

**ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DAS CAMADAS
ESPORÁDICAS BASEADO EM DADOS DE
SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA
PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E
PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/CNPq/INPE

Laís Luz Campos (Ufscar, Bolsista PIBIC/CNPq)

Email: laisluz@estudante.ufscar.br

Dra. Láysa Cristina Araujo Resende Chagas (CGCEA/INPE, Orientadora)

Email: laysa.resende@inpe.br

Dr. Clezio Marcos De Nardin (Direção, Co-orientador)

Email: clezio.denardin@inpe.br

**ESTUDO DA ELETRODINÂMICA DAS CAMADAS
ESPORÁDICAS BASEADO EM DADOS DE
SONDADORES DIGITAIS E MODELAGEM NUMÉRICA
PARA APLICAÇÃO NO MONITORAMENTO E
PREVISÃO DO CLIMA ESPACIAL**

Laís Luz Campos

Iniciação Científica em Geofísica
Espacial, orientada pela Dra.
Laysa. C.A. Resende Chagas e
Dr. Clezio Marcos De Nardin

INPE

São José dos Campos

2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE pela oportunidade de estudos e utilização de seus recursos e instalações. Ao coordenador do Programa PIBIC/INPE – CNPq pela oportunidade de estar em contato com o mundo científico.

A minha orientadora Dra Laysa C. A. Resende Chagas, por todo apoio, dedicação, conselhos, ideias compartilhadas, pelas correções às vezes fora do seu horário de trabalho, pelo carinho e compressão que sempre teve e pela atenção que dedicou durante este trabalho. Ao meu co-orientador Clezio Marcos De Nardin pelo suporte nessa pesquisa e apoio nos momentos difíceis.

Aos pesquisadores e colegas do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE pela ajuda e consideração que recebi em momentos difíceis.

A minha mãe, Ednalva, por me indicar o caminho e por me dar forças para trilhá-lo.

Por fim, a minha família e amigos, em especial meu pai, Alexandre Rodrigues Campos, e minha irmã Alexia Rodrigues Campos Luz, pelo apoio, ensinamentos, consolo e principalmente o amor que sempre ofereceram.

RESUMO

A ionosfera é a parte superior da atmosfera, que se estende entre aproximadamente 60 até 2000 km de altura, na qual existem partículas ionizadas e elétrons livres, gerando uma camada condutora de plasma. Esta camada está basicamente dividida em 3 regiões, chamadas de D, E e F, sendo que a camada F é subdividida em camada F1 e F2. Na região E ionosférica, objeto do nosso estudo, ocorrem adensamentos do plasma denominadas camadas E-esporádicas (Es). Essa como as demais camadas ionosféricas afetadas por diversos fenômenos, como tempestade magnética e variações do fluxo solar. Portanto, pode-se considerar que a ionosfera no setor brasileiro é um importante parâmetro em termos de Clima Espacial. Nesse contexto, este trabalho analisou a relação de ocorrência de *flare* solares, associados ou não a tempestades magnéticas, com a dinâmica das camadas Es e região F nos ionogramas. Os *flare* solares são filamentos que se desprendem do Sol carregados de partículas de Raios-X. Quando orientados em direção a Terra eles são detectados através do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*) e são divididos em níveis de intensidade A, B, C, M e X. Os resultados mostraram que quando ocorrem os *flare* solares de alta intensidade no fluxo de Raios-X (classes M ou X), os sinais de rádio das camadas Es e das regiões E e F podem ser absorvidos. Esse fenômeno é denominado de “*blackouts*”, pois ao absorver as ondas de rádio com comprimento de onda na faixa do HF prejudica o estudo ionosférico utilizando ionogramas. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo de casos da relação entre as ocorrências dos *flares* solares e as camadas ionosféricas. Para isso, foram utilizadas as estações de São Luís - MA (2° 31' S, 44° 16' O), Cachoeira Paulista - SP (22° 39' S, 45° 00' O) e Boa Vista - RR (02° 49' N, 60° 40' O) entre o período de 2022 e 2023. Os resultados deste trabalho mostram que os *flares* solares interferem de maneira distinta nas regiões ionosféricas brasileiras.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.2 - A estrutura solar indicando as posições relativas das regiões	11
Figura 1.3 - Estrutura e atmosfera solar	13
Figura 1.4 - Seção transversal norte-sul da cavidade geográfica e do fluxo de plasma .	14
Figura 1.5 - Mancha solar, mostrando sua composição, umbra e penumbra.....	15
Figura 1.6 - Uma montagem, de onze anos de imagem, demonstrando a variação na atividade solar.....	16
Figura 1.7- Gráfico de previsão revela aumento da atividade solar.	17
Figura 1.8-Explosão de classe X explodindo no lado direito do Sol.....	18
Figura 1.9 - Uma ejeção de massa coronal, SOHO Consortium	19
Figura 1.10 -Tempestades solares explosivas, chamadas de ejeções de massa coronal .	20
Figura 2.1 -Classificação da Atmosfera Terrestre Ionizada.	21
Figura 2.2 - Processo de ionização que ocorre na atmosfera terrestre.....	23
Figura 2.3 - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas.....	24
Figura 2.5 - Atmosfera neutra representada pela temperatura e a atmosfera ionizada ...	28
Figura 3.1- Fotos da digissonda do tipo DPS onde (a) é a antena transmissora, (b) é a antena receptora e (c) é o sistema de controle, pré-processamento e transmissão de dados.	31
Figura 3.2 - Ionograma da estação de São Luís – MA do dia 29 de outubro de 2003, às 09 h 45 min que mostra a região E, subdividida em camada E e camada Es, e a região F.	32
Figura 3.3 - Interface do programa SAO-X e algumas das ferramentas que o programa fornece para visualização e monitoramento da Ionosfera.	33
Figura 4.1 - Efeito de uma explosão solar de alta intensidade na ionosfera.....	35
Figura 4.2 - Horário de alguns ionogramas para a região de Boa Vista em 10 de maio de 2022 para a região E (parte superior) e região F (parte inferior). A escala dos ionogramas	

vão de 0 até 500 km de altura para a região E e 0 até 700 km para a região F. A frequência é dada em Mhz e varia de 0 até 10 para ambas as regiões.	37
Figura 4.3 - Ionogramas para a região de Cachoeira Paulista em 12 de fevereiro de 2022 para os horários de 07:10 UT, 07:30 UT, 08:20 UT e 08:40 UT mostrando as regiões E, F e camadas Es. A escala dos ionogramas vão de 0 até 700 km de 0 até 15 MHz em relação a frequência.....	39
Figura 4.4 - Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 30 de março de 2022. Os gráficos ilustram as regiões E e F, as representações verticais dos ionogramas variam de 0 a 700 km, enquanto as representações horizontais das frequências abrangem de 0 a 15 MHz.....	40
Figura 4.5 - Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 10 de maio de 2022, abrangendo os momentos de 13:50 UT, 14:00 UT, 14:20 UT e 14:30 UT.....	41
Figura 4.6 - Ionograma para a região de São Luís em 30 de março de 2022. São apresentados os ionogramas correspondentes aos diferentes horários, 16:30 UT, 16:40 UT, 17:20 UT e 17:30 UT.....	42
Figura 4.7 - Ionograma para a região de São Luís em 10 de maio de 2022. Análise dos ionogramas aponta detalhes interessantes sobre a ionosfera nas regiões E e F. A escala vertical abrange altitudes de 0 a 700 km, enquanto a escala horizontal se estende de 0 a 15 MHz.....	42
Figura 4.8 - Análise do tempo de interação entre flare solar e ionosfera no dia 14/01/2022 para a região de Boa Vista, Cachoeira Paulista e São Luís.	44
Figura 4.9 - Ionograma para Cachoeira Paulista, onde a frequência passou está em torno de 6 MHz.	45
Figura 4.10 - Análise do tempo de interação entre flare solar e ionosfera no dia 30/03/2022 Para a região de Cachoeira Paulista e São Luís.....	45
Figura 4.11 - Avaliação da extensão temporal da interação entre os eventos solares e a ionosfera no dia 14 de janeiro de 2022, contemplando as localidades de Boa Vista, Cachoeira Paulista e São Luís.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Principais características do Sol	10
Tabela 4.2- Análise de flares solares na região de Boa Vista	36
Tabela 4.3 - Análise de flares solares em Cachoeira Paulista.....	38
Tabela 4.4 - Análise de flares solares em São Luís.....	41
Tabela 4.5 - Dias de ocorrência dos flares solares ocorreram e os horários em que cada região analisada que tiveram adensamentos nas camadas Es.....	43

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
CAPÍTULO 1 – REVISÃO TEÓRICA	10
1.1 O Sol	10
1.2 Estrutura Solar	10
1.2.1 Interior Solar	11
1.3 Atmosfera Solar	11
1.3.1 Fotosfera	11
1.3.2 Cromosfera.....	12
1.3.3 Coroa Solar	12
1.4 Vento Solar	13
1.5 Manchas Solares	14
1.6 Manchas Solares e Atividade Solar	15
1.7 Tempestades Magnéticas	18
CAPÍTULO 2 – IONOSFERA	21
2.1 Ionosfera Terrestre	21
2.2 Formação da Ionosfera.....	22
2.3 Produção Iônica	22
2.4 Regiões Ionosféricas	24
2.5 Perda de Ionização	27
2.6 Definição de Plasma Ionosférico	28
2.7 Processos de Transporte de Ionização.....	29
CAPÍTULO 3 – INSTRUMENTAÇÃO	30
3.1 Digissonda.....	30
3.2 Características da Digissonda	30
3.3 Dados da digissonda	31
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
4.1 Resultado I - Influência dos <i>Flares</i> Solares de Classes M e X na Ionosfera do Setor Brasileiro	34

4.2 Resultados II - Adensamentos das camadas Es durante os dias que ocorreram flares solares.....	43
CONCLUSÃO.....	47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

INTRODUÇÃO

Neste trabalho serão apresentados os estudos realizados nos meses de setembro de 2022 até julho de 2023. Neste período foram realizados dois estudos teóricos a fim de iniciar o desenvolvimento da pesquisa referente a geofísica espacial. Um dos trabalhos refere-se ao Sol, na qual os tópicos abordados foram a estrutura solar, atividade solar, manchas solares e tempestades magnéticas. Em seguida, foi realizado um trabalho sobre a ionosfera, aonde foi estudado as principais características das regiões D, E e F, e das camadas Esporádicas (Es). Os efeitos de eventos de clima espacial, como *flares* solares e tempestades magnéticas também foram abordados nos trabalhos teóricos. A partir disso, foram iniciados os trabalhos referentes aos dados observacionais. Nesse contexto, este trabalho analisou a relação de ocorrência de *flares* solares, associados ou não a tempestades magnéticas, com os eventos de absorção nas regiões E e F ionosfera e os *blackouts* de rádio. Ademais, foram analisados se há alguma relação entre a ocorrência dos *flares* solares com o aparecimento de fortes camadas Es nos dados. As estações analisadas foram regiões brasileiras como São Luís – MA (2° 31' S, 44° 16' O), Cachoeira Paulista – SP (22° 39' S, 45° 00' O) e Boa Vista – RR (02° 49' N, 60° 40' O) no ano de 2022. Os resultados deste trabalho são apresentados e discutidos em termos das diferentes regiões de análise. Os resultados mostraram ser importantes no ponto de vista ionosférico e foi submetido à apresentação do SICINPE 2023 – Seminário de Iniciação Científica do INPE.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO TEÓRICA

1.1 O Sol

O Sol é corpo mais massivo do sistema solar, uma esfera gasosa cuja temperatura na superfície, também conhecida como fotosfera é de cerca de 5.500 graus Celsius, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termonucleares. Ele se localiza a uma distância média de 150 milhões de quilômetros da Terra, equivalente a cerca de 8 minutos-luz, ele se encontra praticamente no centro geométrico e gravitacional do nosso sistema solar. A tabela 1.1 mostra algumas características do Sol.

Tabela 1.1 - Principais características do Sol

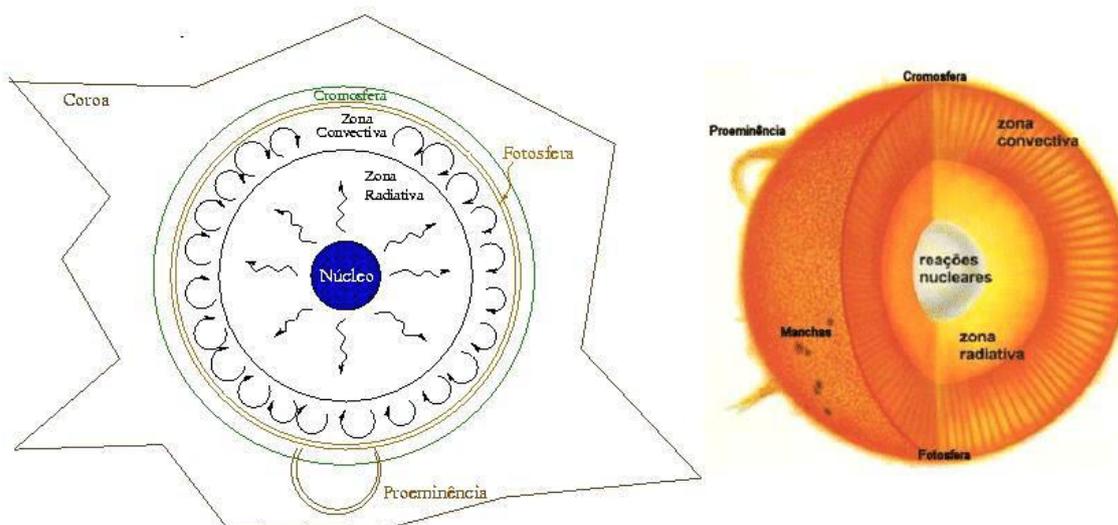
Grandeza Física	Valor aproximado
Massa	$M = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$R = 6,96 \times 10^5 \text{ km}$
Densidade média	$\rho = 1409 \text{ kg/m}^3$
Densidade central	$\rho_c = 1,6 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$
Distância	1,02 – 0,98 UA (1 UA = $1,496 \times 10^8 \text{ km}$)
Luminosidade	$L = 3,9 \times 10^{26} \text{ watts} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$
Temperatura efetiva (corpo negro)	$T_{ef} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central	$T_c = 1 \times 10^7 \text{ K}$
Composição química principal (%)	
Hidrogênio	92,00%
Hélio	7,80%
Elementos pesados	0,20%

Fonte: NASA, 2008 (disponível em <https://www.nasa.gov>)

1.2 Estrutura Solar

Sua estrutura pode ser dividida em duas grandes regiões: o interior, composto pelo núcleo, pela zona radiativa e pela zona convectiva e a atmosfera que é composta pela fotosfera, pela cromosfera e pela coroa. Podemos observar na figura 1.2 um esquema das principais regiões solares.

Figura 1.2 - A estrutura solar indicando as posições relativas das regiões



Fonte: Leite, 2012

1.2.1 Interior Solar

O interior do sol possui temperaturas que chegam a em seu núcleo e é extremamente denso (Rigozo, 2010). É a região onde a energia é produzida por reações termo-nucleares responsáveis pela produção dos átomos de hélio, resultando na emissão de luz e geração de calor. Esta energia é transportada para as demais camadas através da absorção e reemissão de fótons, na região conhecida como zona radiativa. A zona radiativa surge após o núcleo, ela estende-se até cerca de três quartos do raio do Sol, onde a energia flui por radiação. Logo acima dessa zona se localiza a zona convectiva se estendendo por cerca de 15% do raio solar. Nela a energia é transferida por meio das correntes de convecção formadas pelo movimento dos gases em altas temperaturas.

1.3 Atmosfera Solar

1.3.1 Fotosfera

Camada mais interna da atmosfera solar. A fotosfera é bastante estreita, com cerca de 500km de espessura, cheia de bolhas, ou grânulos. Este fenômeno é chamado de granulação fotosférica. Esses grânulos são causados por colunas convectivas. As regiões escuras entre os grânulos são as regiões onde o gás mais frio e o mais denso estão indo para baixo. Nessa região também ocorre o fenômeno das manchas solares, regiões irregulares que aparecem mais escuras do que a fotosfera. As manchas podem ser

observadas a olho nu, mas o seu estudo científico começou com o uso do telescópio, sendo observadas por projeção da imagem do Sol por Galileu Thomas Harriot (1560-1621).

1.3.2 Cromosfera

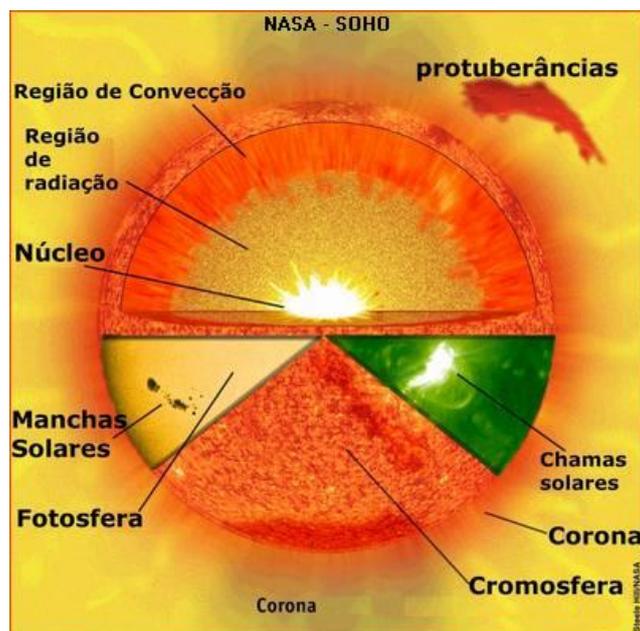
Acima da fotosfera, encontramos a cromosfera, de cor avermelhada e é visível durante os eclipses solares. É uma camada de gás (principalmente de hélio e hidrogênio) que envolve o Sol. Possui uma aparência ondulada por causa da presença de espículos – jatos de gás que se elevam a até 104 km acima. A sua temperatura aumenta da base para o topo, apresentando um valor médio de 15000K. A fonte de energia para esse aumento é provavelmente os campos magnéticos variáveis formados na fotosfera e transportados por correntes elétricas para a coroa.

1.3.3 Coroa Solar

A coroa está localizada acima da cromosfera, se estende por cerca de dois raios solares. É a região da atmosfera solar de maior importância para os fenômenos físicos do meio interplanetário, pois seu material se dissipa formando o vento solar (fluxo de partículas carregadas) (Rigozo, 2010). Na coroa ainda ocorre as ejeções de massa coronal (CME, do inglês Coronal Mass Ejection), nos quais estão relacionados fenômenos geomagnéticos, como tempestades geomagnéticas e variabilidade do clima espacial. A coroa é melhor observada durante os eclipses totais do Sol.

Uma ilustração onde estão identificadas as estruturas mencionadas anteriormente é apresentada na Figura 1.3. Além disso, são apresentadas as protuberâncias, chamadas e manchas solares.

Figura 1.3 - Estrutura e atmosfera solar



Fonte: NASA, 2008 (disponível em <https://www.nasa.gov>)

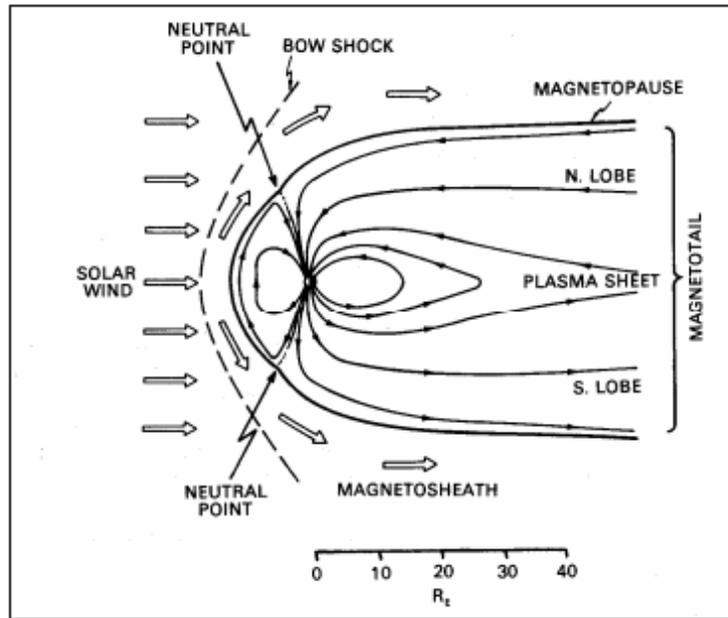
1.4 Vento Solar

O vento solar é um fluxo contínuo de partículas emitidas da coroa que acarretam uma perda de massa por parte do sol para o meio interplanetário. O vento solar que atinge a Terra é capturado pelo campo magnético, formando o cinturão de Van Allen, na magnetosfera terrestre (Kivelson e Russel, 1995). Esse cinturão, descoberto pelo físico americano James Alfred Van Allen (1915-2006) em 1958, normalmente permite que as partículas carregadas do vento solar entrem na atmosfera da Terra pelos polos, causando as auroras polares, fenômeno luminoso de excitação e de estabilidade dos átomos de oxigênio e nitrogênio. O vento solar pode ser dividido em duas diferentes regiões geradoras, o vento solar rápido e o vento solar lento. O vento solar rápido é originado nos buracos coronais, regiões mais frias e menos densas da coroa solar, podendo atingir picos de velocidades de até 900 km/s. Já o vento solar lento se origina em regiões de baixas latitudes, mais próximas ao equador do Sol, geralmente mais denso e de comportamento irregular, atinge velocidades em torno de 300 km/s.

Como foi dito acima, o vento solar rápido originado dos buracos coronais - regiões de campo magnético com configuração de linhas “abertas” - atinge e interage com a Terra causando tanto o fenômeno conhecido como aurora - quanto perturbações no campo

magnético terrestre em uma cavidade denominada magnetosfera, como pode ser visto na figura 1.4.

Figura 1.4 - Seção transversal norte-sul da cavidade geográfica e do fluxo de plasma



Fonte: Hargreaves, 1992

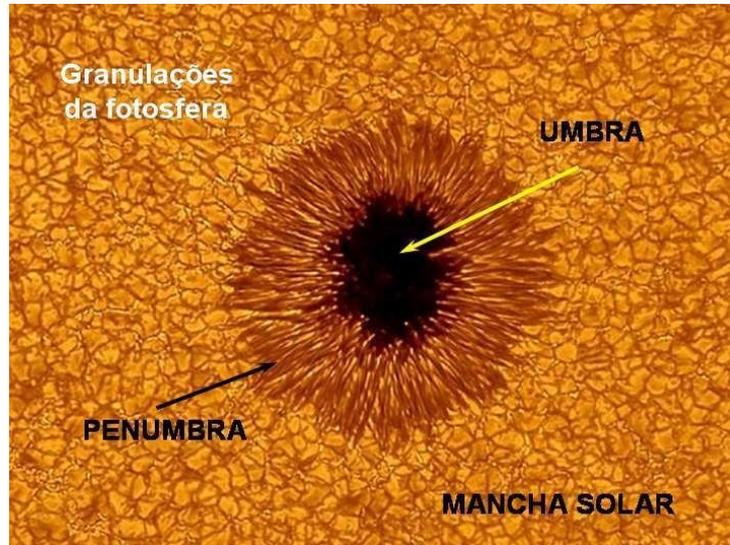
Durante períodos de atividade solar mais intensa, grande parte das partículas eletricamente carregadas conseguem romper a barreira formada pelos Cinturões de Radiação de Van Allen e, ao atingirem a alta atmosfera, são capazes de produzir fenômenos como as auroras polares e as tempestades magnéticas.

1.5 Manchas Solares

As manchas solares são regiões irregulares que aparecem mais escuras do que a fotosfera e muitas vezes podem ser observadas a olho nu. Elas se formam em grupos. Se constituem de duas partes: a umbra, parte central mais escura, com temperaturas em torno de 4000 K, e a penumbra, região um pouco mais clara com estrutura radial em torno da umbra. A figura 1.4 mostra uma mancha solar isolada onde pode-se identificar a umbra e a penumbra. A presença das manchas solares indica a existência de campos magnéticos intensos na atmosfera solar. Uma vez que o campo magnético impede o processo convectivo, tornando o transporte de energia nas manchas bem menor e, conseqüentemente, as manchas são mais frias e emitem menos radiação do que o restante

da superfície solar. Elas também estão associadas com erupções solares, capazes de emitir correntes de partículas carregadas que afetam as comunicações de rádio sobre a Terra.

Figura 1.5 - Mancha solar, mostrando sua composição, umbra e penumbra

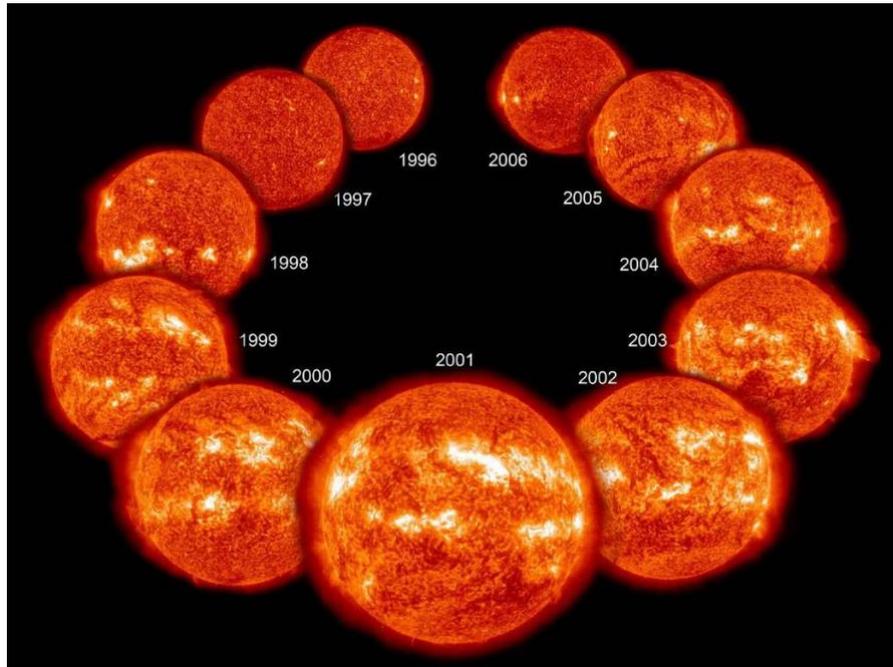


Fonte: NASA, 2005 (disponível em <https://www.nasa.gov>)

1.6 Manchas Solares e Atividade Solar

Os ciclos de atividade de manchas solares ocorrem aproximadamente a cada onze anos, com variações de duração. Durante o ciclo, os grupos de manchas crescem rapidamente e depois caem mais lentamente. A figura 1.6 ilustra bem esse comportamento observado ao longo de vários ciclos solares. No início do ciclo, as manchas aparecem em latitudes maiores e depois se movem em direção ao equador. O campo magnético do Sol muda durante cada ciclo solar, a virada ocorre quando o ciclo está próximo de seu máximo. Após dois ciclos solares, o campo magnético do sol retorna ao seu estado original. Este comportamento é conhecido como Ciclo de Hale - abrange dois ciclos solares, ou 22 anos, antes de retornar ao seu estado original.

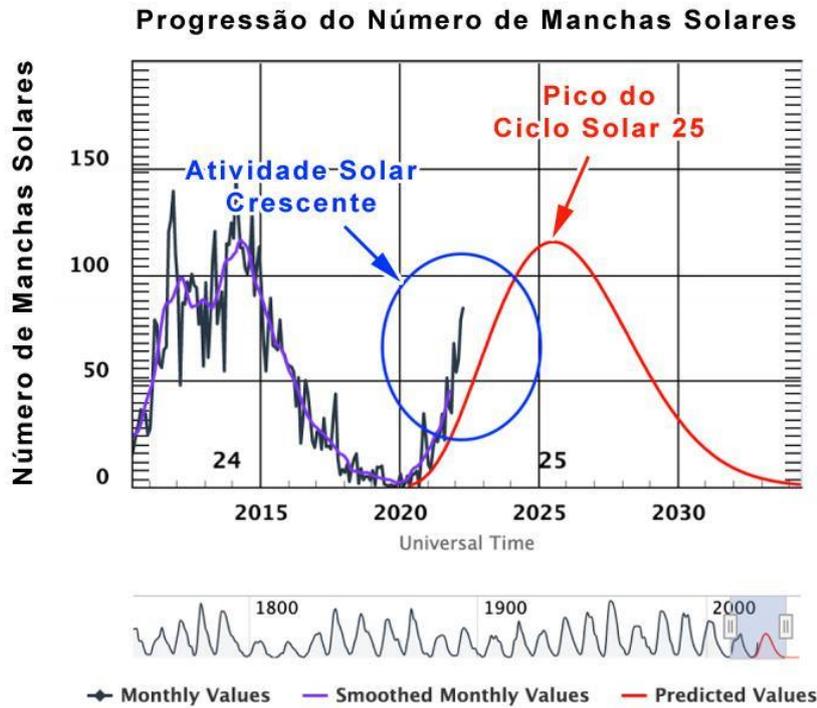
Figura 1.6 - Uma montagem, de onze anos de imagem, demonstrando a variação na atividade solar



Fonte: NASA, 2013 (disponível em <https://www.nasa.gov>)

Segundo De Lucas (2005), o pico do atual ciclo solar 25 e o número de manchas solares observado continua a exceder o número previsto, indicando que o próximo máximo solar, que deve ocorrer em 2025, será maior do que o calculado para este período de 11 anos. Este comportamento pode ser observado na figura 1.7. O período de máxima atividade solar é caracterizado pela máxima ocorrência de manchas solares e de fenômenos energéticos e transientes durante o ciclo do Sol. A atividade solar emite constantemente um fluxo de partículas carregadas para o meio interplanetário denominado de vento solar.

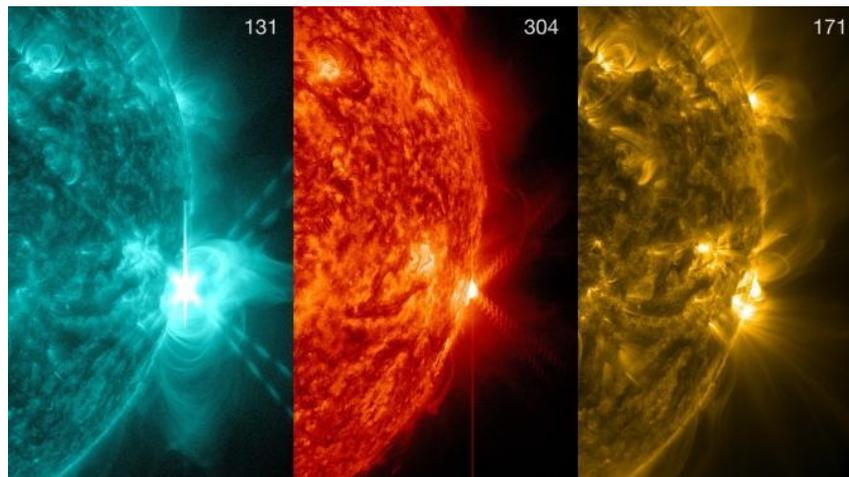
Figura 1.7- Gráfico de previsão revela aumento da atividade solar.



Fonte: De Lucas, 2005

Uma das primeiras evidências dos efeitos das atividades solares na Terra foi a interrupção dos telégrafos ocorrida em 1859 devido a uma forte fulguração solar observada pelo astrônomo Richard Christopher (1826-1875). As ejeções de massa coronal levam de um a quatro dias para alcançar a terra e podem causar danos a satélites, erro no posicionamento de aviões, danos às redes de energia elétrica e entre outras consequências. Ademais, há os *flares* que é um aumento significativo da emissão de radiação eletromagnéticas local e são causadas quando as manchas solares de polaridade magnéticas opostas colidem, ocorrendo o cancelamento do campo magnético. As explosões solares na Terra também são associadas à ocorrência das chamadas tempestades magnéticas. Quando muito intensos, esses fenômenos causam grande perturbação na magnetosfera terrestre, podendo até mesmo provocar um “*blackout*”. Um exemplo dos primeiros momentos de um *flare* solar em diferentes comprimentos de onda pode ser visto na figura 1.8.

Figura 1.8-Explosão de classe X explodindo no lado direito do Sol.



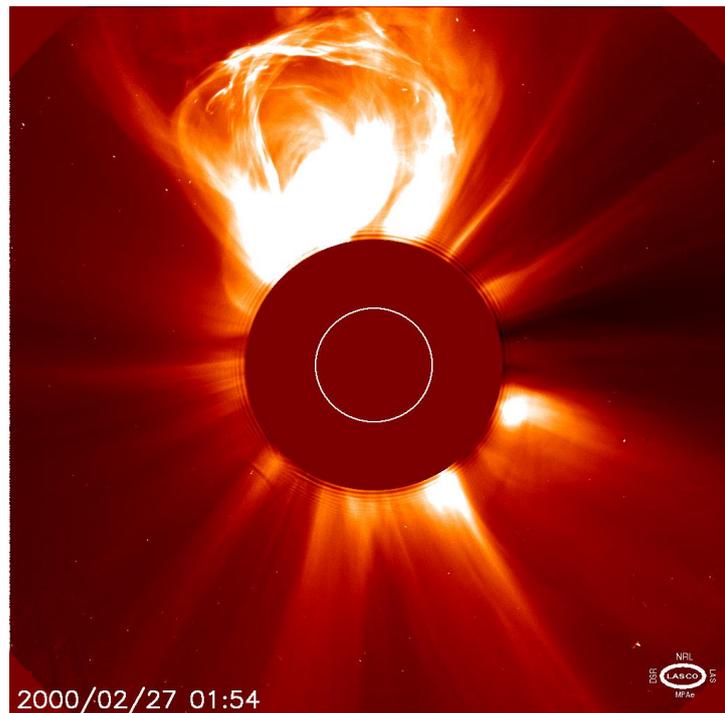
Fonte: De Lucas, 2005

1.7 Tempestades Magnéticas

As atividades que ocorrem no núcleo solar provocam uma produção muito grande de energia por meio da reação de fusão nuclear. Entre essas atividades estão a ejeção de massa coronal, vento solar e erupção solar. Nesse processo, libera-se prótons e elétrons, que são atraídos e acumulados em campos magnéticos. As ejeções de massa coronal são liberações de grandes quantidades de matéria da atmosfera solar, provenientes de uma região chamada de coroa. As ejeções resultam de instabilidades magnéticas de grande escala, liberam quantidades significativas de matéria e de radiação eletromagnéticas no espaço, figura 1.9

Regularmente nosso planeta é atingido por emissões supersônicas de plasma provenientes do vento solar, o qual faz com que o nosso campo magnético se distorça formando uma cavidade com uma longa cauda. Esta cavidade recebe o nome de magnetosfera. Essas emissões podem ser chamadas de ejeções de massa coronal, as quais provêm do Sol ou “solar *flares*”, que são conduzidas por ondas de choque. A Magnetosfera que se origina do campo magnético interno da Terra nos protege destas emissões desviando o campo magnético e o plasma interplanetário.

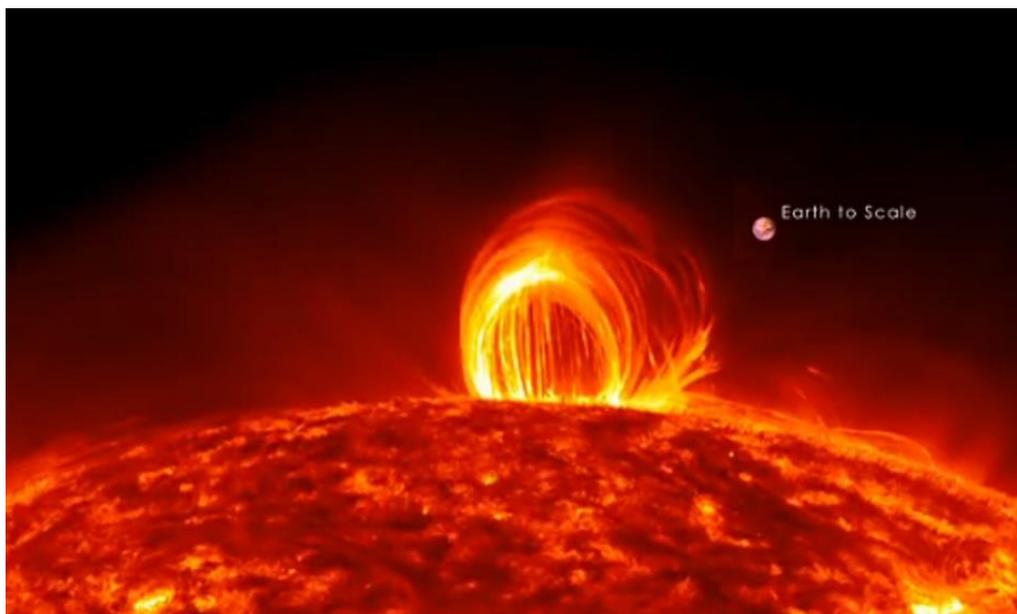
Figura 1.9 - Uma ejeção de massa coronal, SOHO Consortium



Fonte: NASA, 2013 (disponível em <https://www.nasa.gov>)

Adicionalmente as tempestades geomagnéticas são uma perturbação temporária da magnetosfera da Terra causada por uma onda de choque do vento solar ou nuvem magnética que interage com o campo magnético da Terra. O aumento da pressão do vento solar inicialmente comprime a magnetosfera. O campo magnético do vento solar então interage com o campo magnético da Terra e transfere um aumento de energia na magnetosfera. Ambas as interações causam um aumento na circulação de plasma através da magnetosfera (impulsionado pelo aumento de campos elétricos no interior da magnetosfera) e um aumento da corrente elétrica na ionosfera e magnetosfera. A grande concentração dessas partículas causa explosões que podem atingir diversos corpos celestes e afetar o clima espacial. Essas tempestades acontecem com mais frequência em um período conhecido como “máximo solar”, marcado pelo aumento da atividade magnética do Sol, o que acontece a cada onze anos e causa manchas solares. A figura 1.10 mostra as dimensões de uma ejeção de massa coronal em comparação com a Terra.

Figura 1.10 -Tempestades solares explosivas, chamadas de ejeções de massa coronal



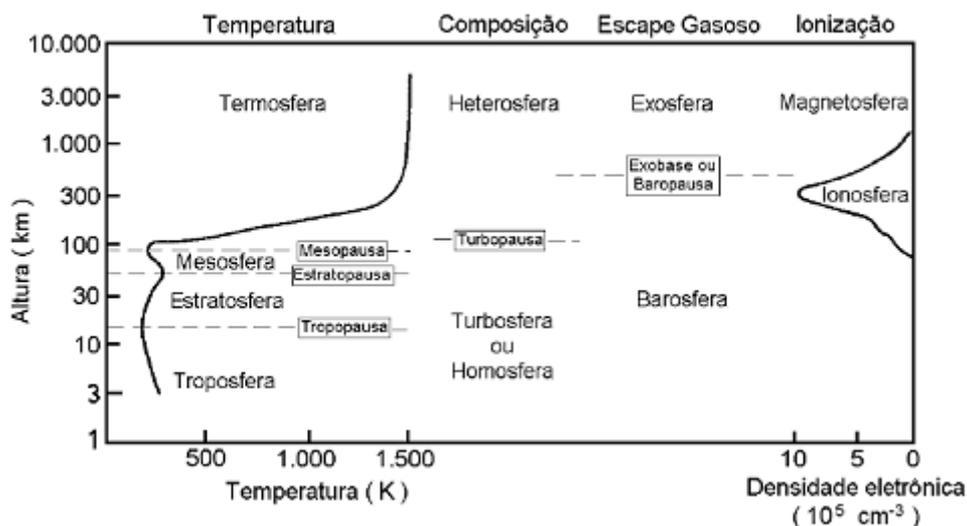
Fonte: NASA, 2013 (disponível em <https://www.nasa.gov>)

CAPÍTULO 2 – IONOSFERA

2.1 Ionosfera Terrestre

A atmosfera Terrestre é a camada de gases que envolve a Terra. Ela é composta por dois componentes distintos: a atmosfera ionizada, também conhecida como Ionosfera, e a atmosfera neutra, sendo esta última o componente majoritário. A atmosfera neutra, quando considerada como um sistema estático, é estudada e dividida de acordo com suas propriedades fundamentais: pressão, densidade, temperatura e composição. Cada uma dessas características desempenha um papel essencial na dinâmica e no comportamento da atmosfera, influenciando processos climáticos, meteorológicos e geofísicos. A figura 2.1 apresenta as diferentes classificações da Atmosfera Neutra e da Atmosfera Ionizada de acordo com suas propriedades.

Figura 2.1 -Classificação da Atmosfera Terrestre Ionizada.



Fonte: Kirchhoff, 1991

A ionosfera é a parte superior da atmosfera, que se estende entre aproximadamente 60 até 2000 km de altura, na qual existem partículas ionizadas e elétrons livres, gerando uma camada condutora de plasma. Esta camada está basicamente dividida em 3 regiões, chamadas D, E e F, sendo que a camada F é subdividida em camada F1 e F2 (Schunk et al., 2009). O comportamento eletrodinâmico da ionosfera é fortemente influenciado pela atmosfera neutra, dentro da qual está inserida, como também pela magnetosfera, que é a região que se encontra acima da ionosfera, onde o campo magnético da Terra exerce uma

influência dominante sobre o movimento dos íons e dos elétrons. Ela é formada pela ionização dos gases atmosféricos

2.2 Formação da Ionosfera

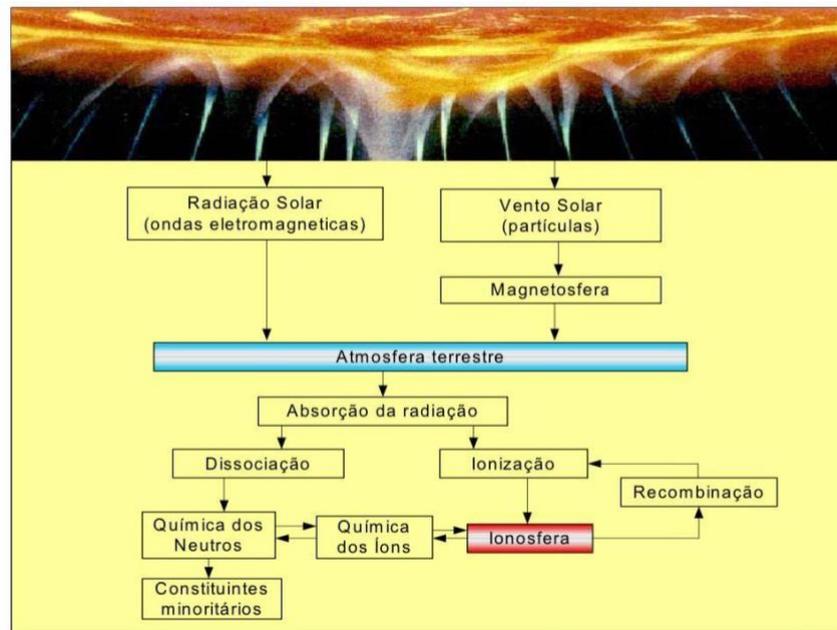
A ionosfera forma-se pela ação de fontes ionizantes solares e cósmicas. As principais fontes de ionização (ionização primária) são a radiação solar energética na faixa do Extremo Ultravioleta (EUV) e os Raios-x (Deroit, 2008). A radiação solar energética na faixa do EUV e os Raios-X são os principais responsáveis por ionizar as partículas da atmosfera, tornando-as eletricamente carregadas e criando íons. Esses processos desempenham um papel crucial na formação e manutenção da ionosfera durante o dia. Além disso, fontes cósmicas especialmente partículas energéticas como prótons também contribuem para a ionização da ionosfera durante o período diurno. No entanto, durante a noite, essas fontes cósmicas tornam-se muito importantes para a manutenção da ionosfera, já que a ausência da radiação solar direta permite que as partículas cósmicas tenham um impacto mais significativo na ionização da atmosfera.

2.3 Produção Iônica

O principal processo de produção iônica é a absorção de radiação na faixa espectral do extremo ultra-violeta (EUV), e dos raios X. Os fótons de energia acima de aproximadamente 12 eV (elétrons volts) são capazes de ionizar os componentes atmosféricos, sendo ao mesmo tempo responsáveis pelo aquecimento da atmosfera (KIRCHHOFF, 1942).

A foto-ionização é um processo onde a Ionosfera Terrestre absorve radiação, em sua grande maioria de origem solar. Além destas, a radiação conhecida como Lyman- α também contribui significativamente para produção iônica da Atmosfera Terrestre. A figura 2.2 apresenta de forma resumida os processos físicos e químicos envolvidos na produção da ionosfera.

Figura 2.2 - Processo de ionização que ocorre na atmosfera terrestre.



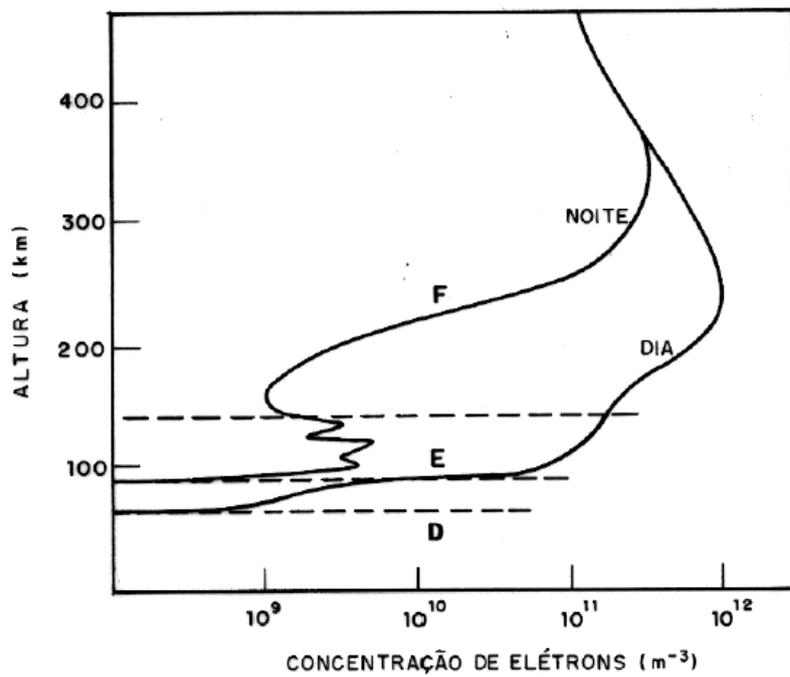
Fonte: Pillat, 2006

Os raios cósmicos, também se apresentam como outra fonte de ionização. A ionização ocorre por impacto, quando a energia cinética da partícula cósmica é maior do que o potencial de ionização do elemento atmosférico. Os íons e os elétrons livres tendem a se recombinarem, gerando novamente elementos neutros. Portanto, a densidade eletrônica da Ionosfera depende de um equilíbrio estabelecido entre as velocidades relativas de ionização e de perda. A relação a seguir, equaciona os processos de produção e de perda: Nesta equação é a taxa de produção, é a taxa de perda e expressa a produção/perda de elétrons pelo transporte, sendo a velocidade. A densidade eletrônica é diretamente proporcional à densidade de radiação ionizante e à concentração de partículas ionizáveis. Como a densidade de radiação ionizante cresce com o aumento da altura enquanto a concentração de partículas ionizáveis decresce, a densidade eletrônica da Ionosfera varia com a altura passando por um máximo em torno dos 300 km de altitude. No entanto, os constituintes da Atmosfera Neutra não apresentam uma distribuição uniforme com altura. Além disso, algumas radiações ionizantes são mais penetrantes que outras. Deste modo, é natural que a Ionosfera apresente diferentes picos de densidade em diferentes alturas. De fato, ela pode ser dividida em camadas. Além disso, essa densidade apresenta variabilidade conforme a hora do dia, a estação do ano e as condições solares.

2.4 Regiões Ionosféricas

A ionosfera é dividida em regiões que diferem entre si por processos físicos e químicos, que controlam o comportamento de cada camada. Estas regiões são: Região D, E e F, subdivididas em cama F1 e F2. A figura 2.3 ilustra as três camadas ionosféricas.

Figura 2.3 - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas.



Fonte: Kirchhoff, (1991).

Região D

A região D é a parte inferior da ionosfera, que se estende até cerca de 80 km de altura. Ela é responsável pela por grande parte da absorção das ondas de rádio Durante o dia, esta camada é ionizada, principalmente, pelos Raios - X e Lyman- α e durante todo o período, pelos raios cósmicos. Durante anoite ela sofre uma redução acentuada na sua densidade eletrônica devido à redução nas fontes de ionização solares. Dentre as camadas ionosféricas, a região D é considerada a mais complexa do ponto de vista químico. As reações mais importantes incluem os elementos O, O₃, NO₂, NO, CO₂ e H₂O. Em pequenas proporções têm-se também metais alcalinos, tais como Na, K e Li (KIRCHHOFF, 1942). A grande variedade de fontes de ionização também contribui para a produção iônica. Dentre as fontes de ionização, as principais são:

- A radiação na faixa dos Raios-X (com $\lambda < 10\text{\AA}$), que ionizam oxigênio e nitrogênio;
- A radiação solar Lyman- α (1216 \AA), ioniza óxido nítrico NO;
- A radiação na faixa Ultravioleta Extremo (com λ entre 1027 e 1118 \AA);
- Os raios cósmicos (ionização adicional nas alturas inferiores);
- As partículas de origem solar ou auroral.

Região E

A região E fica entre a região D e F, aproximadamente entre 80 a 130 km de altura, ela é formada basicamente, pela absorção da radiação ultravioleta. Durante a noite sua densidade eletrônica diminui significativamente, pois sua principal fonte produtora, o Sol, está ionizando o outro hemisfério. Outra característica desta camada é a existência de íons metálicos, o que faz a camada E ser a região de maior condutividade da ionosfera, onde, conseqüentemente, se formam as correntes elétricas mais intensas da ionosfera. Os íons dominantes são o óxido de nítrico NO⁺, nitrogênio molecular N₂⁺, e o oxigênio O₂⁺ (SCHUNK et al., 2009). Além desses íons, é nessa região que encontramos os íons metálicos presentes na ionosfera, tais como: Fe⁺, Mg⁺, Ca⁺ e Si⁺.

Camada E-esporádica (Es)

A camada "E esporádica" ou "Es" ocorre com certa raridade e dependente principalmente do ciclo solar. Pode ser considerada uma espécie de "nuvem iônica" de gases atmosféricos em torno de aproximadamente 90 a 160 km de altitude. O fenômeno

ocasionalmente permite a propagação de VHF a longas distâncias, cuja variabilidade depende de uma série de fatores, incluindo a altura da nuvem e sua densidade. A máxima frequência utilizável também varia com o surgimento da camada E esporádica, propiciando assim a possibilidade das reflexões de ondas de rádio na ordem de 27 até 110 MHz (Hargreaves, 1992).

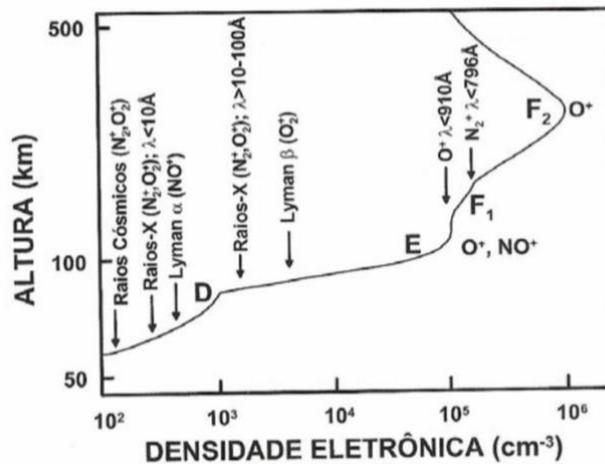
Região F1

Essa camada pode ser formada como um pico no perfil ou uma inflexão na curva devido a competição entre os processos de perdas lineares e quadráticas. A Camada F1 é situada aproximadamente entre 160 km e 180 km de altura. Ela é observada com mais frequência durante o dia, pois apresenta grande redução na sua densidade eletrônica durante a noite. Ela é formada pela absorção de radiação solar com comprimento de onda de 20 a 90 nm e seus principais íons são o NO^+ e o O^+ (Hargreaves, 1992).

Região F2

A região F2 engloba toda a região superior da ionosfera, inclusive a região do pico, onde se concentra quase que a totalidade da densidade eletrônica por volta dos 300 km e é composta pelo íon majoritário O^+ . Durante a noite a sua densidade eletrônica normalmente decai. Dentre todas as regiões, ela é a que apresenta a maior concentração de elétrons da Ionosfera Terrestre, mesmo durante a noite. Isso ocorre por diversos fatores, entre eles, ela possui íons atômicos como espécie predominante, os quais possuem menor taxa de recombinação. A figura 2.4 apresenta os principais íons formados e suas respectivas radiações ionizantes que se encontram no ambiente ionosférico.

Figura 2.4 - Principais íons e suas respectivas radiações ionizantes do plasma ionosférico.

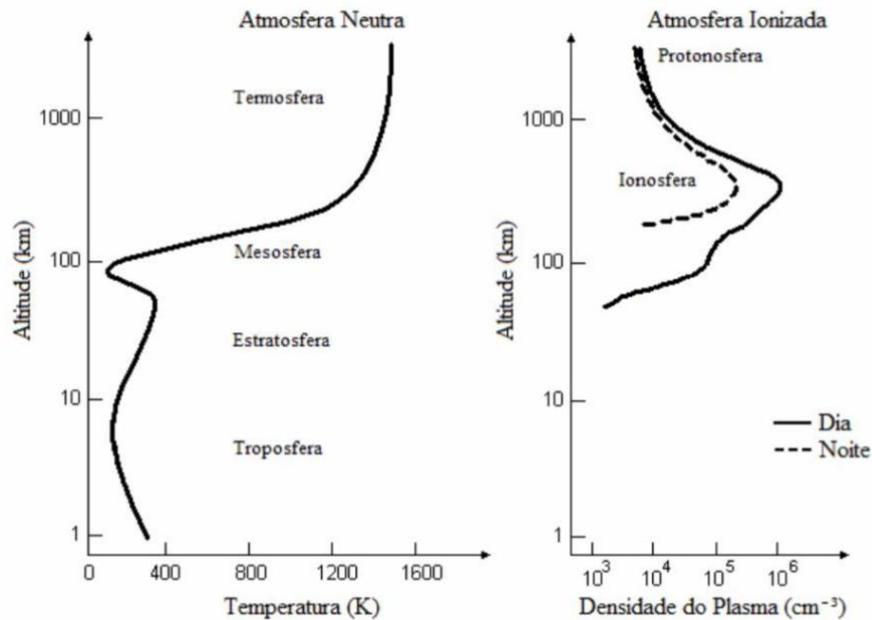


Fonte: Kirchhoff, 1991

2.5 Perda de Ionização

A perda de ionização ocorre através dos processos que diminuem a densidade eletrônica da Ionosfera. Ela é representada pela recombinação química de íons e elétrons que engloba todos os processos de neutralização ou troca de carga da atmosfera ionizada, onde pode ser dividida entre as reações de perda, radioativa e dissociativa. (Kirchhoff, 1991). O processo de recombinação radioativa acontece quando um íon positivo se recombina com um elétron, liberando energia na forma de fótons. Já o processo de recombinação dissociativa acontece quando uma molécula de carga positiva (XY^+) entra em reação com um elétron, dissociando os dois elementos. O movimento de plasma também contribui para a perda de ionização da atmosfera neutra. A figura 2.5 apresenta a estrutura da atmosfera neutra representada pela temperatura dos gases e a atmosfera ionizada representada pela densidade eletrônica.

Figura 2.5 - Atmosfera neutra representada pela temperatura e a atmosfera ionizada



Fonte: Moor, 2011

2.6 Definição de Plasma Ionosférico

A Ionosfera pode ser definida como um plasma, pois apresenta todas as propriedades deste estado da matéria: um meio ionizado, com alta temperatura, macroscopicamente neutro. O plasma é um meio ionizado por possuir em sua composição, íons e elétrons livres convivendo juntos, sob altas temperaturas, num estado de equilíbrio dinâmico de maneira que o efeito do líquido é de não eficiência dos processos de recombinação (Hargreaves, 1992). O plasma é dito macroscopicamente neutro porque possui o mesmo número de elétrons e de íons. No plasma ideal predominam as forças de interação de longo alcance, como a da Lei de Coulomb, e não as forças de pequeno alcance como colisões. O mesmo não é encontrado nas Camadas D e E da Ionosfera. Nestas camadas o grande número de partículas neutras torna a força de colisão entre as moléculas tão significativa quanto a força de interação elétrica entre os íons e elétrons do plasma.

2.7 Processos de Transporte de Ionização

A dinâmica do plasma ionosférico, que inclui o transporte ou movimento, pode ser controlada pelos ventos neutros, campos elétricos, gradientes de pressão e efeitos gravitacionais. Os ventos neutros são formados pela maré atmosférica e surgem mediante os gradientes de pressão causados pelo aquecimento solar na atmosfera terrestre, que produzem forças de arraste proporcionais à diferença entre velocidade do vento U e a velocidade das partículas carregadas (V_i) e suas respectivas frequências de colisão. Os campos elétricos são produzidos por ventos e são causados pelos dínamos da região E (durante o dia) e da região F (durante a noite). Íons e elétrons são movidos por este campo elétrico à deriva eletromagnética resultante da interação $E \times B$ que transporta o plasma perpendicularmente ao campo magnético. Devido aos efeitos gravitacionais e aos efeitos dos gradientes de pressão o plasma ionosférico tende a ter uma difusão ao longo das linhas de campo geomagnético (Kirchhoff, 1991).

CAPÍTULO 3 – INSTRUMENTAÇÃO

3.1 Digissonda

Um sondador digital é um radar de superfície usado para sondagens ionosféricas e fornece atualmente cerca de 49 parâmetros ionosféricos. Foi desenvolvido durante as décadas de 1920-1930, primeiramente como Ionossonda, onde todo o processo era feito manualmente. Com o passar do tempo, a técnica utilizada no aparelho foi se desenvolvendo até chegar no meio digital e assim o seu nome ser mudado para ionossonda digital. A classe dos sondadores digitais desenvolvidos pela University of Massachusetts Lowell's Center for Atmospheric Research (UMLCAR) é chamada de digissonda. Esses equipamentos emitem pulsos de rádio frequência (RF), que variam de 1 até 30 MHz e potência de pico de 600W através de uma antena transmissora. A digissonda recebe este mesmo pulso através de um conjunto de antenas receptoras. Esses pulsos alcançam alturas que vão de 80 até 1360 km, onde o seu principal objetivo é fornecer dados do comportamento da densidade dos elétrons das camadas E e F e as camadas Es (Reinish et al., 1986).

3.2 Características da Digissonda

A digissonda é composta por:

- Antena transmissora, usada para emitir curtos pulsos de rádio (figura 3.1)
- Antenas receptoras, usada para receber os pulsos de rádio transmitido
- Essas antenas são do tipo Delta com cargas resistivas de 600 Ohms.
- Computadores, usado para o processamento dos dados obtidos;
- Periféricos, que são placas de expansão usadas para enviar ou receber informações do computador;
- Chave de antenas, usado para combinar e separar o sinal da antena terrestre; e
- Receptor e Transmissor de pulsos de RF.

Figura 3.1- Fotos da digissonda do tipo DPS onde (a) é a antena transmissora, (b) é a antena receptora e (c) é o sistema de controle, pré-processamento e transmissão de dados.

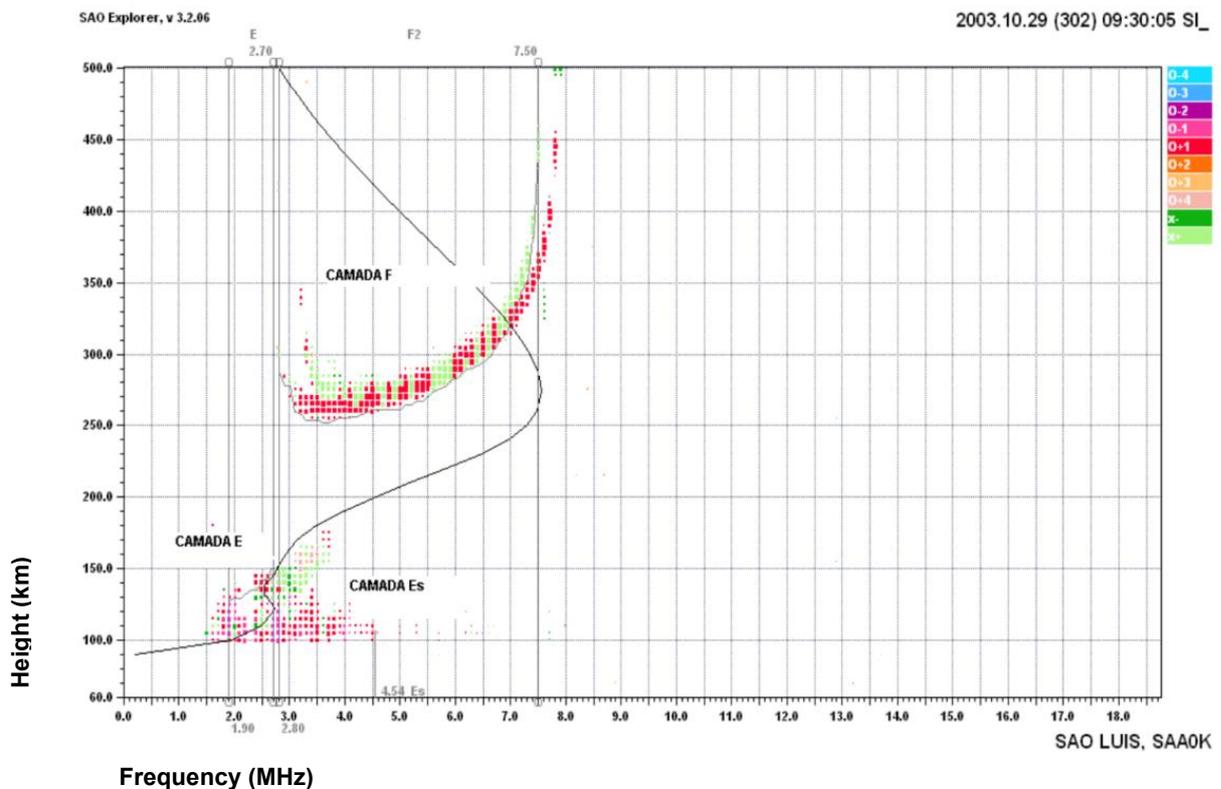


Fonte: Cortesia Sra. Maria Goreti.

3.3 Dados da digissonda

A digissonda gera como dados os ionogramas. Os ionogramas são traços adequadamente organizados a partir dos ecos refletidos pelas camadas ionosféricas. Esses dados são armazenados em gráficos de altura virtual de reflexão por frequência do sinal emitido. Através desses traços, torna-se possível perceber um perfil para a região F e para a região E, assim como mostra o ionograma da figura 3.2.

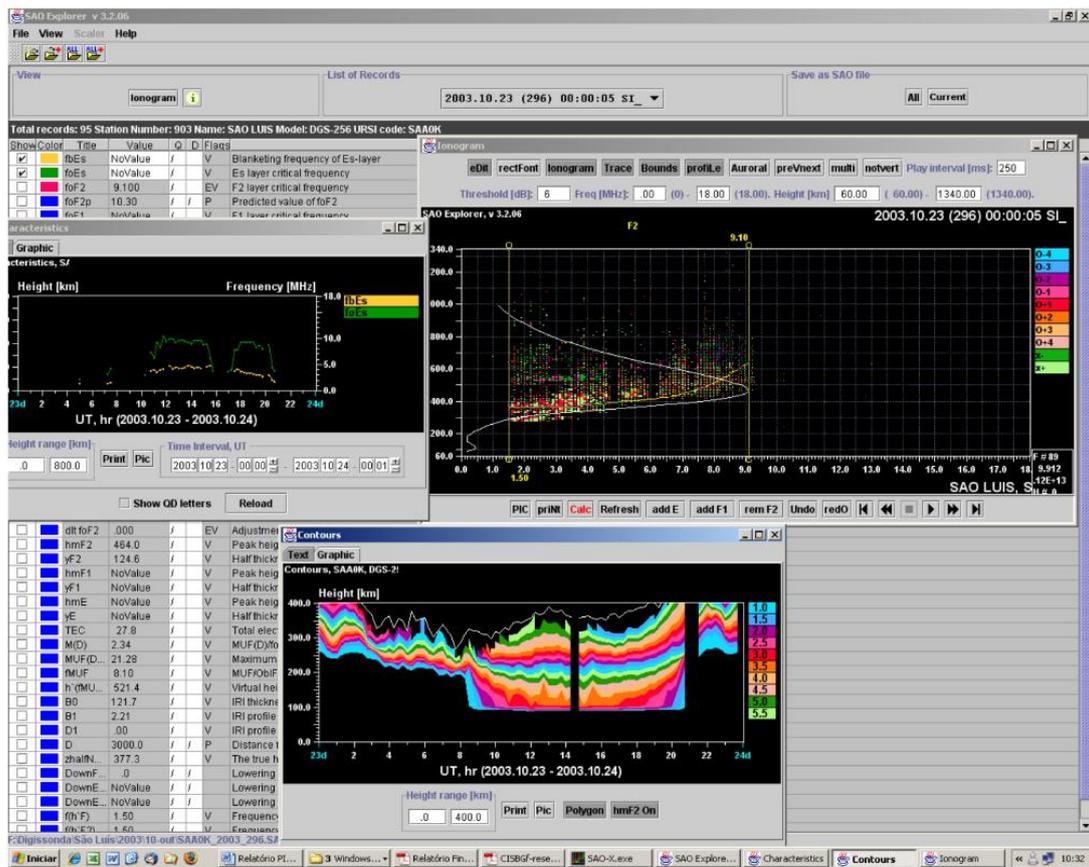
Figura 3.2 - Ionograma da estação de São Luís – MA do dia 29 de outubro de 2003, às 09 h 45 min que mostra a região E, subdividida em camada E e camada Es, e a região F.



Fonte: Resende, 2010

Esses dados brutos são coletados de acordo com o intervalo de tempo pré estabelecido pelo operador e a princípio eram encriptados em um formato denominado TAP, atualmente eles se encontram nos formatos denominados GRM, RSF, MMM. Esses formatos possibilitaram com que as interpretações automáticas fossem gravadas separadamente dos dados brutos. Contudo, o responsável por essas interpretações é o *Automatic Real-Time Ionogram Scaler with Truehigh (Artist)* que através de uma coleção de programas, agrega aos dados alguns parâmetros ionosféricos em relação à altura como por exemplo o $hmF2$, $h'F$, $h'E$, $h'Es$, etc, em relação a frequências como o $foF2$, $foF1$, $foEs$, etc, em relação a fatores de propagação oblíqua como o MUF, M3000 e bem como a curva $h'(f)$ de altura virtual versus frequência (Bertoni, 2004). Para realizar a leitura e análise desses gráficos, utiliza-se o programa SAO – *Explorer* (SAO-X) onde nele também é possível manusear os parâmetros ionosféricos. O programa oferece várias ferramentas de visualização e análise da ionosfera, a figura 3.3 mostra algumas delas (Resende, 2008).

Figura 3.3 - Interface do programa SAO-X e algumas das ferramentas que o programa fornece para visualização e monitoramento da Ionosfera.



Fonte: Resende, 2010

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse capítulo serão abordados os resultados obtidos no ano referente a setembro de 2022 até julho de 2023. Os resultados estão separados em dois grupos diferentes, são eles: influência dos *flares* solares na ionosfera do setor brasileiro e observações de intensas camadas Es nos resultados.

4.1 Resultado I - Influência dos *Flares* Solares de Classes M e X na Ionosfera do Setor Brasileiro

Como já mencionado anteriormente, explosões solares (*solar flares*) são perturbações transientes que ocorrem na atmosfera solar e liberam grandes quantidades de energia emitidas na forma de radiação eletromagnética e corpuscular, como partículas energéticas. As explosões solares emitem radiação em uma grande faixa do espectro eletromagnético. Na ionosfera os efeitos são causados geralmente na região D uma vez que a radiação é nas proximidades da banda do extremo ultravioleta (EUV) e dos Raios-X. O fenômeno mais conhecido é o Distúrbio Ionosférico Súbito (SID). O resultado do SID é um rápido aumento na absorção das ondas de rádio, que é mais intenso na faixa das Altas Frequências (HF) (Resende, 2010).

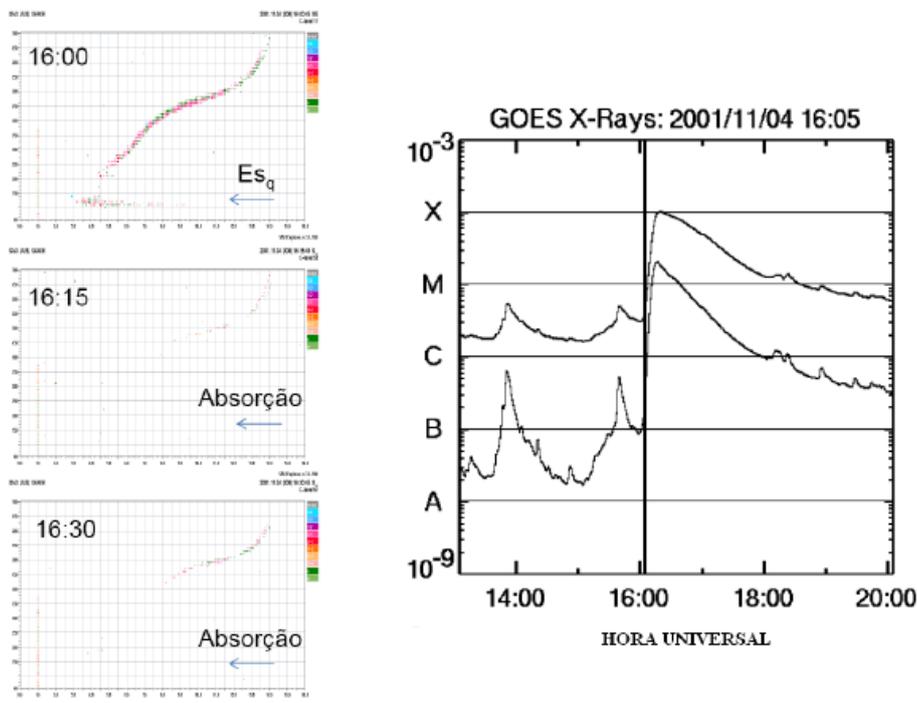
As explosões solares são classificadas de acordo com suas intensidades observadas nos espectros medidos provindos do satélite GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) operado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). As categorias utilizadas são:

- As explosões da classe X, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade a partir de 10^{-4} W/m²;
- As explosões da classe M, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-5} e 10^{-4} W/m²;
- As explosões da classe C, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-6} e 10^{-5} W/m²;
- As explosões da classe B, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-7} e 10^{-6} W/m²; e

- As explosões da classe A, as quais têm associadas a elas Raios-X com a intensidade entre 10^{-9} e 10^{-7} W/m².

A influência dos picos no fluxo de classes M e X dos Raios-X foram analisados para três regiões brasileiras distintas, Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. Em um estudo preliminar feito por Resende (2010) constatou que a maioria dos picos dos Raios-X causou a absorção das ondas de rádio na faixa de frequência da região E, camadas Es e baixa região F, provocando o desaparecimento dessas regiões. Um exemplo é mostrado na figura 4.1 para o dia 04 de novembro de 2001 em São Luís. Às 1600 UT há a presença da camada Es_q, observada no ionograma superior do lado esquerdo. O gráfico do lado direito mostra que às 1605 UT ocorreu uma explosão solar de classe X. Às 1615 UT, o próximo horário do ionograma, houve uma completa absorção das ondas de rádio. Este acontecimento também é visto no horário das 1630 UT. Essa absorção aconteceu pelo fenômeno denominado SID, descrito na que absorveu as ondas de rádio na região D e prejudicou a observação da camada Es e parte da região F ionosférica.

Figura 4.1 - Efeito de uma explosão solar de alta intensidade na ionosfera.



Fonte: Resende, 2010

a) Boa Vista

A partir das emissões de classe M e X podemos analisar e classificar a ocorrência ou não de blackouts nas regiões E, F e camadas E-esporádicas (Es) no período de 2022. A tabela 4.1 mostra essa classificação para a região de Boa Vista.

Tabela 4.1- Análise de *flares* solares na região de Boa Vista

Data	Classe-Flare	Camada Es (tempo)	Região F (tempo)
14/01/2022	M1.84	03:10 UT	Lado Noturno
12/02/2022	M1.44	Sem Blackout	Sem Blackout
20/04/2022	X2.25	Lado Noturno	Lado Noturno
10/05/2022	X1.51	13:40 UT-16:00UT	14:00UT-15:00UT

Já dito anteriormente, os *flares* solares são divididos de acordo com a sua intensidade, sendo as classes M e X os mais intensos. Quando os *flares* solares mais intensos entram em contato com a ionosfera, as ondas de rádio na faixa de HF são absorvidas nas regiões mais inferiores (região D) resultando no fenômeno denominado de *blackout*. Portanto, a tabela 4.1 mostra o tempo em que foram observados esses eventos de *blackouts*.

Note que no dia 14/01/2022 e no dia 20/04/2022, os *flares* solares ocorreram no período noturno. Isso faz com que não ocorra eventos de *blackouts*. De fato, quando os *flares* solares atingiram a Terra, a região de Boa Vista estava do lado noturno. E os Raios-X dos *flares* que ionizam a região D não tem um comprimento de onda tão penetrante e, portanto, não causa nenhuma influência na ionosfera durante esses horários.

Observa-se que dia 14/01/2022 ainda há uma absorção às 03:10 UT em Boa Vista. Ou seja, não foi observada a região E e nem a camada Es nesse horário. Como a região E durante a noite tem sua ionização bastante reduzida, o traço no ionograma não aparece. Já em relação as camadas Es, acredita-se que nessa hora, o vento não foi forte para promover o cisalhamento e formar a camada Es.

O único dia que houve *blackout* em 2022 foi o dia 10/05/2022. Na figuras 4.2 é apresentado os ionogramas para essa região. Na parte superior temos a análise da região E e na parte inferior a região F. A escala dos ionogramas nesse caso vão de 0 até 500 km

de altura para a região E e 0 até 700 km para a região F. A frequência é dada em MHz e varia de 0 até 10 para ambas as regiões.

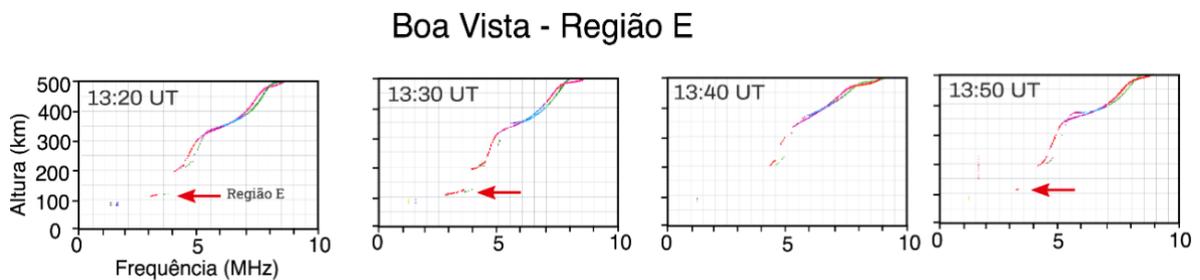
Analisando a região E no painel superior nota-se que às 13:20 UT ela está presente nos ionogramas (representada pela seta vermelha). Ela começa a enfraquecer às 13:30 UT e às 13:40 UT o traço da região E desaparece completamente.

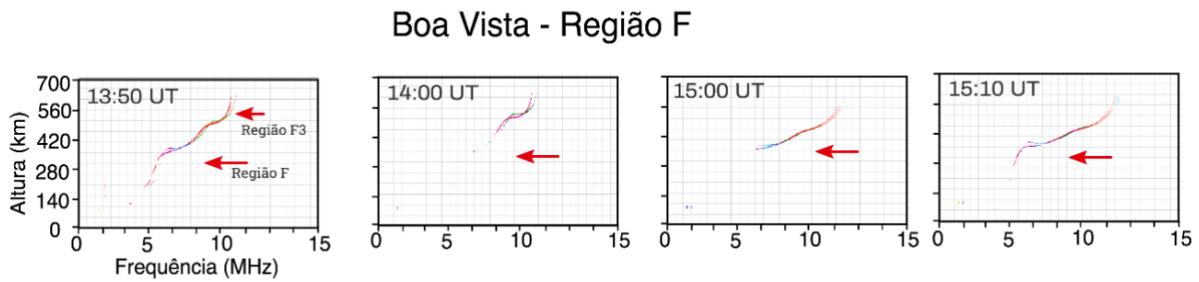
Com relação a região F, observa-se um fato muito interessante. Às 13:50 UT nota-se a presença da região F que é dividida em regiões F1 e F2. Ademais, nesse horário é observado a região F3. Essa região não é típica na ionosfera e pode ocorrer devido ao vento que eleva a região F2 para alturas bem superiores que se torna uma terceira camada, ocorrendo assim, uma nova região F2. Esse fato também pode ocorrer devido aos campos elétricos perturbados durante tempestades magnéticas.

O *blackout* na região F ocorre a partir das 1400 UT e ele é parcial. Isso significa que se observa um pouco do traço da região F ainda nos ionogramas. Em outras palavras, a absorção das ondas de HF da digissonda só ocorreu nas frequências inferiores. Às 15:10 UT, o traço da região F retorna inteiramente nos ionogramas. Outro ponto importante a notar é que em ambas as regiões, E e F, os *blackouts* ocorreram em horários diferentes.

Finalmente, no dia 12/02/2022, ocorreu um *flare* de classe M que não causou nenhum efeito de *blackout* na ionosfera. Isso parece demonstrar que os eventos de classe M não causam modificações na região de Boa Vista.

Figura 4.2 - Horário de alguns ionogramas para a região de Boa Vista em 10 de maio de 2022 para a região E (parte superior) e região F (parte inferior). A escala dos ionogramas vão de 0 até 500 km de altura para a região E e 0 até 700 km para a região F. A frequência é dada em Mhz e varia de 0 até 10 para ambas as regiões.





b) Cachoeira Paulista

A mesma análise foi realizada para Cachoeira Paulista. A tabela 4.2 mostra os dias analisados para essa região conjuntamente com classes dos *flares* solares M e X. Ademais, é mostrado a influência da ocorrência dos *flares* solares nas regiões E e F bem como as camadas Es.

Tabela 4.2 - Análise de *flares* solares em Cachoeira Paulista

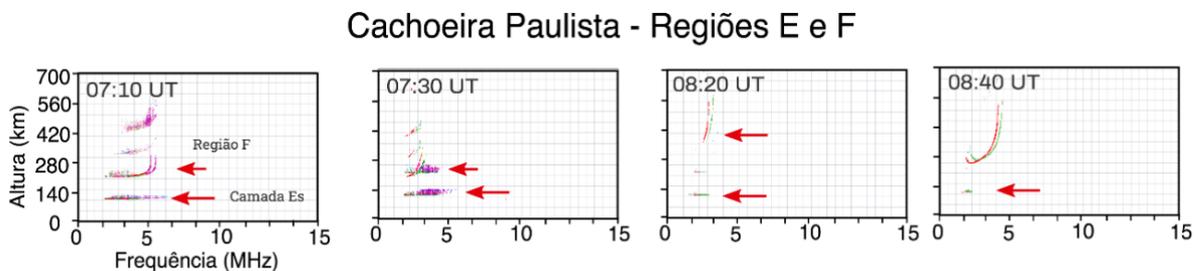
Data	Classe-Flare	Camada Es (tempo)	Região F (tempo)
14/01/2022	M1.84	Lado Noturno	Lado Noturno
12/02/2022	M1.44	Baixa Ionização-07:40UT-09:00UT	07:30UT-08:20UT
30/03/2022	X1.38	17:30UT-18:10UT	17:30UT-18:20UT
20/04/2022	X2.25	Lado Noturno	Lado Noturno
10/05/2022	X1.51	14:00-14:20	14:00UT-14:20UT

Nos dias 14/01/2022 e 20/04/2022 foi observado que os *flares* solares ocorreram no período noturno para a região brasileira. Como já explicado para a região de Boa Vista, quando os *flares* solares ocorrem nesses horários, não há influência na ionosfera.

Diferente de Boa Vista, os eventos de *blackouts* atingiram as regiões E e F praticamente nos mesmos horários. Isso demonstra que o mesmo evento de *flare* solar causa um impacto diferente dependendo da região analisada. Para o dia 12/02/2022 é mostrado os ionogramas para a região E e F da ionosfera (figura 4.3). Nesse caso, a escala de altura vai de 0 até 700 km e a escala de frequência é mostrada de 0 a 15 MHz. Os horários apresentados são 07:10 UT, 07:30 UT, 08:20 UT e 08:40 UT. Às 07:10 é possível observar que há a presença da camada Es e da região F. Nota-se que a região E não é possível observar porque a presença do traço da camada Es dificulta a sua visualização.

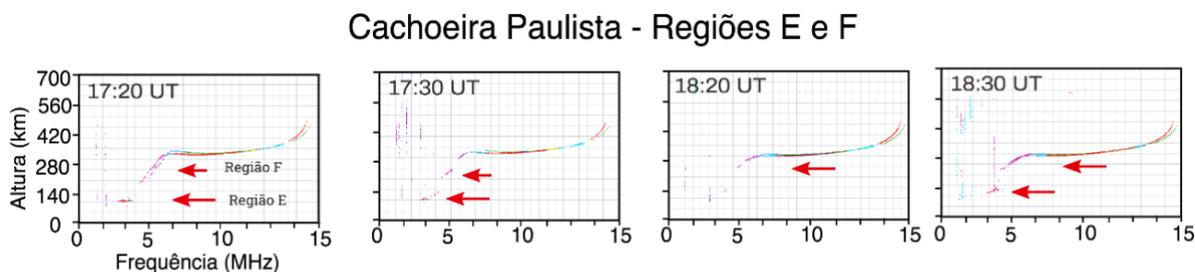
Mas isso não significa que ela não ocorreu. Às 07:30 UT é possível observar que o traço da região F se torna bem enfraquecido e às 08:20 UT ela praticamente desaparece para altas frequências. Esse fato pode ser devido tanto a um *blackout* ou a baixa ionização que ocorre na ionosfera. Contudo, essa baixa ionização é mais comum no inverno e por isso, acredita-se que o *flare* solar teve alguma influência. Ainda, às 08:20 UT há um enfraquecimento da camada Es. Às 08:40 UT o traço da região F retorna completamente e a região E parece ser observada. Já a camada Es desapareceu nesse horário.

Figura 4.3 - Ionogramas para a região de Cachoeira Paulista em 12 de fevereiro de 2022 para os horários de 07:10 UT, 07:30 UT, 08:20 UT e 08:40 UT mostrando as regiões E, F e camadas Es. A escala dos ionogramas vão de 0 até 700 km de 0 até 15 MHz em relação a frequência.



No dia 30/03/2022 é mostrado os ionogramas durante os horários 07:20 UT, 07:30 UT, 18:20 UT e 18:30 UT. Nesse contexto a escala de altura vai de 0 a 700 km e a escala de frequência indicada vai de 0 a 15 MHz. Observa-se que na região E o traço é completamente visualizado às 07:20 UT (figura 4.4). Às 18:20 UT, horário em que ocorre o pico do *flare* a região E desaparece por completo, retornando apenas às 18:30 UT. Já na região F é observado que o seu traço tem um leve desaparecimento às 18:20 UT, ou seja, houve absorção parcial da região F. Embora a região Es não esteja visível no ionograma às 18:20 UT, isso indica a ocorrência da sua total absorção juntamente com a região E O pico do *flare* solar ocorre às 18:20 UT, período em que a região E e a camada Es não estão visíveis, devido a uma forte tempestade solar, ocasionando a ocorrência do fenômeno *blackout* apenas nessa região. A camada F não foi influenciada porque ela é encontrada normalmente durante o dia.

Figura 4.4 - Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 30 de março de 2022. Os gráficos ilustram as regiões E e F, as representações verticais dos ionogramas variam de 0 a 700 km, enquanto as representações horizontais das frequências abrangem de 0 a 15 MHz.



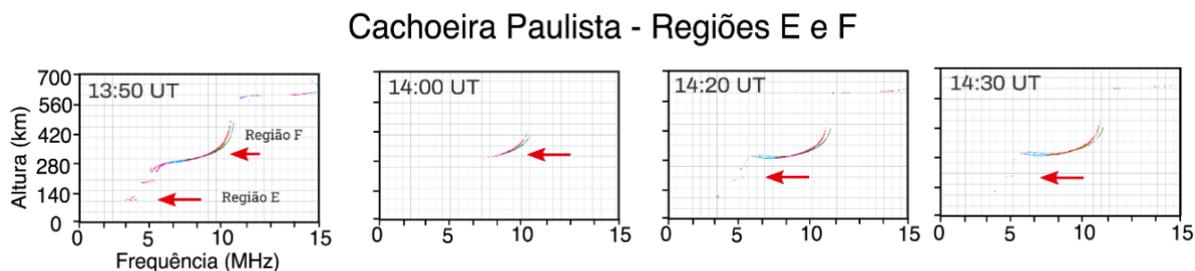
Finalmente, no dia 10 de maio de 2022, eventos de *blackouts* afetaram as regiões E e F simultaneamente, destacando mais uma vez que um mesmo evento de *flare* solar pode ter impactos variados conforme a área analisada. A análise dos ionogramas (figura 4.5) aponta detalhes interessantes sobre a ionosfera nas regiões E e F. A escala vertical abrange altitudes de 0 a 700 km, enquanto a escala horizontal se estende de 0 a 15 MHz.

Observações feitas nos horários 13:50 UT, 14:00 UT, 14:20 UT, E 14:30 UT mostram que, inicialmente às 13:50 UT a região E está visível, porém levemente enfraquecida e às 14:00 UT o traço da região E desaparece completamente.

No contexto da região F, algo notável se manifesta por volta das 13:50 UT. Nesse momento torna-se evidente a presença da região F, que se subdivide em duas partes distintas: F1 e F2. O que chama a atenção mais uma vez é uma possível aparição de uma terceira região, denominada F3, algo incomum dentro da composição padrão da ionosfera. Como foi dito para a região de Boa Vista, uma possível interpretação desse fenômeno se relaciona à influência do vento ionosférico, que eleva a região F2 a altitudes significativamente superiores.

Às 14:00 UT a região E desaparece completamente e a camada Es apresenta ausência nas regiões analisadas, caracterizando um evento de *blackout*, com duração de aproximadamente 10 minutos. A região E é observada novamente às 14:20 UT ainda enfraquecida. Para a região F às 14:00 UT, começa a ocorrer um *blackout* parcial, o que implica que ainda é possível perceber uma parte do traço dessa região no ionograma. A mesma retorna completamente às 14:20 UT. Contudo as regiões E e F retornaram totalmente às 14:30 UT.

Figura 4.5 - Ionograma para a região de Cachoeira Paulista em 10 de maio de 2022, abrangendo os momentos de 13:50 UT, 14:00 UT, 14:20 UT e 14:30 UT.



c) São Luís

A avaliação foi repetida para a localidade de São Luís. A tabela 4.3 apresenta os dias que foram examinados para essa região, juntamente com as classificações dos *flares* solares, categorizados como M e X. Além disso, são ilustrados os efeitos resultantes da atividade dos *flares* solares nas regiões E e F, assim como nas camadas Es.

Tabela 4.3 - Análise de *flares* solares em São Luís

Data	Classe-Flare	Camada Es (tempo)	Região F (tempo)
14/01/2022	M1.84	Lado Noturno	Lado Noturno
12/02/2022	M1.44	Sem Blackout	Sem Blackout
30/03/2022	X1.38	16:40UT-17:20UT	16:40UT-17:20UT
20/04/2022	X2.25	Lado Noturno	Lado Noturno
10/05/2022	X1.51	12:30-desaparece	12:50UT-13:50UT

É importante observar que nos dias 14/01/2022, 12/02/2022 e 20/04/2022, os *flares* solares de classe M surgiram durante a noite, assim como em Boa Vista, o que resultou na ausência de ocorrência de eventos de blackouts. Essencialmente, devido à posição da região de São Luís em relação ao lado noturno da Terra, os efeitos foram mitigados.

Somente nos dias 30/03/2022 e 10/05/2022 ocorreram episódios de *blackouts* ao longo do ano de 2022. As figuras 4.6 e 4.7 apresentam os ionogramas correspondentes a essas datas. A representação superior exhibe a análise da região E, enquanto a inferior retrata a região F. Nos ionogramas em questão, as escalas foram ajustadas para compreender altitudes que vão de 0 a 700 km na região E e F. As frequências estão

dimensionadas em MHz, abrangendo a faixa de 0 a 15 MHz em todas as regiões. No dia 30/03/2022 são apresentados os ionogramas correspondentes aos diferentes horários, 16:30 UT, 16:40 UT, 17:20 UT e 17:30 UT. Ao analisar o primeiro ionograma às 16:30 UT é indicado pela seta vermelha a visível presença da região E e F. Às 16:40, horário do pico solar de classe X o fenômeno blackout ocorre no mesmo instante para ambas as regiões. O traço da região E desaparece completamente, já a interrupção na região F é parcial em sua extensão.

Figura 4.6 - Ionograma para a região de São Luís em 30 de março de 2022. São apresentados os ionogramas correspondentes aos diferentes horários, 16:30 UT, 16:40 UT, 17:20 UT e 17:30 UT.

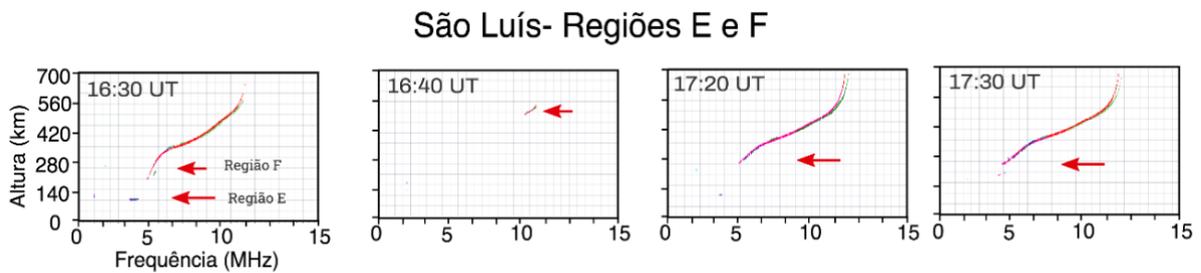
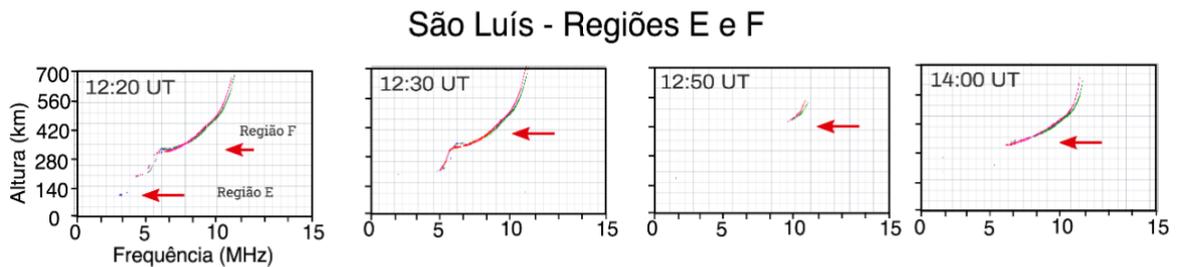


Figura 4.7 - Ionograma para a região de São Luís em 10 de maio de 2022. Análise dos ionogramas aponta detalhes interessantes sobre a ionosfera nas regiões E e F. A escala vertical abrange altitudes de 0 a 700 km, enquanto a escala horizontal se estende de 0 a 15 MHz.



Em relação ao dia 10/05/2022 o pico do *flare* começou às 1250 UT e a influência da ionosfera começou às 1230 UT, ou seja, vinte minutos antes do pico já era possível observar o efeito do *flare* solar nas regiões ionosféricas, mostrando uma intensa absorção das ondas de HF diante de uma forte tempestade magnética seguido de um *flare* solar de classe X1.51 W/m^{-2} . Às 14:00 UT é possível observar o traço da região F retornando enquanto o *blackout* na região E perdura por mais setenta minutos.

4.2 Resultados II - Adensamentos das camadas Es durante os dias que ocorreram *flares* solares

Nesta sessão será abordado alguns exemplos de camadas Es bem densas, atingindo altas frequências durante os dias que ocorreram os eventos de *flares* solares. O objetivo é saber se há algum impacto desses eventos nas camadas Es das regiões brasileiras analisadas. As regiões são Boa Vista, que caracteriza por ser perto do equador geográfico, São Luís, localizada perto do equador magnético e Cachoeira Paulista, uma região de baixa latitude. Nesse contexto, foram escolhidos os seis dias de eventos de ocorrência de *flares* solares. Um ponto importante mencionar é que considera aqui as camadas Es acima de 5 MHz em sua frequência máxima. A tabela 4.5 indica os dias em que os *flares* solares ocorreram e os horários em que cada região que tiveram esses adensamentos. Note em que alguns casos, o adensamento é observado em uma região e outra não.

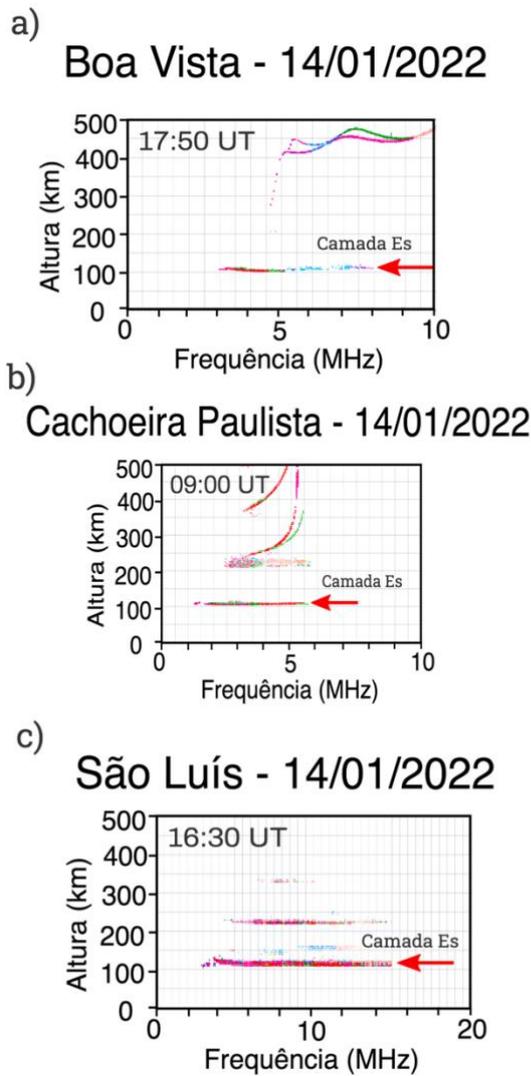
Tabela 4 2 - Dias de ocorrência dos *flares* solares ocorreram e os horários em que cada região analisada que tiveram adensamentos nas camadas Es.

Data	Boa Vista	Cachoeira Paulista	São Luís
14/01/2022	17:50 - 18:20	09:00 - 09:20	16:30 - 17:00
12/02/2022	não teve adensamento	06:50 -07:10	não teve adensamento
30/03/2022	não teve adensamento	03:30 - 03:50	08:40 - 10:00
20/04/2022	18:20 - 18:40	03:30 - 04:00	07:10 - 08:10
10/05/2022	não teve adensamento	não teve adensamento	não teve adensamento

No dia 14/01/2022, as camadas Es atípicas foram observadas nas três regiões analisadas. Contudo, os horários de ocorrência são diferentes para cada região. Em Boa Vista, uma camada Es forte foi observada às 17:50 UT, atingindo 8 MHz (painel a da figura 4.8). Essa camada Es durou até 18:20 UT, quando ela novamente enfraqueceu. Não é comum essa camada Es em Boa Vista, uma vez que os ventos que causam essas camadas Es nessa região são muito fracos, como mencionado em Resende et al. (2022). Em Cachoeira Paulista, uma camada Es densa foi observada pela manhã atingindo valores de 7 MHz (painel b da figura 4.8). Em São Luís, essa camada Es foi observada atingindo valores superiores a 10 MHz, o que não é comum para essa região (painel c da figura 4.8). Esses comportamentos são mostrados na figura 4.8, onde a seta vermelha indica o

máximo de frequência da camada Es. Note que para São Luís, a escala em frequência é de 20 MHz, uma vez que essa camada Es extrapolou os valores que foi utilizado nas outras análises.

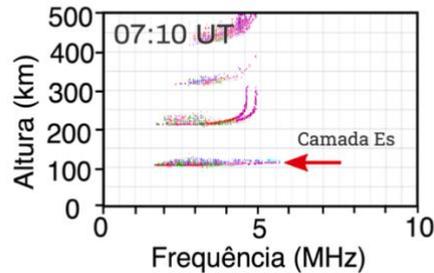
Figura 4.8 - Análise das camadas Es atípicas no dia 14/01/2022 para a região de Boa Vista (a), Cachoeira Paulista (b) e São Luís (c).



Para o dia 12/02/2022, não foi observado nenhum comportamento atípico em São Luís e nem Boa Vista. Apenas um intervalo curto foi observado a camadas Es mais densa em Cachoeira Paulista. A figura 4.9 mostra o ionograma para Cachoeira Paulista, onde a frequência passou está em torno de 6 MHz.

Figura 4.9 - Ionograma para Cachoeira Paulista mostrando uma frequência passou de 6 MHz.

Cachoeira Paulista - 12/02/2022

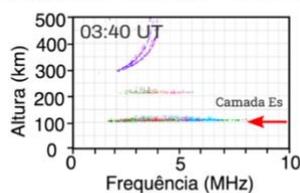


Não ocorreu adensamentos das camadas Es no dia 30/03/2022 em Boa Vista. Já em Cachoeira Paulista, a camada Es atingiu valores em torno de 8 MHz, como é mostrado no lado esquerdo (painel a) da figura 4.10. Em São Luís (painel b), além da camada Es atingir valores de 8-9 MHz, observa-se um traço espalhado característico de regiões aurorais. Esse comportamento pode ser devido a presença de irregularidades de plasma na região analisada ou até mesmo de campos elétricos perturbados. Este comportamento será investigado em trabalhos futuros.

Figura 4.10 - Análise das camadas Es atípicas no dia 30/03/2022 Para a região de Cachoeira Paulista (a) e São Luís (b).

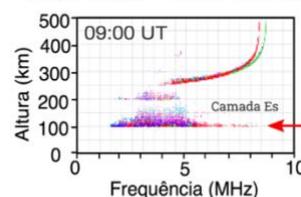
a)

Cachoeira Paulista - 30/03/2022



b)

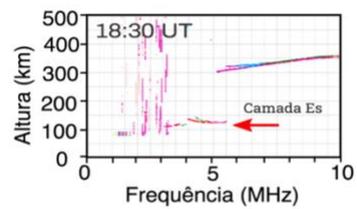
São Luís - 30/03/2022



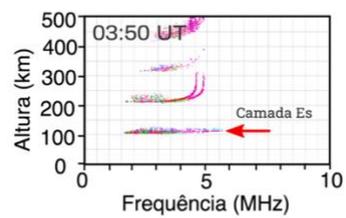
Nos ionogramas da figura 4.11, observou-se uma camada Es mais forte em Boa Vista no dia 20/04/2022, mas ela é bem característica da presença de ventos, responsável pelo comportamento típico da camada Es (painel a). No mesmo dia, as camadas Es em Cachoeira Paulista e em São Luís (painéis b e c) parecem ser bem espalhadas. Acredita-se que pode ter influência de campos elétricos perturbados na ionosfera.

Figura 4.11 - Análise das camadas Es atípicas no dia 20/04/2022 para a região de Boa Vista (a), Cachoeira Paulista (b) e São Luís (c).

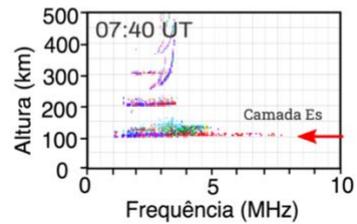
a) **Boa Vista - 20/04/2022**



b) **Cachoeira Paulista - 20/04/2022**



c) **São Luís - 20/04/2022**



CONCLUSÃO

No período de bolsa, o estudo concentrou-se na realização de trabalhos referentes ao assunto proposto, processamento e análise de dados. O método utilizado para o processamento de dados foi a redução dos dados da digissonda. Além disso, foi feito um estudo da literatura específica.

Primeiramente, foi realizada uma análise dos ionogramas disponíveis no site do EMBRACE e dados provindos do satélite GOES dos anos de 2022 para as regiões de Boa Vista, São Luís e Cachoeira Paulista. O objetivo foi verificar o efeito dos *flares* solares nas camadas Es e nas regiões E e F. Em geral, os resultados obtidos permitiram concluir que dentre as várias classificações dos *flares*, os de classes M e X são os que mais afetaram a ionosfera. Os *flares* de classe X atingiram em maior proporção a região E e as camadas Es devido a alta ionização da região D ionosférica fazendo com que o sinal da digissonda seja absorvido em frequências mais baixas causando o desaparecimento parcial ou total da camada Es. Alguns casos de *flares* classe M também interferiram nas camadas da ionosfera, absorvendo-as parcialmente.

Ademais, foi observado a camada F3 em alguns horários, principalmente para a região de Boa Vista. Isso reflete que campos elétricos perturbados podem estar agindo na ionosfera nesse período.

A fim de se verificar o comportamento das camadas Es, foi analisado se houve intensificações anômalas em sua intensidade nos dias que ocorreram os *flares* solares. O critério utilizado seria se a camada Es atingisse uma máxima frequência de 5 MHz. Esse fato foi observado durante horários após o *flare* solar. Este comportamento significa que durante a ocorrência da explosão solar, a ionosfera ficou perturbada. Ademais, foi observado camada Es espalhadas que podem ser devido a campos elétricos perturbados, irregularidades de plasma ou devido à precipitação de partículas uma vez que nessas regiões se tem a presença da Anomalia Magnética da América do Sul. Este comportamento será avaliado mais detalhadamente em trabalhos futuros.

Finalmente, com as atividades teóricas e técnicas realizadas nesse período de bolsa, o cronograma do projeto foi cumprido. O estudo dos efeitos do efeito de períodos

perturbados na ionosfera é importante para a pesquisa no Clima Espacial e, pretende-se assim, dar continuidade a este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, P. D. S. C. Estudos comparativos de simulações numéricas e análises de dados de perfis de densidades eletrônicas para a região brasileira. Dissertação (Iniciação Científica – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2006.

Abdu, M. A.; Daroit, C. A.; Schuch, N.J.; Darnardin, C.M. Estudo da eletrodinâmica da Ionosfera baseado em dados de radares coerentes e sondadores digitais. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) Santa Maria, 2008.

Bertoni, F. C. P. Derivas Ionosféricas em latitudes equatoriais: observações e modelagem. Tese (Doutorado – Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2004.

Damião, J. Estudo da atividade solar no passado em função da radiação cósmica, (UFSM), 2013.

De Lucas, A. Estudo da dinâmica da corrente de anel durante a fase principal de supertempestades magnéticas. 262 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2005.

Echer, E. Estudo de Características de Explosões Solares e de seus Efeitos na Terra. Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), 2009.

Hargreaves, J. K. The solar-terrestrial environment: An introduction to geospace the science of the upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere. New York: Cambridge University Press, 1992.

Kivelson, M. G., Russell, C. T., Introduction to Space Physics, Cambridge atmospheric and space science series, 568 p., 1995

Kelley, M. C. The Earth's Ionosphere. San Diego: Academic Press, 1989.

Kirchhoff, W. J. H. Introdução à Geofísica Espacial. 1. ed. São Paulo: Nova Stella, 1991

Pillat, G.V. Estudo da ionosfera em baixas latitudes através do modelo computacional Lion e comparação com parâmetros ionosféricos. São José dos Campos: (UNIVAP), 2006.

Pimenta, A A. Estudos da deriva zonal e Dinâmica das Bolhas de Plasma na região Tropical. Tese (doutorado em Geofísica Espacial) -Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2003.

Resende, L. C. A. Estudo do Comportamento dos Parâmetros de Frequência das Camadas E-Esporádicas na Região Equatorial Durante Períodos Perturbados ($DST \leq - 100$ NT),

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

Resende, L. C. A., Zhu, Y., Denardini, C. M.; Moro, J.; Arras, C.; Chagas, R. A. J., Da Silva, L. A.; Marchezi, J. P.; Carmo, C. S.; Picanço, G. A. S.; Silva, R. P.; Wang, C.; Li, H.; Liu, Z. Worldwide study of the Sporadic E (Es) layer development during a space weather event. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 241,105966, 2022.

Reinisch, B. W. New techniques in ground-based ionospheric sounding and studies. *Radio Science*, v. 21, n. 3, p. 331–341, 1986.

Rigozo, N. R.; Nordemann, D. J. R.; Echer, E.; Echer, M. P. S.; Silva, H. E. Prediction of solar minimum and maximum epochs on the basis of spectral characteristics for the next millennium. *Planetary and Space Science*, v. 58, p. 1971-1976, 2010.