

SQDESENVOLVIMENTO DE LINHA DE BASE SQ PARA A REGIÃO EQUATORIAL DE SÃO LUÍS - MA, UTILIZANDO CINCO DIAS CALMOS

Laura Luiz Trigo¹, Josiely Aparecida do Espírito Santo Toledo¹, Thainá Barbosa de Lima Cordeiro¹, Virginia Klausner¹, Alan Prestes¹.

¹Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, lauratrigo47@gmail.com, josielytoledo@gmail.com, thainabcordeiro@gmail.com, virginia@univap.br, prestes@univap.br.

Resumo

Este trabalho investiga o comportamento diário da ionosfera na região equatorial, exclusivamente em São Luís, MA (3.9°S, 38.45°W, dip: -9°), durante um período de atividade solar descendente em 2003. Utilizam de dados de ionogramas coletados pela digissonda DGS256, operada pelo INPE como parte do programa EMBRACE. O estudo analisa a variabilidade diária de três parâmetros ionosféricos: Altura virtual mínima da camada F (h'F), frequência crítica da camada F2 (foF2) e altura do pico da camada F2 (hmF2). Foram estabelecidos os cinco dias geomagneticamente mais calmos de outubro de 2003, comparando-os com uma linha de base representativa. A Transformada de Fourier foi empregada para identificação de frequências dominantes e variações espectrais, revelando um período fundamental de 24 horas associado à rotação da Terra e à exposição solar diária, além de seus harmônicos. Os resultados demonstram que, não obstante da variação diurna predominante, fenômenos como bolhas de plasma influenciam, da mesma forma, a variabilidade ionosférica, mesmo em condições de baixa atividade geomagnética. Este estudo contribui para um melhor entendimento da dinâmica ionosférica, auxilia na previsão de propagação de ondas de rádio e no desenvolvimento de sistemas de comunicação e navegação mais eficazes.

Palavras-chave: Ionossonda. Ionosfera. SAO Explorer. Transformada de Fourier. Dias Geomagneticamente Calmos.

Área do Conhecimento: Geociências.

Introdução

A ionosfera é uma camada da atmosfera terrestre que se estende por aproximadamente 50 km a 1000 km de altitude, caracterizada pela presença de íons e elétrons gerados essencialmente pela fotoionização. Este processo ocorre quando a radiação solar, sobretudo nas faixas do ultravioleta extremo e dos raios X, ioniza átomos e moléculas na alta atmosfera. As primeiras sugestões da existência da ionosfera foram baseadas em observações geomagnéticas no século XVIII, quando variações diárias no campo magnético terrestre foram atribuídas a correntes elétricas na alta atmosfera, como sugerido por Carl Friedrich Gauss (RISHBETH *et al.*, 1969). O experimento de transmissão de sinais de rádio por Marconi em 1901, que apontou a reflexão de ondas de rádio por uma camada condutora na alta atmosfera, fornece evidências adicionais para a existência da ionosfera. A teoria magneto-iônica, desenvolvida por Appleton e colaboradores em 1932, tornou-se um modelo fundamental para explicar a interação da ionosfera com ondas de rádio e permanece relevante até os dias atuais (BATISTA, 2011). A dinâmica do plasma ionosférico é fortemente modulada em consequência das variações nos níveis de radiação solar e pelas interações com o vento solar, que pode vir a gerar tempestades geomagnéticas e influenciar a densidade eletrônica da ionosfera.

A ionosfera é influenciada por fatores geográficos e temporais, ademais de anomalias ionosféricas e geomagnéticas, como a anomalia equatorial e a anomalia do Atlântico Sul. A anomalia equatorial é caracterizada por dois picos de alta densidade eletrônica localizados aproximadamente 15° ao norte e ao sul do equador magnético (HUANG *et al.*, 1989). Enquanto a anomalia do Atlântico Sul é um fenômeno ocasionado pelo levantamento de plasma resultante do efeito do eletrojato equatorial (EEJ), uma corrente elétrica intensa que flui ao longo do equador magnético na região E da ionosfera (NIGUSSIE *et al.*, 2022). Este fenômeno é gerado pela interação de campos elétricos diurnos com o

campo magnético terrestre, desempenhando um papel crucial na dinâmica da ionosfera em baixas latitudes e afetando significativamente a propagação de ondas de rádio (ABDU *et al.*, 2012). A orientação quase horizontal do campo geomagnético na região equatorial favorece uma maior absorção da radiação solar, intensificando processos como o sistema de correntes do eletrojato equatorial, a formação de bolhas de plasma e a ocorrência de "spread-F" — fenômenos associados à instabilidade do plasma ionosférico (BALAN *et al.*, 1995).

A teoria do dínamo ionosférico descreve que a geração de campos elétricos pela movimentação de cargas em uma atmosfera parcialmente ionizada, é fundamental para compreender a geração de instabilidades e a formação do eletrojato equatorial. A orientação particular do campo magnético terrestre na região equatorial gera correntes elétricas horizontais que afetam a estrutura da ionosfera e a distribuição de densidades de plasma (WOODMAN *et al.*, 1976). As bolhas ionosféricas são áreas de rarefação de plasma que alinham-se ao longo das linhas de campo geomagnético e propagam-se de oeste para leste, se manifestando nos ionogramas como "spread-F". Esse fenômeno é costumeiro no decorrer dos equinócios, quando a ionização e as condições geomagnéticas estão mais favoráveis à formação de irregularidades na densidade eletrônica. Ademais, sua ocorrência está relativa ao aumento em altitude da região F depois do pôr do Sol, e dá-se somente no período noturno.

Com exceção destas variações irregulares, a ionosfera experimental, igualmente, oscilações regulares na densidade eletrônica devido a fatores como marés atmosféricas, que são influenciadas pela ação gravitacional do Sol e da Lua. Oscilações diárias de 24 horas afetam fundamentalmente, a região E da ionosfera em latitudes tropicais, ao passo que, oscilações de 12 horas são evidentes com maior facilidade em altas latitudes. Essas marés atmosféricas são desenvolvidas pelo aquecimento e resfriamento diário da ionosfera, que geram ondas onde propagam-se e possibilitam a amplificação da densidade eletrônica por meio da interação com ventos atmosféricos.

O objetivo deste artigo é investigar o comportamento diário da ionosfera na região equatorial, especificamente em São Luís, durante o período de atividade solar descendente em 2003. Para isto, foram analisados os cinco dias geomagneticamente mais calmos de outubro de 2003 e comparados a uma linha de base representativa destas datas. Empregando ionogramas processados, o estudo detém enfoque na variabilidade diária de três parâmetros ionosféricos: Altura virtual mínima da camada F ($h'F$), frequência crítica da camada F2 (f_oF2) e altura do pico da camada F2 ($hmF2$). Este estudo visa entender como fatores como a radiação solar e fenômenos locais sugestionam a densidade eletrônica da ionosfera, destacando variações diurnas e a presença de ciclos de 24 horas e seus harmônicos. A pesquisa auxilia para um entendimento mais profundo da variabilidade ionosférica sob condições de baixa atividade geomagnética, essencial para aprimorar previsões da propagação de ondas de rádio, o desenvolvimento de sistemas de comunicação e navegação mais eficazes.

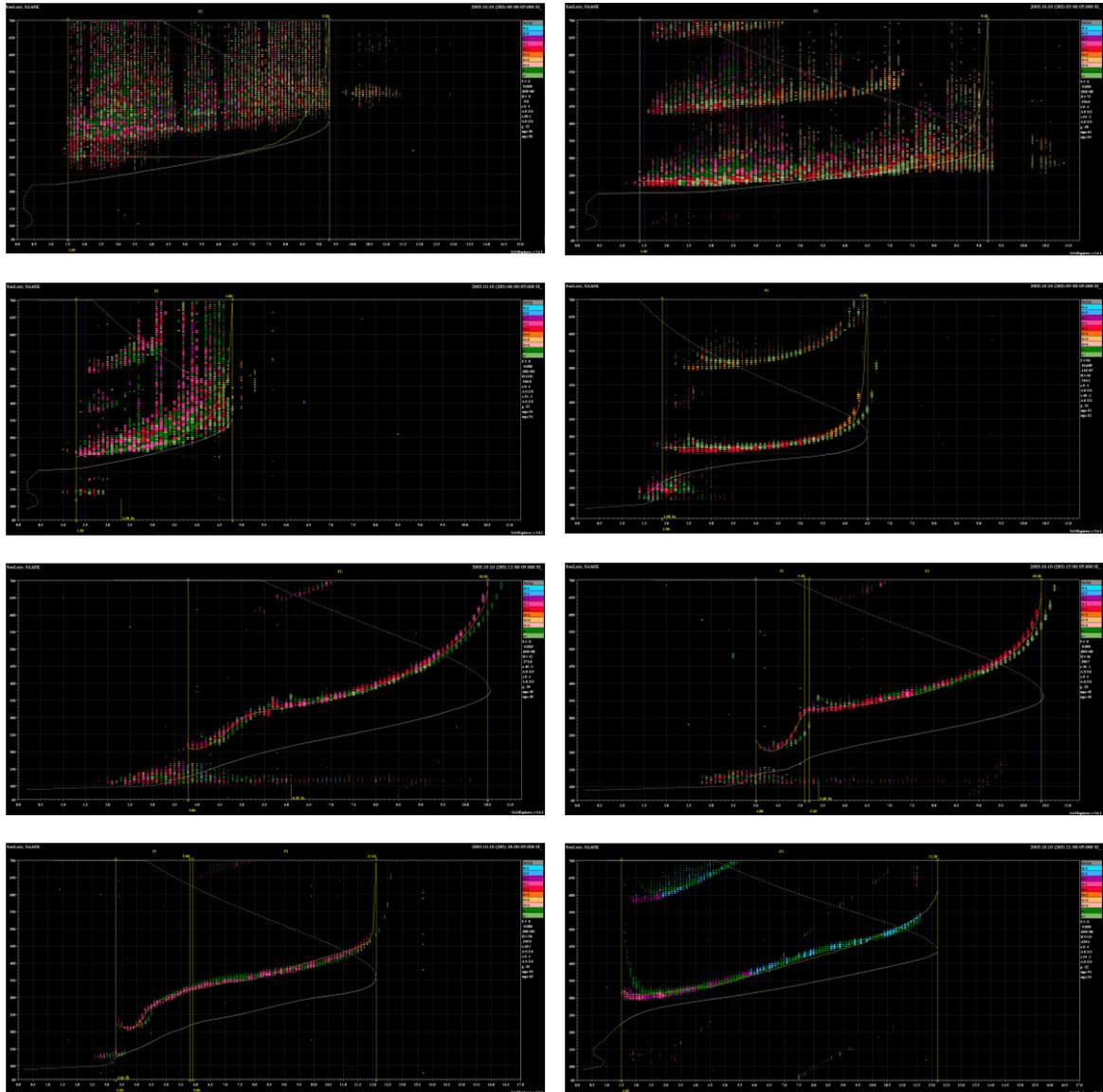
Metodologia

A digissonda DGS256, desenvolvida pela Universidade de Lowell, emite pulsos de alta frequência que são refletidos pelas camadas da ionosfera e captados de volta no solo para análise digital (ABDU *et al.*, 2012). No estudo, dados apurados pela digissonda em São Luís, MA, operada pelo INPE no âmbito do programa EMBRACE, foram analisados manuseando o software SAO Explorer e o programa ARTIST, que automatiza a interpretação dos ionogramas. A Figura 1 ilustra os ionogramas gerados, exibindo a relação entre altura e frequência, e consentindo a determinação de parâmetros ionosféricos, como a frequência crítica (f_oF2), a altura virtual mínima da camada F ($h'F$), e a altura do pico da camada F2 ($hmF2$).

A Figura 1 revela a presença do fenômeno conhecido como "Spread-F". Os traços característicos de "Spread-F" nos ionogramas podem ser categorizados em duas modalidades distintas: "Range Spreading" e "Frequency Spreading". No "Range Spreading", dois ou mais traços são expostos com valores diversificados de altura virtual para o mesmo valor de frequência crítica, indicando um espalhamento de alcance. No "Frequency Spreading", dois ou mais traços com valores dessemelhantes de altura virtual se iniciam a partir de uma determinada frequência, apontando um espalhamento de frequência (RISHBETH *et al.*, 1969). Esses fenômenos são indicativos de irregularidades na densidade eletrônica da ionosfera, que possuem controle ao afetar a propagação de ondas de rádio e são de grande interesse no estudo das condições ionosféricas.

Figura 1 — Ionogramas obtidos em São Luís dispendo do software SAO Explorer, exibindo a

variação da densidade eletrônica e da altura virtual na ionosfera. As imagens foram definidas a cada 3 horas do dia 10 de outubro de 2003, das 00:00 às 23:50 UT. As cores díspares indicam as frequências refletidas pelas camadas ionosféricas, permitindo uma observação da dinâmica diária da ionosfera em baixa latitude durante um dia de condições calmas.



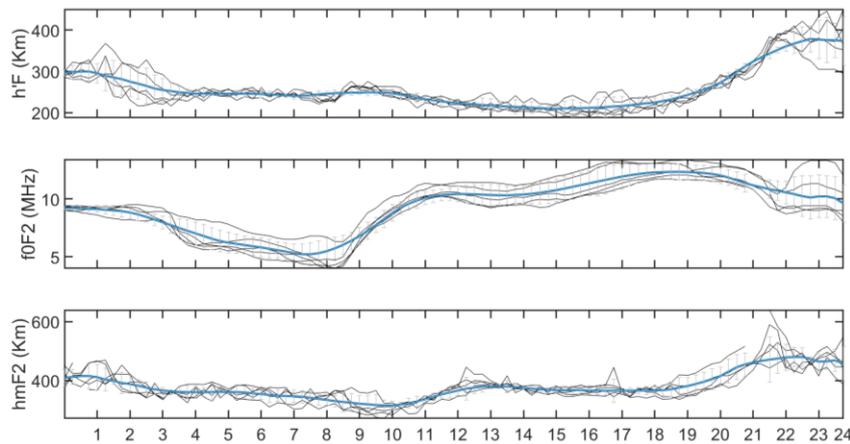
Fonte: Autores (2024).

Resultados

A Figura 2 apresenta a variação diária de três parâmetros ionosféricos — $h'F$ (altura virtual mínima da camada F), $foF2$ (frequência crítica da camada F2) e $hmF2$ (altura do pico da densidade eletrônica na camada F2) — para São Luís, MA, ao longo de um ciclo de 24 horas, no decorrer dos dias geomagneticamente calmos. No painel superior, observa-se que a $h'F$ é reduzida no decorrer de um dia, devido à maior densidade eletrônica e expande à noite, com a redução da ionização. O painel do meio exhibe que a $foF2$ atinge valores máximos no tempo de um dia, refletindo o aumento da densidade eletrônica provocado pela radiação solar intensa, e minimiza-se à noite, conforme a recombinação de íons predomina. No painel inferior, o $hmF2$ mantém-se relativamente estável durante o dia, todavia evidencia um aumento à noite, pontuando uma elevação na altura da camada F2 à medida que a densidade eletrônica diminui em altitudes mais baixas. Estes padrões destacam a influência da

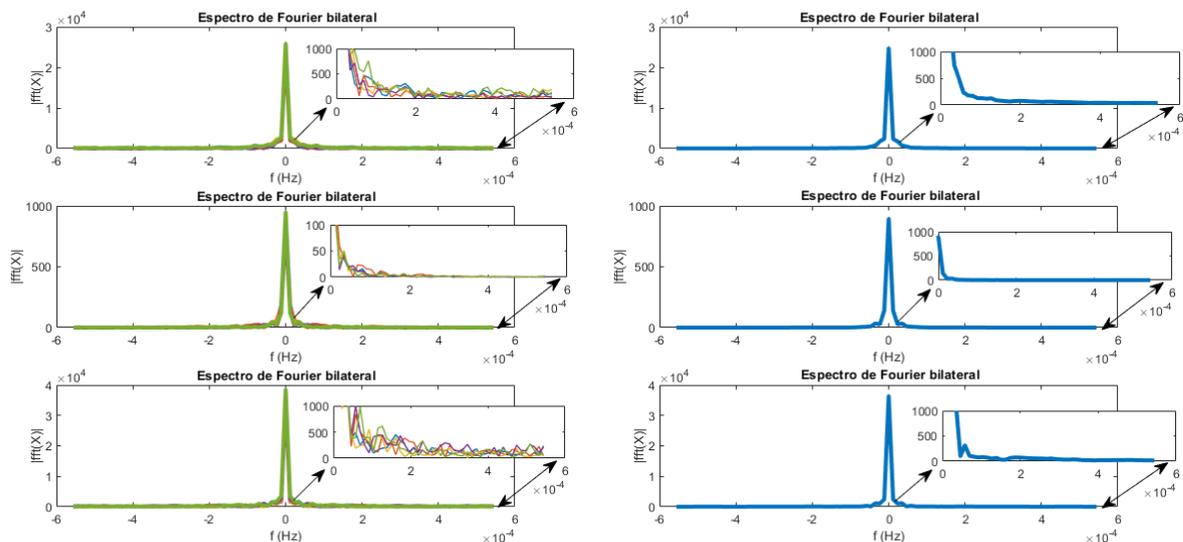
radiação solar e dos processos de recombinação na modulação da ionosfera ao longo do dia em condições de baixa atividade geomagnética.

Figura 2 — Variação diária dos parâmetros ionosféricos h'F, foF2 e hmF2, no espaço dos cinco dias mais calmos (11, 10, 12, 23 e 4) de outubro de 2003. As linhas pretas exprimem os dados individuais de cada dia, em contrapartida, a linha azul denota a média (linha base) suavizada por uma média móvel de três horas.



Fonte: Autores (2024).

Figura 3 — Transformada de Fourier dos parâmetros ionosféricos para cada dia calmo (à esquerda) e para a linha base dos dias calmos (à direita). O zoom na parte superior de cada gráfico destaca o conteúdo espectral, permitindo a visualização das frequências de menor intensidade. A análise espectral evidencia a predominância de componentes de baixa frequência, o que é consistente com variações lentas e suaves nos parâmetros ionosféricos durante dias calmos.



Fonte: Autores (2024).

Para realização da Transformada de Fourier dos dados ionosféricos neste trabalho, desfrutou-se do algoritmo FFT (Fast Fourier Transform) do software MATLAB, que converte dados do domínio do tempo para o domínio da frequência. Ao aplicar essa transformada aos parâmetros ionosféricos, como h'F, foF2, e hmF2, oportuniza a identificação das frequências predominantes que descrevem a variabilidade dos dados ao longo de períodos específicos, como os dias geomagneticamente calmos analisados. A Transformada de Fourier é uma ferramenta matemática essencial que permite transformar uma função

temporal em sua representação no domínio da frequência. Ela decompõe um sinal complexo em uma combinação de ondas senoidais com diversas frequências, amplitudes e fases. Esta técnica é particularmente eficaz para identificação das componentes de frequência presentes em um sinal, sendo excepcionalmente proficiente para análise de dados que exprimem variabilidade periódica ou cíclica.

A Figura 3 expõe espectros de Fourier bilaterais dos parâmetros ionosféricos obtidos para São Luís, MA, no decorrer de dias geomagneticamente calmos indicados. Nos gráficos à esquerda, a Transformada de Fourier foi aplicada aos dados de cada um dos dias calmos (11, 10, 12, 23 e 4 de outubro de 2003). À medida que nos gráficos à direita, a transformada foi disposta a uma linha base representativa, determinada como a média dos parâmetros ionosféricos suavizada por uma média móvel de três horas.

Discussão

Os espectros de Fourier bilaterais na Figura 3 revelam picos de frequência significativos em torno de zero Hertz (Hz), indicando componentes de baixa frequência predominantes nos dados ionosféricos para ambos os conjuntos de gráficos. Esse comportamento é esperado, já que a variabilidade diurna da ionosfera é governada por ciclos de 24 horas referentes à rotação da Terra e à exposição da ionosfera à radiação solar. A concentração de energia espectral em baixas frequências reflete essas variações diurnas, características da resposta ionosférica às mudanças na radiação solar e nos processos de recombinação de íons ao longo do dia e da noite.

Os gráficos à esquerda, que mostram a análise espectral individual de cada dia calmo, evidenciam pequenas variações na distribuição de energia espectral entre os dias, sugerindo que, além da variabilidade diurna dominante, há flutuações de curto período nos parâmetros ionosféricos, atribuíveis a variações geomagnéticas ou na radiação solar, mesmo em dias geomagneticamente calmos. O zoom nesses gráficos destaca componentes de frequência adicionais não uniformemente distribuídos entre os dias analisados.

Nos gráficos à direita, que representam a Transformada de Fourier aplicada à linha de base dos dias calmos, nota-se maior uniformidade na distribuição de energia espectral em torno da frequência zero após a suavização dos dados com uma média móvel de três horas. Essa suavização reduz o ruído e enfatiza os componentes periódicos dominantes, permitindo uma visão mais clara dos ciclos de 24 horas e seus harmônicos, que indicam oscilações adicionais decorrentes de múltiplos inteiros do ciclo principal, sugerindo outras oscilações regulares que influenciam a ionosfera.

Além das variações de baixa frequência observadas, os resultados sugerem a presença de fenômenos ionosféricos como o "spread F" e bolhas de plasma. Essas instabilidades aparecem na análise espectral como flutuações de frequência mais altas e variáveis, refletidas em componentes espectrais adicionais em determinados dias calmos analisados. Essas bolhas podem manifestar-se como oscilações de alta frequência nos dados espectrais, dependendo de sua ocorrência e desenvolvimento, sugerindo que esses fenômenos contribuíram para as variações observadas, mesmo em condições geomagneticamente calmas..

Conclusão

Este estudo examinou o comportamento diário da ionosfera sobre São Luís, MA, no decurso de um período de atividade solar descendente em 2003, aplicando dados de ionogramas coletados por digissonda. A análise focou-se em três parâmetros ionosféricos principais — $h'F$, foF_2 e hmF_2 — para identificação de variações diurnas e dos padrões cíclicos associados à rotação da Terra. A aplicação da Transformada de Fourier aos dados possibilitou revelar a predominância de um período fundamental de 24 horas e a presença de seus harmônicos, evidenciando a resposta da ionosfera às mudanças diárias na radiação solar. Os resultados indicam que, ainda que em dias geomagneticamente calmos, a variabilidade ionosférica é influenciada por fenômenos adicionais como o "spread F" - bolhas de plasma que introduzem instabilidades na densidade eletrônica da ionosfera. Estes fenômenos são comumente evidenciados no período noturno e em períodos de transição entre o dia e a noite, favorecendo oscilações de frequência mais altas analisadas nos espectros de Fourier. Em suma, este estudo reforça a complexidade da dinâmica ionosférica, destacando a indispensabilidade de monitoramento contínuo, e de uma análise detalhada para prever adequadamente os efeitos ionosféricos em tecnologias dependentes da propagação de ondas de rádio. Futuras pesquisas têm

potencial de focar em períodos de maior atividade geomagnética para comparação da influência destas condições na variabilidade ionosférica.

Referências

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; CARRASCO, A. J.; BRUM, C. G. M. **South Atlantic Magnetic Anomaly Modulation of Equatorial Spread F: A Review and a New Focus on Thermosphere Gravity Wave Seeding.** *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, v. 73, n. 11-12, p. 1330-1343, 2012.

ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; REINISCH, B. W.; MACDOUGALL, J. W.; KHERANI, E. A.; SOBRAL, J. H. A. **Equatorial range spread F echoes from coherent backscatter, and irregularity growth processes, from conjugate point digital ionograms.** *Radio Science*, v. 47, n. 5, 2012.

BALAN, N.; BAILEY, G. J. **Equatorial plasma fountain and its effects: Possibility of an additional layer.** *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 100, n. A11, p. 21421-21432, 1995.

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; NOGUEIRA, P. A.; PAES, R. R.; DE SOUZA, J. R.; REINISCH, B. W.; RIOS, V. H. **Early morning enhancement in ionospheric electron density during intense magnetic storms.** *Advances in Space Research*, v. 49, n. 11, p. 1544-1552, 2012.

BATISTA, I.S. **Formato de gravação dos dados da digissonda 256.** 1990. 33 f. Dissertação (Qualificação em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 1990.

HUANG, Y. N.; CHENG, K.; CHEN, S. W. **On the equatorial anomaly of the ionospheric total electron content near the northern anomaly crest region.** *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 94, n. A10, p. 13515-13525, 1989.

NIGUSSIE, Melessew; JAKOWSKI, Norbert; HOQUE, Mainul. **Characterization and climatological modeling of equatorial ionization anomaly (EIA) crest position.** *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 127, n. 12, p. e2022JA030798, 2022.

RISHBETH, Henry; GARRIOTT, Owen K. **Introduction to ionospheric physics.** *Introduction to ionospheric physics*, 1969.

WOODMAN, R. F.; LA HOZ, C. (1976). **Radar observations of F region equatorial irregularities.** *Journal of Geophysical Research*, 81(31), 5447-5466.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa EMBRACE/INPE do MCTI por prover os dados de digissonda de São Luís para este trabalho. Agradecemos à Prof^a Virginia e ao Prof. Alan pela orientação e suporte durante o desenvolvimento deste estudo. Por fim, agradecemos também às nossas famílias e amigos pelo apoio durante este processo.