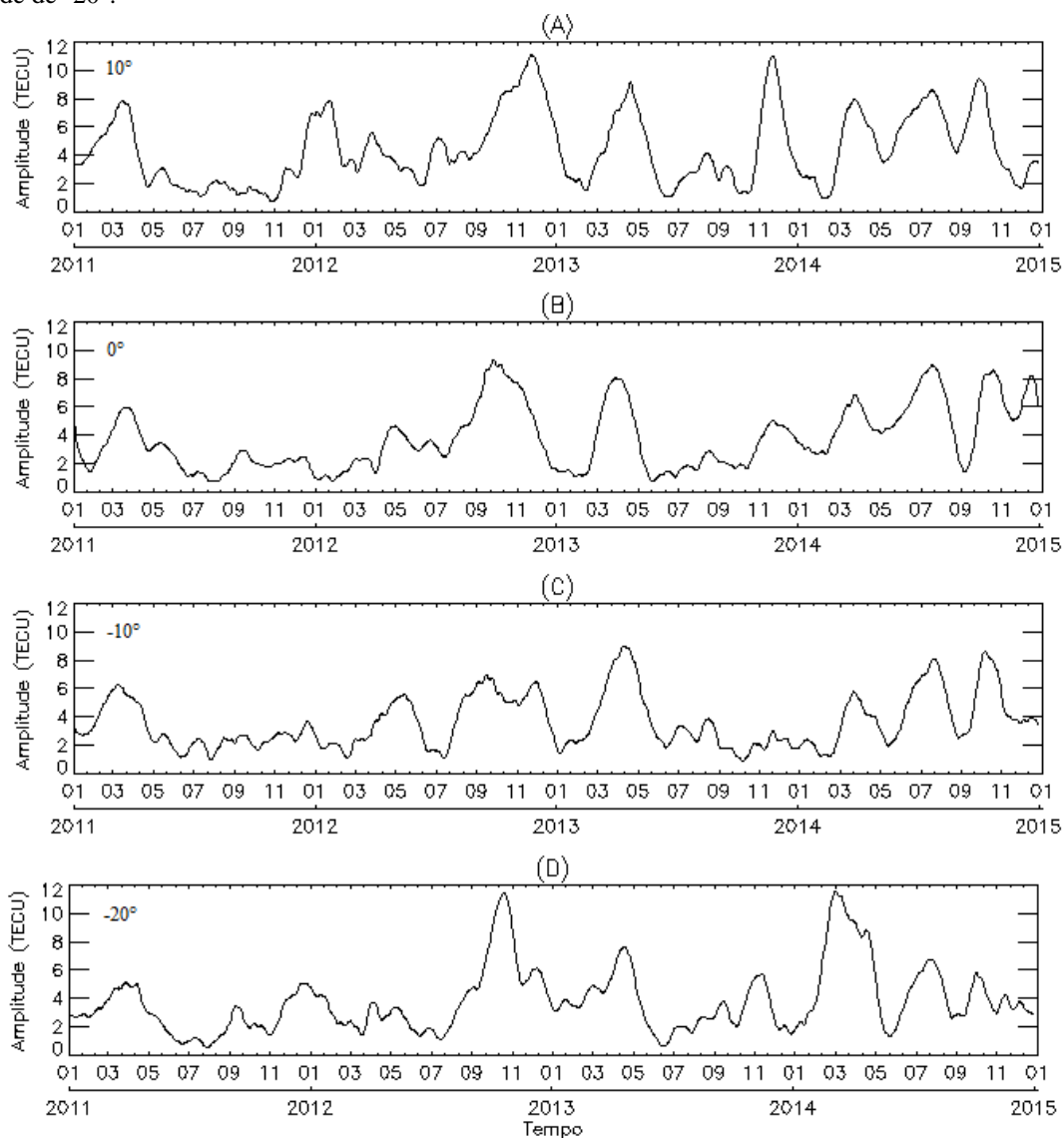
Figura 6. 6. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20° .



6. 2. 2. Filtro passa baixa e passa alta nos dados da Maré diurna

Nos gráficos das Figuras 6. 7 e 6. 8 serão apresentados os resultados referentes as frequências obtidas com o uso dos filtros passa baixa e passa alta respectivamente nos dados da Maré diurna, para as mesmas latitudes definidas na semidiurna, com intuito de filtrar os ruídos e analisar a variação da amplitude ao longo dos quatro anos de dados.

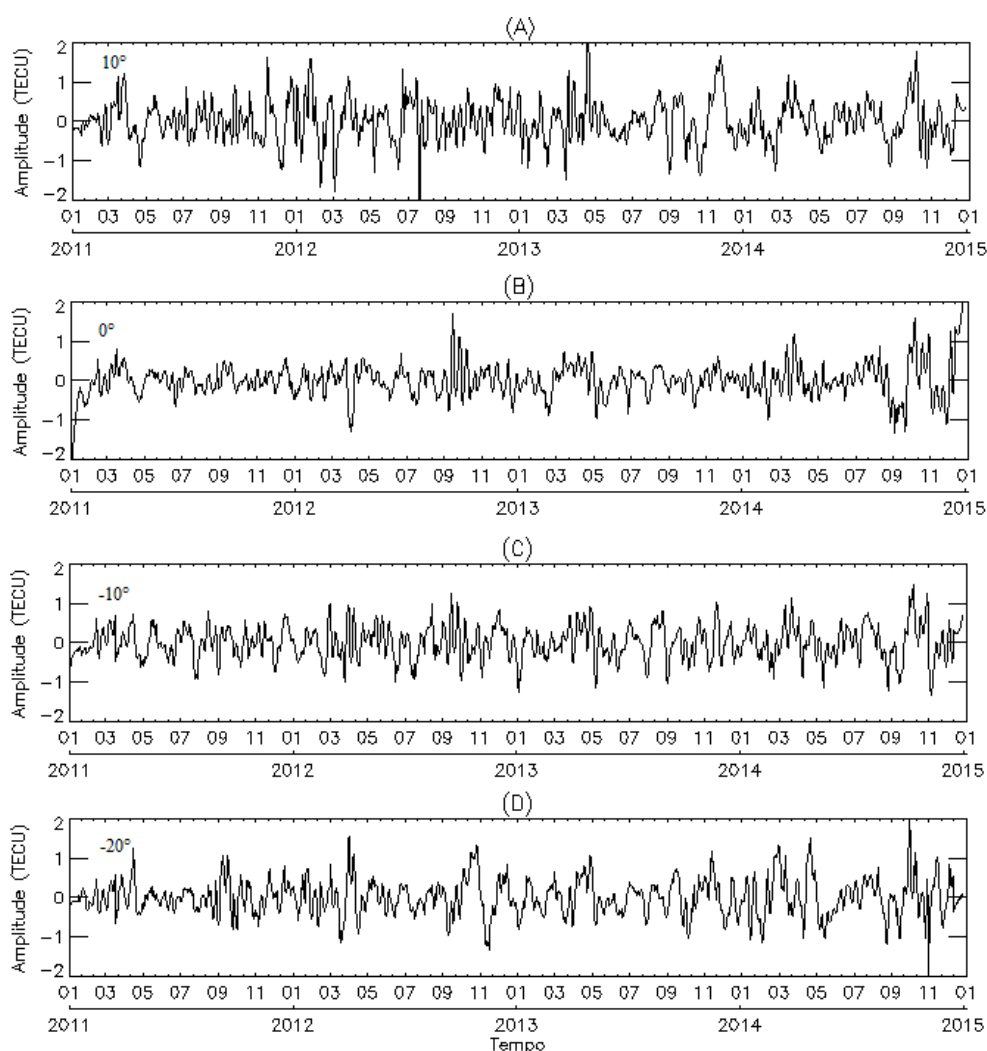
Figura 6. 7. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20° .



Na Figura 6.7 percebe-se que após o uso do filtro passa baixa o comportamento na amplitude da Maré fica com menos ruído ao longo dos quatro anos de dados, e com menores valores de amplitude, mas os maiores valores de amplitude permanecem para as latitudes de 10° e -20° . O pico significativo em -20° foi entre outubro e novembro de 2012 e março e maio de 2014, e para 10° o pico ficou entre novembro e dezembro de 2012 e dezembro de 2013. A latitude de 0° e -10° apresentaram um pico entre março e abril de 2013, sendo que em 0° é visto outra oscilação significativa em outubro de 2012.

Na Figura 6. 8, percebe-se que a variação para as latitude de -10° e 0° , vistos nos painéis (B) e (C) mantém com o comportamento parecido nos quatro anos de dados, já para os painéis (A) e (D) os valores de amplitudes são reduzidos e as frequências são aumentadas, nota-se um pico significativo entre abril e maio de 2013 no painel (A) e um valor mínimo em novembro de 2014 no painel (D). Sendo que para todas as latitudes os valores do filtro passa alta ficaram abaixo de zero.

Figura 6. 8. O painel (A) representa os dados de amplitude para 10° , o painel (B) são os valores de amplitude para o equador magnético, o painel (C) são as amplitudes para -10° , e o último painel (D) são os valores de amplitude para a latitude de -20° .



É possível perceber que os valores do filtro passa baixa exibiram uma menor frequência na variação da amplitude da Maré, enquanto que para o filtro passa alta nota-se maiores frequências e menores valores na amplitude. O comportamento visto no painel (B) foi o que apresentou uma maior uniformidade na variabilidade da amplitude da Maré ao longo dos quatro

anos de dados. Sendo que para ambos os filtros e em todas as latitudes, é possível observar a variabilidade na amplitude da Maré ao longo do período de estudo.

6. 2. 4. Periodograma de Lomb-Scargle nos dados do filtro passa baixa e passa alta

Para esta subseção foram analisados os periodogramas nos dados dos filtros passa baixa e passa alta vistos nas figuras 6. 9 e 6. 10 respectivamente, os intervalos definidos para observar a periodicidade da Maré diurna, foram os mesmos usados para a Maré semidiurna.

Figura 6. 9. O painel (A) representa a periodicidade para 10° , o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10° , e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20° .

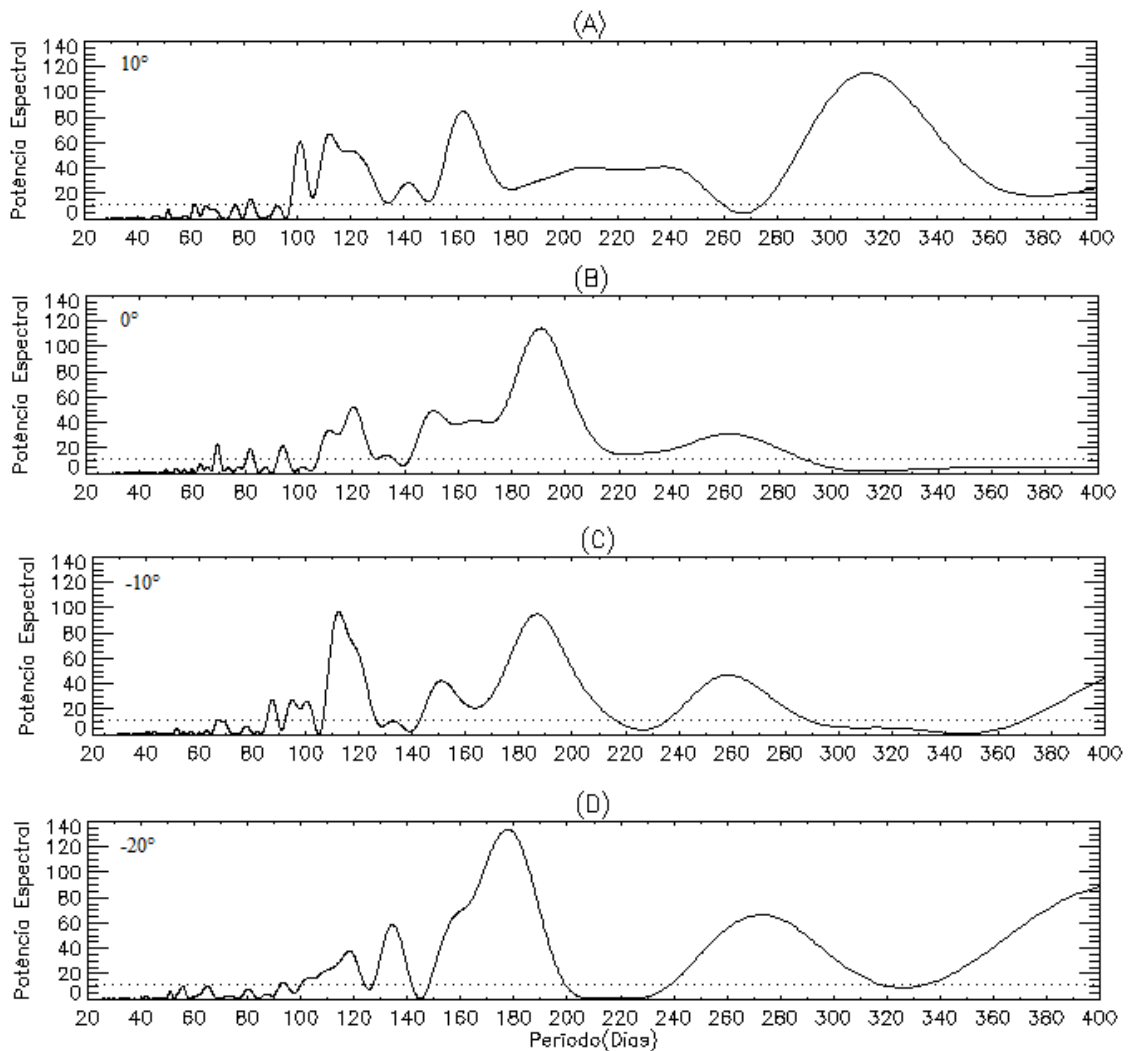
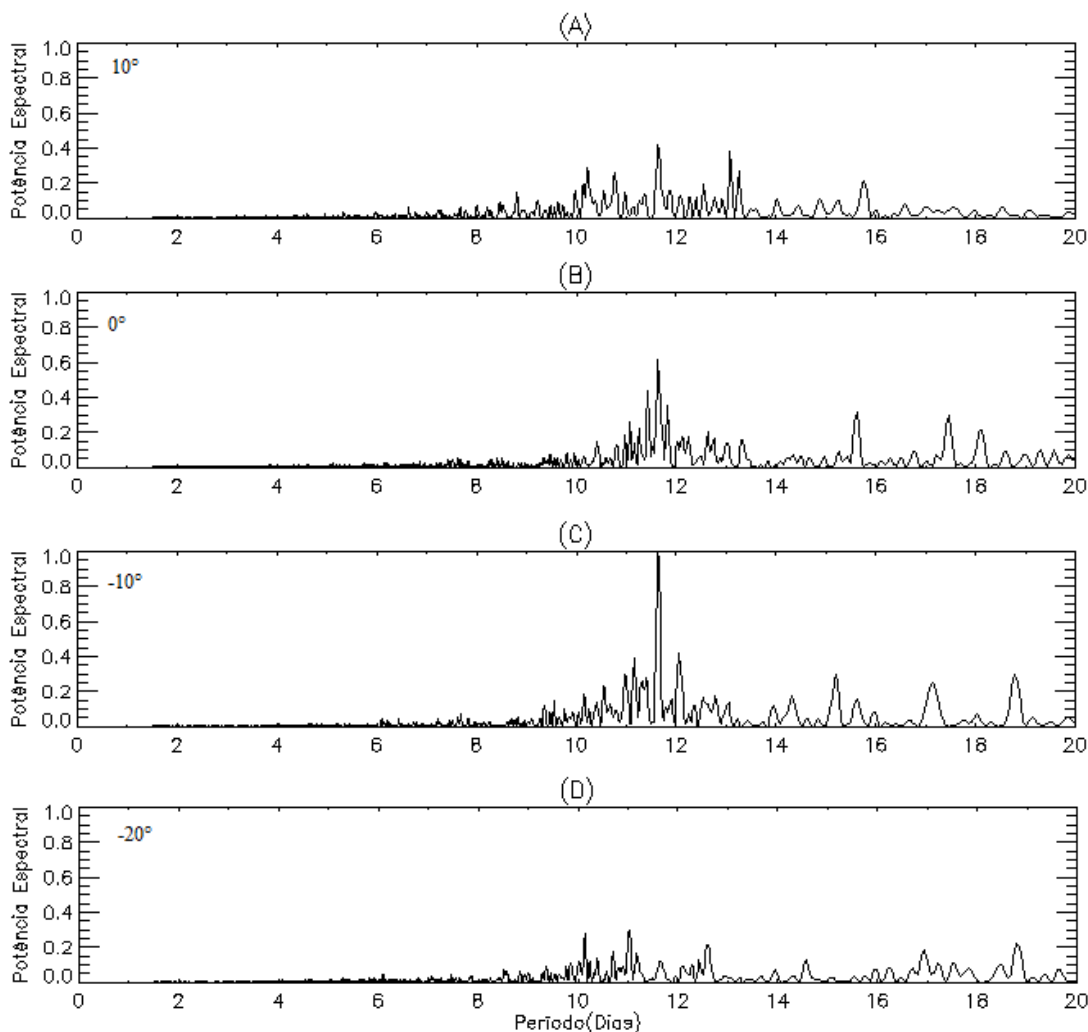


Figura 6. 10. O painel (A) representa a periodicidade para 10° , o painel (B) são os valores para o equador magnético, o painel (C) para -10° , e o último painel (D) são os períodos em dias para a latitude de -20° .



Analisando os gráficos das Figuras 6. 9 e 6. 10, percebe-se que para os dados do filtro passa baixa, Figura 6. 19, nota-se uma oscilação anual para a latitude de 10° , e um comportamento de oscilação semianual para as latitudes de 0° , -10° e -20° , os maiores valores de energia espectral são exibidos para as latitudes de 10° e -20° , a latitude de -10° exibe um pico significativo entre 100 e 120 dias, já para -10° , 0° e -20° , nota-se outro pico próximo de 260 dias, nos intervalos entre 20 e 100 dias não se nota nenhuma variação significativa na amplitude da Maré em todas as latitudes. Na Figura 6. 10, é possível observar baixos valores de energia espectral, os maiores valores de energia espectral são vistos nas latitudes de 0° e -10° , sendo semelhante aos dados da semidiurna, para estas latitudes, observou-se que os picos mais significativos foram em torno de 11 dias, já para as latitudes de 10° e -20° as oscilações mais significativas são concentradas próximo de 10, 11 e 13 dias.

6. 3. DISCUSSÃO

A série de gráficos apresentados anteriormente serviram para analisar o comportamento da Maré diurna e semidiurna Lunar nos dados de TEC, onde pode-se perceber que para os periodogramas com os dados do filtro passa baixa, o comportamento na oscilação na amplitude da Maré semidiurna apresentou características de anualidade, já para os dados da diurna, o comportamento na oscilação apresentou características de semianualidade nas latitudes de 0° , -10° e -20° . Para os períodos de curta oscilação nos dados dos filtros passa alta, os períodos com energia espectral mais significativos foram para as latitudes de 0° e -10° , onde as oscilações se concentraram em torno de 8, 9, 10 11 e 13 dias.

No geral, os maiores valores de amplitudes vistos nos dados originais foram para a Maré diurna em todas as latitudes estudadas. O maior valor de amplitude observado para a semidiurna foi para janeiro de 2013, visto no gráfico da Figura 6. 1 painel (A), podendo o mesmo está relacionado com evento de SSW.

O valor máximo na amplitude da Maré vista no gráfico da Figura 6.1, pode ter sido causada por um evento de SSW que aconteceu em janeiro de 2013 estudado por GONCHARENKO et al. (2013). Demais autores também já estudaram a modulação na amplitude da Maré e em ondas de escala planetárias durante eventos de SSW. Durante grandes eventos de SSW, as amplitudes das Marés diurna e semidiurna, tanto solares quanto lunares e das ondas planetárias, são amplificadas e sua ação combinada registra maior influência na ionosfera (STENING et al., 1997 ; PEDATELLA e LIU 2013).

Pedatella e Liu (2013) estudaram a variabilidade das Marés na região MLT e em baixas latitudes da ionosfera, e observaram alterações significativas que ocorreram na Maré Solar e semidiurna Lunar. O comprimento de onda da Maré Solar é alterado, e as mudanças na Maré Lunar durante eventos de SSW contribuem cerca de 30% na variabilidade da ionosfera, sendo que essa influência depende da fase da lua.

Pode-se observar no gráfico da Figura 6. 1, que os menores valores de amplitude para a Maré semidiurna foram vistos para o equador magnético exibidos no painel (B). Paulino et al (2017) usando dados de TEC, também observaram que os valores de amplitudes de Maré semidiurna Lunar ao longo do equador magnético foram menores do que nas outras latitudes magnéticas investigadas.

Tanto para a Maré diurna quanto para a semidiurna, é possível notar a variação nas suas amplitudes em todos os anos. Paulino et al (2017) verificaram em seus dados TEC a variabilidade ano a ano para os componentes da Maré diurna e semidiurna. Para as latitudes

estudadas, os valores de amplitude foram maiores para a Maré diurna do que para as semidiurnas, como também pode ser observado por PAULINO et al (2017) e PEDATELLA e FORBES (2010).

Paulino et al (2017) observaram um aumento na amplitude para componentes da Maré diurna e semidiurna de março a maio de 2014 na latitude magnética de 15° S, esse mesmo aumento entre março e maio é visto para a latitude de -20° , nas Figuras 6. 1 e 6. 6 no painel (D).

Sridharan (2017) estudou a variabilidade na Maré Solar e Lunar nos dados de TEC e do campo geomagnético durante um evento de SSW em 2010, em 15° N geomagnético. E verificou que as amplitudes das Marés diurna e semidiurna mostram variação semestral com amplitudes máximas durante fevereiro-março e setembro-novembro.

Haldoupis et al (2004) investigaram as periodicidades das Marés e das ondas planetárias na formação de camada esporádica E, e verificaram que existiam periodicidade de ondas planetárias com períodos próximos aos modos normais de Rossby de 10 e 16 dias, oscilações próximas a essas foram vistas nas latitudes magnéticas de 0° e -10° para a Maré diurna, como também, para a maré semidiurna, mostrados nos gráficos das Figuras 6. 5 e 6. 10 respectivamente. Observaram também que as oscilações das marés sofrem uma forte modulação de amplitude com períodos comparáveis às periodicidades de ondas planetárias dominantes presentes nos dados. Onde sugeriram que a camada esporádica E é afetada indiretamente pelas ondas planetárias através de sua interação não-linear e modulação das Marés atmosféricas em altitudes mais baixas.

Os resultados exibidos nos periodogramas para a Maré diurna e semidiurna, como mencionado anteriormente apresentam modulações significativas na sua amplitude em períodos próximos de 8, 9, 10, 11 e 13, oscilações parecidas foram vistas em LASKAR et al (2014). Onde observaram a presença de períodos de 12 a 16 dias, acima do nível de significância de 90%, nos resultados dos periodogramas, como também um padrão sistemático nas periodicidades do tipo onda planetária de 12 a 16 dias no TEC e no EEJ, que é visto como proeminente ao longo do dia. Notaram também um comportamento de variabilidade na amplitude da Maré semidiurna, como se a mesma fosse modulada pelas ondas de quase 16 dias em torno do pico de um grande evento de SSW, especialmente para os três grandes eventos em 2006, 2009 e 2013. Onde as amplitudes da Maré semidiurna apresentaram correlação com a onda de quase 16 dias, exibindo amplitudes máximas durante um evento de SSW para o ano de 2013.

Para os periodogramas das Figuras 6. 4 e 6. 9 nos dados do filtro passa baixa, nota-se variações com períodos longos. Sendo possível observar períodos significativos próximos de, 180, 260 e 360 dias. Sassi et al (2019) verificaram uma variabilidade considerável nos modos de Maré diurna e semidiurna em todas as escalas de tempo. Em seus dados foram exibidos períodos com variabilidade de 180 dias em amplitudes diurnas durante 2014 e 2016 e variabilidade nas amplitudes semidiurnas em ventos mesosféricos tropicais em 2017 em períodos de 90 a 180 dias.

7. CONCLUSÕES

A pesquisa teve como objetivo analisar a variabilidade da amplitude da Maré semidiurna e diurna Lunar nos dados observacionais da ionosfera do conteúdo eletrônico total sobre o Brasil, nos sistemas GNSS-GPS, fornecidos pelo INPE, para as latitudes magnéticas fixas de 10° , 0° , -10° e -20° , durante um intervalo de quatro anos de 2011 a 2014.

A variabilidade na amplitude da Maré diurna e semidiurna nos dados de TEC é perceptível para os quatro anos de dados. Sendo possível observar que todos os valores de amplitudes referentes aos dados da Maré diurna foram maiores do que a semidiurna em todas as latitudes estudadas. Observou-se também que os menores valores de amplitude são para o equador magnético.

A variabilidade na amplitude da Maré semidiurna aconteceu durante todo o período de estudo, com destaque para janeiro de 2013, onde o efeito do evento de SSW foi mais efetivo, proporcionando um aumento significativo na amplitude da Maré em todas as latitudes magnéticas para a componente semidiurna.

Como mencionado anteriormente a variabilidade na amplitude da Maré diurna é vista durante todo o período de dados, com os maiores picos de amplitude vistos para as latitudes de 10° e -20° . O efeito do SSW não foi efetivo para a Maré diurna em janeiro de 2013 como aconteceu na semidiurna. Em janeiro de 2013 para a latitude de -10° é visto um valor mínimo na amplitude da Maré diurna, onde para a semidiurna esse valor é máximo para a latitude de 10° . Para as latitudes que apresentaram os maiores valores de amplitude para a Maré diurna, os picos se evidenciaram entre novembro e dezembro de 2012, abril e maio de 2013 e entre novembro e dezembro de 2013 para a latitude magnética de 10° e entre outubro e novembro de 2012, março e maio de 2014 para a latitude magnética de -20° .

Os longos períodos de oscilações mais expressivas para a maré semidiurna se concentraram entre 180, 260 e 360 dias. Nos dados de amplitude da semidiurna percebe-se um comportamento de oscilação anual em todas as latitudes estudadas. Para a diurna percebe-se uma oscilação anual para a latitude de 10° , e um comportamento de oscilação semianual para as latitudes de 0° , -10° e -20° . Nos períodos de curta oscilação, não se observou variabilidade próximo 1.5 a 6 dias. A variabilidade da Maré semidiurna e diurna foi observada entre os períodos próximos de 8, 9, 10, 11 e 13 dias.

Os dados observacionais da ionosfera do conteúdo eletrônico total gerados do sistema GNSS-GPS, funcionam como uma ferramenta importante para estudar a variabilidade na amplitude da Maré Lunar, identificando a modulação proporcionada por ondas de escala

planetária, como também os efeitos dos eventos de SSW. Dessa forma o mapeamento TEC se mostra como uma ferramenta importante voltada para caracterizar a variabilidade da Maré Lunar na ionosfera.

8. REFERÊNCIAS

ANDREWS, D. G.; HOLTON, J. R.; LEOVY, C. B. **Middle atmosphere dynamics**. Academic Press, Orlando 490pp, 1987.

ARAÚJO, LUCIANA RODRIGUES DE. **Sazonalidade de ondas planetárias nos ventos meteóricos observados em São João do Cariri-PB e em Cachoeira Paulista-SP**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual da Paraíba, 2012.

BARROS, D.; TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; FIGUEIREDO, C. A. O. Characteristics of equatorial plasma bubbles observed by TEC map based on ground-based GNSS receivers over South America. In: **Annales Geophysicae**. Copernicus GmbH, 2018. p. 91-100.

BEER, T. **Atmospheric waves**. Londres: Adam Hilder, 1974. 300p.

BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BURSTEN, B.E. **Química, a ciência central**. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2005.

CHAPMAN, S.; LINDZEN, R. S. **Atmospheric tides**. Newark, N. J.: Gordon and Breach, 1970. 1, 7, 14, 15, 16, 17, 55.

CHAU, J. L.; FEJER, B. G.; GONCHARENKO, L. P. Quiet variability of equatorial E×B drifts during a sudden stratospheric warming event. **Geophysical Research Letters**, v. 36, n. 5, 2009.

CHEN, WEN.; LI, TIM. Modulation of northern hemisphere wintertime stationary planetary wave activity: East Asian climate relationships by the Quasi-Biennial Oscillation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 112, n. D20, 2007.

CHSHYOLKOVA, TATYANA. **Planetary waves and dynamical processes associated with seasonal perturbations and transitions**. 2007.

COCHRAN, W. T.; COOLEY, J. W.; FAVIN, D. L.; HELMS, H. D.; KAENEL, R. A.; LANG, W. W.; WELCH, P. D. What is the fast Fourier transform?. **Proceedings of the IEEE**, v. 55, n. 10, p. 1664-1674, 1967.

CRAIG, R. L.; ELFORD, W. G. Observations of the quasi 2-day wave near 90 km altitude at Adelaide (35° S). **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 41, n. 10, p. 1051-1056, Oct. 1981.

DE ABREU, A. J.; MARTIN, I. M.; DE JESUS, R.; BOLZAN, M. J. A.; VENKATESH, K.; FAGUNDES, P. R.; ALVES, M.A.; GENDE, M. **Estudo do Conteúdo Eletrônico Total Ionosférico no Setor Brasileiro Durante o Incomum Ciclo Solar 23: Comparação entre Observações e Modelo iri-2012**. In: VI Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - VI SBGEA, 26 a 30 de Setembro de 2016, Góiais, 2016.

DE MORAES, J. F.; PAULINO, A. R.; PAULINO, I.; BATISTA, I. S. Evidence of the lunar tide in the ionosphere. In: **15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 31 July-3 August 2017**. Brazilian Geophysical Society, 2017. p. 1699-1703.

ECCLES, V.; RICE, D. D.; SOJKA, J. J.; VALLADARES, C. E.; BULLETT, T.; CHAU, J. L. (2011). Lunar atmospheric tidal effects in the plasma drifts observed by the Low-Latitude Ionospheric Sensor Network. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 116(A7).

FEJER, B. G.; TRACY, B. D.; OLSON, M. E.; CHAU, J. L. Enhanced Lunar semidiurnal equatorial vertical plasma drifts during sudden stratospheric warmings. **Geophysical Research Letters**, v. 38, 2011.

GONCHARENKO, L.; CHAU, J. L.; CONDOR, P.; COSTER, A.; BENKEVITCH, L. Ionospheric effects of sudden stratospheric warming during moderate-to-high Solar activity: Case study of January 2013. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 19, p. 4982-4986, 2013.

HALDOUPIS, CHRISTOS.; PANCHEVA, DORA.; MITCHELL, N. J. A study of tidal and planetary wave periodicities present in midlatitude sporadic E layers. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 109, n. A2, 2004.

HIROOKA, TOSHIHIKO.; HIROTA, ISAMU. Normal mode Rossby waves observed in the upper stratosphere. Part II: Second antisymmetric and symmetric modes of zonal wavenumbers 1 and 2. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 42, n. 6, p. 536-548, 1985.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. 2020. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/cartograma_s/RBMC_2020.png>. Acesso em 27 de agosto de 2020.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. 2011. **O que é cada instrumento**. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/SWMonitorUser/faces/about.xhtml>>. Acesso em 27 de fevereiro de 2020.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. 2014. **O programa Embrace**. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>>. Acesso em 27 de fevereiro de 2020.

JAKOWSKI, N. TEC monitoring by using satellite positioning systems. **Modern Ionospheric Science**, p. 371-390, 1996.

KARIA, S. P.; PATHAK, K. N. Change in refractivity of the atmosphere and large variation in TEC associated with some earthquakes, observed from GPS receiver. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 5, p. 867-876, 2011.

KINGSLEY, S. P.; MULLER, H. G.; NELSON, L.; SCHOLEFIELD, A. Meteor winds over Sheffield (53 N, 2 W). **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 40, n. 8, p. 917-922, 1978.

KUTTIPPURATH, JAYANARAYANAN.; NIKULIN, GRIGORY. A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 12, n. 17, p. 8115-8129, 2012.

LASKAR, FAZLUL I.; PALLAMRAJU, DUGGIRALA.; VEENADHARI, BHASKARA. Vertical coupling of atmospheres: dependence on strength of sudden stratospheric warming and solar activity. **Earth, Planets and Space**, v. 66, n. 1, p. 1-10, 2014.

LAŠTOVIČKA, J.; ŠAULI, P. Are planetary wave type oscillations in the F2 region caused by planetary wave modulation of upward propagating tides?. **Advances in Space Research**, v. 24, n. 11, p. 1473-1476, 1999.

LEAN, J. L.; MEIER, R. R.; PICONE, J. M.; SASSI, F.; EMMERT, J. T.; RICHARDS, P. G. Ionospheric total electron content: Spatial patterns of variability. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 10, p. 10,367-10,402, 2016.

LOMB, N. R. Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. **Astrophysics and Space Science**, v.39, n.02, p. 447-462, 1976.

MADDEN, ROLAND A.; JULIAN, PAUL R. Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. **Journal of the atmospheric sciences**, v. 29, n. 6, p. 1109-1123, 1972.

MARTYN, DAVID FORBES. Atmospheric tides in the ionosphere. II. Lunar tidal variations in the F region near the magnetic equator. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences**, v. 190, n. 1021, p. 273-288, 1947.

MATSUNO, T. A dynamical model of the stratospheric sudden warming. **Journal of The Atmospheric Science**. v.28, p.1479-1494, 1971.

MATSUSHITA, SADAMI. Sequential Es and lunar effects on the equatorial Es. **Journal of geomagnetism and geoelectricity**, v. 7, n. 3, p. 91-95, 1955.

MATSUSHITA, SADAMI. Marés lunares na ionosfera. In: Geophysik III / Geophysics III . Springer, Berlin, Heidelberg, 1967. p. 547-602.

MAYR, H. G.; MENGEL, J. G.; CHAN, K. L.; PORTER, H. S. Seasonal variations and planetary wave modulation of diurnal tides influenced by gravity waves. **Advances in Space Research**, v. 24, n. 11, p. 1541-1544, 1999.

MOHANAKUMAR, K. **Stratosphere troposphere interactions an introduction**. Cochin: Springer, 2008.

MONICO, J. A. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 2, 21, 22, 23, 25, 29, 32.

MULLER, H. G.; NELSON, L. Uma onda de quase dois dias de viagem na região do meteoro. **Jornal de Física Atmosférica e Terrestre**, v. 40, n. 6, p. 761-766, 1978.

NOGUEIRA, PAULO ALEXANDRE BRONZATO. **ESTUDOS DAS CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO DE ONDA NÚMERO 4 E VARIABILIDADES**

DO TEC SOBRE A AMÉRICA DO SUL. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, p. 234. 2013.

OTSUKA, Y.; OGAWA, T.; SAITO, A.; TSUGAWA, T.; FUKAO, S.; MIYAZAKI, S. A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan. **Earth Planets Space** v.54, p. 63–70, 2002.

PAES, R. DA. R. **Estudo da influência do aquecimento estratosférico súbito (SSW) sobre a anomalia de ionização equatorial na região brasileira.** Dissertação de Mestrado em Geofísica Espacial - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 2012.

PARK, J.; H. LÜHR, M. KUNZE.; B. G. FEJER.; K, W. MIN. Effect of sudden stratospheric warming on Lunar tidal modulation of the equatorial electrojet. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 117, n. A3, 2012.

PARKINSON, B. W., ENGE, P., AXELRAD, P., & SPILKER JR, J. J. (Ed.). **Global positioning system: Theory and applications, Volume II.** American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996.

PAULINO, A. R. ESTUDO GLOBAL DA MARÉ LUNAR NA MÉDIA ATMOSFERA ATRAVÉS DE MEDIDAS **POR SÁTELITE.** Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, p. 212. 2013.

PAULINO, A. R.; BATISTA, P. P.; BATISTA, I. S. A global view of the atmospheric lunar semidiurnal tide. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 118, n. 23, p. 13,128-13,139, 2013.

PAULINO, A. R.; BATISTA, P. P.; CLEMESHA, R. Lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere over Cachoeira Paulista (22.7° S; 45.0° W). **Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics**, v. 78, p. 31-36, 2012.

PAULINO, A. R.; BATISTA, P. P.; LIMA, L. M.; CLEMESHA, B. R.; BURITI, R. A.; SCHUCH, N. The lunar tides in the mesosphere and lower thermosphere over Brazilian sector. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 133, 129-138, 2015.

PAULINO, A. R.; BURITI, R.; BATISTA, P.; LIMA, L.; BATISTA, I. S.; PAULINO, I.; FERNADES, J. The lunar tides in the ionosphere over Brazil. **cosp**, v. 42, p. C2. 2-49-18, 2018.

PAULINO, A. R.; DE MORAES, J. F.; PAULINO, I.; BATISTA, I. S. (2017, August). Evidence of the lunar tide in the ionosphere. **In 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Brazil, 31 July-3 August 2017** (pp. 1699-1703). Brazilian Geophysical Society.

PAULINO, A. R.; LIMA, L. M.; ALMEIDA, S. L.; BATISTA, P. P.; BATISTA, I. S.; PAULINO, I.; WRASSE, C. M. Lunar tides in total electron content over Brazil. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 7, p. 7519-7529, 2017.

PAULINO, I.; PAULINO, A. R.; CUEVA, R. Y.; AGYEI-YEBOAH, E.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; BATISTA, I. S. Semimonthly oscillation observed in the start times of equatorial plasma bubbles. In: **Annales Geophysicae**. Copernicus GmbH, 2020. p. 437-443.

PEDATELLA, N. M.; FORBES, J. M. Global structure of the lunar tide in ionospheric total electron content. **Geophysical research letters**, v. 37, n. 6, 2010.

PEDATELLA, N. M.; LIU, H.L. The influence of atmospheric tide and planetary wave variability during sudden stratosphere warmings on the low latitude ionosphere. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 8, p. 5333-5347, 2013.

ROB. **Royal observatory of Belgium GNSS**. 2017. Acesso em: 27 de agosto de 2020. Disponível em: <<http://gnss.be>>. 57, 61.

SANDFORD, D. J.; MITCHELL, N. J.; VINCENT, R. A.; MURPHY, D. J. (2007). **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, n. 17-18, p. 2219-2237, 2007.

SASSI, F.; MCCORMACK, J. P.; MCDONALD, S. E. Whole atmosphere coupling on intraseasonal and interseasonal time scales: A potential source of increased predictive capability. **Radio Science**, v. 54, n. 11, p. 913-933, 2019.

SCARGLE, J. D. Studies in astronomical time series analysis. II-Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. **The Astrophysical Journal**, v. 263, p. 835-853, 1982.

SCHOEBERL, M. R. Stratospheric warmings: Observations and theory. **Reviews of Geophysics**, v. 16, n. 4, p. 521-538, 1978.

SEEBER, GÜNTER. Satellite Geodesy, 2nd completely revised and extended edition. **Walter de Gruyter GmbH & Co. KG**, v. 10785, p. 303-304, 2003.

SILVA, DIEGO BARROS. **Formação e desenvolvimento de bolhas de plasma na ionosfera equatorial: observação e simulação**. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial/Ciências Atmosféricas) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

SRIDHARAN, S. Solar and lunar tidal variabilities in GPS-TEC and geomagnetic field variations: Seasonal as well as during the sudden stratospheric warming of 2010. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 4, p. 4571-4587, 2017.

STENING, R. J. Lunar tide in the equatorial electrojet in relation to stratospheric warmings. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 116, n. A12, 2011.

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.

TAKAHASHI, H.; COSTA, S.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MONICO, J. F. G.; PAULA, E.; IVO, A. S. Diagnostics of equatorial and low latitude ionosphere by TEC mapping over Brazil. **Advances in Space Research**, v. 54, n. 3, p. 385-394, 2014.

TAKAHASHI, H.; WRASSE, C. M.; DENARDINI, C. M.; PÁDUA, M. B.; DE PAULA, E. R.; COSTA, S. M. A.; SANT'ANNA, N. Ionospheric TEC weather map over South America. **Space Weather**, v. 14, n. 11, p. 937-949, 2016.

THAYAPARAN, T.; HOCKING, W. K.; MACDOUGALL, J.; MANSON, A. H.; MEEK, C. E. Simultaneous observations of the 2-day wave at London (43 N, 81 W) and Saskatoon (52 N, 107 W) near 91 km altitude during the two years of 1993 and 1994. In: **Annales Geophysicae**. Springer-Verlag, 1997. p. 1324-1339.

TSALI-BROWN, V. Y.; FAGUNDES, P. R.; PAULINO, A. R.; PILLAT, V. G.; BOLZAM, M. J. A. Geomagnetic field variations due to Solar and Lunar tides in the Brazilian Sector, EGU General Assembly 2020, Online, 4–8 May 2020, EGU2020-1309, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-1309>, 2019.

TSUDA, T.; OHNISHI, K.; ISODA, F.; NAKAMURA, T.; VINCENT, R. A.; REID, I. M.; HARIJONO, W. B.; SRIBIMAWATI, T.; NURYANTO, A.; WIRYOSUMARTO, H. Coordinated radar observations of atmospheric diurnal tides in equatorial regions. **Earth Planets and Space**, v. 51, n. 7-8, p. 579-592, July 1999.

YA'ACOB, N.; ABDULLAH, M.; ISMAIL, M. GPS total electron content (TEC) prediction at ionosphere layer over the equatorial region. In: **Trends in Telecommunications Technologies**. IntechOpen, 2010.

YAMAZAKI, Y.; STOLLE, C.; MATZKA, J.; SIDDIQUI, T. A.; LÜHR, H.; ALKEN, P. Longitudinal variation of the lunar tide in the equatorial electrojet. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 122, n. 12, p. 12,445-12,463, 2017.

YAMAZAKI, YOSUKE. Large lunar tidal effects in the equatorial electrojet during northern winter and its relation to stratospheric sudden warming events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 118, n. 11, p. 7268-7271, 2013.