

DESENVOLVIMENTO DE LINHA DE BASE SQ PARA A REGIÃO DA CRISTA DA ANOMALIA DE IONIZAÇÃO EQUATORIAL

Josiely Aparecida do Espírito Santo Toledo¹, Laura Luiz Trigo¹, Thainá Barbosa de Lima Cordeiro¹, Virgínia 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, josielytoledo@gmail.com, lauratrigo47@gmail.com, thainablcordeiro@gmail.com, virginia@univap.br, prestes@univap.br.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento diário da ionosfera sobre a região da crista da anomalia equatorial em Cachoeira Paulista ($22,5^{\circ}\text{S}$, 45°W , dip latitude 17°S) durante o período de atividade solar descendente em 2003. Para isso, foram utilizados os cinco dias geomagneticamente mais calmos e uma linha de base representativa. A análise usou uma digissonda, um radar que opera na faixa de radiofrequência de 1 a 20 MHz e gera ionogramas que mostram a reflexão das ondas de rádio nas camadas ionosféricas. Os ionogramas obtidos são posteriormente visualizados, processados e analisados. São considerados três parâmetros ionosféricos fundamentais: a altura virtual mínima da camada F ($h'F$), a frequência crítica da camada F2 ($foF2$) e a altura do pico da camada F2 ($hmF2$). O comportamento da ionosfera é influenciado por processos dinâmicos, como a variação da densidade eletrônica causada pela radiação solar e a presença de fenômenos locais, que introduzem variabilidades adicionais, afetando parâmetros como $h'F$, $foF2$ e $hmF2$. Os resultados indicam a presença de um ciclo de 24 horas, associado à rotação da Terra e à exposição solar.

Palavras-chave: Ionossonda. SAO Explorer. Dias Geomagneticamente Calmos. Ionosfera. Anomalia de Ionização Equatorial.

Área do Conhecimento: Geociências

Introdução

A ionosfera da Terra é uma camada de gás parcialmente ionizado que envolve o planeta, servindo como a fronteira entre a atmosfera terrestre e o espaço (NOGUEIRA, 2009). Situada entre aproximadamente 50 km e 1000 km de altitude, a ionosfera é caracterizada pela presença significativa de elétrons livres, que influenciam a propagação de ondas de rádio (DAVIES, 1990). O principal mecanismo responsável pela geração desses elétrons livres é a fotoionização, onde a radiação solar, especialmente nas faixas do ultravioleta extremo e dos raios X, é absorvida, resultando na ionização de átomos e moléculas.

Além da fotoionização, a ionosfera é influenciada por complexas interações dinâmicas e eletrodinâmicas, especialmente na região da crista da anomalia equatorial. Essa região é significativamente afetada pelo efeito do eletrojato equatorial (EEJ), uma corrente elétrica intensa ao longo do equador magnético que, junto com campos elétricos diurnos, eleva o plasma ionosférico a altitudes maiores, intensificando a densidade eletrônica nas cristas da anomalia equatorial (ABDU *et al.*, 2005). Este fenômeno, conhecido como anomalia de Appleton ou anomalia equatorial, resulta em dois máximos de densidade eletrônica localizados cerca de 15° a 20° ao norte e ao sul do equador geomagnético. A variação diurna da ionosfera, impulsionada pela ionização solar durante o dia e a recombinação de íons durante a noite, modula continuamente a densidade eletrônica nessa região, exacerbando a variabilidade ionosférica e impactando diretamente as comunicações por rádio e sistemas de navegação por satélite (RISHBETH *et al.*, 1969).

A anomalia equatorial também apresenta variações consideráveis ao longo do dia e entre as estações, atingindo seu ponto máximo durante os equinócios e sendo um pouco mais pronunciada no inverno do que no verão (HUANG *et al.*, 1989). As posições dos picos da Anomalia de Ionização Equatorial (EIA) variam com a longitude e o fluxo solar, e a distância entre os picos dos hemisférios norte e sul tende a aumentar ligeiramente com o aumento do fluxo solar (NIGUSSIE *et al.*, 2022). Essa variabilidade latitudinal e sazonal da anomalia equatorial reflete a complexa interação entre fatores solares, geomagnéticos e atmosféricos, que controlam a dinâmica da ionosfera e influenciam significativamente a sua estrutura e comportamento.

O objetivo deste artigo é investigar o comportamento diário da ionosfera na região da crista da anomalia equatorial, especificamente em Cachoeira Paulista, durante o período de atividade solar descendente em 2003. Para atingir esse objetivo, foram selecionados os cinco dias geomagneticamente mais calmos do mês de outubro de 2003 para análise, comparando-os com uma linha de base representativa desses dias calmos. Utilizando ionogramas processados focou-se na variabilidade diária de três parâmetros ionosféricos: a altura virtual mínima da camada F ($h'F$), a frequência crítica da camada F2 ($foF2$) e a altura do pico da camada F2 ($hmF2$) utilizando o software SAO Explorer para praticar a obtenção de escalas e medições a partir de ionogramas. Este estudo busca compreender como variáveis como a radiação solar e fenômenos locais influenciam a densidade eletrônica da ionosfera, proporcionando uma análise das variações diárias e a presença de ciclos de 24 horas e seus harmônicos, contribuindo para um melhor entendimento da variabilidade ionosférica em condições de baixa atividade geomagnética.

Metodologia

A digissonda DGS256, desenvolvida pela Universidade de Lowell, nos Estados Unidos, emite pulsos de alta frequência que são refletidos na ionosfera, sendo posteriormente recebidos e armazenados digitalmente (BATISTA, 1990). Neste estudo, utilizamos dados das digissondas DGS256 instaladas em Cachoeira Paulista (SP), mantidas pelo INPE como parte do programa EMBRACE.

Para a análise dos dados, foi utilizado o software de edição manual de ionogramas SAO Explorer. Complementarmente, o programa de processamento *Automatic Real-time Ionogram Scaler with True height* (ARTIST) automatiza a interpretação dos ionogramas. No sistema existente, os sinais são exibidos na tela de um microcomputador na forma de ionogramas, onde o eixo horizontal representa a frequência em (MHz) e o eixo vertical a altura virtual (Km), (SANTOS et al., 2005).

A Figura 1 apresenta ionogramas obtidos em função da altura e frequência, permitindo a determinação de importantes parâmetros ionosféricos, como a frequência crítica ($foF2$), a altura virtual mínima ($h'F$) e a altura do pico da camada F2 ($hmF2$). O parâmetro $h'F$ refere-se à altura virtual mínima da camada F, indicando a altura da base desta camada na ionosfera sem levar em conta o atraso de propagação da luz no meio magneto-iônico. O parâmetro $hmF2$ corresponde à altura do pico da camada F2, onde a densidade eletrônica é máxima. Já a $foF2$ representa a frequência crítica da onda ordinária na camada F2, que é a frequência máxima em que ocorre a reflexão das ondas eletromagnéticas na ionosfera.

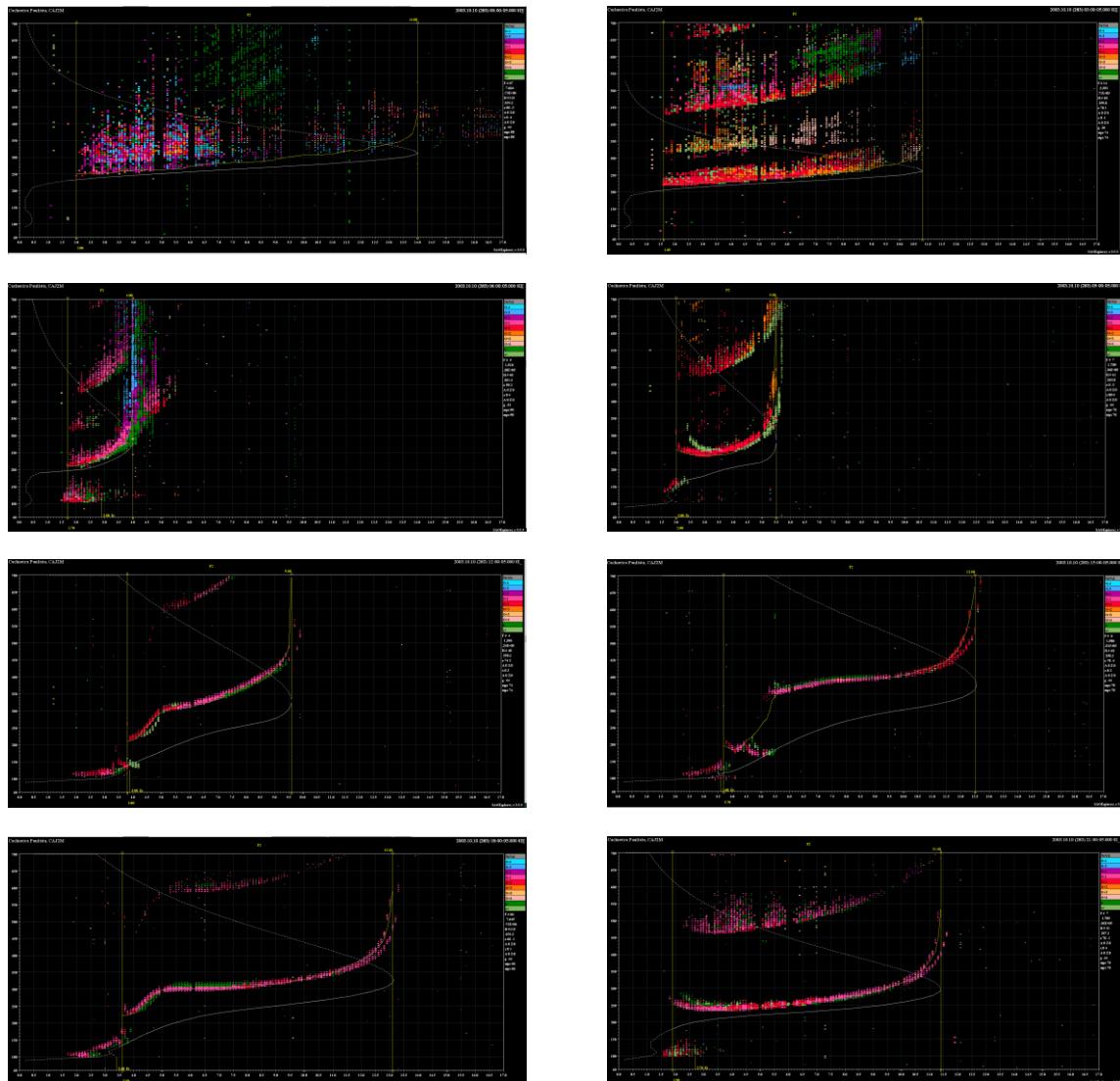
Os ionogramas também mostram o fenômeno conhecido como “spread-F”, que aparece como um alargamento difuso das traçadas das reflexões das ondas de rádio nos ionogramas. O spread-F é causado por irregularidades na densidade eletrônica da ionosfera, que ocorrem principalmente após o pôr do sol, quando a ionosfera passa por um período de recombinação e a distribuição de plasma se torna mais instável. Este fenômeno é mais comum em baixas latitudes, como em Cachoeira Paulista, e é influenciado por processos como instabilidades no plasma ionosférico e a formação de bolhas de plasma. O spread-F é mais frequentemente observado durante os meses de equinócio, como outubro, devido à combinação de fatores geomagnéticos e de radiação solar que favorecem a ocorrência de instabilidades ionosféricas. Durante este período, a ionização residual da ionosfera e a dinâmica do campo magnético terrestre promovem condições ideais para o surgimento de irregularidades na densidade eletrônica, que são captadas como spread-F nos ionogramas.

Além disso, a figura ilustra a variação diurna típica da ionosfera em baixas latitudes, caracterizada por um ciclo de aumento e diminuição da densidade eletrônica ao longo do dia. Durante o dia, a densidade eletrônica aumenta devido à ionização intensa causada pela radiação solar ultravioleta e raios X, atingindo seu pico ao meio-dia local, quando o Sol está mais alto no céu. À noite, ocorre a recombinação dos íons, reduzindo a densidade eletrônica e diminuindo a frequência crítica ($foF2$). Este ciclo diurno é influenciado pela variação da radiação solar, pela rotação da Terra e pelos processos dinâmicos na atmosfera superior, como ventos neutros e correntes elétricas.

A escolha dos dias calmos (Sq-days) foi baseada no índice K_p , o que utiliza três critérios: a soma dos oito valores diários de K_p , a soma dos quadrados desses valores e o valor máximo de K_p em cada dia. O índice planetário K_p é calculado a cada 3 horas ou por sua somatória diária (24h), (BARTELS, 1949).

Figura 1 - Ionogramas obtidos em Cachoeira Paulista utilizando o software SAO Explorer, apresentando a variação da densidade eletrônica e da altura virtual na ionosfera. As imagens foram selecionadas a cada 3 horas do

dia 10 de outubro de 2003, das 00:00 às 23:50 UT. As diferentes cores indicam as frequências refletidas pelas camadas ionosféricas, em baixa latitude durante um dia de condições calmas.



Fonte: Autores (2024).

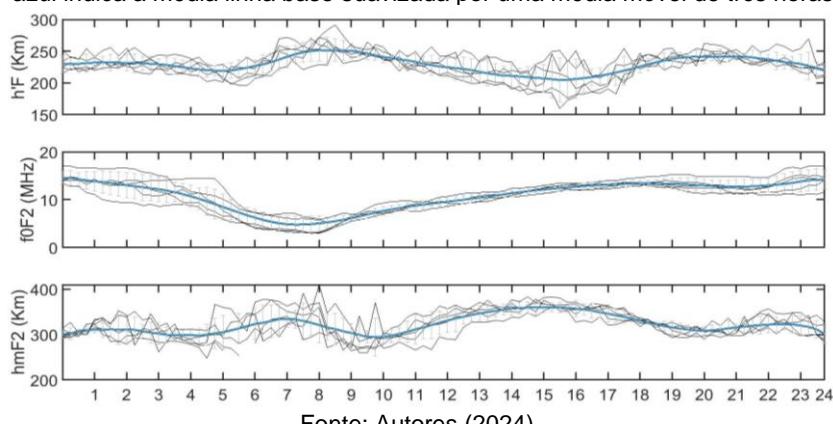
Resultados

A Figura 2 ilustra as variações diárias de três parâmetros ionosféricos — $h'F$, $foF2$ e $hmF2$ — durante os cinco dias mais calmos de outubro de 2003. Para a análise dos dados na Figura 2, o período diurno foi considerado das 10:00 às 20:00 UT (07:00 - 17:00 LT), que corresponde ao intervalo de maior exposição à radiação solar, influenciando a ionização e a densidade eletrônica na ionosfera. O período noturno foi definido entre 22:00 e 08:00 UT (19:00 - 05:00 LT), onde a recombinação dos íons domina, resultando em uma diminuição da densidade eletrônica. Os períodos de transição — amanhecer (08:00 às 10:00 UT) e entardecer (20:00 às 22:00 UT) —correspondem à influência de efeitos transitórios complexos que ocorrem durante essas fases de mudança de iluminação solar.

A Figura 3 apresenta a análise espectral dos parâmetros ionosféricos utilizando a Transformada de Fourier para identificar as principais variabilidades e frequências dominantes em dias calmos (11, 10, 12, 23 e 4) de outubro de 2003. Os gráficos à esquerda mostram a Transformada de Fourier aplicada a cada um dos dias calmos selecionados, enquanto os gráficos à direita representam a Transformada de Fourier da linha base, que é a média dos parâmetros ionosféricos suavizada com uma média móvel de três horas. Nos gráficos da esquerda, cada linha representa o conteúdo espectral de um dia calmo individual. O zoom

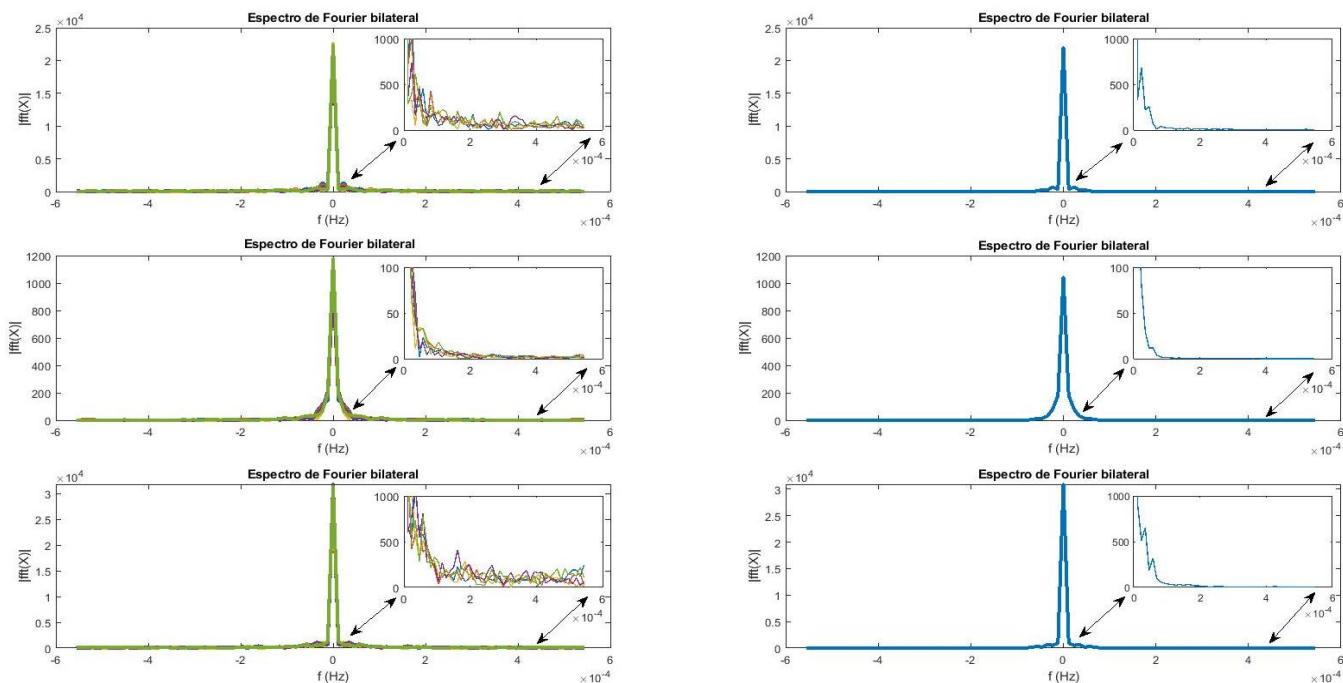
na parte inferior desses gráficos destaca as variabilidades espectrais específicas que ocorrem em cada dia, permitindo a identificação de flutuações diárias e de curto prazo nos parâmetros ionosféricos. Os gráficos à direita ilustram a Transformada de Fourier da linha base dos dias calmos, que foi suavizada para reduzir o ruído e enfatizar os componentes periódicos dominantes. O zoom mostra claramente a presença de um período de 24 horas, associado à rotação da Terra e à exposição diária à radiação solar, que representam múltiplos inteiros deste período principal.

Figura 2 -Variação diária dos parâmetros ionosféricos h'F, foF2 e hmF2 durante os cinco dias mais calmos (11, 10, 12, 23 e 4) de outubro de 2003. As linhas pretas representam os dados individuais de cada dia, enquanto a linha azul indica 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, evidenciando as variabilidades e os períodos dominantes, incluindo o período de 24 horas e seus harmônicos.



Fonte: Autores (2024).

Discussão

Na Figura 2, os dados mostram uma variação clara nos parâmetros h'F, foF2 e hmF2, refletindo a resposta da camada F da ionosfera às mudanças entre os períodos diurno e noturno. Durante o dia, a densidade eletrônica tende a aumentar, elevando os valores de foF2 e influenciando as altitudes h'F e hmF2 devido à intensa ionização causada pela radiação solar. À noite, a redução na ionização leva à recombinação, diminuindo a densidade eletrônica e ajustando os valores dos parâmetros observados.

A Figura 3 apresenta uma análise detalhada dos parâmetros ionosféricos através da Transformada de Fourier, tanto para dias calmos específicos quanto para uma média representativa de dias calmos ("linha base"). A utilização da Transformada de Fourier permite decompor os sinais temporais em seus componentes de frequência, revelando as principais variabilidades e periodicidades presentes nos dados ionosféricos.

Nos gráficos à esquerda da Figura 3, a Transformada de Fourier é aplicada individualmente a cada um dos dias calmos selecionados. Essa análise evidencia a presença de diferentes componentes espectrais, refletindo variabilidades específicas que ocorrem em cada dia. Através do zoom no conteúdo espectral, é possível observar flutuações diárias e de curto prazo nos parâmetros ionosféricos, que podem estar associadas a fenômenos ionosféricos locais, como o "spread-F" ou variações na densidade eletrônica causadas por mudanças na radiação solar ou por efeitos geomagnéticos de pequena escala ou presença de MSTIDs, "Distúrbios Ionosféricos Propagantes de Média Escala" (*Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances*).

Os gráficos à direita mostram a Transformada de Fourier aplicada à "linha base", que representa a média dos parâmetros ionosféricos dos dias calmos, suavizada para reduzir variações na densidade eletrônica causadas por mudanças locais e destacar os componentes periódicos dominantes. O zoom nessa área revela a clara presença de um período de 24 horas, que é associado ao ciclo diário de rotação da Terra e à exposição regular da ionosfera à radiação solar. Este período de 24 horas é a principal característica da variabilidade diurna na ionosfera e reflete a resposta da ionosfera às variações na intensidade da radiação ultravioleta e de raios X do Sol durante o dia e à recombinação de íons durante a noite. Além do período de 24 horas, também são evidentes os harmônicos desse período, que correspondem a múltiplos inteiros do período principal. A presença desses harmônicos indica que, além do ciclo diário, há outras oscilações regulares que ocorrem com frequência maior, como oscilações semidiurnas ou terdiurnas, que podem estar associadas a ondas atmosféricas ou a interações mais complexas entre a ionosfera e a magnetosfera.

Conclusão

Este estudo investigou o comportamento diário da ionosfera na região da crista da anomalia equatorial em Cachoeira Paulista durante um período de atividade solar descendente em 2003, utilizando dados de ionogramas obtidos através de uma digissonda. A análise de cinco dias geomagneticamente calmos e de uma linha de base média representativa desses dias permitiu observar variações significativas nos parâmetros ionosféricos h'F, foF2 e hmF2. Os resultados destacaram que o comportamento da ionosfera é fortemente modulado pela radiação solar, com um ciclo claro de 24 horas devido à rotação da Terra, que influencia diretamente a densidade eletrônica da camada F.

A presença de distúrbios como o "spread-F" e MSTIDs (Distúrbios Ionosféricos Propagantes de Média Escala) foi evidente nos dados, demonstrando a importância de fenômenos locais e geomagnéticos na modulação da variabilidade ionosférica. A análise espectral por meio da Transformada de Fourier revelou não apenas o ciclo principal de 24 horas, mas também a presença de harmônicos, indicando oscilações adicionais que contribuem para a complexidade da dinâmica ionosférica.

Essas observações são fundamentais para melhorar a compreensão dos processos que governam a variabilidade ionosférica em regiões de baixa latitude e fornecer informações valiosas para aplicações práticas, como a previsão da propagação de ondas de rádio e o desenvolvimento de sistemas de comunicação e navegação. Futuras pesquisas poderão explorar mais a fundo as variações sazonais e a influência de diferentes condições geomagnéticas para expandir o conhecimento sobre a dinâmica ionosférica em regiões de baixa latitude.

Referências

ABDU, M.A., I.S. Batista, A.J. Carrasco, C.G.M. **South Atlantic magnetic anomaly ionization: A review and a new focus on electrodynamic effects in the equatorial ionosphere** - Brum Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, 12245 970 São José dos Campos, 2005.

BARTELS, J., 1949. **The standardized index, K_s, and the planetary index, K_p**, IATME Bull. 12b, 97-120.

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.

DAVIES, K. **Ionospheric Radio** (London: Peter Pergrinus). 1990.

HUANG, Yinn-Nien; CHENG, Kang; CHEN, Sen-Wen. 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.

NOGUEIRA, Paulo Alexandre Bronzato. **Estudo da anomalia de ionização equatorial e dos ventos termosféricos meridionais durante períodos calmos e perturbados na região de baixas latitudes brasileira**. 2009.

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

DOS SANTOS, Karina Martinelli; FAGUNDES, Paulo Roberto; KLAUSNER, Virgínia.

Estudo do comportamento da região F durante períodos geomagneticamente perturbados para atividade solar máxima (2000-2001) E MÍNIMA (2005).

Universidade do Vale do Paraíba – UNIVAP, Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento – IP&D, São José dos Campos, 2007.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) - processo 109825/2024-1. Os autores agradecem ao programa EMBRACE/INPE do MCTI por prover os dados de digissonda de Cachoeira Paulista para este trabalho.