

Universidade do Vale do Paraíba
IP&D Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento

**ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE BLOBS DE PLASMA IONOSFÉRICO
OBSERVADAS NO SETOR BRASILEIRO**

FLÁVIA COELHO

São José dos Campos, SP

2017

FLÁVIA COELHO

**ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE BLOBS DE PLASMA IONOSFÉRICO
OBSERVADAS NO SETOR BRASILEIRO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo Abalde Guede
Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre Álvares Pimenta

São José dos Campos, SP

2017

Ficha Catalográfica

Espaço reservado para a ficha catalográfica

Autorizo para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.

Assinatura da Aluno:

Data da defesa: 23/08/2017

FLÁVIA COELHO

**ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE BLOBS DE PLASMA IONOSFÉRICO
OBSERVADAS NO SETOR BRASILEIRO**

Espaço reservado para a folha de aprovação da banca examinadora

Tese de Doutorado _____ como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Física e Astronomia, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

Banca examinadora

São José dos Campos, 23 de agosto de 2017.

ΕΠΙΓΡΑΦΕ

*Imagine there's no heaven
It's easy if you try
No hell below us
Above us only sky
Imagine all the people
Living for today...
It isn't hard to do
Nothing to kill or die for
And no religion too
Imagine all the people
Living life in peace
You may say
I'm a dreamer
But I'm not the only one
I hope some day
You'll join us
And the world will be as one...*

(Imagine - John Lennon)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Antônio e Ivone Coelho, que souberam me trilhar no caminho correto.

Ao meu marido Alexandre Tardelli, sem ele nada disso seria possível, é meu maior incentivador.

A minha filha Ana Flávia Tardelli.

AGRADECIMENTOS

Os meus sinceros agradecimentos a Universidade do Vale do Paraíba, por todo suporte dado até aqui.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudo concedida durante esses 4 anos.

Ao Professor Dr. José Ricardo Abalde pela paciência, dedicação, comprometimento e por toda a contribuição no decorrer desses anos;

Ao Professor Dr. Alexandre A. Pimenta por aceitar a co-orientação e principalmente por toda a contribuição;

Aos Professores: Dr. Francisco Carlos Fernandes, Dr. Valdir Gil Pillat, Dr. Maurício Bolzam e ao Dr. Alam Kerani, meu muito obrigada e suas contribuições enriqueceram muito este trabalho;

Ao Dr. Venkatesh Kavutarapu que me auxiliou com os dados dos satélites DMSP;

Aos professores do grupo de Física e Astronomia da UNIVAP;

Ao meu marido o Dr. Alexandre Tardelli, por toda dedicação, por todo o companheirismo, por sempre me orientar em todos os caminhos, sempre digo e vou repetir, graças a ele, isso foi possível;

A minha filha Ana Flávia sempre compreendendo as minhas faltas;

Aos meus pais Antônio e Ivone porque sem a base que me deram, não chegaria tão longe;

Aos meus irmãos Emerson e Lilian que muito se orgulham de onde cheguei.

A Kátia que nos incentiva e torce por nós sempre;

As amigas Dra. Zu Sodré, e a Dra. Caren Lorensi, companheiras nessa luta do dia a dia;

Aos amigos que fiz durante esse percurso, principalmente aos companheiros de bancada, que muito me apoiaram e torceram por mim.

ESTUDO DE CARACTERÍSTICAS DE BLOBS DE PLASMA IONOSFÉRICO OBSERVADAS NO SETOR BRASILEIRO

Resumo

Neste trabalho são analisados dois tipos de irregularidade do plasma ionosférico: bolhas e blobs de plasma. As bolhas são depleções na densidade eletrônica do plasma quando comparada ao plasma de fundo. As blobs caracterizam-se pelo inverso, são regiões onde a densidade do plasma aumenta quando comparada ao plasma de fundo. As bolhas e as blobs de plasma estudadas neste trabalho foram identificadas por meio de fotômetros imageadores com o filtro de interferência OI 630,0 nm e com dados obtidos através do satélite DMSP F15 em duas regiões no setor brasileiro. As imagens digitais foram obtidas por dois sistemas de imageamento óptico que operam em: Manaus AM (MAN; 2,59°S; 60,22°O; dip. latitude 12,1°N; região próxima ao equador magnético) e São José dos Campos SP (SJC; 23,21°S, 45,86°O; dip. latitude 18,3°S; região de baixa latitude e próxima à crista da Anomalia Ionosférica Equatorial, *EIA*). Com o objetivo de compreender melhor a dinâmica e morfologia dessas irregularidades, foram realizados, neste estudo, cálculos de velocidades de deriva zonal e latitudinal, e as dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs de plasma. Os resultados encontrados em MAN mostram que a deriva zonal de blobs de plasma é maior se comparada à deriva zonal de bolhas de plasma, estudo feito no período de julho de 2015 a abril de 2016. No entanto, os resultados encontrados em SJC mostram que a deriva zonal de blobs de plasma foi ligeiramente menor se comparada à deriva zonal de bolhas de plasma, para a noite estudada, 23-24 de fevereiro de 2007. Neste estudo, são apresentados pela primeira vez, cálculos de velocidades de deriva latitudinal de blobs de plasma no setor brasileiro. As velocidades de deriva latitudinal observadas em Manaus, em geral, apresentaram valores inferiores aos observados nos cálculos de deriva zonal das blobs de plasma. As dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs de plasma observadas em SJC e MAN, mostram uma grande variabilidade. As blobs foram observadas em um período de baixa atividade solar e em média atividade solar, ambos foram períodos geomagneticamente calmos.

Palavras chave: Bolhas de plasma, blobs de plasma, irregularidades ionosféricas, fotômetro imageador, satélite DMSP.

STUDY OF CHARACTERISTICS OF IONOSPHERIC PLASMA BLOBS OBSERVED IN THE BRAZILIAN SECTOR

Abstract

In this work two types of ionospheric plasma irregularity are analyzed: plasma bubbles and blobs. The bubbles are depletions in the plasma electronic density when compared to the background plasma. The blobs are characterized by the inverse; they are regions where the plasma density increases when compared to the background plasma. The bubbles and plasma blobs studied in this work were identified by imaging photometers with the interference filter OI 630.0 nm and with data obtained through the DMSP F15 satellite in two regions in the Brazilian sector. The digital images were obtained by two optical imaging systems operating in Manaus AM (MAN, 2.59°S, 60.22°W; dip. latitude 12.1°N; near the magnetic equator) and São José dos Campos SP (SJC; 23.21°S, 45.86°W; dip. latitude 18.3°S; low latitude region and near the *EIA* crest). In order to better understand the dynamics and morphology of these irregularities, calculations of zonal and latitudinal drift velocities and north/south and east/west dimensions of plasma blobs were performed in this study. The results found in MAN show that the zonal drift of plasma blobs is larger than to the zonal drift of plasma bubbles, study done in the period from July 2015 to April 2016. However, the results found in SJC show that drift zonal plot of plasma blobs was slightly lower than to the zonal drift of plasma bubbles for the night studied, 23-24 February 2007. In this study, we present for the first time calculations of latitudinal drift velocities of plasma blobs in the Brazilian sector. The latitudinal drift velocities observed in Manaus, in general, presented lower values than those observed in the calculations of zonal drift of the plasma blobs. The north/south and east/west dimensions of the plasma blobs observed in SJC and MAN show a great variability. The blobs were observed in a period of low solar activity and in average solar activity, both were geomagnetically calm periods.

Keywords: Plasma bubbles, plasma blobs, ionospheric irregularities, imaging photometer, DMSP satellite.

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição vertical das camadas atmosféricas em função da temperatura.	34
Figura 2 – Mapa ilustrando a anomalia equatorial ionosférica (EIA) sobre o globo terrestre.	39
Figura 3 – Esquema do sistema de correntes de dínamo produzido por ventos na camada F equatorial.	40
Figura 4 – Gráfico ilustrando as derivas (a) zonal e (b) vertical, da camada F ionosférica em Jicamarca-PE.	42
Figura 5 – Imagem de uma bolha de plasma obtida pelo fotômetro imageador na emissão OI 630 nm observada na região de SJC na noite de 23 de fevereiro de 2007 às 22:52 LT, mostrando a assinatura da bolha de plasma.	46
Figura 6 – Imagem obtida pelo fotômetro imageador na região de SJC pelo filtro de interferência OI 630,0 nm na noite de 23 de fevereiro de 2017, às 22:52 LT. A presença da bolha de plasma está indicada através de uma seta sobre a imagem.	51
Figura 7 – Diagrama esquemático da teoria de Rayleigh-Taylor.	52
Figura 8 – Ilustração didática da evolução de uma instabilidade ionosférica, segundo a teoria de Rayleigh-Taylor.	54
Figura 9 – Ilustração da geração das principais emissões ionosféricas a partir do oxigênio atômico excitado.	61

Figura 10 – Vista externa do laboratório móvel do laboratório de Física & Astronomia no Campus Urbanova da UNIVAP (SJC – SP), container onde está instalado e operando um fotômetro imageador de alta resolução.	62
Figura 11 – Descrição da geometria das lentes do telescópio de alta resolução espacial.	63
Figura 12 – Vista de uma roda de filtros desmontada de um dos fotômetros imageadores da UNIVAP. Nela se observa as 8 posições da roda e os sete filtros colocados.	65
Figura 13 – Imagem capturada pelo fotômetro imageador em SJC na noite de 23 de fevereiro de 2007 às 23:12 LT e visualizada através do programa UASDA.	65
Figura 14 – Esquema gráfico com a área de cobertura do fotômetro imageador instalado nos observatórios de (a) São José dos Campos (23,21° S, 45,86° O; dip. latitude 18,3° S) e (b) Manaus (2,59°S; 60,22°O; dip. latitude 12,1°N), Brasil.	66
Figura 15 – Ilustração do satélite DMSP em órbita	67
Figura 16 – Tela do programa UASDA com a imagem crua à esquerda e a direita já linearizada numa altitude de 280 km e uma área de 1024 km x1024 km. Essa imagem é do dia 23 de fevereiro de 2007, capturada utilizando o filtro de interferência de OI 630,0 nm no observatório de SJC.	71
Figura 17 – Vista da interface gráfica do UASDA utilizada para o cálculo da velocidade de deriva zonal das bolhas e das blobs de plasma da noite de 23 de fevereiro de 2007 em SJC.	72
Figura 18 – Vista da interface gráfica do UASDA utilizada para o cálculo da velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma da noite de 23 de fevereiro de 2007 em SJC.	

Utilizando uma área de 1320x1320 km, em uma altitude da emissão OI 630,0 nm de 280 km.....73

Figura 19 – Vista do perfil de intensidade para os quatro cortes (270, 300, 350 E 380 km) selecionados na (Figura 17). O perfil em cor verde é da imagem do primeiro horário e o perfil em cor vermelho é da imagem do segundo horário, seu deslocamento indica o movimento em que a bolha teve nesse intervalo de tempo.....74

Figura 20 – Exemplo da interface gráfica utilizada no cálculo de velocidade de deslocamento da blob de plasma a partir de um dos quatro cortes no perfil de intensidade de emissão selecionado, conforme visto na Figura 18. Observa-se o traçado das paredes nas bordas das blobs construídas a partir dos dois pontos selecionados para cada uma delas.....75

Figura 21 – Interface do programa UASDA com o corte para a medição da extensão leste/oeste da noite de 23 de fevereiro de 2007 no observatório de São José dos Campos-SP, a marcação em amarelo refere-se aos pontos de x e y que são utilizados para a realização do cálculo.....76

Figura 22 – Interface do programa UASDA com o corte para a medição da extensão norte/sul da noite de 23 de Fevereiro de 2007 no observatório de São José dos Campos-SP, para esta noite foi utilizada a área de linearização de 1320 x 1320 km.....77

Figura 23 – Perfil gráfico gerado pelo programa MatLab, por meio dos dados obtidos do satélite DMSP F15, na noite de 21 de novembro de 2015.....78

Figura 24 – Ilustração da área de cobertura com a imagem as 21:30 LT do filtro de interferência OI 630,0 nm do fotômetro imageador instalado em SJC (23,21°S; 45,86°O; dip. latitude 18,3°S). Observam-se as linhas do equador magnético e geográfico e a

trajetória percorrida pelo satélite DMSP F15 para a noite do dia 23 de fevereiro de 2007.
.....81

Figura 25 – Imagens obtidas pelo fotômetro imageador na noite de 23 - 24 de fevereiro de 2007. (a) Mostra imagem às 21:30 LT, na emissão OI 630 nm, da passagem da primeira blob no campo de visão do fotômetro e no horário da passagem pela região do satélite DMSP F15 em que ele registra o aumento na densidade de elétrons. (b) Imagem às 22:52 LT, quando em seu deslocamento oeste para leste a mesma blob das 21:30 LT, já se encontra próxima ao centro da imagem. (c) e (d) Apresentam as imagens do céu local sem o filtro de interferência, nos horários mais próximos que estes foram registrados das imagens (a) e (b), 21:50 LT e 22:51 LT, respectivamente.82

Figura 26 – Gráfico da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, altitude de 830 km, aproximadamente, das 21:22 LT às 21:32 LT na noite de 23 - 24 de fevereiro de 2007. A banda na cor cinza corresponde ao aumento na densidade do plasma local.84

Figura 27 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, observadas por imageador em 280 km de altitude na noite de 23 de fevereiro de 2007. Painel (a) Velocidade de deriva zonal de bolha de plasma, (b) velocidade de deriva zonal das blobs de plasma e (c) velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma.86

Figura 28 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S; 60,22°O dip. latitude 12,1°N), com indicação da linha do equador magnético e geográfico e da trajetória do satélite DMSP F15 para a noite de 14 - 15 de outubro de 2015.
.....90

Figura 29 – Noite de 14 - 15 de outubro de 2015. Painel superior (a) e (b) imagens na emissão OI 630 nm às 03:23 UT e 04:30 UT, onde observa se a presença de bolhas e

blobs, abaixo (c) e (d) imagens do céu noturno sem filtro, às 03:25 UT e 04:28 UT, respectivamente.91

Figura 30 – Gráfico da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 14 - 15 de outubro de 2015 no período de 06:22 UT até 06:34 UT, quando a sua passagem pela setor brasileiro. A banda em cinza corresponde ao aumento no perfil da densidade eletrônica (blobs de plasma) medidas pelo satélite.92

Figura 31 – Velocidades de deriva do plasma inferidas a partir da emissão de OI 630,0 nm, observadas pelo imageador de MAN usando imagens linearizadas em 280 km de altitude na noite de 14 - 15 de outubro de 2015. Painéis (a) e (b) Gráficos das velocidades de deriva zonal das bolhas e das blobs de plasma, respectivamente, e (c) valores da velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma.94

Figura 32 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O dip. latitude 12,1°N), com a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite do dia 15 - 16 de outubro de 2015.97

Figura 33 – Imagens da noite de 15 - 16 de outubro de 2015 na emissão OI 630,0 nm e imagens sem filtro de interferência, apenas a imagem do céu noturno (a) nesta imagem há a presença de bolhas e blobs, ambas estão referenciadas por uma seta no horário das 03:52 UT, (b) esta imagem mostra a blob independente, às 05:24 UT e (c) e (d) são imagens do céu noturno às 03:46 UT e 05:30 UT, respectivamente.98

Figura 34 – Gráfico da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 15 - 16 de outubro de 2015. As bandas em cinza correspondem ao aumento na densidade eletrônica do plasma, em diferentes pontos, medidas através de dados do satélite DMSP F15.99

Figura 35 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630,0 nm, observadas por imageador, em 280 km de altitude na noite de 15 - 16 de outubro de 2015.

Painéis (a) velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma, (b) velocidade de deriva zonal das blobs de plasma e (c) velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma. ...101

Figura 36 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O dip. latitude 12,1°N), a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite de 19 - 20 de outubro de 2015.

.....104

Figura 37 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 19 - 20 de outubro de 2015. A área em cinza corresponde ao aumento na densidade (blob de plasma) medidas pelo satélite.105

Figura 38 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, observadas por imageador, usando imagens linearizadas numa altitude de 280 km na noite de 19 - 20 de outubro de 2015. (a) Velocidade de deriva zonal da blob de plasma e (b) velocidade de deriva latitudinal da blob de plasma.106

Figura 39 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O; dip. latitude 12,1°N), com a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite do dia 20 - 21 de outubro de 2015.107

Figura 40 – Imagens de fotômetro imageador (a) com o filtro de interferência na emissão OI 630 nm com a presença de uma blob de plasma às 07:22 UT, e (b) sem o filtro de interferência às 07:24 UT.108

Figura 41 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 20 - 21 de outubro de 2015. A banda em cinza corresponde ao aumento na densidade do plasma (blobs de plasma) medidas pelo satélite.108

Figura 42 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630,0 nm, em uma altitude de 280 km na noite de 20 - 21 de outubro de 2015. (a) Velocidades de deriva zonal e (b) velocidade de deriva latitudinal.109

Figura 43 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O; dip. latitude 12,1°N), indicando a linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite do dia 20 - 21 de novembro de 2015 às 06:42 UT.111

Figura 44 – Imagens do fotômetro imageador com o filtro de interferência e sem o filtro de interferência na noite de 20 - 21 de novembro de 2015. (a) Apresenta uma imagem na emissão OI 630,0 nm às 06:26 UT com a presença de blob e (b) refere-se a imagem do céu noturno a um horário próximo (06:23 UT) sem o filtro de interferência.111

Figura 45 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 20 - 21 de novembro de 2015. A banda em cinza corresponde ao aumento na densidade eletrônica do plasma (blobs de plasma) medidas pelo satélite.112

Figura 46 – Velocidade de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, observadas por imageador, em uma altitude de 280 km. Painel (a) deriva zonal, painel (b) deriva latitudinal, referentes à blob analisada na noite de 20-21 de novembro de 2015. 113

Figura 47 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O dip. latitude 12,1°N), com a indicação da linha do equador magnético e

geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite de 04 - 05 de dezembro de 2015 às 06:21 UT.....	115
Figura 48 – Imagens obtidas do fotômetro imageador para a noite de 04-05 de dezembro de 2015; (a) e (b) mostram duas imagens com o filtro de interferência OI 630 nm em 00:23 UT e 02:15 UT, respectivamente e (c) e (d) apresentam os horários próximos sem o filtro de interferência às 00:37 UT e 02:21 UT, respectivamente.....	116
Figura 49 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 04-05 de dezembro de 2015. A banda em cinza corresponde ao aumento na densidade (blobs de plasma) medidas pelo satélite.	117
Figura 50 – Velocidade de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, em 280 km de altitude. Painel (a) velocidade de deriva zonal e (b) velocidade de deriva latitudinal das três blobs de plasma observadas e analisadas na noite de 04-05 de dezembro de 2015.	118
Figura 51 – Perfil da variação média diária do valor do índice $F_{10.7}$ para o período de 2005 a 2017.	125
Figura 52 – Perfis das variações dos valores dos índices $F_{10.7}$, Kp e Dst, para o mês de fevereiro de 2007. A banda cinza sobre a imagem corresponde à noite analisada de 23-24.	127
Figura 53 – Perfis das variações dos valores dos índices $F_{10.7}$, Kp e Dst, para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2015. As bandas cinza sobre a imagem são as noites selecionadas e analisadas nesse trabalho com a presença de bolhas ou blobs.....	128

Lista de Tabelas

Tabela 1 Principais emissões do oxigênio atômico na região-F noturna.....	59
Tabela 2 Características dos sensores do satélite DMSP	68
Tabela 3 Valores médios das velocidades de deriva zonal das 03 bolhas de plasma estudadas em SJC e MAN.	119
Tabela 4 Valores médios das velocidades de deriva zonal e latitudinal e dimensões norte/sul e leste/oeste das 07 blobs de plasma estudadas.....	119

Lista de abreviaturas e siglas

DMSP	Defense Meteorological Satellite Program
Dst	Disturbance storm time index
EIA	Equatorial Ionization Anomaly
EUV	Extremo ultravioleta
kp	Planetary index
LT	Local Time
MAN	Cidade de Manaus, no estado do Amazonas (AM)
SJC	Cidade de São José dos Campos, no estado de São Paulo (SP)
UNIVAP	Universidade do Vale do Paraíba
UT	Universal Time
UV	Ultravioleta

Lista de Símbolos

B	Fluxo de densidade magnética ou indução magnética
E	Vetor campo elétrico
g	Aceleração gravitacional
n, N	Concentração de espécies (usados para íons e elétrons)
N_e	Densidade eletrônica
p	Pressão de constituintes
q, Q	Taxa de produção de íons
T	Temperatura absoluta
U	Deriva eletromagnética do vento neutro
V	Velocidade de deriva do plasma

Símbolos gregos

α	Constante do coeficiente de perda quadrática
β	Constante do coeficiente de perda linear
λ	Comprimento de onda
τ	Profundidade óptica
φ	Fluxo de radiação
χ	Ângulo zenital
ω	Frequência angular

Constantes físicas

e	Módulo da carga do elétron	$[e = 1,602 \times 10^{-19} \text{C}]$
ϵ_0	Permissividade do espaço livre	$[\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \text{C}^2/\text{Nm}^2]$
k	Constante de Boltzmann	$[k = 1,381 \times 10^{-23} \text{J/K}]$
m_e	Massa de repouso do elétron	$[m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{kg}]$
m_p	Massa de repouso do protón	$[m_p = 1,672 \times 10^{-27} \text{kg}]$

Símbolos matemáticos especiais

∇	Operador nabla
∂	Operador da derivada parcial
d	Operador da derivada total
Σ	Operador somatório

Sumário

Lista de Figuras	13
Lista de Tabelas	21
Lista de abreviaturas e siglas.....	22
Lista de Símbolos.....	22
1 INTRODUÇÃO.....	26
1.1 Objetivos	30
1.2 Estruturas da tese	30
2 ATMOSFERA NEUTRA E IONIZADA	33
2.1 Atmosfera neutra.....	33
2.2 Atmosfera ionizada	34
2.2.1 Regiões ionosféricas	35
a) Região D.....	35
b) Região-E.....	36
c) Região-F.....	36
3 ELETRODINÂMICA DA REGIÃO-F DA IONOSFERA	38
3.1 A Eletrodinâmica da ionosfera equatorial	38
3.2 Dínamo da região-F	39
3.3 Campo elétrico da região-F	41
3.4 Deriva eletromagnética do plasma.....	41
4 IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS	43
4.1 Bolhas de plasma.....	43
4.2 Blobs de plasma	46
4.3 Teoria linear Rayleigh Taylor (RT)	52
4.4 Teoria generalizada Rayleigh Taylor	55
4.4.1 Gradientes de Condutividade Pedersen	56
5 LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA.....	58
5.1 Emissão OI 630,0 nm	59
5.1.2 Recombinação dissociativa	60
6 INSTRUMENTAÇÃO	62
6.1 Fotômetro imageador	62
6.2 Satélite DMSP (<i>Defense Meteorological Satellite Program</i>).....	67
7 METODOLOGIA.....	69
7.1 Dimensões norte/sul e leste/oeste	76
7.2 Aumento na densidade eletrônica do plasma	78
8 ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS.....	80
8.1 Análise de dados.....	80

8.1.1	Análise de dados de São José dos Campos	81
8.1.2	Análise de dados de Manaus	88
a)	Noite de 14 - 15 de outubro de 2015 (blob associada com bolhas de plasma)....	89
b)	Noite de 15 - 16 de outubro de 2015 (blobs associada com bolhas de plasma)..	96
c)	Noite de 19 - 20 de outubro de 2015 (blobs independente).....	103
d)	Noite de 20 - 21 de outubro de 2015 (blobs independente).....	106
e)	Noite de 20 - 21 de novembro de 2015 (blobs independente)	110
f)	Noite de 04 - 05 de dezembro de 2015 (blobs independente)	114
8.2	Discussões	119
8.2.1	Blobs em relação aos valores do fluxo solar $F_{10.7}$ e dos índices Kp e Dst..	125
9.	CONCLUSÃO	130
9.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137

1 INTRODUÇÃO

As irregularidades do plasma ionosférico foram inicialmente apresentadas por [Booker e Wells, 1938](#). Através da análise de radiossondagem, eles perceberam que os sinais de rádio refletidos pela ionosfera mostravam um tipo de espalhamento, em uma determinada faixa de altitude e numa determinada frequência. Em meados dos anos 50, Dungey, realizando estudos na magnetosfera terrestre, propôs uma teoria que explicava o processo que gerava esses espalhamentos na ionosfera ([Dungey, \(1961\)](#)). Com o passar dos anos, novos estudos foram realizados e diferentes técnicas de análises foram desenvolvidas para aprimorar o conhecimento em relação às irregularidades do plasma ionosférico. Portanto, o estudo da geração, evolução, dinâmica e morfologia das irregularidades equatoriais na região-F, vêm sendo amplamente estudado por várias décadas e por diferentes pesquisadores ([Woodman, 1972](#); [Sobral et al. 1980a,1980b, 2002, 2011](#); [Fejer et al. 1991](#); [Sahai et al. 1999, 2000](#); [Kudeki and Battacharyya, 1999](#); [Santana et al. 2001](#); [Takahashi et al. 2001](#); [Pimenta et al. 2001, 2003, 2004, 2007, 2008](#); [Abalde et al. 2004, 2009](#); [Basu et al. 2004](#); [Chu et al. 2005](#); [Chu et al. 2007](#); [Tardelli-Coelho et. al. 2016, 2017](#)).

O estudo de irregularidades do plasma utilizando técnicas ópticas vem fornecendo informações importantes sobre a geração e evolução de irregularidades de grande escala no plasma ionosférico (que são nomeadas como bolhas de plasma) desde 1960 ([Calvert e Cohen, 1961](#); [Woodman e La Hoz, 1976](#); [Mcclure et al. 1977](#); [Weber et al. 1978](#); [Anderson e Haerendel, 1979](#); [Mendillo e Baumgarden, 1982](#); [Pimenta et al. 2003](#); [Abalde et al. 2004](#); [Abdu et al. 2009](#); [Tsunoda, 2010](#); [Sobral et al. 2011](#); entre outros).

As bolhas de plasma têm sua origem na ionosfera equatorial, na base da camada F, e são geradas logo após o pôr-do-sol, devido a uma perturbação inicial e a deriva do plasma em ascensão ([Kelley, 1989](#)). Estas irregularidades são reconhecidas devido à depleção que apresentam na densidade do plasma. Estudos já realizados mostram que as

ocorrências das bolhas plasma dependem de alguns fatores, como exemplo, a deriva eletromagnética, a altura e densidade eletrônica de pico da camada ionosférica, o gradiente de densidade eletrônica na região inferior da ionosfera noturna, os ventos neutros e a presença de perturbações externas. Existem também estudos que consideram a sazonalidade, a hora local, a declinação magnética, a anomalia equatorial, os efeitos das tempestades magnéticas, e as fases do ciclo solar.

As bolhas de plasma têm sua origem nas instabilidades que ocorrem na base da região-F. A ação combinada do vento neutro e o intenso gradiente de condutividade geram um aumento rápido do campo elétrico zonal para o leste, que juntamente com o campo magnético, promovem um aumento abrupto da velocidade zonal do plasma na região-F (devido à deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$). Este fenômeno é conhecido como pico pré-reversão (Risbeth et al. 1972; Kelley, 1989; Nade et al. 2013; Haase et al. 2010). Ao anoitecer, a ionosfera terrestre sofre processos de recombinação, dando origem a um gradiente de densidade vertical na base da região-F, gerando uma instabilidade em que um meio de maior densidade é suportado por um meio de menor densidade, podendo criar condições à formação de bolhas de plasma. Essas bolhas de plasma podem interferir na propagação de sinais trans-ionosféricos, como a comunicação por satélite e os sistemas de navegação por GPS (*global position system*), por exemplo.

As bolhas de plasma, em geral, têm um movimento de oeste para leste (deriva zonal) com velocidades de aproximadamente 100 m/s (Taylor et al. 1997; Sobral e Abdu 1990, 1991; Pimenta et al. 2003). Essa deriva zonal é resultado da polarização vertical de campos elétricos que são gerados por complexas interações entre ventos de marés, o campo geomagnético e o plasma ionosférico da região-F (Terra et al. 2004).

Como dito anteriormente, os estudos sobre uma melhor compreensão dos mecanismos de formação, evolução, dinâmica, e morfologia das bolhas de plasma, são objeto

de muitas investigações da Física da Ionosfera. Por exemplo, [Sobral et al. \(2011\)](#) apresentaram resultados de um estudo teórico e experimental sobre a reversão da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma (leste-oeste), utilizando a emissão OI 630,0 nm para detectá-las. Eles concluíram que a ocorrência de bolhas de plasma que derivam para oeste, é de origem climatológica e ocorre durante o inverno no hemisfério Sul, perceberam que o sentido da deriva zonal inverte de oeste para leste, em torno da meia noite local, sobre a ação do vento neutro.

No trabalho de [Paulino et al. \(2011\)](#), sobre a região equatorial, eles mostraram que as velocidades de deriva zonal das bolhas de plasma observadas em período de alta atividade solar foram maiores do que as observadas durante o período de baixa atividade solar. Utilizando emissão de OI 630,0nm e OI 777,4 nm para inferir a velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma em duas regiões diferentes, uma de baixa latitude e outra próxima ao equador magnético, [Abalde et al. \(2004\)](#) apontaram que a velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma eram maior para o período de alta atividade solar em ambas as emissões. Os valores encontrados para emissão OI 630,0nm na região de SJC (São José dos Campos), para o caso de altitude fixa de 300 km, foram máxima de 185 ± 10 m/s e mínima de 104 ± 18 m/s e para altitudes variáveis entre 250 a 300 km, máxima de 172 ± 2 m/s e mínima de 89 ± 15 m/s. No caso da emissão OI 777,4 nm, para altitude fixa as velocidades zonal médias foram de 202 ± 19 m/s e 121 ± 20 m/s e para o caso de altitudes variáveis foram de 184 ± 12 m/s e 103 ± 16 m/s. Os resultados indicam que os valores da velocidade de deriva zonal medida em emissão OI 777.4 nm são maiores (de 5% a 9%) em relação às inferidas na emissão OI 630.0nm, indicando que a velocidade de deriva zonal próxima à base da camada F é menor do que no pico da camada.

Estudos relacionados às bolhas de plasma vêm sendo realizados não somente sobre o setor brasileiro. No trabalho de [Pasnukhov et al. \(2012\)](#), utilizando dados de GPS, são

relatadas as ocorrências de bolhas de plasma equatorial e cintilações em uma região equatorial do setor Africano durante o período de baixa atividade solar. [Yao e Makela \(2007\)](#), utilizando técnicas de imageamento, analisaram a velocidade de deriva zonal de bolhas de plasma no período de 2002 a 2005, no setor Havaiano, sobre o vulcão Haleakala, na ilha de Maui.

[Oya et. al. \(1986\)](#), utilizando uma sonda a bordo do satélite HINOTORI, encontraram pela primeira vez outro tipo de irregularidade que acontece na região-F durante o período noturno. Eles perceberam uma região no plasma ionosférico onde a densidade eletrônica era maior do que a densidade de fundo, e chamaram esta região de blob de plasma. Logo após a descoberta de [Oya et. al. \(1986\)](#), um trabalho estatístico mais completo sobre blobs e bolhas de plasma foi desenvolvido por [Watanabe e Oya \(1986\)](#), utilizando um conjunto de dados do satélite HINOTORI, no período de fevereiro de 1981 a junho de 1982. Desde então, o estudo de blobs de plasma vem sendo realizado utilizando diferentes instrumentos, como por exemplo, fotômetro imageador, ionossonda ([Crowley et al. 2000](#); [Pimenta et al. 2004, 2007](#); [Nade et al. 2014](#); [Sharma et al. 2014](#)), satélites ([Le et al. 2003](#); [Kil et al. 2009](#); [Park et al. 2010](#); [Choi et al. 2012](#)), radar ([Ishida et al. 2015](#)).

[Le et al. \(2003\)](#) propuseram que o campo elétrico responsável pela geração de blob é o mesmo campo elétrico que gera as bolhas. [Pimenta et al. \(2004, 2007\)](#) mostraram que as blobs se desenvolvem entre as bolhas. No estudo feito por [Kil et al. \(2011\)](#), utilizando dados de satélites, são apresentados resultados que mostram que blobs e bolhas de plasma podem ser fenômenos independentes. Neste estudo, [Kil et al. 2011](#) relatam a ocorrência de blobs e bolhas durante a noite de 02 de março de 2009, as bolhas foram observadas por volta das 20:00 LT numa região de baixa latitude; por outro lado, as blobs foram observadas entre 23:00 e 05:00 LT, em altitudes próximas a 450 km, em 20°N de latitude magnética, e em longitude mais a leste do local de observação das bolhas. [Choi et al.](#)

(2012), investigaram a taxa de ocorrência de blobs e bolhas, durante o período de agosto de 2008 a abril de 2010. Eles mostraram que as blobs ocorrem majoritariamente em torno das 00:00 LT, em altitudes próximas a 430 km, e em $\pm 25^\circ$ de latitude magnética; já as bolhas ocorrem majoritariamente em torno das 02:00 LT, em altitudes próximas a 400 km, e em regiões próximas ao equador magnético.

Hoje estudos da geração e dinâmica de bolhas e blobs de plasma continuam a ser feitos e contribuem para um melhor entendimento da física desses fenômenos ionosféricos.

1.1 Objetivos

Objetivo deste trabalho foi estudar blobs e bolhas de plasma em duas regiões distintas sobre o setor brasileiro, SJC, SP, (23,21°S, 45,86°O; dip. latitude 18,3°S; região de baixa latitude e próxima a crista da anomalia ionosférica equatorial), e MAN, AM, (2,59°S, 60,22°O; dip. latitude 12,1°N; região próxima ao equador magnético).

Neste estudo, foram feitos os cálculos de velocidades de deriva zonal, de blobs e bolhas de plasma. Cálculos de velocidades de deriva latitudinal de blobs de plasma. E a verificação das dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs de plasma. Os valores obtidos são apresentados no Capítulo 8 de resultados.

Para o estudo de blobs e bolhas de plasma foram utilizados dados de fotômetros imageadores, utilizando o filtro de interferência da emissão OI 630,0 nm, instalados em ambos os sítios (SJC e MAN). Para complementar esse estudo foram utilizados dados do satélite DMSP (*Defense Meteorological System Protect*).

1.2 Estruturas da tese

O Capítulo 2 apresenta um resumo da atmosfera neutra e ionizada. O Capítulo 3 descreve a eletrodinâmica, o campo elétrico, e o dínamo da região-F, além de suas respec-

tivas derivas eletromagnéticas. O Capítulo 4 introduz um resumo com as principais características das irregularidades ionosféricas (bolhas e blobs) e a teoria Rayleigh Taylor. O Capítulo 5 apresenta a luminescência atmosférica e a emissão do oxigênio atômico OI 630,0 nm. O Capítulo 6 descreve a instrumentação utilizada neste trabalho. O Capítulo 7 é a metodologia empregada para realizar os cálculos de deriva latitudinal e zonal e para medir as dimensões norte/sul e leste/oeste. O Capítulo 8 mostra os resultados e as discussões que estrutura essa tese. O Capítulo 9 enumera as conclusões e sugestões para trabalhos futuros. No final as referências bibliográficas que embasaram este trabalho.

2 ATMOSFERA NEUTRA E IONIZADA

Este Capítulo define e descreve as principais características e propriedades da atmosfera neutra e ionizada. A atmosfera neutra está dividida em 5 camadas e possui classificação de acordo com o perfil vertical de temperatura. A atmosfera ionizada é a parte da atmosfera terrestre que apresenta partículas com carga elétrica, átomos e moléculas ionizadas e está imersa na Mesosfera, a ionização dessa camada ocorre principalmente por fontes ionizantes solares e cósmicas.

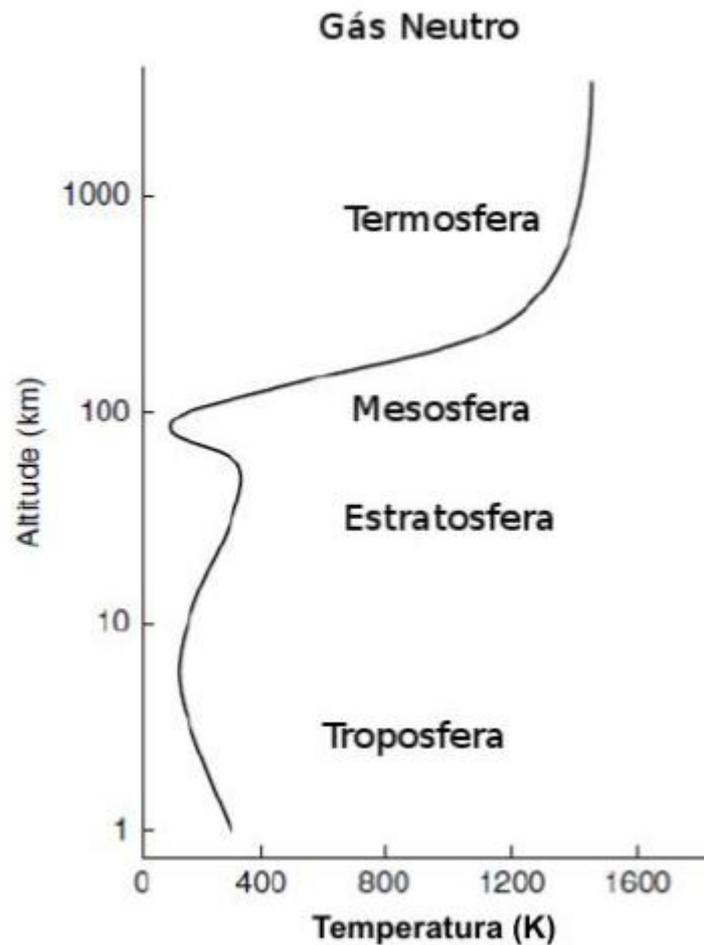
2.1 Atmosfera neutra

A atmosfera terrestre pode ser classificada conforme seu perfil de temperatura com relação à altitude e apresenta estratificações, que são nomeadas como segue (ver Figura 1). A primeira camada é a troposfera e nela a temperatura diminui com a altitude. Em cerca de 10 km de altura, a tendência da temperatura se inverte a estratosfera começa. O aumento da temperatura é devido principalmente à absorção, por ozônio, ela absorve grande parte da radiação ultravioleta. Esse efeito maximiza em 50 km, onde a tendência de temperatura novamente reverte, na estratopausa e início da Mesosfera. O resfriamento radiativo cria uma diminuição brusca da temperatura para um mínimo na faixa de - 80°C em aproximadamente 80 km. Para alturas acima da mesopausa, a temperatura aumenta em valores que são bastante variáveis, e muitas vezes são superiores a 1000 K. Não é de surpreender que esta região seja denominada termosfera. A quinta e última camada é a Exosfera nessa camada há uma perda contínua de partículas devido às altas temperaturas.

A atmosfera é relativamente uniforme na composição abaixo de 100 km devido a uma variedade de fenômenos de mistura turbulentos. Acima da "turbo pausa", os componentes começam a ser separados de acordo com suas massas. O aumento de temperatura na termosfera é parcialmente explicado pela absorção do espectro UV solar. Esta mesma fonte de energia, também é responsável pela produção de plasma no hemisfério iluminado

pelo sol, uma vez que os fótons solares têm energia suficiente para ionizar a atmosfera neutra. Nesse processo de ionização, são produzidos íons positivos e elétrons em números iguais.

Figura 1 – Distribuição vertical das camadas atmosféricas em função da temperatura.



Fonte: Adaptado de [Kelley \(2009\)](#)

2.2 Atmosfera ionizada

A ionosfera é a parte ionizada da atmosfera terrestre, sua formação é devida a fontes ionizantes solares e cósmicas. As fontes ionizantes solares são a radiação solar de alta energia de ondas curtas, na faixa do EUV (extremo ultravioleta) e dos raios-X, que são absorvidos por átomos e moléculas da atmosfera terrestre. Os fótons destas faixas espec-

trais são capazes de desprender os elétrons das moléculas e dos átomos de oxigênio, nitrogênio e outros, deixando assim, elétrons livres e íons positivos. Quando um fóton interage com um átomo neutro, sua energia é transferida para um elétron desse átomo, tornando-se um elétron livre, com energia suficiente para separar-se do átomo neutro, tornando-o um íon positivo. Esse é o processo de fotoionização que atinge seu máximo no meio dia local.

A recombinação eletrônica é um processo que ocorre na ionosfera noturna, na parte superior, quando elétrons recombina-se com íons positivos formando os átomos neutros. Na parte inferior da ionosfera, acontece o processo de perda iônica, chamado junção eletrônica. Nele, as partículas neutras juntam-se a elétrons formando íons negativos. Esse processo explica a concentração de íons negativos na base da ionosfera.

A ionosfera pode ser classificada de acordo com a variação vertical da densidade eletrônica n_e , e assim divididas em camadas ou regiões que são chamadas de: camada D, E e F, a camada F, por sua vez podem ser divididas em F1, F2.

2.2.1 Regiões ionosféricas

a) Região D

A região D está localizada entre 60 a 90 km de altitude; é a camada inferior da ionosfera, tem comportamento diurno, aparecendo no momento em que átomos começam a adquirir energia vinda do Sol ao amanhecer e permanece por alguns minutos depois que o Sol se põe. A maior parte da energia eletromagnética é absorvida nessa região.

As radiações ionizantes dominantes são os raios-X, com comprimento de onda menores que 10 \AA ($\lambda < 10 \text{ \AA}$) que produzem os íons O_2^+ e N_2^+ , a radiação Lyman α ($\lambda = 1216 \text{ \AA}$), que produz óxido nítrico NO^+ e os raios cósmicos, que produzem a ionização primária

em baixas altitudes. As ondas eletromagnéticas de alta frequência (MHz) atravessam a região D, enquanto que as ondas com baixa frequência (kHz) são refletidas pela região D.

b) Região-E

A região-E está presente somente durante o dia, localizada entre 90 a 150 km de altitude aproximadamente, é a região da ionosfera de máxima condutividade elétrica, em torno de 110 km, ela é importante por causa da interação com o campo magnético através de intensas correntes elétricas que nela fluem.

Os ventos neutros predominantes transmitem movimentos para as camadas condutoras, com a presença do campo magnético, originando as correntes elétricas. Assim, ela também é conhecida como a região do dínamo. Em algumas ocasiões, a densidade eletrônica nem sempre varia suavemente com a altura, por isso podem se desenvolver estreitas camadas esporádicas, que em alguns casos podem permanecer durante a noite.

A fonte primária de ionização é a emissão de raios-X do Sol, chegando a diferentes densidades eletrônicas de acordo com a atividade solar, com as variações sazonais, as variações diárias. Nesta região a ionização ocorre principalmente pelas moléculas de O_2^+ por meio da fotoionização.

c) Região-F

Região localizada entre 150 a 1000 km tem como principal fonte de ionização a radiação EUV e o íon predominante é o O^+ . Essa região se subdivide em duas durante o dia camada F1 e F2 e as vezes até em três F3. A camada F1 é definida pela aparição de um pequeno pico da densidade eletrônica ou apenas uma pequena inflexão do perfil ionosférico em torno de 180 km, estando presente apenas durante o período diurno acompanhando o comportamento da região-E.

A camada F2 estende-se de 200 a 1000 km de altitude, e apresenta um pico na altitude entre 280-300 km. Acima do pico da camada F2, a densidade diminui exponencialmente até chegar à magnetosfera e perder sua identidade. Ao contrario das outras regiões, esta é caracterizada pela ionização atômica que produz igual numero de elétrons e íons atômicos positivos, e é dominada por processos dinâmicos havendo uma grande interação entre a ionosfera superior e os ventos termosféricos.

3 ELETRODINÂMICA DA REGIÃO-F DA IONOSFERA

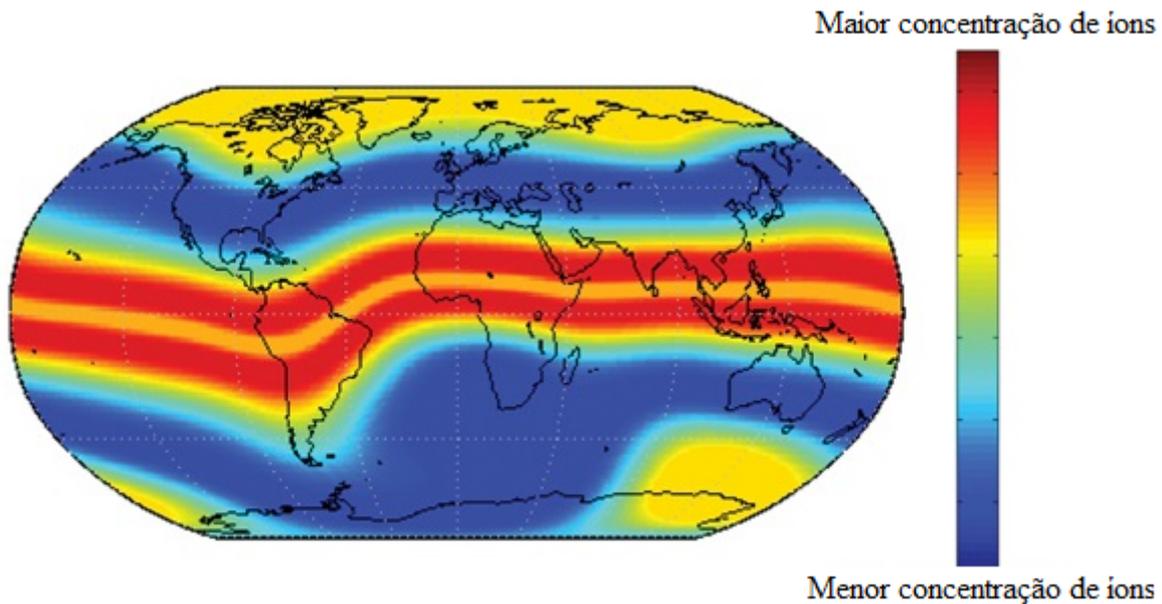
Neste Capítulo, serão mostrados alguns aspectos teóricos sobre a eletrodinâmica da região-F da ionosfera em baixa latitude e em região equatorial, o dínamo e o campo elétrico na região-F e as derivas eletromagnéticas dessa região.

3.1 A Eletrodinâmica da ionosfera equatorial

A ionosfera equatorial é formada por processos eletrodinâmicos entre atmosfera neutra e plasma ionosférico. Esses processos são dominados pela ação dos ventos neutros da atmosfera superior que ao interagirem com as camadas condutoras e magnetizadas da ionosfera produzem, por efeito do dínamo, campos elétricos nas camadas E e F. Tais campos elétricos, junto com ventos neutros e ondas atmosféricas geram oscilações, um exemplo, é o efeito fonte.

Os campos elétricos são gerados na camada E equatorial pelos ventos neutros termosféricos, que são gerados por gradientes de pressão horizontais, esses campos elétricos são mapeados ao longo das linhas de campo magnético para altas latitudes, devido à alta condutividade. Durante o dia esse campo elétrico \mathbf{E} é direcionado para leste e o campo magnético \mathbf{B} para o norte, em função da deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, o plasma formado na região equatorial é levado para cima. Esse plasma que foi elevado difunde-se para baixo ao longo das linhas de campo magnético, devido ao gradiente de pressão ∇_p e a força da gravidade \mathbf{g} , esse processo é chamado de efeito fonte, e ao decair pelas linhas de campo, se depositam em latitudes magnéticas de $\pm 15^\circ$, aproximadamente. Essa distribuição é conhecida como anomalia equatorial ionosférica (*EIA do inglês Equatorial Ionospheric Anomaly*) (ver Figura 2).

Figura 2 – Mapa ilustrando a anomalia equatorial ionosférica (EIA) sobre o globo terrestre.



Fonte: Adaptado de <http://gpsworld.com/gnss-systemsignal-processinginnovation-ionospheric-scintillations-12809/>

3.2 Dínamo da região-F

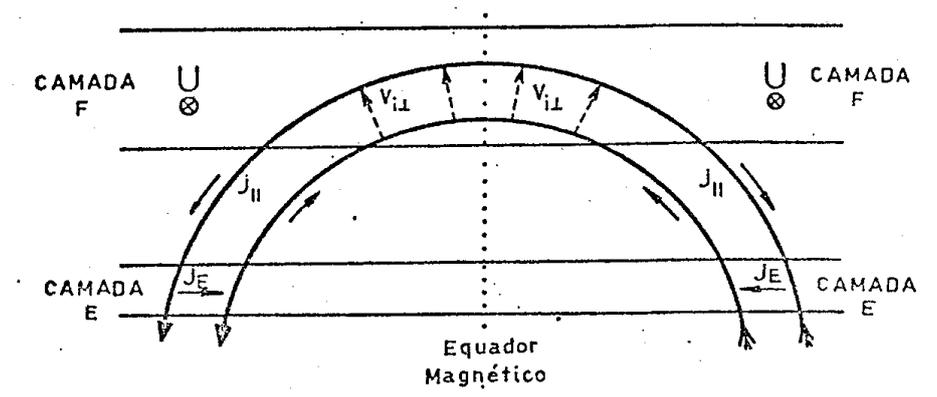
O aquecimento solar gera gradientes de pressão horizontais na termosfera, que por sua vez dão origem aos ventos termosféricos da região-F ionosférica. Os ventos induzem movimentos às partículas carregadas, esse movimento induzido pelos ventos termosféricos é a deriva dos íons e elétrons ao longo das linhas de campo magnético, que é igual à componente do vento na direção do campo. Há também um movimento na direção perpendicular, tanto ao campo como ao vento, porém, esse movimento é bem mais lento, cuja velocidade é dada pela seguinte equação (Risbeth, 1971):

$$\vec{V} = \frac{v\omega}{v^2 + \omega^2} \frac{\mathbf{u} \times \mathbf{B}}{B}, \quad (1)$$

Em que \mathbf{V} é a velocidade das partículas carregadas; \mathbf{u} a velocidade do vento neutro; \mathbf{B} é o vetor indução magnética; ν é a frequência de colisão entre as partículas neutras e carregadas, $\omega=q/m$ é a girofrequência das partículas, q é a carga e m é a massa das partículas. Por causa da dependência com a carga q , os íons se moverão no sentido $\mathbf{u} \times \mathbf{B}$ e os elétrons no sentido contrário, gerando assim, separação de cargas e uma corrente elétrica.

A mobilidade dos elétrons ao longo das linhas de campo magnético, faz com que sejam bons condutores, ligando as regiões E e F. Portanto, qualquer divergência ou convergência de fluxo de corrente na região-F pode criar um campo elétrico de polarização, porém, esse campo pode ser descarregado por correntes que fluam ao longo das linhas de campo magnético e através da região-E. Então, durante o dia quando a condutividade da região-E é alta, fecha o circuito de corrente na região-F. À noite, quando a condutividade da região-E diminui, o circuito não se fecha, o qual gera os campos elétricos de polarização na região-F que resultam em um movimento zonal do plasma.

Figura 3 – Esquema do sistema de correntes de dínamo produzido por ventos na camada F equatorial.



Fonte: Adaptado de [Rishbeth \(1971\)](#)

A Figura 3 mostra um esquema do mecanismo descrito acima para a região-F equatorial. A velocidade das partículas no movimento do plasma descrito acima é dada pela equação:

$$\vec{V} = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}, \quad (2)$$

3.3 Campo elétrico da região-F

[Rishbeth \(1971\)](#) sugeriu que campos elétricos também poderiam ser gerados na região-F noturna. As correntes elétricas J da região-F, $J = nq \vec{V}$; em que n é a densidade de partículas, \vec{V} velocidade das partículas e q a carga; essas correntes são geradas pela ação dos ventos termosféricos e pequenas quando comparadas as correntes da região-E. Mas, torna-se importante à noite quando a condutividade da região-E diminui. Como essas correntes não podem fechar o circuito são gerados campos elétricos de polarização, que darão origem as derivas do plasma. Desta forma, o plasma se move para cima e para oeste durante o dia e para baixo e para leste durante a noite. Portanto, na região-F, o transporte do plasma na direção perpendicular ao campo magnético é controlado pela deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$.

3.4 Deriva eletromagnética do plasma

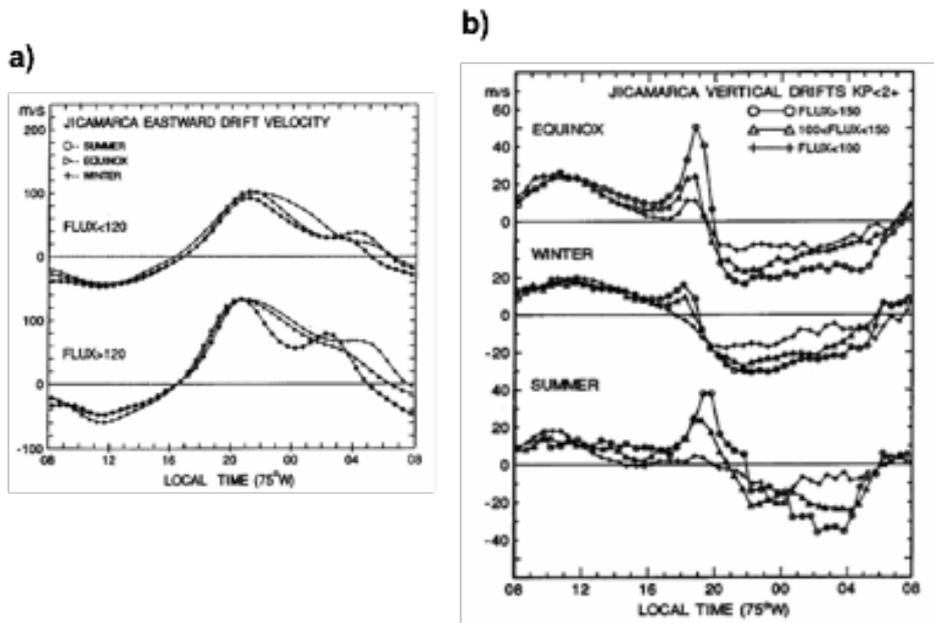
O termo deriva é adicionado à palavra velocidade, ou seja, velocidade de deriva, para dar ênfase nos efeitos dos campos elétricos \mathbf{E} e magnéticos \mathbf{B} sobre o movimento das partículas carregadas ([Pimenta 2003](#)). As derivas da camada F ionosférica são devido aos ventos neutros e campos elétricos de polarização, como já dito anteriormente.

Durante o dia, devido à interação com o campo elétrico \mathbf{E} , dirigido para leste junto com o campo magnético \mathbf{B} , dirigido para o Norte, essa interação movimentam o plasma para cima e para oeste. À noite, o campo elétrico inverte seu movimento, ou seja, ele é direcionado para oeste, no momento em que interage com o campo magnético para norte, provoca uma deriva para baixo e para leste no plasma ionosférico.

Todos os dias, esse processo de deriva ocorre no plasma ionosférico, e todos os dias antes de inverter seu movimento, ocorre também um aumento abrupto na deriva vertical. A combinação do aumento dos ventos com o gradiente de condutividade dia-noite,

acentuada em todo terminador leva a uma intensificação do campo elétrico leste, gerando uma abrupta deriva vertical para cima após o pôr do sol, chegando ao seu máximo. Essa intensificação é chamada de pico pré-reversão. A Figura 4 mostra o exemplo das derivas zonal e vertical da ionosfera, e o momento em que ocorre o pico pré-reversão.

Figura 4 – Gráfico ilustrando as derivas (a) zonal e (b) vertical, da camada F ionosférica em Jicamarca-PE.



Fonte: [Fejer \(1991\)](#)

4 IRREGULARIDADES IONOSFÉRICAS

Neste Capítulo, são apresentadas algumas das principais características das irregularidades do plasma ionosférico. As bolhas de plasma, irregularidades de plasma ionosférico de grande escala são depleções na densidade do plasma devido às instabilidades que ocorrem na base da camada F. Essas irregularidades podem interferir na propagação de ondas de rádio usadas para telecomunicações e nos sinais transmitidos por GPS, como por exemplo, navegação e posicionamento. Para explicar as instabilidades que ocorrem no plasma e geram as bolhas de plasma, faz-se uso da teoria de Rayleigh Taylor, que explica como um ambiente estável começa a perder a estabilidade.

Outra irregularidade descoberta por [Oya et. al. \(1986\)](#), são as blobs de plasma, que ocorrem devido ao aumento na densidade eletrônica do plasma quando comparado ao plasma de fundo. São irregularidades que ocorrem acima da base da camada F, e, muitas vezes, estão associadas a bolhas de plasma, mas também podem ocorrer como evento independente.

Neste trabalho foi feito uso da técnica óptica por meio do fotômetro imageador, por isso, utilizaremos a nomenclatura bolhas de plasma, para se referir à diminuição na densidade do plasma que houve nas determinadas regiões aqui estudadas. A nomenclatura utilizada de blob de plasma (será a mesma palavra em inglês, por não haver uma tradução para o português), refere-se as irregularidades que apresentam um aumento na densidade do plasma.

4.1 Bolhas de plasma

As primeiras observações ópticas das bolhas de plasma foram feitas por [Weber et al. \(1978\)](#), utilizando um sistema de fotômetro imageador e mostraram bandas de depleção na intensidade da luminescência atmosférica da emissão OI 630,0 nm, sempre alinhadas

as linhas de campo geomagnético, com extensões maiores que 1200 km norte-sul e em torno de 50 a 200 km, leste-oeste. A velocidade da deriva zonal encontrada foi de 50 a 100 m/s, em horários antes da meia noite.

No Brasil, as primeiras observações foram apresentadas por [Sobral et al. \(1980b\)](#) e [Sahai et al. \(1981\)](#), utilizando fotômetros de varredura. Hoje em dia as bolhas de plasma são estudadas por meio de diferentes instrumentos por diversos pesquisadores, como por exemplo, fotômetros e ionossondas ([Sobral et al. 1980a, 1980b](#); [Fagundes et al. 1997](#); [Sahai et al. 2000](#); [Pimenta et al. 2001, 2003; 2008](#) [Abalde et al. 2004; 2009](#), entre outros) radar de espalhamento incoerente ([Woodman 1972](#); [Fejer et al. 1991](#); [Basu et al. 2004](#); [Kudeki e Bhattacharyya 1999](#), e outros) Sistema de GPS ([Yao et al. 2004](#); [Chu et al. 2007](#); entre outros).

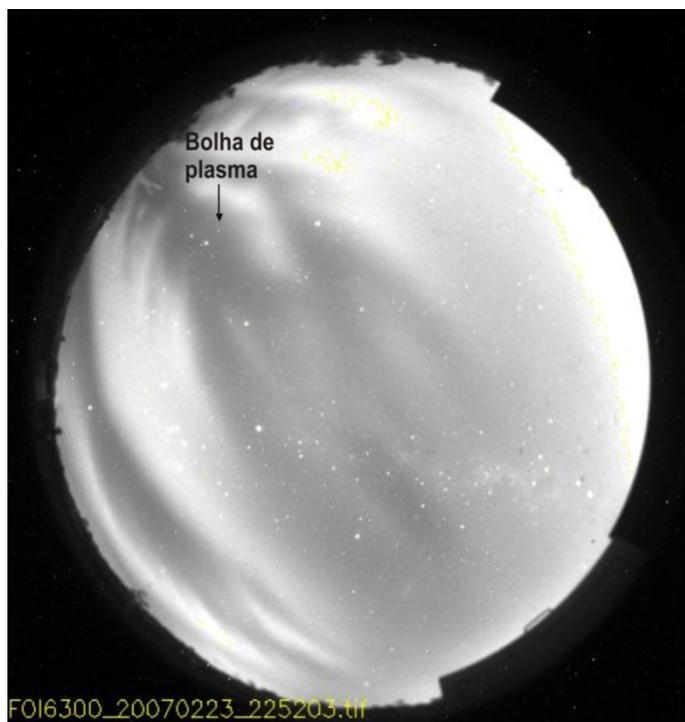
As bolhas de plasma ionosféricas da região-F são regiões de depleções de grande escala que se desenvolve na base da camada F na região equatorial logo após o pôr do Sol, devido a processos de instabilidades no plasma. Após o pôr do Sol, surge um intenso gradiente de condutividade latitudinal integrado ao tubo fluxo geomagnético na região próxima ao terminador solar. Nesse momento, a condutividade da região-E começa a cessar. A ação conjunta do vento neutro e do intenso gradiente de condutividade gera um rápido aumento do campo elétrico zonal para leste, que junto com o campo magnético, promovem uma subida abrupta da camada F, ou deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, chamado de pico pré-reversão. E nesse instante, é propício para o desenvolvimento das bolhas de plasma. Há também, o fato de que, ao anoitecer, a baixa ionosfera sofre processos de recombinação (perda de elétrons), dando origem a um gradiente vertical de densidade na base da camada F, gerando uma instabilidade na qual um meio de maior densidade seja sustentado por um meio de menor densidade. Para explicar o desenvolvimento de instabilidades, usa-se a teoria Rayleigh-Taylor ([Dungey, 1956](#)), que é uma teoria que explica o mecanismo acima citado.

Depois de formadas na base da camada F, as bolhas de plasma começam um movimento de ascensão na ionosfera, se estendendo para altas latitudes, seguindo as linhas de campo magnético, e podem se estender até algumas centenas de quilômetros em altura, indo desde a base da camada ionosférica, onde são geradas, até baixas latitudes, sempre acompanhando o movimento do plasma ionosférico. Muitos estudos ao longo dessas décadas foram realizados ([Sobral et al. 1980a, 1980b](#); [Fejer et al. 1991](#), [Fagundes et al. 1997](#); [Kudeki e Bhattacharyya 1999](#); [Sahai et al. 2000](#); [Pimenta et al. 2001, 2003, 2008](#); [Abalde et al. 2004, 2009](#); [Basu et al. 2004](#); [Tardelli – Coelho et al. 2016, 2017](#); entre outros). Hoje são bem conhecidas a dinâmica e a morfologia das bolhas de plasma. Elas apresentam variabilidade sazonal, com maior ocorrência nos meses de setembro a abril, apresentam variabilidade com o ciclo solar, nos períodos de alta atividade solar costumam aparecer em horários mais cedo do que quando em baixa atividade solar. Deslocam-se em geral, de oeste para leste (deriva zonal), mas quando ocorrem tempestades geomagnéticas essa deriva pode inverter de leste para oeste.

A velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma, tem um comportamento já bem estabelecido, com valores maiores até por volta das 22:00 LT e após esse horário começa um decréscimo até o momento em que cessa. Nos estudos de [Woodman, \(1972\)](#); [Pimenta et al. \(2001\)](#); [Pimenta et. al. \(2003\)](#); [Abalde et. al. \(2004\)](#); [Terra et al. \(2004\)](#); [Haase et al. \(2010\)](#); [Paulino et al. \(2011\)](#); [Nade et al. \(2013\)](#); entre outros, observou-se que a velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma está em torno de 100 a 300 m/s, e se deslocam praticamente na mesma velocidade do plasma ambiente.

A Figura 5 mostra o exemplo de bolhas de plasma observadas por fotômetro imageador pela emissão OI 630,0 nm, uma das bolhas de plasma que ocorreram nesta noite, está identificada na mesma figura pela indicação de uma seta.

Figura 5 – Imagem de uma bolha de plasma obtida pelo fotômetro imageador na emissão OI 630 nm observada na região de SJC na noite de 23 de fevereiro de 2007 às 22:52 LT, mostrando a assinatura da bolha de plasma.



Fonte: A autora

4.2 Blobs de plasma

As blobs de plasma ionosférico são regiões onde a densidade do plasma aumenta comparada a densidade de fundo, estudos indicam que o aumentam da densidade pode se dar por um fator de dois ou mais (Le et al. 2003; Park et al. 2003; Pimenta et al. 2004, 2007).

A ocorrência desse fenômeno foi mostrada pela primeira vez por Oya et. al. (1986) utilizando uma sonda a bordo do satélite HINOTORI, que foi lançado em 21 de fevereiro de 1981. No mesmo ano Watanabe e Oya (1986) utilizando dados do mesmo satélite HINOTORI, aprimoraram a descoberta feita por Oya et al. (1986) e analisaram aproximadamente 1000 casos de irregularidades de plasma entre bolhas e blobs durante o período de fevereiro de 1981 a junho de 1982. Entre os estudos feitos por Watanabe e Oya (1986) está à estatística da dependência sazonal durante 2 meses. Concluíram que a probabilidade de

ocorrência de bolhas de plasma é grande nos períodos de equinócio e mínima nos períodos de solstício. Por outro lado, as blobs de plasma tornam-se máxima nos períodos de solstício e mínima no equinócio. Os resultados mostraram também que blobs não aparece no equador magnético, mas frequentemente na região de latitude magnética de aproximadamente $\pm 20^\circ$. Neste mesmo trabalho estudaram a dependência de bolhas e blobs com distúrbios magnéticos e concluíram que a ocorrência de blobs de plasma é baixa durante os períodos perturbados. E a probabilidade de ocorrência decresce com o aumento da intensidade do fluxo solar $F_{10.7}$. Já as bolhas de plasma aparecem principalmente em períodos em que $F_{10.7}$ está alto. Estes resultados mostram que a geração de bolhas e blobs estão associadas com a formação da região-F ionosférica que é afetada pela radiação EUV (Extremo Ultravioleta). Neste estudo, também classificaram blobs em dois tipos, tipo I: são blobs que é formada por dezenas de poucos km a algumas centenas de km, enquanto que a blob tipo II: possui mais de centenas de km, tornando-se maior do que a blob tipo I.

O processo de geração das blobs de plasma que foram descobertas por [Oya et. al. 1986](#) pode ser entendido considerando a variação sazonal e a dependência da hora local, elas aparecem principalmente no hemisfério que se encontra na época de inverno e no período após a meia noite, quando o vento neutro meridional flui fortemente através do equador magnético. Estes resultados sugerem que as blobs de plasma crescem como resultado de instabilidades impulsionadas pelo vento neutro no topo da camada F.

Depois do trabalho pioneiro de [Watanabe e Oya \(1986\)](#) outros estudos sobre blobs de plasma foram realizados ([Park et al. 2003](#); [Le et al. 2003](#); [Pimenta et al. 2004](#); [Pimenta et al. 2007](#); [Choi et al. 2012](#)), por meio de diferentes técnicas ([Park et al. 2003](#); [Pimenta et al. 2004](#), [Ishida et al. 2015](#); [Nade et al. 2014](#)).

[Park et al. \(2003\)](#) realizaram análises estatísticas que indicaram que as blobs originam-se a partir da ionosfera de baixa latitude. Elas foram localizadas aproximadamente 15°

de latitude magnética, e as posições dos eventos mostraram uma dependência sazonal semelhante ao de formação de bolhas de plasma. O trabalho também manifesta que a ocorrência dos eventos não tem relação com distúrbios geomagnéticos ou variação diária da atividade solar, diferente de [Pimenta et al. 2007](#). As blobs expandiram e perderam calor enquanto derivavam para cima, mas o processo não foi adiabático, com transferência de calor para as blobs. Perceberam que blobs ocorreram predominantes no setor do Atlântico Norte durante o inverno e no Pacífico Sul durante o inverno. Nenhuma blobs foi vista no equinócio.

Os resultados encontrados [Park et al. \(2003\)](#) apoia fortemente que blobs são intimamente relacionadas ao mecanismo de geração de bolhas. Conseqüentemente, o vento neutro pode afetar a ocorrência de blobs de plasma como faz na formação de bolhas de plasma. Além disso, eles apresentaram uma teoria de formação de blobs [Le et al. \(2003\)](#), em que blobs são formadas como resultado da elevação do plasma mais denso perto do pico da região-F, nas cristas da anomalia equatorial na alta ionosfera, por campo elétrico para leste gerado dentro da bolha de plasma, mapeado ao longo das linhas de campo magnético para as latitudes da crista. Talvez seja possível que o efeito fonte contribua para a formação das blobs de plasma.

[Le et al. \(2003\)](#) visualizaram blobs de plasma na região da anomalia equatorial entre aproximadamente 10° e 25° de latitude magnética em ambos os hemisférios e não no equador magnético, onde bolhas podem ser vistas. Essas blobs foram observadas em diferentes altitudes ionosféricas, em 622 km com o satélite ROCKSAT-1 e em 850 km com o satélite DMSP. [Le et. al. 2003](#) propôs um mecanismo para explicar a geração de blobs associadas com depleção de plasma. Segundo esta teoria, os campos elétricos de polarização são gerados dentro das bolhas de plasma quando seu deslocamento para cima, durante seu processo de deriva latitudinal. Essa deriva produz uma força que faz com que as

partículas ionizadas do plasma se movam em direção ao equador. Entretanto, a bolha ao se estender para altas altitudes permanece limitada as regiões próximas ao equador, muitas vezes limitada pelas cristas da anomalia equatorial ionosférica. Contudo, o campo elétrico de polarização pode ser mapeado ao longo das linhas de campo magnético, além dos limites da bolha. O ponto chave é que a bolha ocorre apenas na parte central do tubo fluxo, já o campo elétrico de polarização ocorre por todo o tubo. Quando a bolha de plasma sobe, o tubo fluxo pode atingir o pico da região F, ao redor das maiores latitudes da anomalia. O campo elétrico de polarização dentro do tubo fluxo, move o plasma de alta densidade para cima das cristas da anomalia, de modo que, o aumento na densidade ocorre, se o plasma de fundo da ionosfera mover se para baixo.

[Pimenta et al. \(2004\)](#), mostraram pela primeira vez a ocorrência de blobs sobre o setor brasileiro. Fizeram o cálculo de deriva zonal das bolhas e blobs vistas sobre Cachoeira Paulista e mediram as dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs de plasma em duas noites: 07 de outubro de 1999 e 04 de março de 2000.

Os principais resultados das análises feitas na noite de 07 de outubro de 1999 foram: média de velocidade de deriva zonal de 80 m/s para a blob de plasma e 140 m/s para a bolha de plasma, extensão norte/sul 190-240 km e leste/oeste de 150-180 km. Os resultados da noite de 04 de março de 2000 tiveram média de velocidade de deriva zonal da blob e da bolha de plasma de 130 m/s e 145 m/s, respectivamente e uma extensão norte/sul e leste/oeste de 130-170 km e 100-140 km, respectivamente. Neste trabalho, [Pimenta et al. \(2004\)](#) mostraram a fase de crescimento da blob e perceberam que a blob se desenvolve justamente após a reversão do campo elétrico, onde a velocidade de deriva inverte.

Em outro artigo sobre blobs de plasma [Pimenta et. al. \(2007\)](#) mostram um caso de blobs de plasma associadas com bolhas de plasma, ocorrido numa grande tempestade

geomagnética, na noite de 6 - 7 de abril de 2000. Neste dia o índice Kp chegou a 3,8 e o índice DsT a - 288 nT. As velocidades das bolhas e blobs estudadas nesta noite derivaram para oeste e as médias foram de 30 m/s para a velocidade zonal das blobs e 40 m/s para a velocidade zonal das bolhas de plasma. As dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs foram de 200 - 450 km e 110 - 160 km, respectivamente.

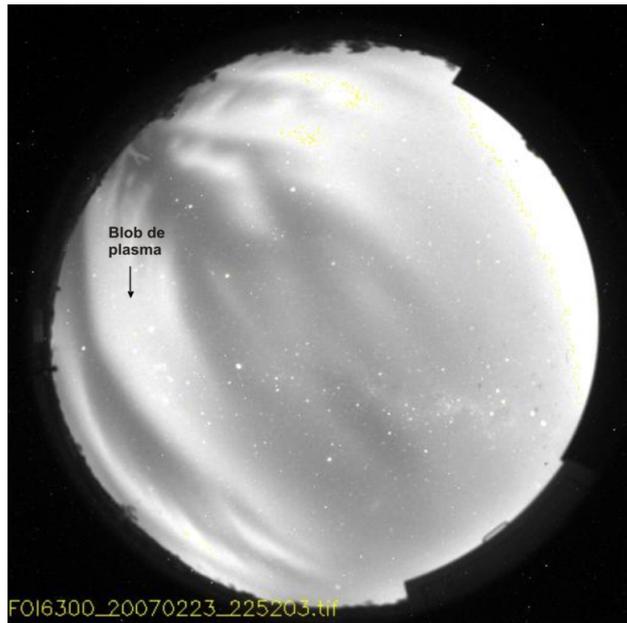
Estudo feito por [Kil et al. \(2011\)](#), na noite de 02 de março de 2009, mostrou que bolhas e blobs podem ser fenômenos independentes. Neste caso bolhas foram vistas em baixa latitudes por volta das 20:00 LT e blobs foram detectadas entre 23:00 e 05:00 LT, em altas latitudes e altitudes próximas a 450km em latitude magnética de $\pm 20^\circ\text{N}$. Eles sugeriram que as blobs são produzidas por perturbação local e que a ausência de bolhas onde blobs foram vistas, indica que bolhas de plasma não são pré-requisito para o aparecimento de blobs de plasma.

[Choi et al. \(2012\)](#), investigaram a distribuição de bolhas e blobs, durante o período de agosto de 2008 até abril de 2010. Eles estudaram as distribuições: sazonal, e latitudinal da frequência de ocorrência das bolhas e blobs durante o mínimo solar, e mostraram que a frequência de ocorrência média das bolhas é mínima durante o solstício de junho, mas a média da frequência de ocorrência de blobs é máxima durante o solstício de junho. A distribuição da hora local mostrou que bolhas têm o pico de ocorrência próximo as 02:00 LT sobre alta e moderada atividade solar, contudo, a distribuição da ocorrência de bolhas durante o mínimo solar é diferente que durante outros períodos do ciclo solar, quando a taxa de ocorrência de bolha mostra um aumento rápido logo após o pôr-do-sol e picos por volta das 22:00 LT. A frequência de ocorrência de bolhas mostrou ser mínima quando o fluxo solar é baixo, já para as blobs mostrou ser máxima quando o fluxo solar é baixo. Isso reforça o estudo feito por [Watanabe and Oya \(1986\)](#).

Em um trabalho recente, [Tardelli-Coelho et al. \(2017\)](#) mostram a ocorrência de blobs de plasma associada com bolhas de plasma no setor brasileiro em uma região de baixa latitude, utilizando dados de fotômetro imageador e dados do satélite DMSP. Nesse trabalho, eles mostraram um aumento na densidade do plasma no dia 23 de fevereiro de 2007, numa região de baixa latitude no setor brasileiro. Realizaram análise para a velocidade de deriva zonal das bolhas e blobs de plasma que ocorreram nesta noite, e, pela primeira vez, apresentaram resultados da velocidade de deriva latitudinal de blobs de plasma sobre o setor brasileiro. Além disso, mediram as dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs ocorridas. Os principais resultados deste trabalho mostraram uma velocidade média de deriva zonal das bolhas e blobs de plasma de 74 ± 8 m/s e 61 ± 6 m/s, respectivamente. A velocidade de deriva latitudinal da blob de plasma teve uma média de 85 ± 13 m/s. E a média da dimensão norte/sul da blob de plasma foi de 591km e leste/oeste de 328 km.

Vários estudos realizados até o momento mostram que blobs de plasma possuem as mesmas características apresentadas por [Watanabe e Oya \(1986\)](#), os estudos realizados no decorrer dos anos foram aprimorando e detalhando novas características dessas irregularidades. Atualmente, já se conhece um pouco mais sobre elas, como as velocidades zonal e latitudinal que se propagam, a que direção se movimentam e quais as dimensões que podem atingir. A Figura 6 mostra um exemplo de uma blob de plasma visualizada em SJC, através do fotômetro imageador na emissão OI 630,0 nm. Note que há um forte brilho na imagem, indicando o aumento da densidade eletrônica naquele local.

Figura 6 – Imagem obtida pelo fotômetro imageador na região de SJC pelo filtro de interferência OI 630,0 nm na noite de 23 de fevereiro de 2017, às 22:52 LT. A presença da blob de plasma está indicada através de uma seta sobre a imagem.

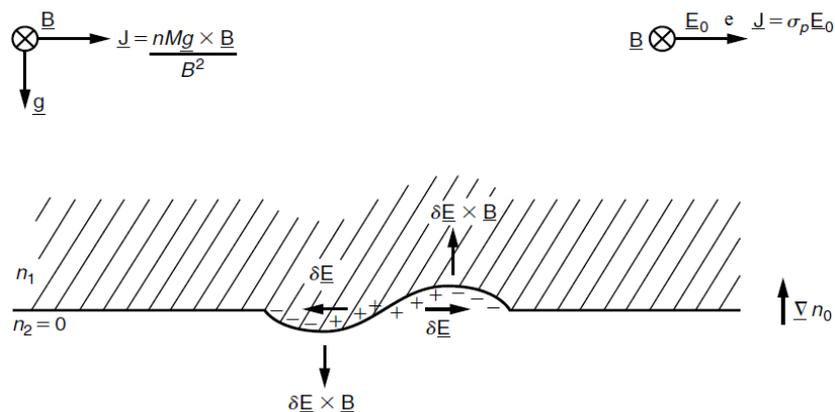


Fonte: A autora

4.3 Teoria linear Rayleigh Taylor (RT)

Para explicar a formação de irregularidades do plasma, utiliza-se como primeira aproximação a teoria linear de Rayleigh-Taylor (RT). Essa teoria explica como uma pequena perturbação na base da região F ionosférica, pode gerar uma irregularidade do plasma. O mecanismo que exemplifica esta teoria é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Diagrama esquemático da teoria de Rayleigh-Taylor.



Fonte: Adaptada de (Kelley, 2009)

Esse mecanismo mostra como um meio de maior densidade está sendo sustentado por um meio de menor densidade. Essa configuração resulta em uma ação de equilíbrio instável, e uma perturbação, como por exemplo, uma onda de gravidade, pode romper esse equilíbrio, gerando uma pequena instabilidade, que pode evoluir, gerando as irregularidades do plasma de grande escala.

Com a ausência de luz solar logo após o pôr do sol, se inicia rapidamente o processo de recombinação na baixa ionosfera, gerando assim um gradiente de densidade na base da camada F. A interação do campo magnético \mathbf{B} com a gravidade \mathbf{g} dá origem a um fluxo de corrente horizontal (J_x), que é representado pela seguinte relação:

$$J_x = \frac{nM\mathbf{g}\times\mathbf{B}}{\mathbf{B}^2}, \quad (3)$$

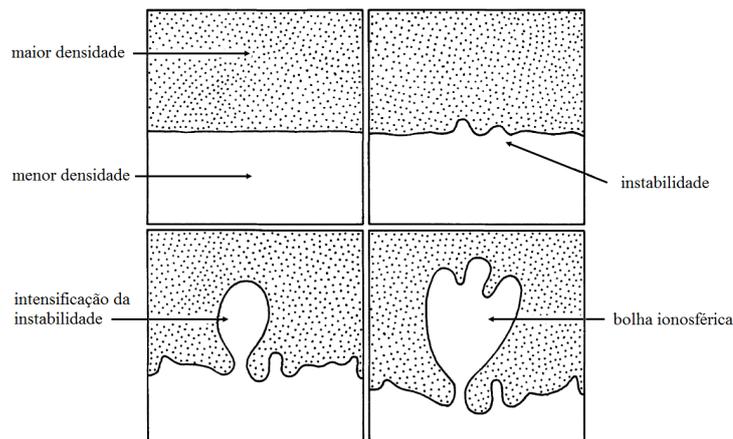
O fluxo de corrente elétrica horizontal é proporcional à densidade n , levando a um acúmulo de cargas nas bordas da região inicialmente perturbada. Esta perturbação inicial ao sistema a princípio estável é teórica e, portanto, considerada senoidal, conforme se verifica no diagrama esquemático da teoria de RT (Figura 7).

Nesta perturbação inicial, percebe-se então o surgimento de um campo elétrico provocado pela separação de cargas proveniente da interação do plasma local com os ventos neutros zonais, que induzem a uma difusão ambipolar, em que, devido a menor massa do elétron comparada a do próton, este (elétron) sofre a interação com o vento neutro de maneira mais intensa que a do próton, e sendo assim, se afastará do próton com velocidade e cada vez mais, porém, como deve ser satisfeita a condição, esta faz com que o sistema agora composto de um campo elétrico gerado da interação do vento neutro com o plasma local, tente retornar ao estado original (de estabilidade de forças eletromagnéticas). Surge então um campo elétrico restaurador do sistema. Estes campos elétricos intensificam a deriva vertical do plasma local, e esta deriva ocorre em dois sentidos, para cima numa

região da perturbação e para baixo em outra região. Desta forma, tem-se uma região dividida em duas camadas de diferentes densidades; uma região menos densa sustentando uma mais densa, que se manterá estável até que seja perturbada.

Nesta configuração de perturbação inicial e interação do campo magnético com a força gravitacional, surge o movimento do plasma menos denso para cima, ocupando espaço numa região mais densa, e o plasma mais denso derivando para baixo, ocupando espaço numa região menos densa. Esta configuração, explica a formação de irregularidades na ionosfera da região-F equatorial até uma altitude de máxima ionização. A Figura 8 apresenta uma representação deste comportamento.

Figura 8 – Ilustração didática da evolução de uma instabilidade ionosférica, segundo a teoria de Rayleigh-Taylor.



Fonte: Adaptado de [Kelley \(2009\)](#)

A taxa de crescimento da instabilidade verificada pela teoria linear se dá pela seguinte relação:

$$\gamma = \frac{g}{Lv_{in}}, \quad (4)$$

em que, v_{in} é a frequência de colisão entre íons e partículas neutras e L é o inverso da escala de gradiente como segue:

$$L = \left[\frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dz} \right]^{-1}, \quad (5)$$

A teoria linear de RT é utilizada para observações na base da camada F.

Segundo [Candido \(2008\)](#), um bom resultado obtido com a teoria linear é o comportamento da taxa de crescimento γ com a altitude. Como pode se ver na equação 4, γ é inversamente proporcional à frequência de colisão. As primeiras observações de espalhamentos, já mostravam que as reflexões ocorriam quando a camada F estava em altas altitudes. Por outro lado, acima do pico da camada F o gradiente de densidade inverte o sinal, espera-se que qualquer instabilidade seja amortecida. Desta forma, a teoria linear não pode explicar a existência de bolhas de plasma acima do pico da densidade da camada. Por este fator uma teoria modificada foi proposta, incluindo outros fatores. A teoria RT generalizada.

4.4 Teoria generalizada Rayleigh Taylor

Descrita conforme [Kelley \(2009\)](#), a gravidade não é o único fator que gera instabilidade na ionosfera equatorial. Há influência do campo elétrico ambiente E_0 , bem como a ação dos ventos neutros. Considerando a presença de campos elétricos e ventos neutros, a densidade de corrente é dado por:

$$J = \sigma E_0, \quad (6)$$

onde,

$$\mathbf{E}_0 = E_0 + \mathbf{u} \times \mathbf{B}, \quad (7)$$

O campo elétrico zonal, induzido pelos ventos neutros, está na mesma direção do campo elétrico gravitacional. Desta forma, a taxa de crescimento da irregularidade calculada pela teoria linear deve incluir o efeito deste campo elétrico substituindo-se o fator $\frac{g}{Lv_{in}}$

por $\frac{g}{Lv_{in}} + \frac{E_{x0}}{B}$ sendo que E_{x0} é o campo elétrico zonal no referencial do vento neutro.

Qualquer perturbação na interface plasma-atmosfera neutra promoverá o acúmulo de cargas e a perturbação aumentará, assim como no caso gravitacional. A condição necessária para a instabilidade é então que $\vec{E}_{x_0} \times \vec{B}$ seja paralelo ao gradiente de densidade do plasma. A componente zonal do campo elétrico aumenta logo após o anoitecer (pico pré reversão) e promove a subida da camada F. Esta subida pode aumentar a instabilidade de duas formas: 1) o campo elétrico para leste interage com B fazendo com que a onda cresça para cima; 2) quando a camada sobe o fator $\frac{g}{v}$ torna-se muito grande (as colisões em altitudes mais altas são menos frequentes). Para um valor típico de campo elétrico na região, tanto a ação gravitacional como o campo elétrico zonal tem o mesmo peso no crescimento de uma instabilidade em uma altitude de 360 km. A taxa de crescimento da instabilidade de RT generalizada que inclui a contribuição de campos elétricos é dada por:

$$\gamma_L = \frac{\Delta n}{n} \left(\frac{E}{B} - \frac{g}{v_{in}} \right) - \beta_L, \quad (8)$$

em que n é a densidade eletrônica ambiente, E é o campo elétrico zonal ambiente, B é a intensidade do campo magnético, g é a aceleração da gravidade, v_{in} é a frequência de colisão entre íons e partículas neutras β_L é a taxa de recombinação das espécies iônicas majoritárias.

4.4.1 Gradientes de Condutividade Pedersen

A taxa de crescimento γ_{RT} da instabilidade do plasma devido a condutividade Pedersen integrada ao longo do tubo fluxo explicada por [Martinis et al. \(2005\)](#) é dada por:

$$\gamma_{RT} = \frac{\sum_p^F}{\sum_p^E + \sum_p^F} \frac{\bar{v}_N}{N} \cdot \left[\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2} - \frac{\vec{g}}{v_{in}} - \vec{U}_n \right] \quad (9)$$

Quando a taxa de crescimento γ_{RT} é positiva, começa um processo de instabilidade na parte inferior da camada F. As irregularidades se formam quando a razão da condutividade Pedersen da camada F e camadas E e F $\frac{\Sigma_P^F}{\Sigma_P^E + \Sigma_P^F}$, se aproxima da unidade, ou quando há maiores gradientes de densidade eletrônica $\frac{\bar{v}_N}{N}$ ou a deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ após o pôr do sol se intensifica $\frac{E \times B}{B^2}$, quando a ionosfera se expande para altas latitudes, reduzindo a frequência de colisões entre as partículas neutras $\frac{\bar{g}}{v_{in}}$ e quando ao termo do vento neutro da componente perpendicular ao campo magnético, são componentes meridional e vertical do total dos ventos no meridiano geomagnético e I seja o ângulo de inclinação magnética.

Segundo [de Abreu, 2012](#), o primeiro termo e o segundo termo da equação 9 são condições essenciais para o crescimento da irregularidade, e os três últimos termos são condições para conduzir e suprimir a geração de irregularidades.

5 LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA

A luminescência atmosférica é um fenômeno natural que ocorre na atmosfera superior em altitudes maiores que 80 km, pela emissão de fótons liberados por átomos e moléculas excitadas. A geração dessa luminescência está relacionada às emissões de radiação na ampla faixa do espectro eletromagnético (ultravioleta, visível e infravermelho), onde as reações fotoquímicas entre constituintes neutros e ionizados (que se tornam excitados pelas reações de recombinação dissociativa) são as suas principais causas, como sugerido por [Chapman, \(1931\)](#). A luminescência atmosférica pode ser classificada em diurna (*dayglow*), emissão que ocorre durante o dia, em noturna (*nightglow*), que acontece durante a noite ou crepuscular (*twilight*) que ocorre durante a madrugada.

São duas categorias de emissões atmosféricas, uma denominada aurora e a outra luminescência atmosférica ou aeroluminescência (*airglow*). A aurora é produzida quando partículas eletricamente carregadas provenientes do Sol colidem com átomos e moléculas da ionosfera, a uma altitude de 80 a 500 km, levando-os a emissões visíveis a olho nu. A luminescência atmosférica é emissão de luz mais fraca causada por reações químicas, da excitação de átomos e moléculas acima de seu nível de energia, que ao voltarem ao estado fundamental emitem fótons, em determinado comprimento de onda.

Os meios de detecção da luminescência atmosférica dependem do propósito de estudo. As observações fornecem técnicas convenientes para medir as densidades de partículas excitadas e temperaturas cinéticas, é possível também, estudar os processos dinâmicos em diferentes alturas da atmosfera superior, que são realizadas de três formas: em solo, a bordo de foguetes e com satélites.

De acordo com o trabalho de [Candido \(2008\)](#), o oxigênio atômico (OI) pode emitir radiação em uma ampla faixa espectral que vai desde o ultravioleta até o infravermelho. As

emissões mais estudadas são as do OI 557,7 nm (linha verde), o OI 630,0 nm (linha vermelha), são produzidas por processos de recombinação dissociativa e a do OI 777,4 nm (recombinação radiativa e íon-íon). As duas últimas emissões são típicas da região-F noturna, região-F2. A intensidade de emissão da luminescência é muito fraca, a unidade para medir sua intensidade é o Rayleigh, que corresponde à intensidade de uma fonte isotrópica que emite 10^6 fótons por centímetros quadrados de coluna por segundo. A Tabela 1 mostra as principais emissões do oxigênio atômico na região-F noturna.

Tabela 1 Principais emissões do oxigênio atômico na região-F noturna.

Emissões atmosféricas	Comprimento de onda (nm)	Intensidade típica (R)	Altitude média (km)
OI 557,7	557,7	60 – 200	250 – 300
OI 630,0	630,0	300 – 600	250 – 300
OI 777,4	777,4	20 – 200	280 - 350

Neste trabalho, foi utilizada a emissão do oxigênio atômico na emissão OI 630,0 nm. Por isso, abaixo será apresentado algumas importantes características dessa emissão.

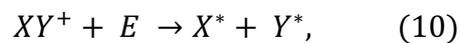
5.1 Emissão OI 630,0 nm

A linha vermelha do oxigênio atômico (OI) é a mais utilizada no estudo da dinâmica da camada F noturna, vem de uma camada emissora de aproximadamente 50 km de espessura, localizada na parte inferior da região-F, com emissão entre 250 e 300 km de altitude, sendo resultado de uma transição proibida entre os níveis 1D e 3P . A linha vermelha do OI é emitida pelo átomo do oxigênio no nível de energia $O(^1D)$, através da transição foto-

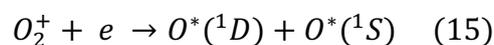
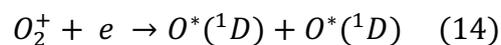
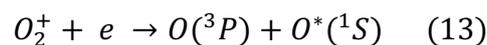
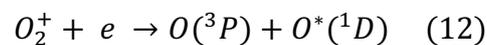
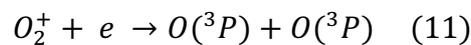
emissiva $O(^1D) \rightarrow (^3P)$. A emissão de átomos excitados $O(^1D)$ é gerado a partir do processo de recombinação dissociativa do íon molecular O_2^+ junto com elétrons da região-F ionosférica.

5.1.2 Recombinação dissociativa

O processo de produção do oxigênio atômico excitado $O(^1D)$ na região-F, que gera a linha vermelha OI 630,0 nm, é a recombinação dissociativa do íon molecular com os elétrons, segundo a reação química geral:



Uma parte da energia da reação é usada para dissociar o íon molecular XY^* em átomos excitados. A recombinação dissociativa do íon molecular pode produzir os seguintes produtos:

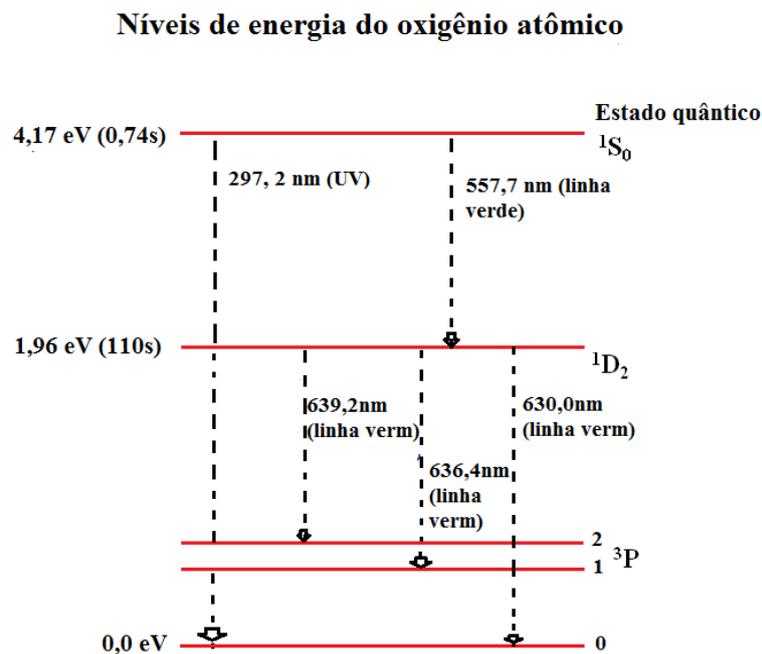


O átomo do oxigênio atômico no nível 1D , ao decair para o estado fundamental espontaneamente ($O^*(^1D) \rightarrow O(^3P) + h\nu$ (630,0 nm e 636,4 nm), libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética, emitindo discretas linhas nos comprimentos de onda 630,0 nm e 636,4 nm. O tempo de vida do oxigênio excitado no nível 1D é de aproximadamente 110 s, podendo ser desativado durante esse período por colisões, sem emitir

o fóton. Os principais constituintes atmosféricos envolvidos na desativação do O(¹D) são as moléculas neutras O₂ e N₂.

Uma observação relevante sobre a emissão OI 630,0 nm é que a deriva vertical do plasma **ExB** na região-F, após o pôr do Sol, influencia na intensidade de sua emissão. O movimento do plasma para cima, diminui a concentração de O₂⁺, em consequência, diminui a concentração do oxigênio atômico excitado no nível ¹D, desta forma diminui a intensidade da emissão OI 630,0 nm. Já o movimento vertical para baixo, aumenta a intensidade da emissão OI 630,0 nm (Pimenta, 2003). A Figura 9 ilustra os níveis de energia do oxigênio excitado nas principais emissões.

Figura 9 – Ilustração da geração das principais emissões ionosféricas a partir do oxigênio atômico excitado.



Fonte: A autora

6 INSTRUMENTAÇÃO

Foi empregado os dados observacionais de dois instrumentos no estudo das bolhas e blobs de plasma sobre o setor brasileiro: fotômetros imageadores tipo all Sky e instrumentação a bordo do satélite DMSP (*Defense Meteorological Security*). Os fotômetros imageadores utilizados nesse trabalho pertencem ao laboratório de Física e Astronomia da Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), operando nas cidades de São José dos Campos (SJC) e Manaus (MAN). Já os dados usados a partir da instrumentação dos satélites DMSP estão disponíveis e obtidos na página eletrônica <http://sat-dat.ngdc.noaa.gov/dms0/data/>. A Figura 10 é uma vista externa do container onde está instalado o fotômetro imageador em SJC.

Figura 10 – Vista externa do laboratório móvel do laboratório de Física & Astronomia no Campus Urbanova da UNIVAP (SJC – SP), container onde está instalado e operando um fotômetro imageador de alta resolução.



Fonte: A autora

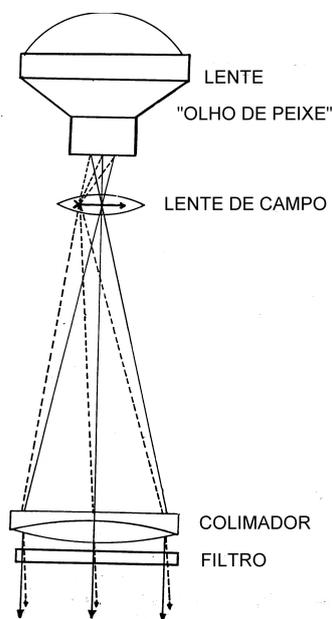
6.1 Fotômetro imageador

O fotômetro ou imageador de alta resolução espacial tipo “all sky” é um telescópio que possui uma lente do tipo “olho de peixe” permitindo um campo de visão de 180°. No

telescópio os raios divergentes que compõem as imagens assim obtidas inicialmente são logo colimadas para passar pelo filtro apropriado (OI 557,7 nm; OI 630,0 nm e OI 777,4 nm).

Para assegurar que toda a imagem processada pela lente “*olho de peixe*” entre no colimador e conseqüentemente gere uma imagem maior possível e de boa resolução, uma lente de campo é colocada entre a lente “*olho de peixe*” e o colimador. O comprimento focal desta lente de campo deve ser de um comprimento tal que a imagem na abertura da lente se encontre no filtro, como se observa no esquema da Figura 11. Com isso fica assegurado que, no filtro, todos os raios de luz que passam pelo centro da lente de campo são vistos paralelos ao eixo óptico e aqueles raios que passam pela borda da lente vão ser também vistos paralelos no filtro, mas fazendo um ângulo com o eixo óptico que é a metade do ângulo que apresentam na entrada do colimador.

Figura 11 – Descrição da geometria das lentes do telescópio de alta resolução espacial.



Fonte: Manual do usuário do Fotômetro all-sky

Devido a esta característica, o valor deste ângulo de incidência no filtro pode ser

arbitrariamente pequeno, basta para isso afastar o suficiente o colimador da lente. Este procedimento tem a limitação prática de que quanto mais afastado o colimador da lente, maior será o tamanho da imagem final obtida e maior o tamanho do filtro a ser utilizado. Na prática, o colimador é colocado tão longe quanto o tamanho do filtro comporte. Tendo em consideração que este ângulo também é minimizado inicialmente quando a lente “*olho de peixe*” produz imagens muito pequenas. A importância de se implementar e utilizar imageadores de alta resolução espacial é que com eles podem ser observados detalhadamente a morfologia e a dinâmica das irregularidades ionosféricas, além da geração, evolução e desenvolvimento desse fenômeno. Finalmente, a imagem é recolhida/registrada em forma digital por meio de um CCD.

Para utilização das imagens obtidas no fotômetro imageador é necessário um céu limpo, isto é, sem nuvens, sem neblina, sem luzes intensas, principalmente luz proveniente da Lua. Portanto, a sua operação fica restrita inicialmente ao período lunar de quarto minguante, passando pela lua nova e até quarto crescente.

O grande avanço tecnológico obtido para detectar luminescência atmosférica utilizando imageadores foi a CCD (*Charge Couple Device*) como o CH350 Photometrics detectors utilizada nestes fotômetros da UNIVAP. Esse detector é composto por uma matriz de 1024 x 1024 células, retro iluminadas, sensíveis a luz, denominadas de pixels. Esta CCD possui 14 bits de precisão e uma área de 1cm². A câmera CCD possui um sistema de refrigeração líquido que melhora os efeitos causados pela energia térmica gerada pelos componentes eletrônicos e correntes elétricas da própria câmera e a temperatura do ambiente onde estão instalados.

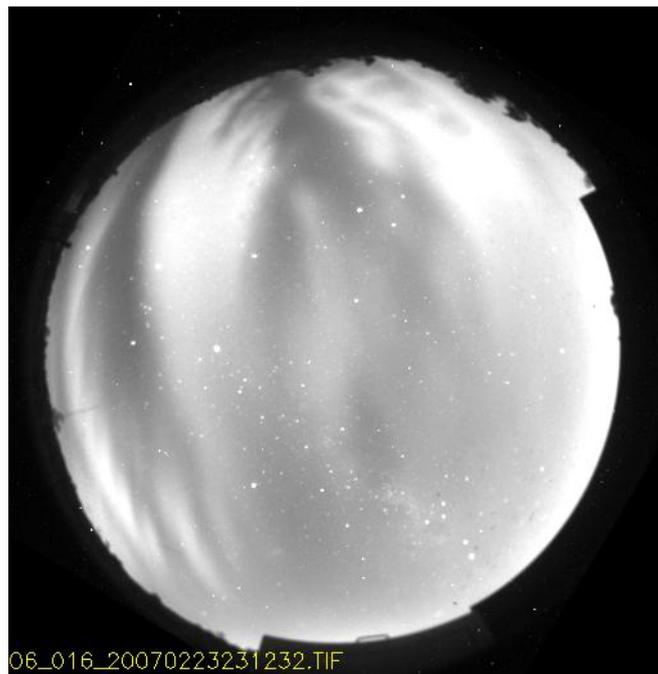
Estas características são do fotômetro operando em SJC, no momento dos dados utilizados. O fotômetro imageador em MAN possui uma CCD de 2048 x 2048 pixels e um sistema de refrigeração elétrico (efeito Peltier).

Figura 12 – Vista de uma roda de filtros desmontada de um dos fotômetros imageadores da UNIVAP. Nela se observa as 8 posições da roda e os sete filtros colocados.



Fonte: A autora

Figura 13 – Imagem capturada pelo fotômetro imageador em SJG na noite de 23 de fevereiro de 2007 às 23:12 LT e visualizada através do programa UASDA.

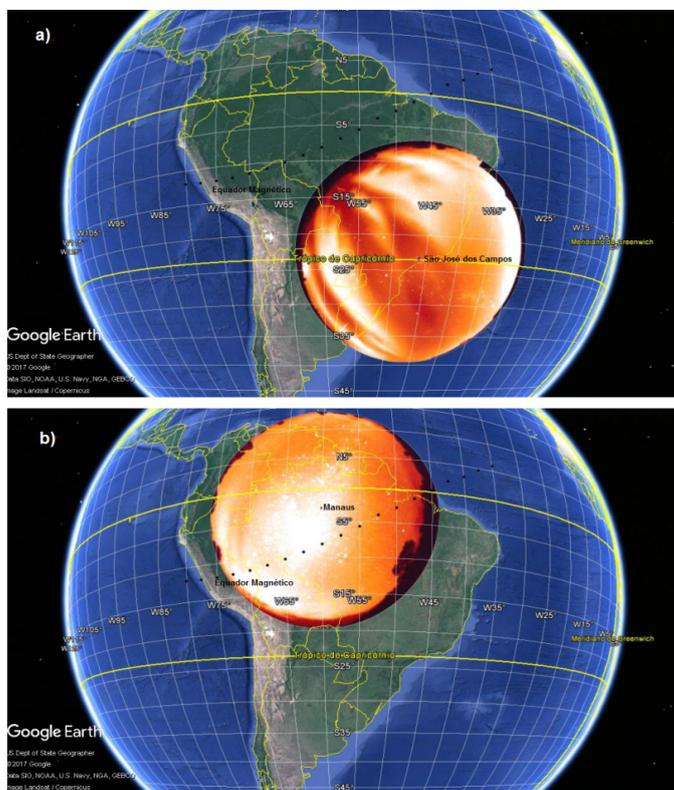


Fonte: A autora

No trabalho foram analisados dados observacionais obtidos com filtro de interferência do oxigênio atômico no comprimento de onda de 630 nm, emissão OI 630,0 nm. Os filtros na roda de filtros destes fotômetros (Figura 12) possuem 3" de diâmetro e uma largura de banda de 1,5 nm a 2,0 nm sempre centralizado no comprimento de onda de cada filtro. A Figura 12 é uma imagem da roda de filtros.

A Figura 13 mostra uma imagem obtida na noite de 23 de Fevereiro de 2007 pelo fotômetro imageador, com filtro de interferência OI 630,0 nm, operando em SJC. Estas imagens são visualizadas e analisadas inicialmente por um programa próprio desenvolvido pelo grupo da UNIVAP, o programa UASDA. Na imagem, é possível visualizar bolhas e blobs de plasma, regiões obscuras e claras, respectivamente. A Figura 14 apresenta a área de cobertura do fotômetro imageador em (a) SJC e (b) MAN.

Figura 14 – Esquema gráfico com a área de cobertura do fotômetro imageador instalado nos observatórios de (a) São José dos Campos (23,21° S, 45,86° O; dip. latitude 18,3° S) e (b) Manaus (2,59°S; 60,22°O; dip. latitude 12,1°N), Brasil.



Fonte: A autora

6.2 Satélite DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*)

O DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*) é uma série de satélites artificiais científicos da Força Área Americana que entraram em operação a partir da década de 1960. É um programa de satélites inicialmente destinado a atividades de defesa, de uso militar, dos Estados Unidos (EUA). Com o passar dos anos foram disponibilizados os dados, para uso da comunidade científica, principalmente, as que desenvolvem estudos na área de meteorologia e geofísica. O DMSP está sobre responsabilidade do *Air Force Space and Missile Systems Center* (SMC). Este órgão implementa, lança, opera e mantém os vários satélites de defesa dos EUA. A Figura 15 ilustra um dos satélites DMSP em órbita.

Figura 15 – Ilustração do satélite DMSP em órbita



Fonte: <http://wonderfulengineering.com/us-military-satellite-explodes-over-earth-and-european-space-agency-assesses-damage/>

O DMSP fornece dados meteorológicos, oceanográficos e geofísicos solares. Neste trabalho, foi utilizado o satélite DMSP F15 da série, lançado em 12 dezembro de 1999, e

começou a operar em 24 de janeiro de 2000, numa órbita polar (inclinação de 98,9° e um período de 101,8 minutos), quase circular, sol-síncrono, numa altitude máxima de 851 km e mínima de 837 km.

Os satélites DMSP oferecem uma cobertura global da atmosfera a cada seis horas, cruzando o mesmo ponto da Terra a cada dois dias. Seus principais sensores são: OLS; SSM-1; SSM/T; SSMT/2; SSJ/4; SSIES; SSM; SSULI; SSIES-13 e o SSJ-5 (ver Tabela 2). Uma das características especiais desta família de satélites é que conseguem gerar imagens de objetos que refletem pouca quantidade de luz. Outro indicador positivo é que possui o sensor OLS que é capaz de detectar pontos de luz noturnos, como cidades e queimadas. A Tabela 2 mostra os principais sensores e suas funcionalidades.

Tabela 1 Características dos sensores do satélite DMSP

OLS	Sistema operacional do rastreamento linear (Operational Line scanning System)
SSM/I	Imagens na banda de microonda (Microwave imager)
SSM/T	Perfil da temperatura (Atmospheric Temperature Profiler)
SSM/T2	Perfil de vapor de água atmosférica (Atmospheric Temperature Profile)
SSJ/4	Espectrômetro de íon e elétron (Precipitating Electron and Ion Spectrometer)
SSIES	Monitor de ions por cintilação (Ion Scintillation Monitor)
SSM	Magnetômetro (Magnetometer)
SSULI	Sensor especial de imagens em ultravioleta (Special Sensor Ultraviolet Limb Imager)
SSIES-13	Sensor especial de deriva de plasma ionosférico/ monitor de cintilação (Special Sensor Ionospheric Plasma Drift/Scintillation Monitor – 13)
SSJ-5	Sensor especial de precipitação de elétron e espectrometro de íon (Special Sensor Precipitating Electron and Ion Spectrometer)

7 METODOLOGIA

Para o cálculo de deriva zonal e latitudinal e para medir a dimensão norte/sul e leste/oeste das blobs foram utilizados dados de dois fotômetros imageadores. Para tratar e analisar os dados obtidos foi desenvolvido pelo laboratório de Física e Astronomia da UNIVAP o programa UASDA (*Univap All Sky Data Analysis*). O programa é uma ferramenta essencial para a análise de dados obtidos pelo fotômetro imageador de alta resolução. Ele permite por meio de análises das imagens coletadas, conhecer os fenômenos físicos e químicos presentes na região da atmosfera terrestre em estudo, tais como: cálculo das dimensões das irregularidades do plasma, suas velocidades de deriva, altura da camada F ionosférica, variação espaço temporal da densidade eletrônica e o pico da camada F.

Este programa emprega o IDL (*Interactive Data Language*) para carregar e visualizar as imagens e o Visual Basic como interface para o usuário. Através do UASDA é possível analisar as imagens selecionadas dos fotômetros imageadores, para obter valores quantitativos e por meio do processo de linearização, pode se obter valores dos diferentes parâmetros que caracterizam os fenômenos ionosféricos presentes nas imagens: bolhas de plasma, ondas de gravidade e planetárias, estratificação das camadas ionosféricas, e outros.

Para obter valores numéricos dos parâmetros primeiramente é necessário obter as características não lineares da lente olho de peixe do aparelho, este processo é importante na linearização das imagens e pode ser dividido em três etapas:

1. cálculo do centro real da imagem, ou ponto zenital da observação;
2. cálculo do ângulo de rotação do eixo da imagem, para ficar orientado com as coordenadas geográficas, posicionando o Norte geográfico na parte superior centrado na tela;

3. geração da função de transferência (os cinco coeficientes de um polinômio de quarta ordem), para linearização das imagens. Pelo efeito óptico da lente olho de peixe as imagens guardadas apresentam-se distorcidas.

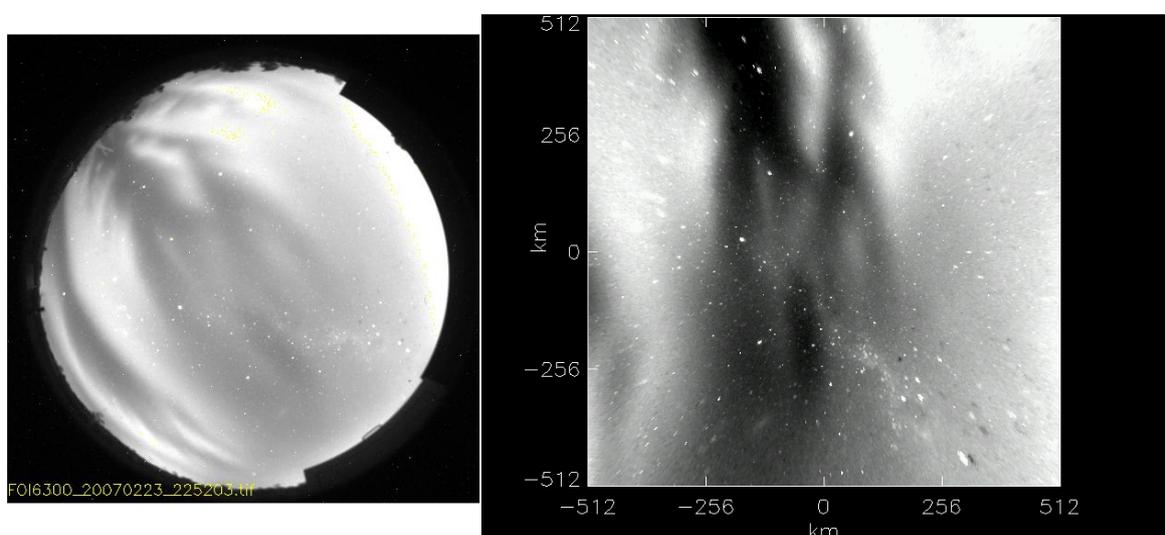
A linearização, o cálculo dos parâmetros das três etapas enumeradas acima, é feito a partir de uma sub-rotina própria do programa UASDA, que emprega as imagens cruas coletadas pelo instrumento, as coordenadas geográficas do observatório, os horários das imagens e o mapa do céu obtido de outros aplicativos, como por exemplo, o SKYMAP (Pillat et al. 2009).

Após a obtenção dos parâmetros de linearização próprios para cada observatório e período em que o aparelho ficou fixo, ou seja, não houve nenhum movimento no rack onde fica instalado o imageador, desta forma, é possível realizar a linearização de qualquer imagem coletada nesse período; para isso primeiro, em uma sub-rotina própria são introduzidas as coordenadas geográficas do observatório, a altitude da emissão para as imagens selecionadas no respectivo filtro de interferência e a área de cobertura em análise. O programa carrega automaticamente os valores que caracterizam a lente: centro real, ângulo de rotação e coeficientes de polinômio, característico da não linearidade. Nesta etapa, é possível visualizar a imagem crua e a área selecionada linearizada da bolha de plasma ou qualquer outra região a partir do centro zenital da imagem, como mostra a Figura 16.

Neste processo de linearização, o programa converte a dimensão em pixels da imagem original para uma imagem em coordenadas geográficas, parametrizada em graus ou quilômetros. A conversão em quilômetros é mais simples e emprega a regra de proporção, diferente da conversão em graus onde é preciso utilizar relações que introduzem as coordenadas do ponto de observação, o raio da Terra e a altitude da camada ionosférica da imagem a linearizar (Pillat et al. 2009).

Para descrever a metodologia de análise, as etapas realizadas são descritas tomando-se como exemplo o dia 23 de fevereiro de 2007, fotômetro instalado na região de São José dos Campos, utilizando filtro de interferência OI 630, 0 nm, linearizada a uma altitude de 280 km, em uma área de cobertura de 1024 km x 1024 km.

Figura 16 – Tela do programa UASDA com a imagem crua à esquerda e a direita já linearizada numa altitude de 280 km e uma área de 1024 km x1024 km. Essa imagem é do dia 23 de fevereiro de 2007, capturada utilizando o filtro de interferência de OI 630,0 nm no observatório de SJC.



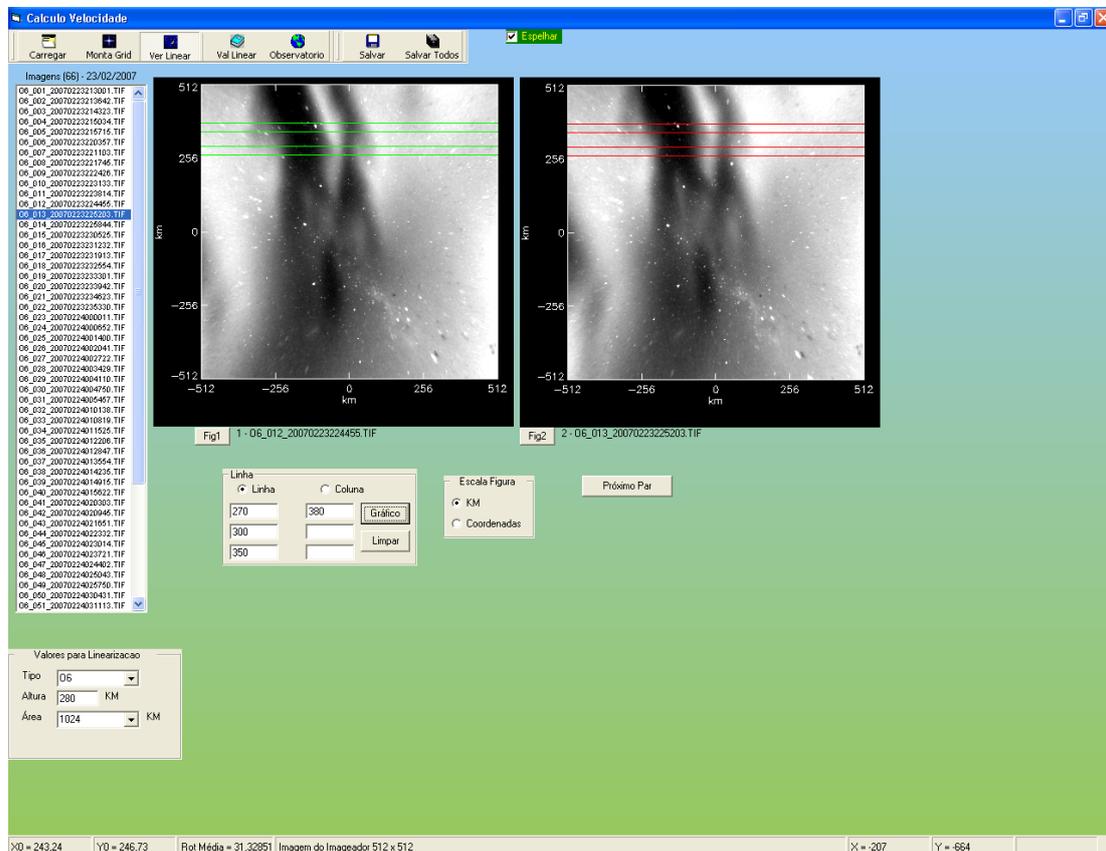
Fonte: A autora

A Figura 17 mostra um exemplo deste trabalho com imagens obtidas pelo fotômetro imageador em operação em SJC, na noite de 23 de fevereiro de 2007. Podem ser observados na imagem quatro cortes horizontais nas posições de 270 km, 300 km, 350 km e 380 km. Os cortes foram feitos em duas imagens sequenciais e representam os perfis de intensidade das imagens nessas linhas, ou seja, o perfil da densidade eletrônica do plasma, que mostra a presença de bolhas (depleção) ou blobs (incremento). Baseado nesses cortes é realizado o estudo proposto, nesse caso, determinar a velocidade de deriva zonal para ambas irregularidades. O que difere na hora do programa calcular as derivas em zonal e latitudinal é a forma em que os cortes são realizados. Quando os cortes são na horizontal a

velocidade de deriva calculada será a zonal, quando os cortes são na vertical a velocidade de deriva calculada será a latitudinal. Na Figura 18 há um exemplo da tela do programa UASDA com cortes na vertical nas posições -370 km, -390 km, -410 km, -430 km.

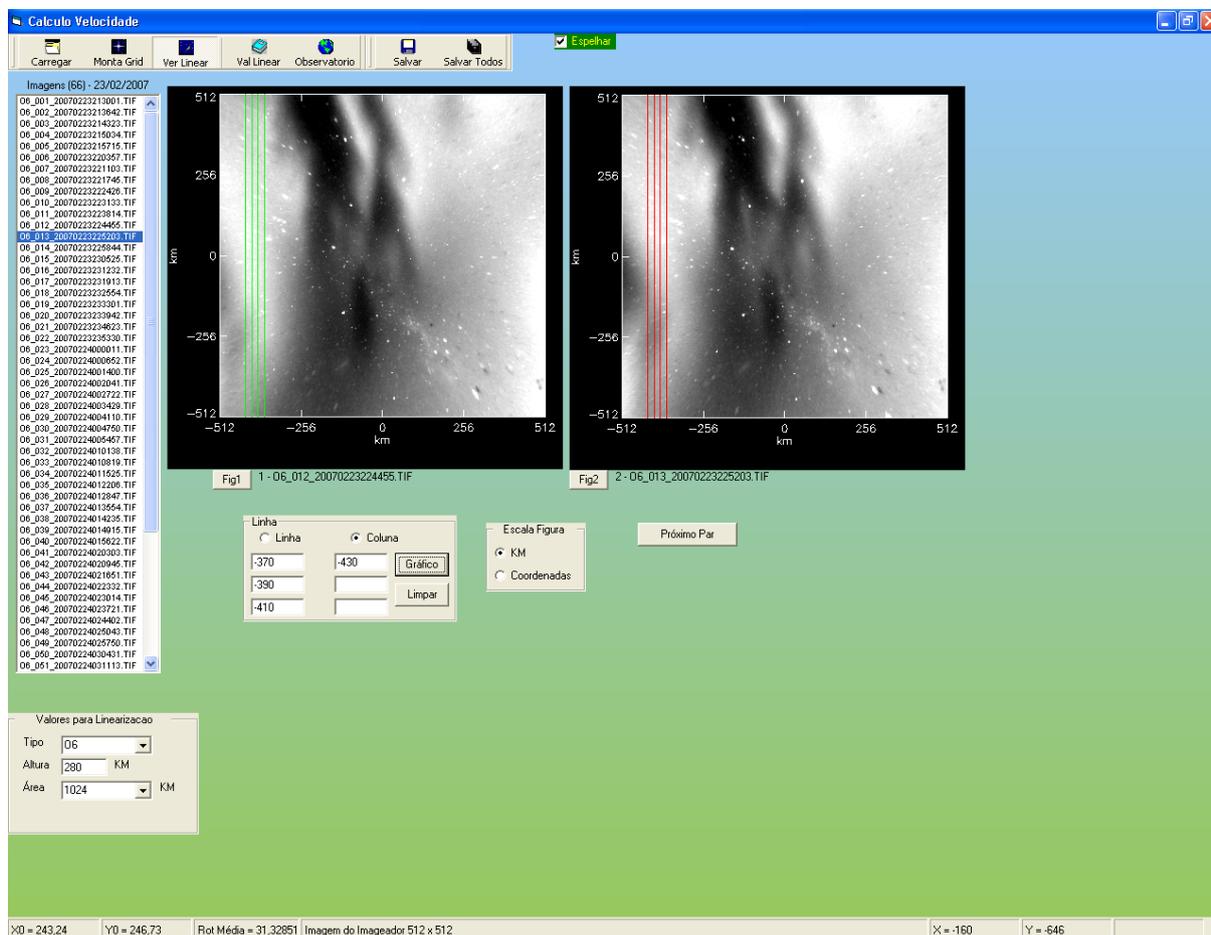
Para o cálculo das derivas em função da hora local e latitude, primeiramente é preciso linearizar as imagens como descrito acima. Assim sendo, escolhida e determinada uma mesma posição da bolha ou blob em ambas as figuras obtém-se a distância entre ambas posições (isto é feito para cada corte da imagem linearizada que representa uma determinada latitude) e inferir a velocidade zonal ou latitudinal das bolhas e das blobs de plasma a partir dos horários de cada imagem. Como essas irregularidades são dinâmicas, mudam em sua forma e dimensão, temos desvios significativos devido a erros na escolha de um mesmo ponto de estudo para cada par de imagens analisadas.

Figura 17 – Vista da interface gráfica do UASDA utilizada para o cálculo da velocidade de deriva zonal das bolhas e das blobs de plasma da noite de 23 de fevereiro de 2007 em SJC.



Fonte: A autora

Figura 18 – Vista da interface gráfica do UASDA utilizada para o cálculo da velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma da noite de 23 de fevereiro de 2007 em SJC. Utilizando uma área de 1320x1320 km, em uma altitude da emissão OI 630,0 nm de 280 km.



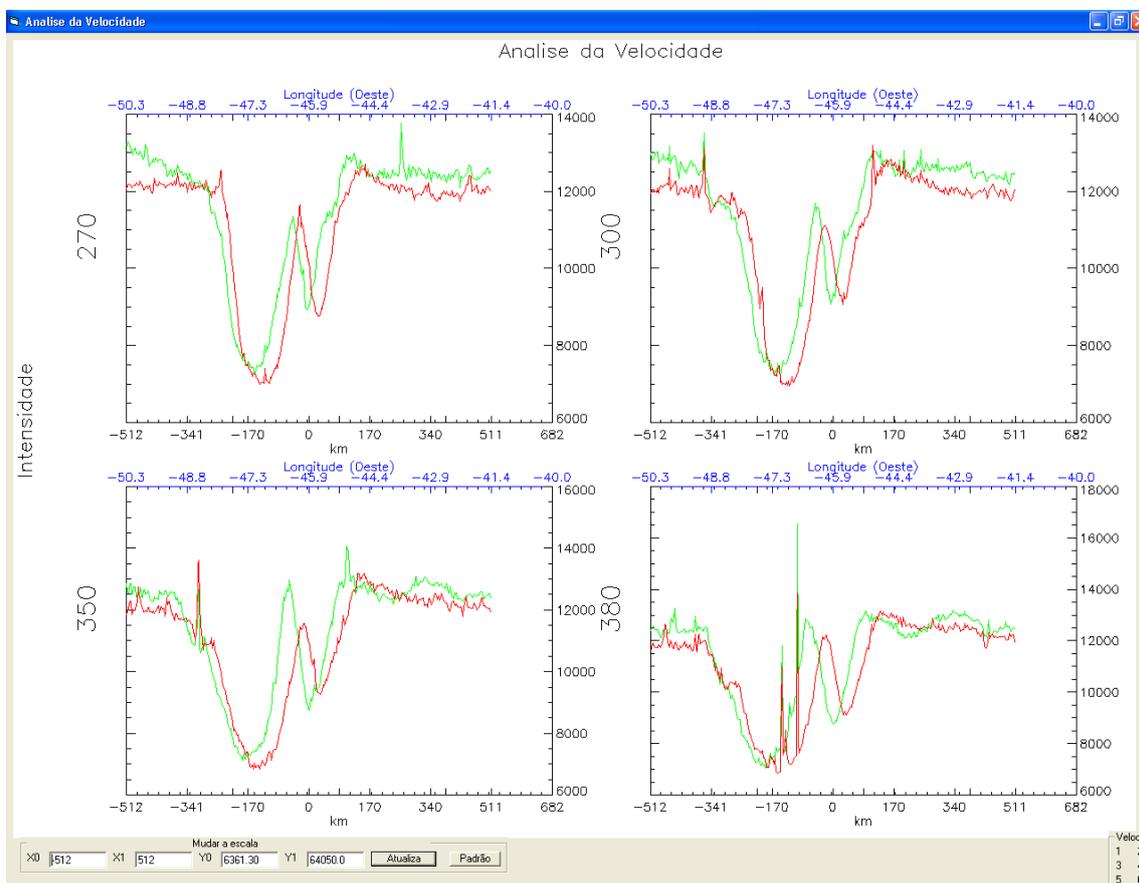
Fonte: A autora

Na Figura 19 há quatro gráficos com os cortes no perfil de intensidade para cada um dos níveis selecionados citados anteriormente (Figura 17). A partir desses gráficos (Figura 19), que é feito o cálculo de deriva zonal/latitudinal nas bolhas e blobs de plasma.

Em cada gráfico há dois perfis, cada perfil corresponde a um horário das duas imagens que foram escolhidas, neste momento seleciona-se dois pontos que definem as retas nas bordas da estrutura. Assim conhecidos os horários em que esses perfis/imagem foram obtidos (informação que cada imagem registra e o programa acessa) se calcula o valor da velocidade a partir do deslocamento apresentado por essas retas. O programa calcula o

valor da velocidade para cada um dos cortes selecionados nesse horário e guarda estes valores e seu valor médio. Nesta interface, também é possível fazer uma ampliação em regiões determinadas do gráfico e salvar um arquivo com os dados obtidos para o cálculo da velocidade (Pillat et al. 2009). O programa permite fazer até seis cortes, mas nesse trabalho foram utilizados quatro cortes para cada período calculado.

Figura 19 – Vista do perfil de intensidade para os quatro cortes (270, 300, 350 E 380 km) selecionados na (Figura 17). O perfil em cor verde é da imagem do primeiro horário e o perfil em cor vermelho é da imagem do segundo horário, seu deslocamento indica o movimento em que a bolha teve nesse intervalo de tempo.



Fonte: A autora

A Figura 20 apresenta um exemplo da tela de um dos quatro gráficos apresentados na Figura 19, já com os pontos selecionados nas bordas, ou seja, nesse ponto o programa já calculou a velocidade de deriva proposta, para a latitude selecionada.

Figura 20 – Exemplo da interface gráfica utilizada no cálculo de velocidade de deslocamento da blob de plasma a partir de um dos quatro cortes no perfil de intensidade de emissão selecionado, conforme visto na Figura 18. Observa-se o traçado das paredes nas bordas das blobs construídas a partir dos dois pontos selecionados para cada uma delas.



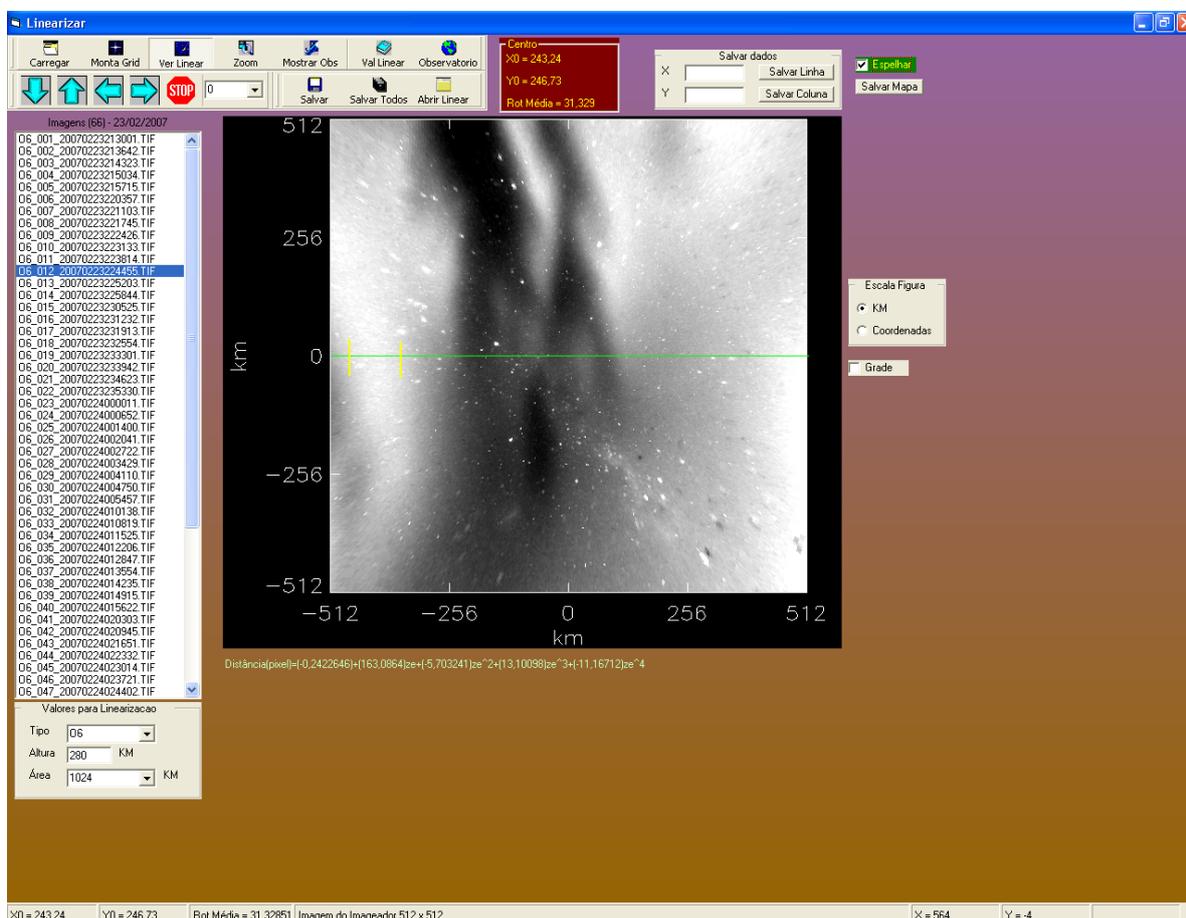
Fonte: A autora

Portanto, é dessa forma que extraímos o valor da velocidade de deriva zonal e latitudinal tanto das bolhas de plasma como também das blobs de plasma, esse foi um método utilizado por [Pimenta et al. 2001](#). Para cada par de horários analisado o programa gera um arquivo.dat, nesse arquivo consta os valores das velocidades encontrados em cada corte, os horários, a altitude dos cortes, a média de velocidade para cada horário e o erro associado, tudo calculado pelo proprio programa UASDA. No final das análises é possível gerar outro arquivo.dat, com as médias de cada horário, ou seja, é um único arquivo que contém a média da velocidade em todos os horários. Com os dados desse arquivo, é possível gerar um gráfico para visualizar o comportamento da velocidade na noite estudada.

7.1 Dimensões norte/sul e leste/oeste

Outra parte do trabalho refere-se as medições das dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs de plasma. O estudo é realizado manualmente com o auxílio do programa UASDA, por meio do programa é feito o processo de linearização da imagem e a coleta manualmente dos valores de x e y.

Figura 21 – Interface do programa UASDA com o corte para a medição da extensão leste/oeste da noite de 23 de fevereiro de 2007 no observatório de São José dos Campos-SP, a marcação em amarelo refere-se aos pontos de x e y que são utilizados para a realização do cálculo.



Fonte: A autora

Primeiramente, é preciso linearizar a imagem para medir a blob corretamente, depois da imagem linearizada é feito o corte horizontal no meio da blob para então encontrar os valores de x e y. Seguindo a linha do corte (Figura 21), é possível encontrar com precisão

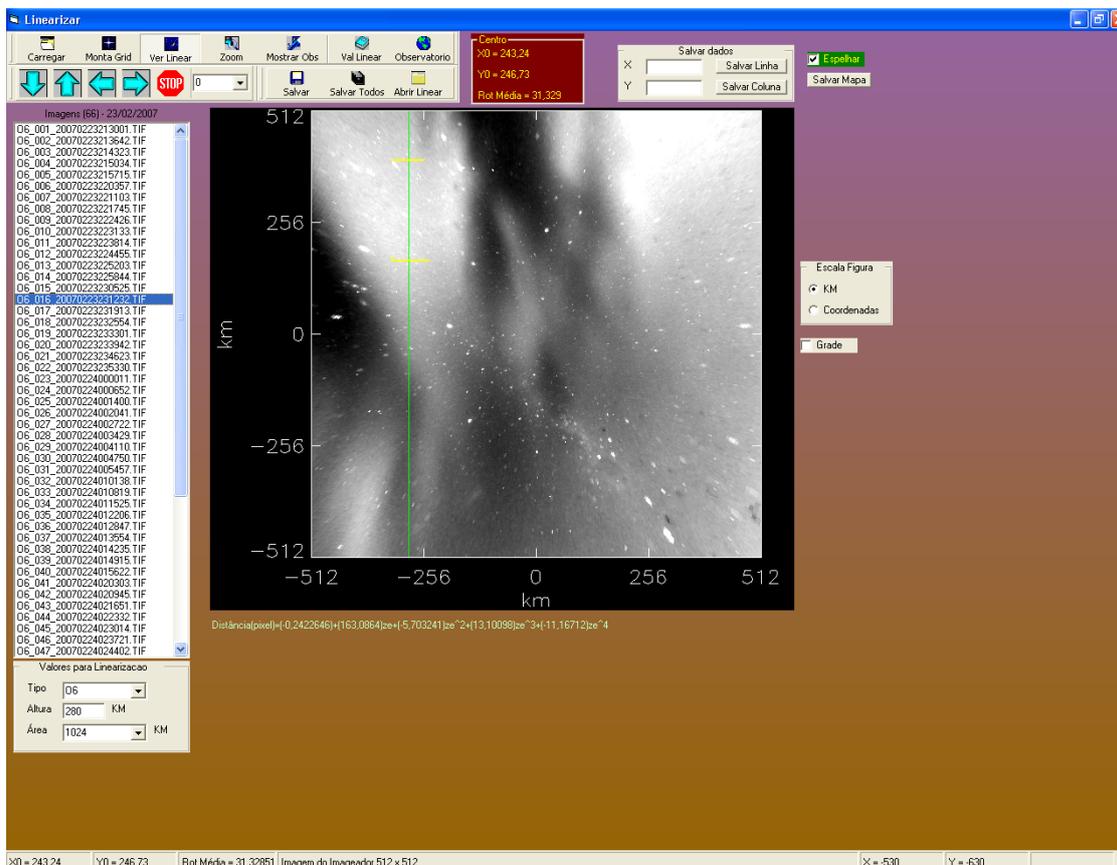
o valor de y, que no caso da medição leste/oeste é o valor que será repetido em ambas às pontas do traço (marcação amarela na Figura 21), no limiar da blob. Os valores de x serão os valores subtraídos para obter a extensão da blobs leste/oeste, veja um exemplo de como é feito esse cálculo.

Exemplo: 22:44 (LT)

$$X = |-467| - |-360| = |107|$$

Y=46 (em ambas as bordas da blob). Portanto, a extensão leste/oeste dessa blob nesse horário específico é de 107 km.

Figura 22 – Interface do programa UASDA com o corte para a medição da extensão norte/sul da noite de 23 de Fevereiro de 2007 no observatório de São José dos Campos-SP, para esta noite foi utilizada a área de linearização de 1320 x 1320 km.



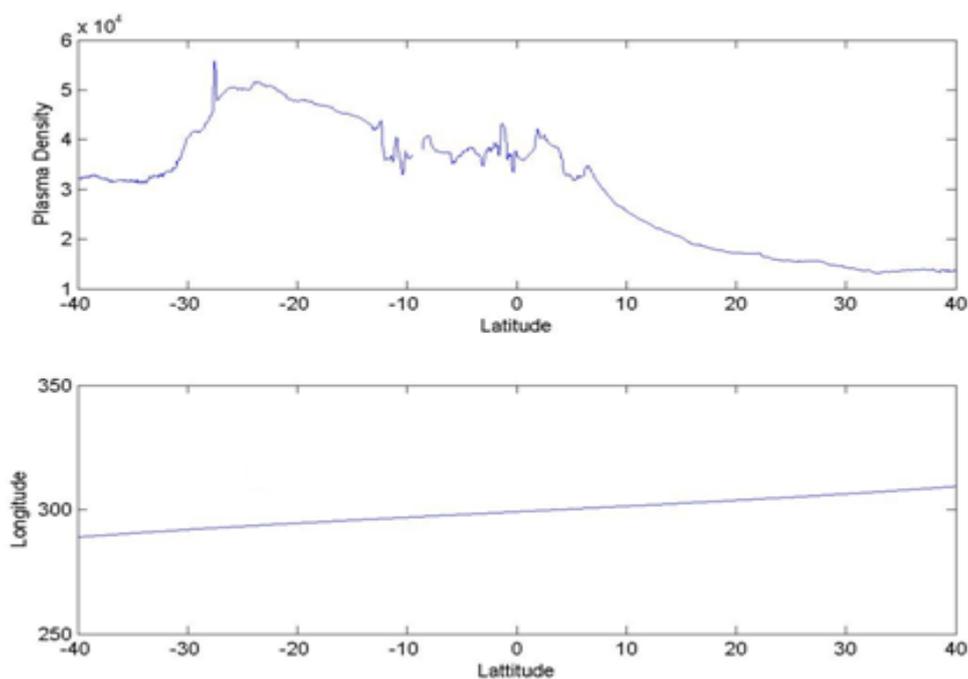
Fonte: A autora

Para o estudo de extensão norte/sul utilizamos dos mesmos parâmetros, porém, o corte é feito na vertical e a subtração é feita a partir de y e para x repete se os valores (marcação em amarelo na Figura 22).

7.2 Aumento na densidade eletrônica do plasma

Buscando identificar a formação de blobs no setor brasileiro em duas regiões distintas, foram utilizados dados de satélite, quando este estava orbitando em regiões próximas às estudadas, para verificar a densidade eletrônica do plasma. Nesse estudo foram utilizados dados do satélite DMSP F15. Os dados obtidos do satélite para este estudo foram cedidos por [HTTP://satdat.ngdc.noaa.gov/dmisp/data/](http://satdat.ngdc.noaa.gov/dmisp/data/).

Figura 23 – Perfil gráfico gerado pelo programa MatLab, por meio dos dados obtidos do satélite DMSP F15, na noite de 21 de novembro de 2015.



Fonte: A autora

Esses dados são tratados em uma programação, como por exemplo, (IDL, MATLAB) podendo, desta forma, obter gráficos com as informações de densidade eletrônica *versus* latitude, como também a órbita do satélite, através de um gráfico de latitude *versus* longitude. A Figura 23 mostra um exemplo de como é gerado o gráfico por meio da programação utilizada.

Neste estudo foram analisados dados dos satélites DMSP F15, F16, F17 e F18, porém, apenas o satélite DMSP F15 teve a órbita coincidindo com os horários em que foram visualizadas blobs por meio de fotômetros imageadores.

8 ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

Este Capítulo apresenta as análises que foram feitas nas bolhas de plasma ou *plasma bubbles* e nas blobs de plasma, sem denominação na língua portuguesa. Foram selecionadas e analisadas irregularidades em imagens obtidas por fotômetros imageadores operando em duas regiões do Brasil, São José dos Campos (SJC) e Manaus (MAN). E foram analisados dados da família dos satélites DMSP, F15, F16, F17 e F18. De todos os quatro satélites, apenas o DMSP F15, teve órbita que coincidia com a cobertura do fotômetro.

8.1 Análise de dados

Os dados coletados pelo fotômetro imageador na região de SJC, foi no período de 2001 - 2008, durante esse período, 61 noites houve ocorrência de bolhas de plasma, destas noites, somente 5 apresentaram ambos os fenômenos, bolhas e blobs. Como dito anteriormente, neste estudo foi utilizado dados do satélite DMSP F15 para complementar os resultados, devido a isso destas 5 noites em que há ocorrência de blobs de plasma, em apenas 01 noite há dados do satélite que mostram o aumento na densidade do plasma. Nesta única noite de 23 - 24 de fevereiro de 2007 há um período extenso de observação, ou seja, imagens com bolhas e blobs perfeitamente definidos e caracterizados.

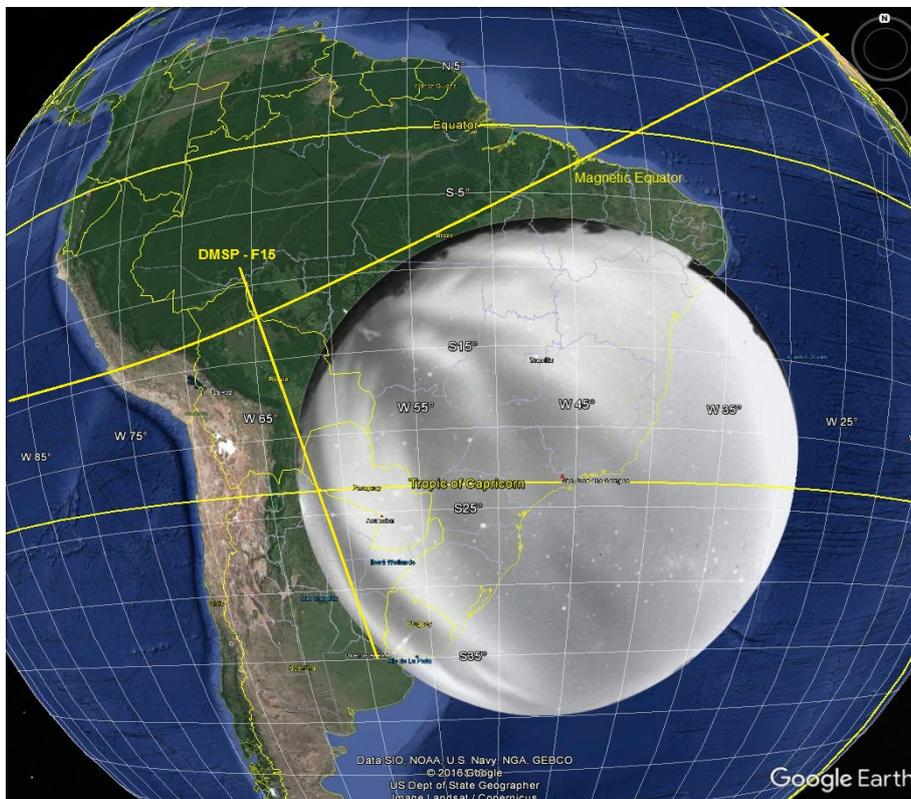
Na região de MAN foram analisadas 30 noites, no período de julho de 2015 a abril de 2016, sendo 19 noites com bolhas e blobs e 11 noites com apenas blobs de plasma, sem a presença simultânea de bolhas de plasma, coberta pelas imagens do fotômetro. O mesmo critério das análises de SJC foi utilizado para MAN, ou seja, foram analisadas noites em que possuem dados de satélite que comprovam o aumento na densidade eletrônica na altitude da órbita do satélite. Portanto, dessas 30 noites de ocorrência de eventos, 06 delas

há dados do satélite DMSP F15. As noites estudadas são: 14-15, 15-16, 19-20 e 20-21 de outubro de 2015, 20-21 de novembro de 2015 e 04-05 de dezembro de 2015.

8.1.1 Análise de dados de São José dos Campos

Os dados analisados em SJC são imagens no filtro de interferência da emissão OI 630,0 nm, em que a luminosidade ou fótons que incide nelas, estão diretamente relacionados com os elétrons livres na base da camada F ionosférica, por meio dos processos físicos químicos já bem estabelecidos, mencionados no Capítulo 5. Neste trabalho foi considerada uma altitude de emissão de 280 km para análises e uma área de cobertura do fotômetro de 1024 km x 1024 km.

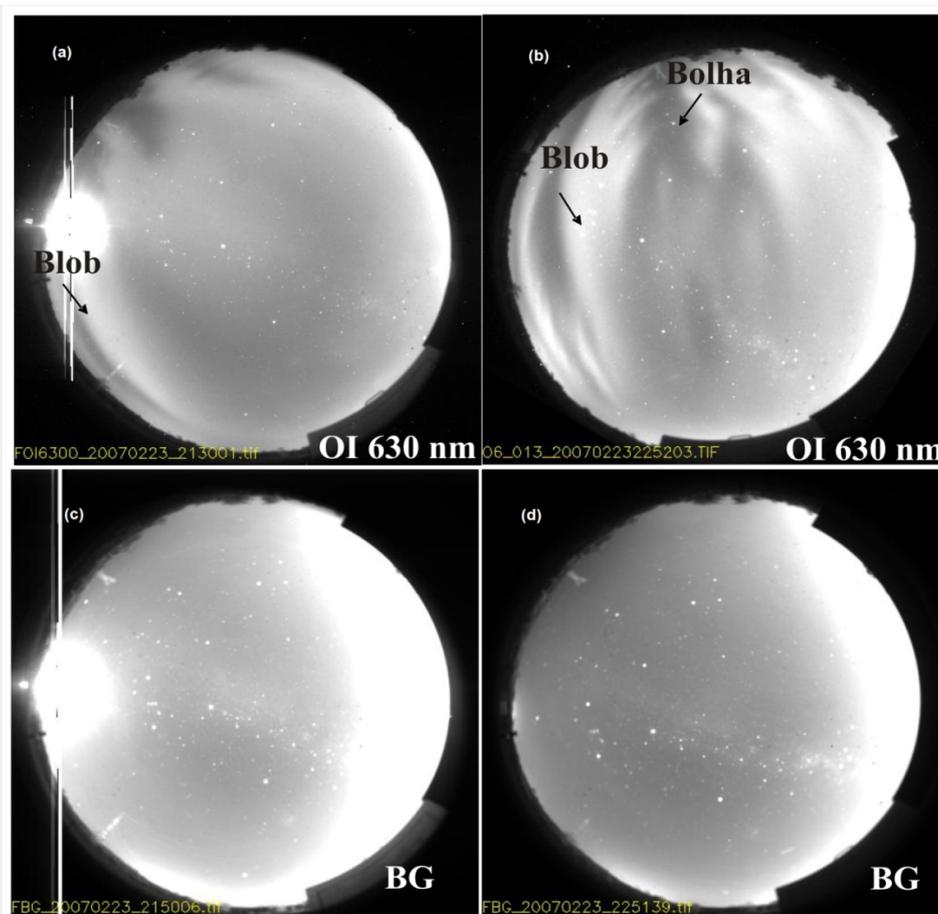
Figura 24 – Ilustração da área de cobertura com a imagem as 21:30 LT do filtro de interferência OI 630,0 nm do fotômetro imageador instalado em SJC (23,21°S; 45,86°O; dip. latitude 18,3°S). Observam-se as linhas do equador magnético e geográfico e a trajetória percorrida pelo satélite DMSP F15 para a noite do dia 23 de fevereiro de 2007.



Fonte: A autora

A Figura 24 mostra uma composição com o mapa da América do Sul e a cobertura de cada uma das imagens obtidas na observação do fotômetro imageador posicionado em SJC. A imagem corresponde às 21:30 LT do dia 23 de fevereiro de 2007. Na parte inferior esquerda, observa-se a chegada da primeira blob analisada em seu deslocamento de oeste para leste e após a presença de uma grande bolha de plasma a sua direita. A Figura 24 também ressalta os equadores geográfico e magnético e a trajetória percorrida pelo satélite DMSP F15 na sua órbita com uma altitude aproximada de 830 km.

Figura 25 – Imagens obtidas pelo fotômetro imageador na noite de 23 - 24 de fevereiro de 2007. (a) Mostra imagem às 21:30 LT, na emissão OI 630 nm, da passagem da primeira blob no campo de visão do fotômetro e no horário da passagem pela região do satélite DMSP F15 em que ele registra o aumento na densidade de elétrons. (b) Imagem às 22:52 LT, quando em seu deslocamento oeste para leste a mesma blob das 21:30 LT, já se encontra próxima ao centro da imagem. (c) e (d) Apresentam as imagens do céu local sem o filtro de interferência, nos horários mais próximos que estes foram registrados das imagens (a) e (b), 21:50 LT e 22:51 LT, respectivamente.



Fonte: A autora

Durante a noite analisada de 23 de fevereiro de 2007, o fotômetro imageador operou das 21:30 LT às 04:50 LT (00:30 UT as 07:50 UT) registrando imagens em OI 630 nm a cada 7 minutos, aproximadamente. A taxa de amostragem varia como consequência da programação na sequência dos filtros expostos a fim de obter as imagens ionosféricas nas diferentes emissões no período noturno. A Figura 25 mostra imagens em dois momentos dessa noite obtidas com e sem filtros de interferência, que coincidem com os horários de passagem da trajetória do satélite DMSP F15 passa pela região-F, medindo a densidade de elétrons.

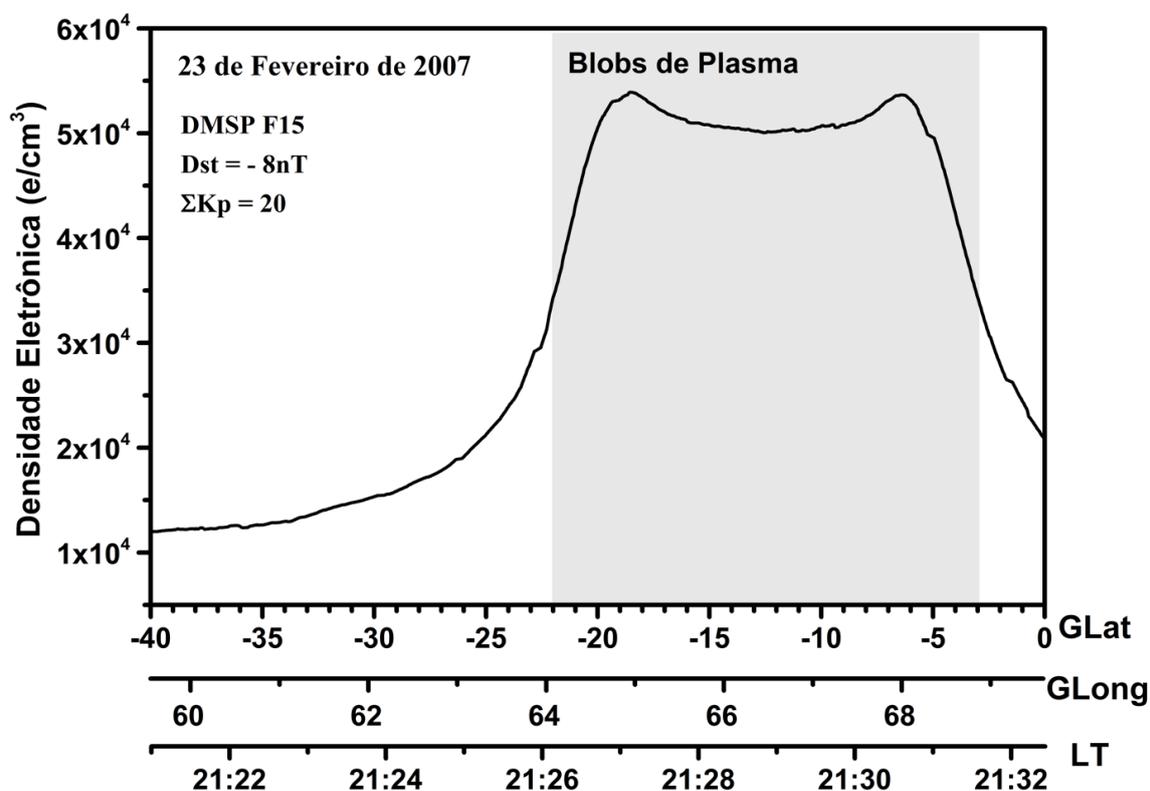
As Figuras 25 (a) e 25 (b) mostram imagens, na emissão OI 630,0 nm, da passagem da primeira blob analisada na noite de 23-24 de fevereiro de 2007 no seu deslocamento de oeste para leste no campo de visão do fotômetro imageador em SJG. O centro ou zênite de cada imagem, corresponde ao local de observação ou ponto onde se encontra instalado o equipamento. O forte brilho visto na imagem OI 630,0 nm (indicado por uma seta em negrito) são as regiões de maior densidade do plasma, ou seja, as blobs observadas nesta noite. A bolha de plasma também está indicada por uma seta na Figura 25 (b).

As Figuras 25 (c) e 25 (d) ilustram o céu noturno nos mesmos horários. Note que blobs e bolhas são irregularidades de grande escala na densidade de elétrons do plasma ionosférico local, emissões da aeroluminescência noturna, registradas apenas na emissão OI 630,0 nm.

Nessa noite, as blobs analisadas apresentaram-se associadas com bolhas de plasma, valores das velocidades de deriva zonal e latitudinal e dimensões (norte/sul e leste/oeste) foram calculados. Valores da velocidade de deriva zonal para as bolhas de plasma presentes nesta noite também foram obtidos.

Para o cálculo destes valores, o parâmetro da altitude foi fixado em 280 km e a área de cobertura na linearização das imagens foi de 1024 km x 1024 km. Embora há presença de várias bolhas de plasma nesta noite, a análise foi feita acompanhando apenas uma delas, a única que se apresenta no campo de visão do fotômetro imageador, ou seja, nas imagens durante a maior parte do período de observação.

Figura 26 – Gráfico da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, altitude de 830 km, aproximadamente, das 21:22 LT às 21:32 LT na noite de 23 - 24 de fevereiro de 2007. A banda na cor cinza corresponde ao aumento na densidade do plasma local.



Fonte: A autora

Na Figura 26, observa-se o perfil de densidade eletrônica obtido pelos instrumentos a bordo do satélite DMSP F15, entre 21:20 LT e 21:32 LT, na sua passagem pela região brasileira em estudo, indicada pelas coordenadas de latitude e longitude na figura. Nota-se que, no gráfico, a densidade eletrônica do plasma aumenta por um fator de dois ou mais na região coberta pelo fotômetro, quando comparado com o valor da região fora dela ou valor

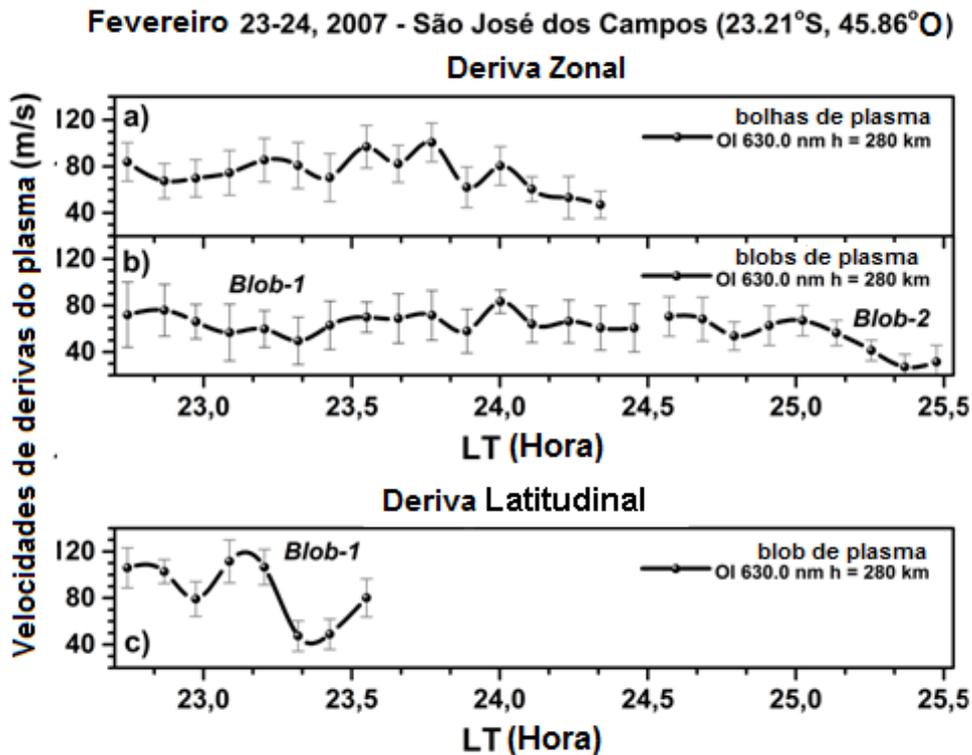
de fundo, ou seja, na posição em que se encontra a blob vista pelo fotômetro, a densidade eletrônica é mais que o dobro daquela do plasma de fundo. Esta diferença de valores ou gradiente é assumida por alguns autores para caracterizar e definir o evento blobs de plasma de qualquer outra região que apresenta incrementos na densidade eletrônica do plasma (Park et al. 2003; Le et al. 2003; Pimenta et al. 2004).

Nesta Figura 26, no eixo horizontal estão indicadas escalas com os valores da longitude e latitude geográficas e hora local; no eixo vertical tem-se os valores da densidade eletrônica do plasma para cada ponto espaço temporal medido pelo satélite. Nota-se claramente o aumento na densidade eletrônica do plasma entre -20 e -5 graus de latitude geográfica, região coberta pelo fotômetro imageador e no horário em que as imagens mostram a presença de blobs.

No início das observações registradas pelo fotômetro, a primeira blob aparece no canto esquerdo da imagem, região oeste, dificultando a definição dela e sua linearização, para o cálculo dos parâmetros das velocidades de deriva e dimensões. Isto é devido as imagens registradas pelo equipamento fotômetro imageador apresentam uma baixa linearidade do centro na direção de suas bordas, efeito da lente all-sky (Garcia et al. 1997). Mas com a evolução das imagens nota-se que a blob presente no perfil de densidade eletrônica do satélite às 21:30 LT (Figura 26), é a mesma que aparece na imagem das 22:52 LT (Figura 26 (b)) registrada pelo imageador. A extensão latitudinal da blob sugere que ela se estende em grandes altitudes. Assim, esta blob acompanha um movimento de deriva zonal no sentido para leste, acompanhando o movimento das bolhas de plasma presentes.

A Figura 27 (a) e 27 (b) mostram os resultados da velocidade de deriva zonal da bolha e das duas blobs de plasma (blob-1 e blob-2), respectivamente. A Figura 27 (c) mostra os resultados da velocidade de deriva latitudinal apenas da blob-1.

Figura 27 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, observadas por imageador em 280 km de altitude na noite de 23 de fevereiro de 2007. Painel (a) Velocidade de deriva zonal de bolha de plasma, (b) velocidade de deriva zonal das blobs de plasma e (c) velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma.



Fonte: A autora

Na Figura 27 (a), a variação da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma apresentou um comportamento típico, ou seja, possuem velocidades de deriva zonal maiores logo após o anoitecer e vão decrescendo ao longo da noite, em que geralmente próxima à meia-noite apresenta seu mínimo, chegando a desaparecer. O valor médio da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma nesta noite, com a presença simultânea de blobs de plasma, foi de 74 ± 8 m/s.

A Figura 27 (b), mostra os valores da velocidade de deriva zonal para duas distintas blobs de plasma que ocorreram durante esta noite. A denominada blob-1 foi observada a partir das 21:30 LT. Nesse momento ela estava nos limites do campo de visão na borda

esquerda inferior da imagem, como dito anteriormente. A variação temporal da velocidade de deriva zonal desta primeira blob apresenta um comportamento similar ao da bolha estudada (Figura 27 (a)) com valores ligeiramente inferiores. A média da velocidade da deriva zonal da blob-1 foi de 65 ± 4 m/s.

A segunda blob, denominada blob-2, foi observada das 00:34 LT até as 01:28 LT, apesar do curto período de análises pode se perceber que os valores da velocidade de deriva zonal oscilaram entre máximos e mínimos até por volta da 01:00 LT, após esse horário decaiu bruscamente até perder a nitidez, dificultando sua identificação. A média da velocidade de deriva zonal da blob-2 obtida foi de 53 ± 8 m/s, menor do que a da blob-1. Os valores médios das velocidades de deriva zonal da blob-1 (65 ± 4 m/s) como da blob-2 (53 ± 8 m/s) foram menores que os valores da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma (74 ± 8 m/s). Isto é semelhante ao relatado por [Pimenta et al. \(2004\)](#), com valores absolutos menores para a observação aqui exposta.

A Figura 27 (c), apresenta o gráfico com os valores da velocidade de deriva latitudinal da blob-1. O período considerado para o cálculo da deriva latitudinal foi de 22:44 LT até 23:33 LT. O intervalo no estudo deste fator apresenta uma grande dificuldade de ter imagens com a definição latitudinal perfeitamente definida da blob para poder fazer o cálculo desta velocidade de deriva. Neste período os limites das paredes da blob estão completamente visíveis e estáveis, fora deles, ou seja, antes das 22:44 LT e após às 23:33 LT a blob-1 e parte da blob-2 está fora do campo de visão das imagens ou com perda de definição do perfil de suas bordas. Assim, pela primeira vez foram obtidos valores para o cálculo de deriva latitudinal de uma blob de plasma no setor brasileiro, não se tem conhecimento desse cálculo em outras regiões.

Devido a estas dificuldades, os valores obtidos apresentam grande variação, ao longo da observação. A média da velocidade de deriva latitudinal da blob-1 foi de 85 ± 13

m/s, valor maior do que ao encontrado para a velocidade de deriva zonal da blob-1 (65 ± 4 m/s).

Este estudo foi completado com o cálculo das dimensões norte/sul e leste/oeste das duas blobs definidas na noite de 23 - 24 de fevereiro de 2007. A blob-1 teve uma extensão média de 591 km norte/sul e 328 km leste/oeste. Por sua parte a blob-2 teve uma média leste/oeste de 263 km, menor do que a blob-1. A blob-1 é a primeira a apresentar-se no campo de visão já desenvolvida e por um longo período, fazendo uma semelhança com bolhas seria uma blobs fóssil. A blob-2 estudada aparece logo após menor e muito próxima da borda superior da imagem. Como explicado, isto dificulta sua linearização e cálculo dos valores dos parâmetros em estudo. Assim, para esta blob não foi possível medir a dimensão norte/sul, devido a seu posicionamento e por suas extremidades não estarem bem definidas no campo de visão do fotômetro imageador.

8.1.2 Análise de dados de Manaus

Foram coletados dados do fotômetro imageador operando na região de MAN no período de julho de 2015 a abril de 2016, foram selecionadas 30 noites com esses fenômenos, sendo 19 delas com blobs e bolhas e 11 somente de blobs, ou seja, evento de blobs independente como citado por [Kil et. al. \(2011\)](#). Dessas 30 noites, foi possível confirmar a natureza das blobs por meio dos dados obtidos do satélite DMSP F15, mostrando o aumento significativo na densidade do plasma em apenas 6 noites.

Nas análises do cálculo de velocidade de deriva zonal das blobs e nas 2 noites quando associado com bolhas foram obtidos os valores para ambas as irregularidades. O cálculo da deriva latitudinal das blobs foi realizado para todas as 6 noites, e o mesmo para o cálculo das dimensões. Assim, as 6 noites selecionadas na região de MAN foram: 14 -

15, 15 - 16, 19 - 20 e 20 - 21 de outubro de 2015, 20 - 21 de novembro de 2015 e 04 - 05 de dezembro de 2015.

Os registros dos dados do fotômetro imageador de MAN e os dados dos satélites DMSP estão em UT (*Universal Time*), a diferença para LT (*Local Time*) é de - 4 horas, ou seja, $LT = UT - 4$. Assim, os dados para essa região estão em horário UT.

A seguir os resultados para cada uma das 6 noites analisadas em MAN.

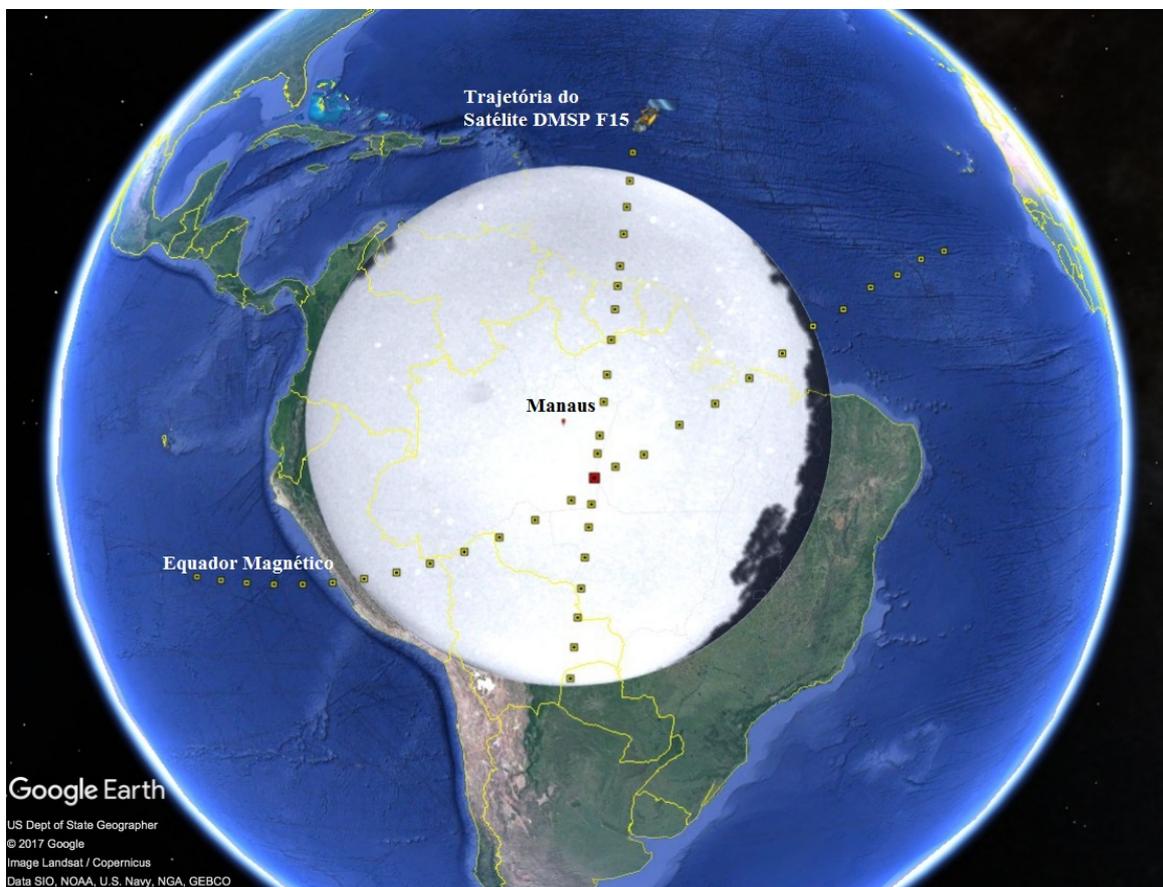
a) Noite de 14 - 15 de outubro de 2015 (blob associada com bolhas de plasma)

Nessa primeira noite selecionada, o fotômetro imageador começou a operar às 22:36 UT (18:36 LT), do dia 14 de outubro de 2015, e registrou imagens em OI 630,0 nm a cada 4 minutos, aproximadamente. O fotômetro operou registrando imagens em diferentes filtros de emissão numa sequência de 20 posições diferentes em que o filtro OI 630, 0 nm aparece em intervalos diferentes. Esta sequência é repetida ao longo de toda noite. Consequentemente os dados ou imagens registradas se apresentam com intervalos diferentes ao longo da noite.

Blobs foram perfeitamente visualizadas a partir das 23:22 UT, nesse momento não havia a presença de bolhas de plasma. Estas são vistas a partir das 01:35 UT, quando são visualizadas junto com blobs de plasma. As bolhas que apareceram nessa noite foram visíveis até as 05:16 UT, depois enfraqueceram e cessaram. As blobs foram vistas até aproximadamente 08:40 UT.

Foram usados dados do satélite DMSP F15 para confirmar o perfil da densidade eletrônica ao redor da área onde a blob de plasma foi identificada. A Figura 28 ilustra uma imagem da blob de plasma sobre a cobertura do fotômetro imageador e a trajetória do satélite DMSP F15, a imagem é referente ao mesmo horário em que o satélite registra o perfil de densidade eletrônica pelos seus instrumentos.

Figura 28 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S; 60,22°O dip. latitude 12,1°N), com indicação da linha do equador magnético e geográfico e da trajetória do satélite DMSP F15 para a noite de 14 - 15 de outubro de 2015.

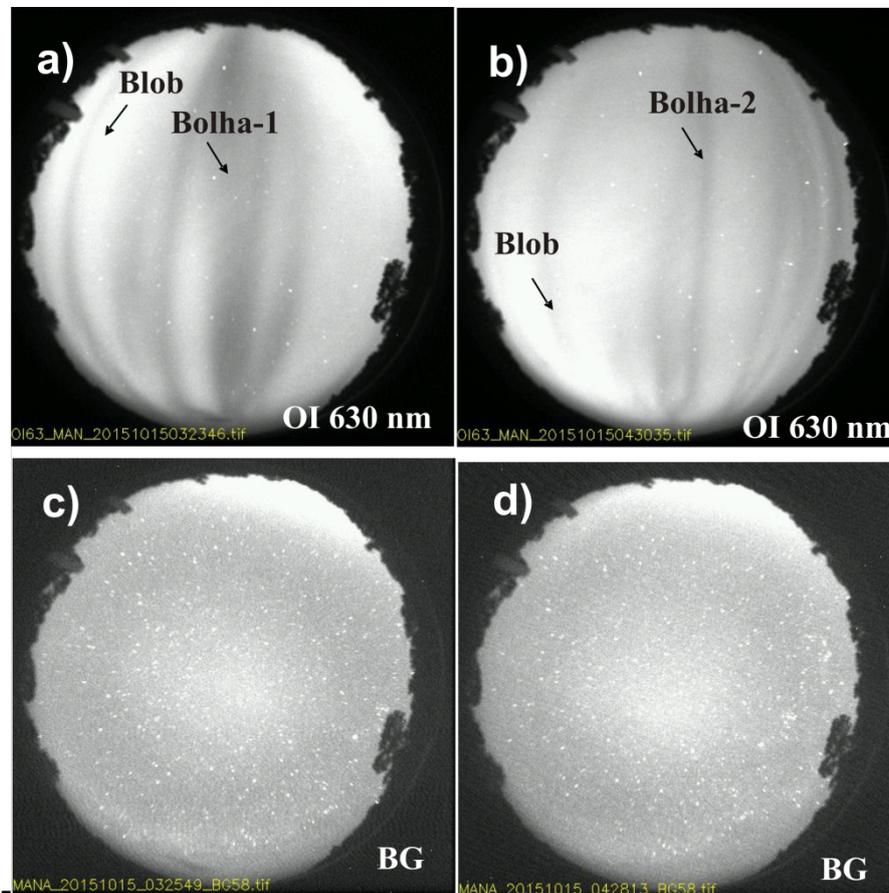


Fonte: A autora

Na Figura 28 a imagem da blob sob o mapa foi captada pelo imageador às 06:30 UT, o ponto em vermelho sobre a trajetória do satélite representa as coordenadas da posição do mesmo, nesse horário (06:30 UT equivalente a 6,5 decimal), na latitude 6,84°S e longitude 58,33°O, obtendo os valores da densidade eletrônica que são apresentados na Figura 30.

A Figura 29 (a) e 29 (b) mostram duas imagens desta noite em estudo na emissão OI 630 nm em dois horários com a presença de bolhas e blobs de plasma. A Figura 29 (c) e (d) imagens do céu noturno sem filtros de interferência, registrados nos horários mais próximos aos apresentados com o filtro OI 630,0 nm.

Figura 29 – Noite de 14 - 15 de outubro de 2015. Painel superior (a) e (b) imagens na emissão OI 630 nm às 03:23 UT e 04:30 UT, onde observa se a presença de bolhas e blobs, abaixo (c) e (d) imagens do céu noturno sem filtro, às 03:25 UT e 04:28 UT, respectivamente.



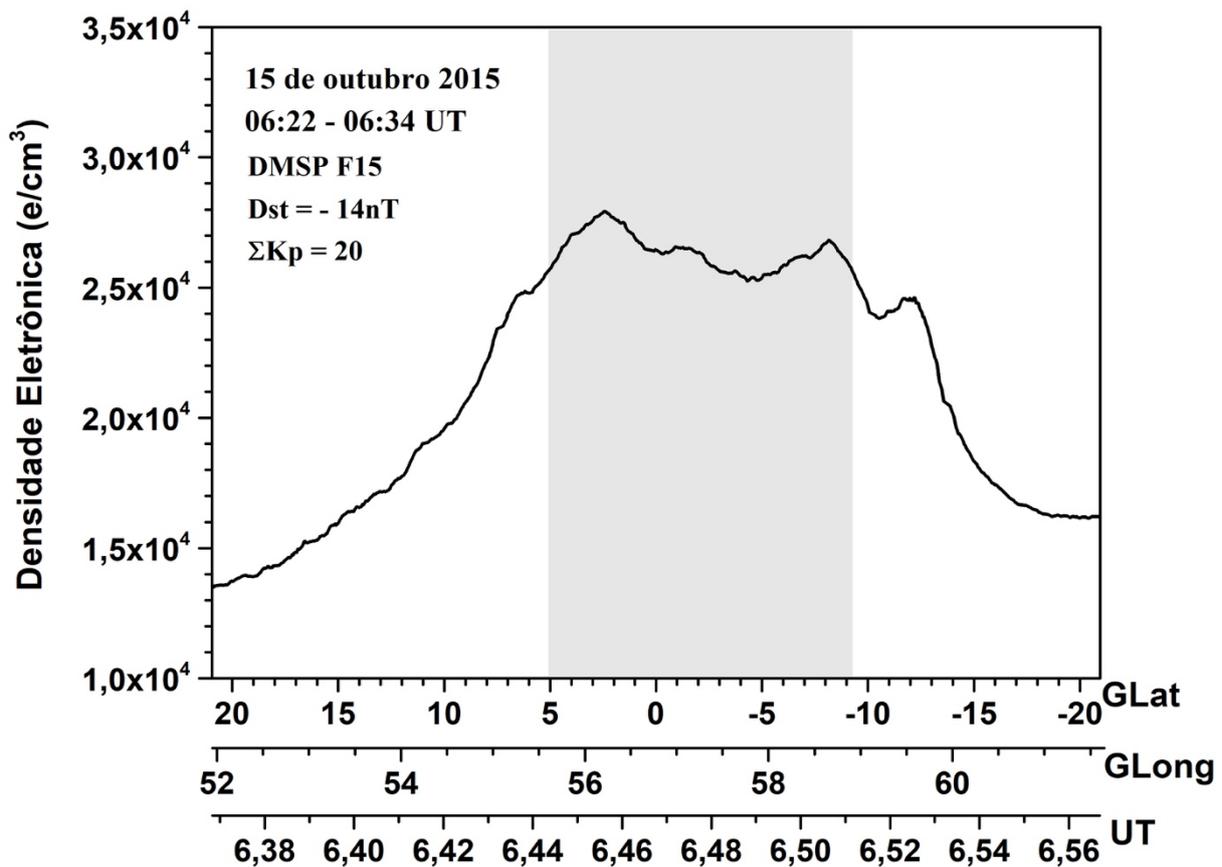
Fonte: A autora

As Figuras 29 (a) e 29 (b) mostram um exemplo das imagens na emissão OI 630,0 nm em dois horários 03:23 UT e 04:30 UT. O centro ou o zênite de cada imagem corresponde ao local de observação (MAN). O forte brilho visto nas imagens de OI 630,0 nm (indicado por uma seta em negrito) são as regiões de maior densidade do plasma ou blobs estudadas nesta noite, e o local onde a seta aponta para uma região mais escura são as assinaturas das bolhas de plasma. As Figuras 29 (c) e 29 (d) são exemplos do céu de fundo para esses horários próximos, 03:25 UT e 04:28 UT, respectivamente. Note que blobs e bolhas aparecem apenas nas imagens da emissão OI 630 nm, que ocorre na região-F pelo

processo de recombinação dissociativa e não aparecem nas imagens sem filtro quando só capta a luminosidade astronômica.

A Figura 30 mostra a blob de plasma através do perfil de dados de densidade eletrônica obtidos do satélite DMSP F15, entre 06:22 UT até 06:34 UT. Percebe-se que a densidade do plasma aumenta por um fator de dois ou mais quando comparado ao plasma de fundo, no horário das 06:30 UT ou 6,5 decimal em que os dados do imageador mostra um brilho intenso na região.

Figura 30 – Gráfico da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 14 - 15 de outubro de 2015 no período de 06:22 UT até 06:34 UT, quando a sua passagem pela setor brasileiro. A banda em cinza corresponde ao aumento no perfil da densidade eletrônica (blobs de plasma) medidas pelo satélite.



Fonte: A autora

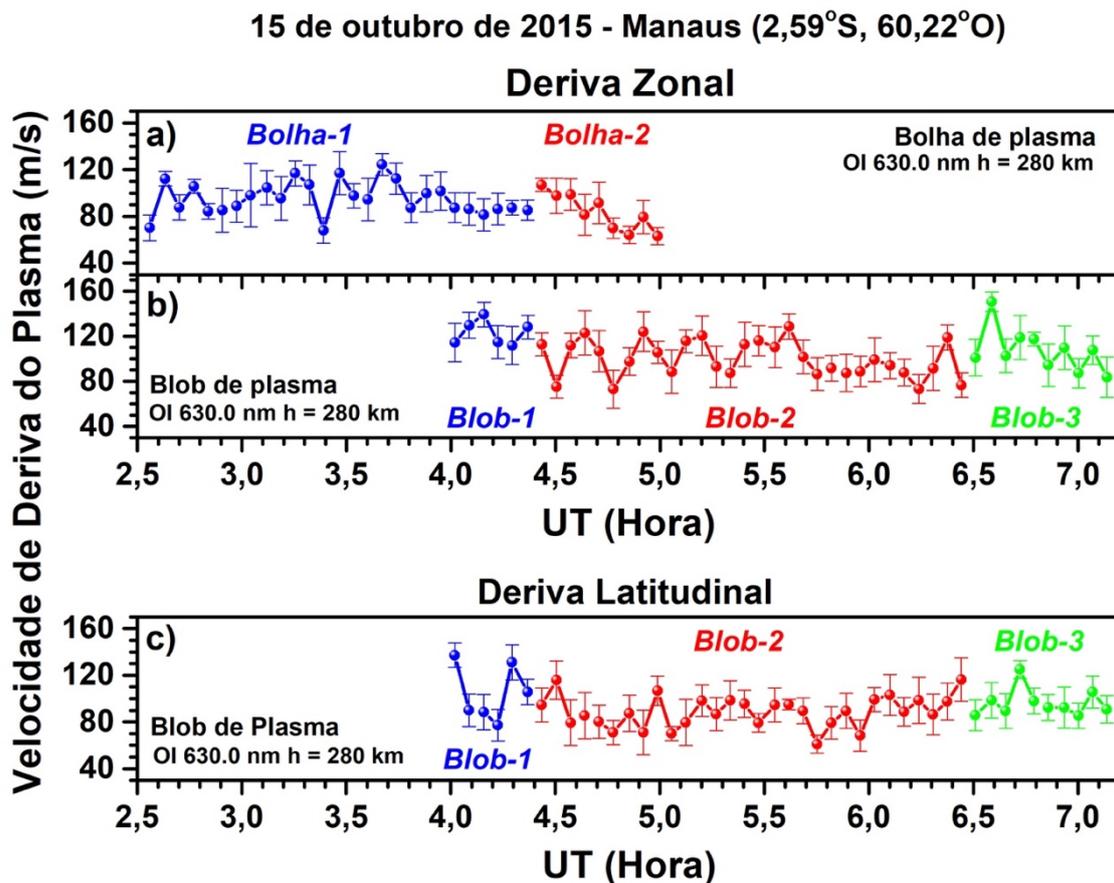
Os dados no gráfico da Figura 30 mostram claramente o súbito aumento na densidade do plasma entre 06:26 UT até 06:31 UT ou 6,44 até 6,52 em decimal aproximadamente, quando nesse momento tem blob de plasma sobre a região ou próximo a ela.

As análises de velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma começaram a partir das 02:33 UT, para esta noite, com estruturas bem visíveis. O estudo foi realizado em 02 bolhas de plasma. A primeira bolha iniciou-se as 02:33 UT e às 04:22 UT e ela já não é mais identificada, permitindo a análise de uma segunda bolha que no seu movimento oeste para leste já se encontrava nesse horário no centro da imagem. A análise dessa segunda bolha foi feita até as 05:07 UT quando novamente o gradiente da intensidade da emissão diminui e a bolha deixa de ser reconhecida. As imagens foram linearizadas com o parâmetro da altitude no valor de 280 km e considerando uma área de 1024 km x 1024 km. A Figura 31 (a) mostra o comportamento da velocidade de deriva zonal das duas bolhas nesta noite analisadas.

Na mesma noite, houve também a presença de blobs associadas a essas bolhas de plasma, e da mesma forma, foi feito o cálculo da velocidade de deriva zonal. O início das análises das velocidades das blobs foi às 04:01 UT, o motivo é devido ao horário em que o satélite passa sobre a região (06:30 UT), optou-se por um começo mais próximo ao horário do satélite, que confirmou suas características. Às 04:22 UT, uma segunda blobs começa a ser analisada e as análises permanecem até ela dissipar-se 4 minutos antes da terceira blobs ser analisada. Às 06:30 UT, uma terceira blobs começa a ser analisada e às 07:12 UT nuvens entram no campo de visão do imageador, impedindo qualquer tipo de análises a partir desse momento. A Figura 31 (b) mostra os valores resultantes da velocidade de deriva zonal das blobs de plasma que ocorreram nessa noite de 14 - 15 de outubro de 2015.

Finalmente, para esta noite foi realizado o cálculo de deriva latitudinal dessas 3 blobs, nos mesmos intervalos de período de tempo em que foi determinada a deriva zonal.

Figura 31 – Velocidades de deriva do plasma inferidas a partir da emissão de OI 630,0 nm, observadas pelo imageador de MAN usando imagens linearizadas em 280 km de altitude na noite de 14 - 15 de outubro de 2015. Painéis (a) e (b) Gráficos das velocidades de deriva zonal das bolhas e das blobs de plasma, respectivamente, e (c) valores da velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma.



Fonte: A autora

A Figura 31 (a) mostra o comportamento da velocidade de deriva zonal das duas bolhas de plasma analisadas nesta noite, a bolha-1 está identificada pela cor azul, a bolha-2 pela cor vermelha. Nota-se um comportamento típico de velocidade de deriva zonal, tanto da bolha-1 como da bolha-2, mesmo com a presença de blobs de plasma não se notou nenhum comportamento fora dos padrões esperado, ou seja, os valores da velocidade são máximos no início da noite, logo após o pôr do Sol e decaem no decorrer da noite, até a

meia noite onde temos seus valores mínimos. As bolhas tiveram velocidades coerentes com os resultados já apresentados na Literatura (Pimenta et. al. 2003; Abalde et. al. 2004; Arruda et. al. 2006; Paulino et. al. 2011; Sobral et. al. 2011) onde os diferentes autores confirmam o comportamento descrito acima. Os valores calculados da velocidade de deriva zonal médios das bolhas de plasma estudadas nesta noite foram de: bolha-1 95 ± 13 m/s e bolha-2 83 ± 11 m/s.

A Figura 31 (b) refere-se ao resultado do cálculo da deriva zonal das blobs de plasma da mesma noite. Foram três blobs detectadas e analisadas nesta noite, as blobs estão sinalizadas por cores, a blob-1 em azul, a blob-2 em vermelho e a blob-3 em verde. A blob-1 ocorreu simultaneamente com o final da bolha-1, é possível ver que no momento em que o valor da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma decai, os valores da velocidade zonal da blob-1 aumenta, o mesmo ocorre com o comportamento da blob-2, se comparada ao comportamento da bolha-2. E a blob-3 segue o mesmo comportamento das duas blobs analisadas nesta noite, com valores de velocidade de deriva zonal variando entre máximos e mínimos em todo o período estudado. Nessa noite os valores da velocidade de deriva zonal das blobs foram maiores que os das bolhas. Os valores médios da velocidade de deriva zonal das três blobs analisadas foram de 123 ± 13 m/s, 99 ± 14 m/s e 107 ± 14 m/s, respectivamente.

A Figura 31 (c) apresenta o resultado da análise da velocidade de deriva latitudinal das três blobs observada nesta noite. Analisando o gráfico da blob-1, observa-se que a deriva latitudinal teve oscilações durante todo período estudado, indo de máximos a mínimos. A blob-2 e blob-3 tiveram valores médios menores quando comparada a blob-1. A velocidade média das três blobs analisadas nesta noite foi de 104 ± 13 m/s, 88 ± 14 m/s e 96 ± 12 m/s, respectivamente. Estes cálculos de deriva latitudinal de blobs de plasma na

região de MAN, região próxima ao equador magnético, estão sendo apresentados pela primeira vez. Pelo que pôde-se perceber, a deriva latitudinal das blobs encontradas em MAN teve um comportamento similar ao apresentado por [Tardelli-Coelho et. al. \(2017\)](#), em uma região de baixa latitude do setor brasileiro (SJC), onde ela também oscila entre máximos e mínimos durante todo o período estudado e apresentou valores médios de velocidade próximos ao de MAN, 85 ± 13 m/s.

Assim como na região de SJC, para os casos de blobs que ocorreram em MAN, também foi realizada uma análise das dimensões norte/sul e leste/oeste. Para a noite de 14 - 15 de outubro de 2015, foram feitas as medidas das três blobs encontradas. A blob-1 teve uma média norte/sul de 220 km e leste/oeste de 155 km. A blob-2 teve uma média norte/sul de 422 km e leste/oeste de 496 km, e a blob 3 teve uma média norte/sul e leste/oeste de 586 km e 592 km, respectivamente. Pode-se perceber que a blob-3, a última a aparecer nesta noite, foi maior tanto nos valores leste/oeste como em norte/sul quando comparada com as duas outras blobs que ocorreram nesta noite, mesmo com o pouco tempo de análises, percebe-se que se tratou de um grande evento. Podemos supor que similarmente as bolhas, esta última blob seria "fóssil", ou seja, gerada fora do campo de observação do fotômetro em um horário anterior e apresentando-se completamente desenvolvida na região de observação.

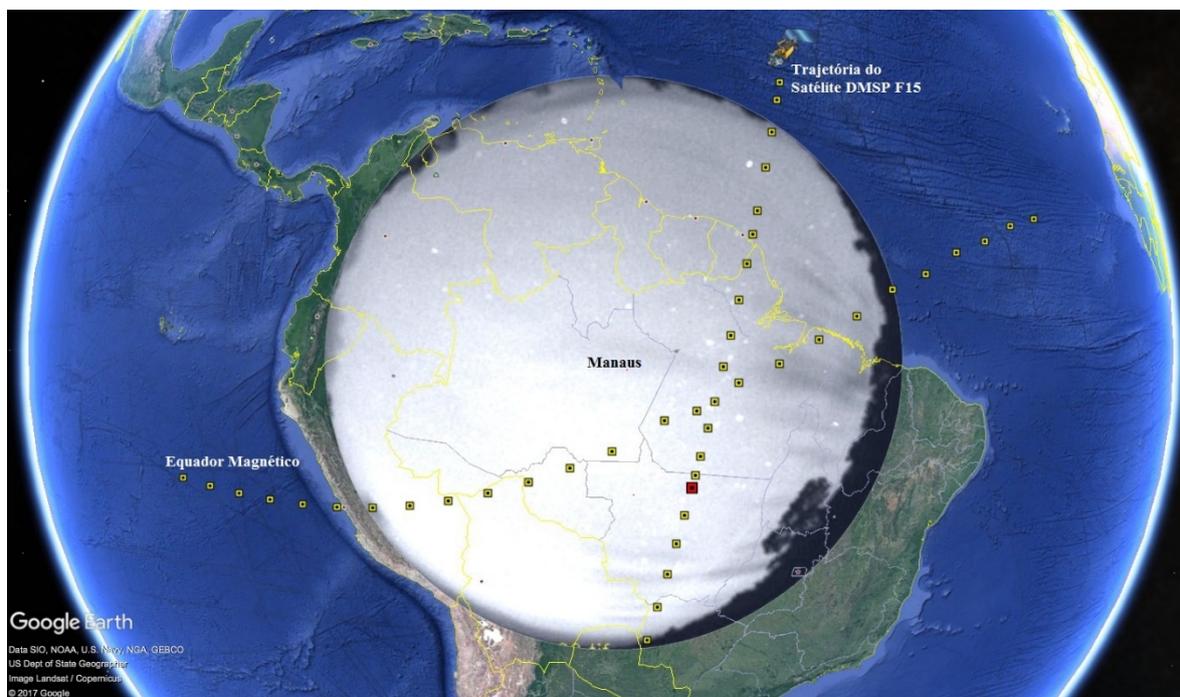
b) Noite de 15 - 16 de outubro de 2015 (blobs associada com bolhas de plasma)

Nessa noite, o imageador começou a operar as 22:36 UT, e registrou imagens de OI 630,0 nm a cada 4 minutos aproximadamente. Blobs foram visualizadas a partir das 00:41 UT, quando não havia a presença de bolhas de plasma. As bolhas são vistas a partir das 01:23 UT, junto com blobs de plasma. As bolhas que apareceram nesse dia foram

visíveis até aproximadamente 05:12 UT. As blobs foram vistas até aproximadamente 08:48 UT.

Dados do satélite DMSP F15 foram utilizados para verificar os valores da densidade eletrônica ao redor da área onde a blob de plasma foi identificada. A Figura 32 mostra a imagem da blob de plasma sob a cobertura do fotômetro imageador e a trajetória do satélite no mesmo horário dessa imagem.

Figura 32 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O dip. latitude 12,1°N), com a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite do dia 15 - 16 de outubro de 2015.

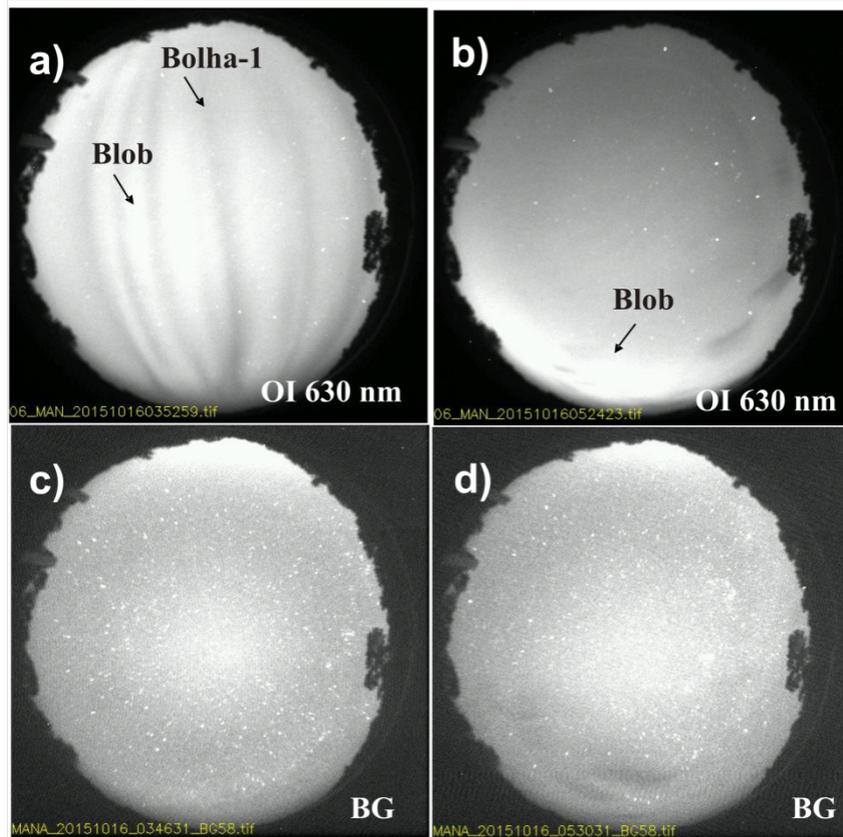


Fonte: A autora

Na Figura 32, a blob sob o mapa é referente à imagem observada pelo imageador às 06:14 UT, o ponto em vermelho sobre a trajetória do satélite é a latitude 10,31°S e longitude 55,11°O, no horário das 06:14 UT ou 6,24 em decimal, momento em que o satélite passa sobre a região e mede o valor da densidade eletrônica. As Figuras 33 (a) e 33 (b) mostram duas imagens do filtro de interferência OI 630,0 nm em dois diferentes horários

desta noite com a presença de bolhas e blobs de plasma. As Figuras 33 (c) e 33 (d) mostram em horários próximos o céu registrado sem o filtro de interferência usado.

Figura 33 – Imagens da noite de 15 - 16 de outubro de 2015 na emissão OI 630,0 nm e imagens sem filtro de interferência, apenas a imagem do céu noturno (a) nesta imagem há a presença de bolhas e blobs, ambas estão referenciadas por uma seta no horário das 03:52 UT, (b) esta imagem mostra a blob independente, às 05:24 UT e (c) e (d) são imagens do céu noturno às 03:46 UT e 05:30 UT, respectivamente.



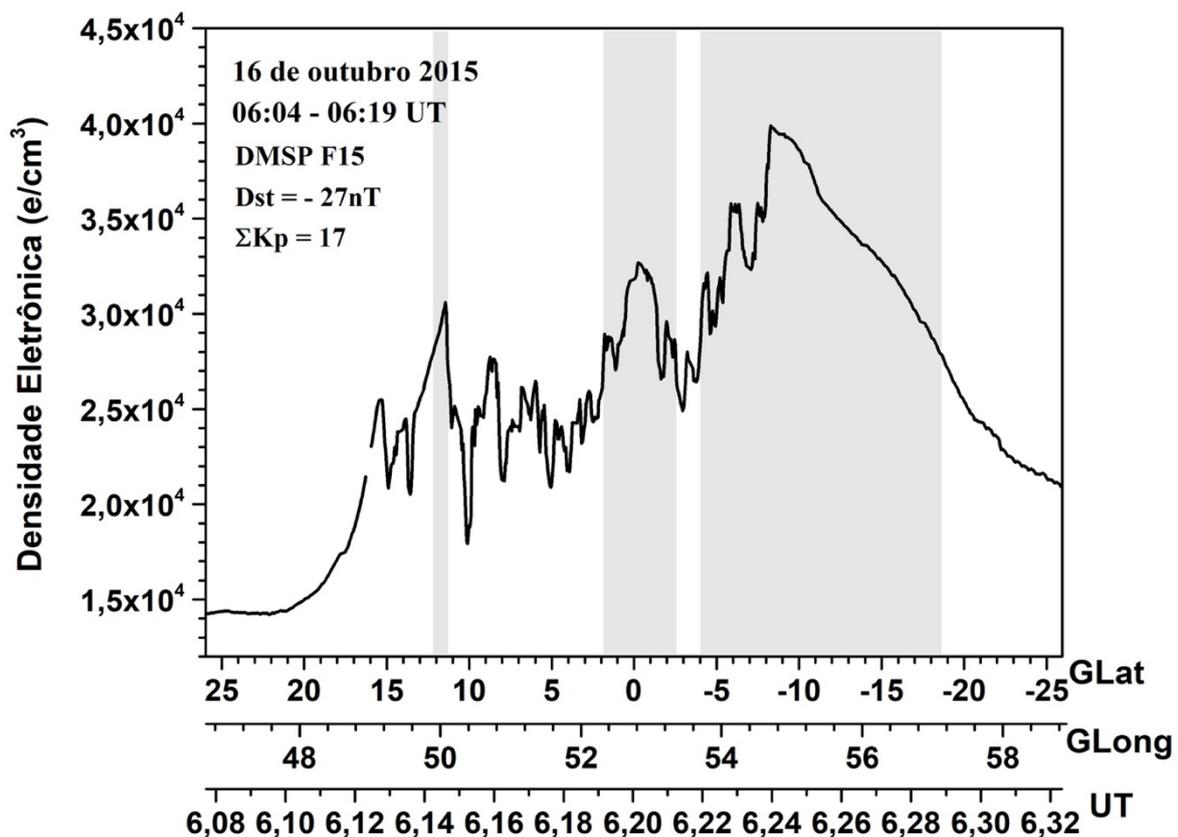
Fonte: A autora

As Figuras 33 (a) e 33 (b) apresentam duas imagens na emissão OI 630,0 nm em dois momentos diferentes durante o decorrer da noite. O forte brilho visto nas imagens de OI 630,0 nm (indicado por uma seta em negrito) são as regiões de maior densidade do plasma (blobs) referente a uma das blobs observadas nesta noite. Na Figura 33 (a) há também bolhas de plasma, indicadas por uma seta no ponto mais escuro da imagem, caracterizando a assinatura das bolhas de plasma. Além disso, as Figuras 33 (c) e 33 (d) são

imagens do céu noturno sem filtro. Nota-se que a blob aparece apenas na emissão OI 630,0 nm, o clarão visto em BG trata-se do brilho noturno emitido pelo centro de nossa galáxia.

A Figura 34 é a representação gráfica do perfil da densidade eletrônica obtidos através dos dados do satélite DMSP F15, entre 06:04 UT até 06:19 UT. Percebe-se, claramente, o aumento da densidade do plasma por um fator de dois ou mais quando comparado ao plasma de fundo, no exato momento em que a imagem observada pelo imageador mostra um forte brilho às 06:14 UT ou 6,25 em decimal.

Figura 34 – Gráfico da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 15 - 16 de outubro de 2015. As bandas em cinza correspondem ao aumento na densidade eletrônica do plasma, em diferentes pontos, medidas através de dados do satélite DMSP F15.



Fonte: A autora

As 3 bandas em cinza apresentadas na imagem do gráfico indicam que houve blobs de plasma não somente no ponto em que o imageador capturou a imagem que foi às 06:14 UT ou 6,24 em decimal, mas em vários outros pontos como em 6,14; 6,19; 6,20; 6,22 até

6,28 em decimal. Porém, não há imagens nesses locais, mas o perfil mostra que houve um aumento na densidade eletrônica do plasma, então nesses pontos indicados também há blobs.

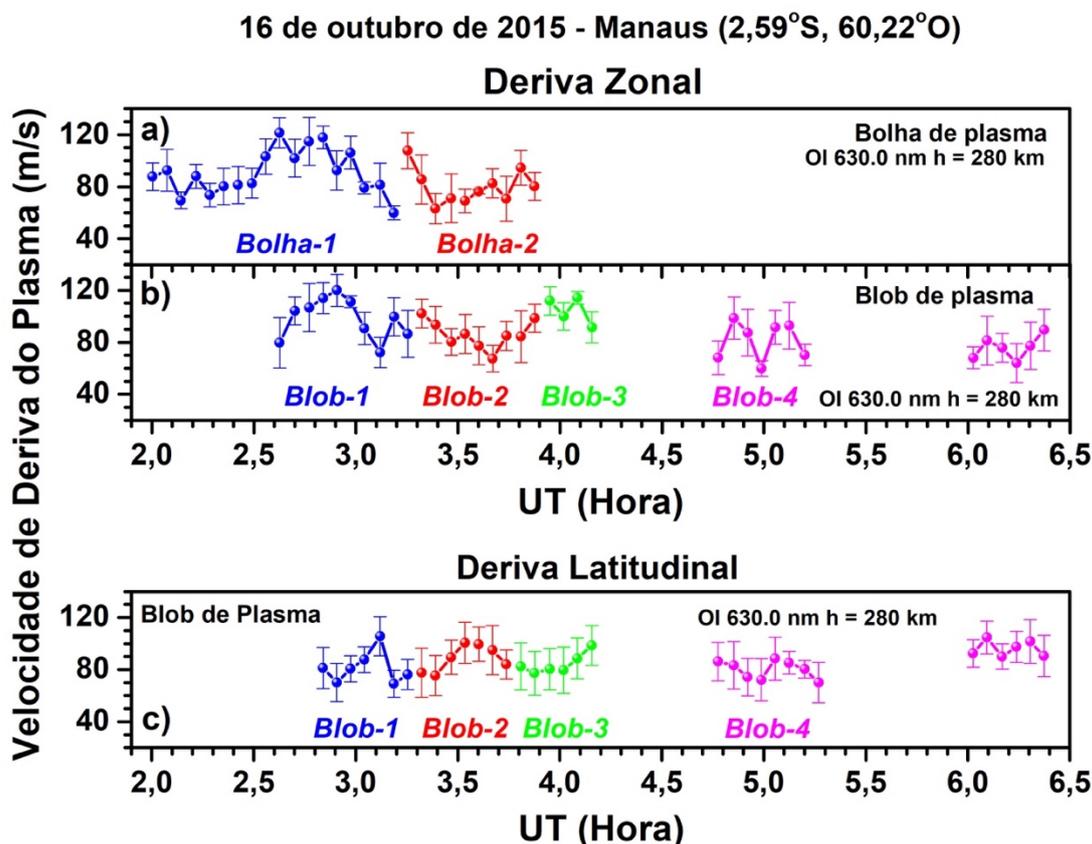
Assim como o perfil da densidade eletrônica de plasma da noite anterior, visto na Figura 30, o aumento desta densidade poderia estar associado as cristas da anomalia equatorial, mas nestes casos eles apresentam gradientes ou aumentos nos valores acima dos valores médios que caracterizam esta anomalia.

As análises de velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma começaram a partir das 02:00 UT, com suas estruturas visíveis. Nesta noite, as análises foram realizadas em 2 bolhas de plasma utilizando o filtro de interferência OI 630 nm e uma altitude de 280 km com uma área de linearização de 1024 km x 1024 km. A bolha-1 ficou visível até aproximadamente às 03:11 UT, após esse horário não foi possível fazer o cálculo de deriva zonal através do processo de linearização, pois já se encontrava no canto da imagem, dificultando as análises. Desta forma, às 03:15 UT iniciou-se a análise da bolha-2, que estava localizada ao centro da imagem, esta análise foi até as 03:57 UT. Apesar de ainda haver bolhas em horários posteriores, elas se encontravam com a intensidade de emissão muito reduzida, facilitando a indução de erro. A Figura 35 (a) mostra o comportamento da velocidade de deriva zonal das duas bolhas analisadas nesta noite.

Nesta noite, 04 blobs foram analisadas, 02 delas estavam associadas a bolhas de plasma. O início das análises foi às 02:37 UT, a blob-1 cessou por volta das 03:15 UT. Às 03:19 UT, a segunda blob começou a ser monitorada, permaneceu até aproximadamente 03:53 UT. A análise da blob-3 iniciou-se às 03:57 UT e foi até às 04:16 UT, depois desse horário, nuvens entraram no campo de visão do imageador, o que impediu continuar as análises. Finalmente, a blob-4 começou a ser registrada às 04:46 UT. Às 05:12 UT, algumas

nuvens começaram a entrar no campo de visão do imageador, optou-se por parar as análises e voltar quando já não havia mais nuvens. Então, às 06:01 UT a blob-4 voltou a ser registrada, sabe-se que é a mesma blob porque as nuvens não cobriram totalmente a blob e desta forma, foi possível acompanhá-la até às 06:22 UT. A Figura 35 (b) é o gráfico com os valores resultantes do cálculo da velocidade de deriva zonal dessas 4 blobs de plasma que foram vistas na noite de 15 - 16 de outubro de 2015.

Figura 35 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630,0 nm, observadas por imageador, em 280 km de altitude na noite de 15 - 16 de outubro de 2015. Painéis (a) velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma, (b) velocidade de deriva zonal das blobs de plasma e (c) velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma.



Fonte: A autora

As análises da velocidade de deriva latitudinal das blobs de plasma da noite de 15 - 16 de outubro de 2015 começou a ser inferidas um pouco mais tarde do que as análises da velocidade de deriva zonal, estas às 02:37 UT e a deriva latitudinal às 02:50 UT quando

a blob-1 se encontrava próxima ao centro da imagem e permitia uma definição precisa de suas bordas superior e inferior, ou seja, sua extensão norte/sul.

Da mesma forma que a deriva zonal, foi possível acompanhar a evolução das quatro blobs desta noite, e calcular a deriva latitudinal de cada uma delas. A Figura 35 (c) é o gráfico desses valores e mostra o comportamento das velocidades de deriva latitudinais de cada blob da noite de 15 - 16 de outubro de 2015.

A Figura 35 (a) mostra o comportamento da velocidade de deriva zonal das 2 bolhas de plasma analisada nesta noite, a bolha-1 está identificada pela cor azul, a bolha-2 pela cor vermelha. Os resultados da velocidade de deriva zonal da bolha-1 mostrou um comportamento similar a noite anteriormente relatada, com valores entre máximos e mínimos durante todo o período estudado, porém, após as 22:30 LT (02:30 UT) a velocidade de deriva começa a diminuir até seu registro final, por volta das 23:20 LT (03:20 UT). A bolha-2 seguiu o mesmo comportamento até sua extinção por volta da meia-noite local. A média da velocidade de deriva zonal da bolha-1 foi de 90 ± 11 m/s e da bolha-2 foi de 80 ± 12 m/s.

A Figura 35 (b) refere-se ao resultado do cálculo de deriva zonal das blobs de plasma da noite de 15 - 16 de outubro de 2015. Foram 4 blobs analisada nesta noite, as blobs estão sinalizadas por cores, a blob-1 em azul, a blob-2 em vermelho e a blob-3 em verde e blob-4 em rosa. A blob-1 e a blob-2 estavam associadas à bolha de plasma, analisando o gráfico percebe-se que ambas as derivas zonais (bolhas e de blobs) tiveram um comportamento semelhante, na maior parte do tempo. A blob-3 teve um período curto de análises, mas sua velocidade foi maior do que a blob-1 e blob-2, e um comportamento similar ao já visto na análise da noite anterior. A blob-4 teve velocidades que variaram de máximo a mínima até o fim das análises. Os valores médios encontrados foram de 98 ± 13 m/s, 86 ± 12 m/s, 104 ± 9 m/s e 78 ± 13 m/s, respectivamente.

A Figura 36 (c) apresenta o resultado da análise da velocidade de deriva latitudinal das 4 blobs observada nesta noite. As 4 blobs estudadas tiveram comportamentos similares. A blob-1 teve um comportamento similar à velocidade de deriva zonal, a blob-2 mostrou se o inverso na maior parte do tempo, ou seja, quando a deriva zonal era máxima, a latitudinal era mínima, e as blobs-3 e 4 também tiveram um comportamento similar ao da blob-2. Os valores médios encontrados para as quatro blobs de plasma analisada foram de blob-1 81 ± 12 m/s, blob-2 88 ± 15 m/s, blob-3 84 ± 16 m/s e blob-4 86 ± 13 m/s, valores semelhantes ao apresentados anteriormente.

A média das dimensões norte/sul e leste/oeste da blob-1 foram de 353 km e 300 km, respectivamente. A blob-2 obteve uma média norte/sul de 432 km e leste/oeste de 342 km, a blob-3 foi de norte/sul 482 km e leste/oeste 491 km, a blob-4 teve dimensões norte/sul e leste/oeste de 465 km e 511 km, respectivamente.

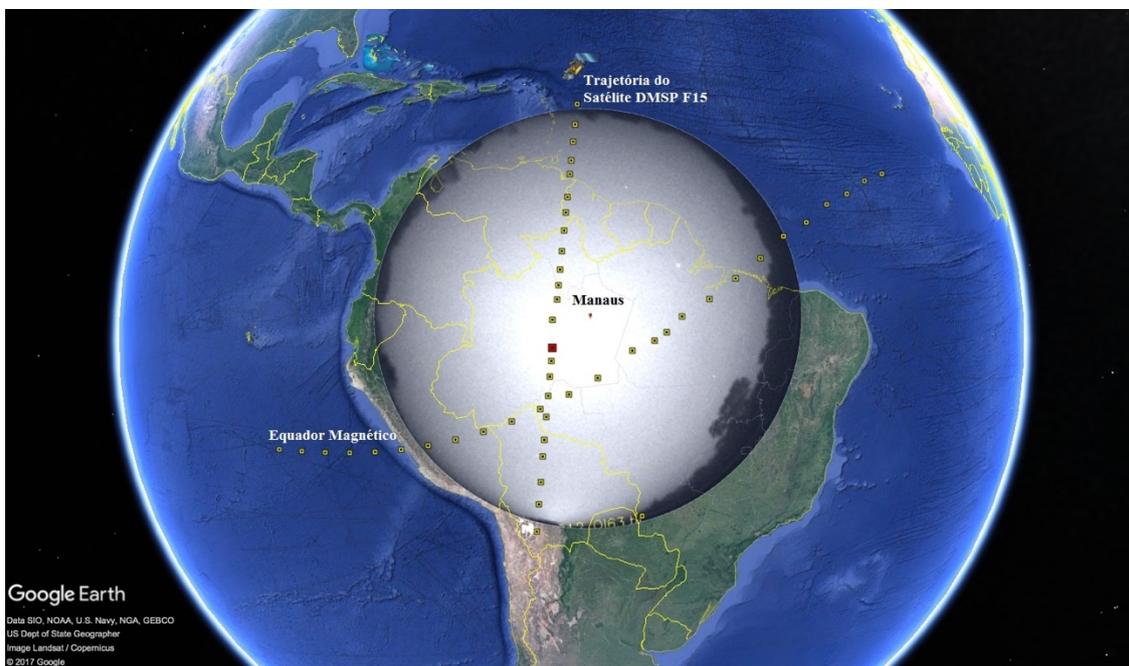
c) Noite de 19 - 20 de outubro de 2015 (blobs independente)

Nessa noite o imageador começou a operar às 02:15 UT, e capturou imagens da emissão OI 630,0 nm a cada 4 minutos, aproximadamente. As blobs foram visualizadas a partir das 02:44 UT, nesta noite não houve ocorrências de bolhas de plasma associadas.

Dados do satélite DMSP F15 mostrou o comportamento da densidade eletrônica ao redor da área onde a blob de plasma foi identificada. A Figura 36 mostra a imagem da blob de plasma sob a cobertura do fotômetro imageador e a trajetória do satélite no momento em que coincide com a imagem obtida pelo fotômetro.

Na Figura 36, a blob que está sob o mapa é a imagem das 06:50 UT captada pelo imageador, o ponto em vermelho sobre a trajetória do satélite é a latitude $5,24^\circ\text{S}$, longitude $63,34^\circ\text{O}$ e horário 06:50 UT ou 6,84 decimal, momento em que o satélite mede a densidade eletrônica. Nesta noite não há imagens sem o filtro de interferência.

Figura 36 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O dip. latitude 12,1°N), a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite de 19 - 20 de outubro de 2015.



Fonte: A autora

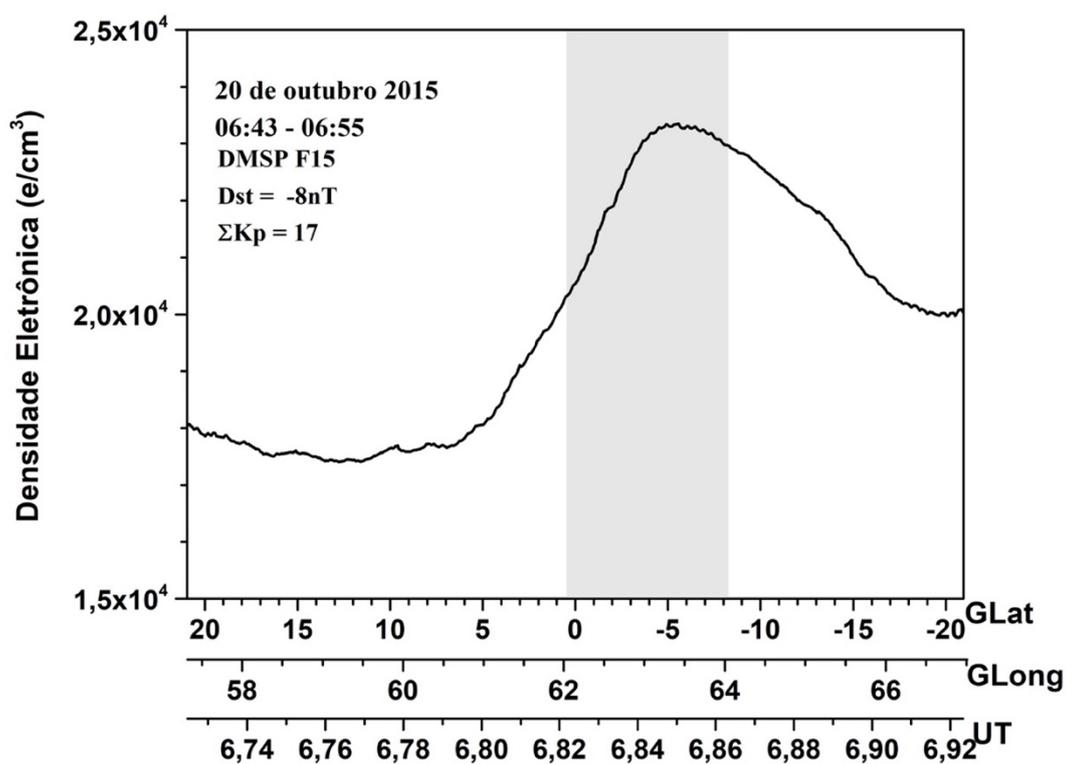
A Figura 37 é a representação gráfica do perfil da densidade eletrônica medida através dos dados do satélite DMSP F15, entre 06:43 UT até 06:55 UT, percebe-se que há um aumento na densidade do plasma por um fator de dois ou mais, no mesmo horário da imagem capturada pelo imageador, Figura 36, que mostra um forte brilho, que foi às 06:50 UT ou 6,84 em decimal.

Neste perfil observa-se claramente um aumento ou gradiente pronunciado da densidade eletrônica sem mostrar a simetria da anomalia ionosférica equatorial, ou seja, claramente o perfil de uma blob de plasma.

Na noite de 19 - 20 de outubro de 2015, foi analisada a velocidade de deriva zonal e latitudinal numa única blob, durante todo o período estudado, que foi de 05:02 UT às 08:50 UT. A Figura 38 (a) mostra o comportamento da velocidade de deriva zonal da única

blob de plasma analisada nesta noite. A Figura 38 (b) mostra o comportamento da velocidade de deriva latitudinal dela.

Figura 37 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 19 - 20 de outubro de 2015. A área em cinza corresponde ao aumento na densidade (blob de plasma) medidas pelo satélite.



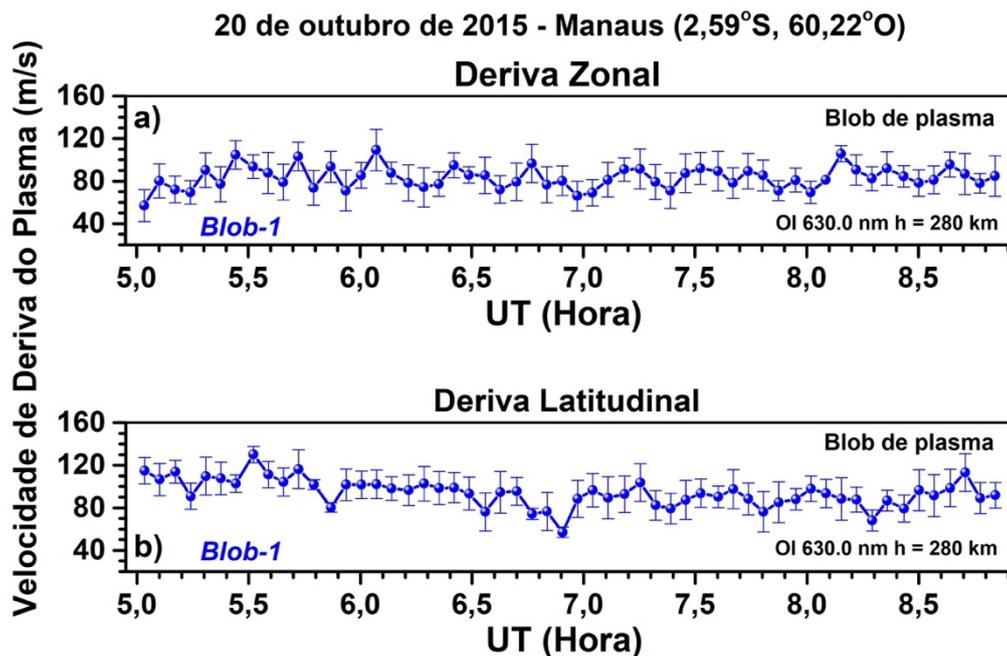
Fonte: A autora

A Figura 38 (a) apresenta o resultado do cálculo de deriva zonal da blob de plasma da noite de 19 - 20 de outubro de 2015. A blob analisada mostra um comportamento similar com resultados anteriores, ou seja, os valores oscilam entre máximos e mínimos ao longo de toda noite, até o fim das análises. A média de velocidade de deriva zonal encontrada foi de 83 ± 14 m/s.

A Figura 38 (b) apresenta o resultado da análise da velocidade de deriva latitudinal da blob observada nesta noite. Da mesma forma que a deriva zonal, a velocidade de deriva latitudinal mostrou um comportamento similar às velocidades de deriva latitudinal das noites anteriores, com um ligeiro aumento no valor da velocidade quando comparada a velocidade

zonal, e velocidades entre máximo e mínimo durante toda a noite. A média da velocidade de deriva latitudinal para a blob de plasma analisada foi de 94 ± 14 m/s.

Figura 38 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, observadas por imageador, usando imagens linearizadas numa altitude de 280 km na noite de 19 - 20 de outubro de 2015. (a) Velocidade de deriva zonal da blob de plasma e (b) velocidade de deriva latitudinal da blob de plasma.



Fonte: A autora

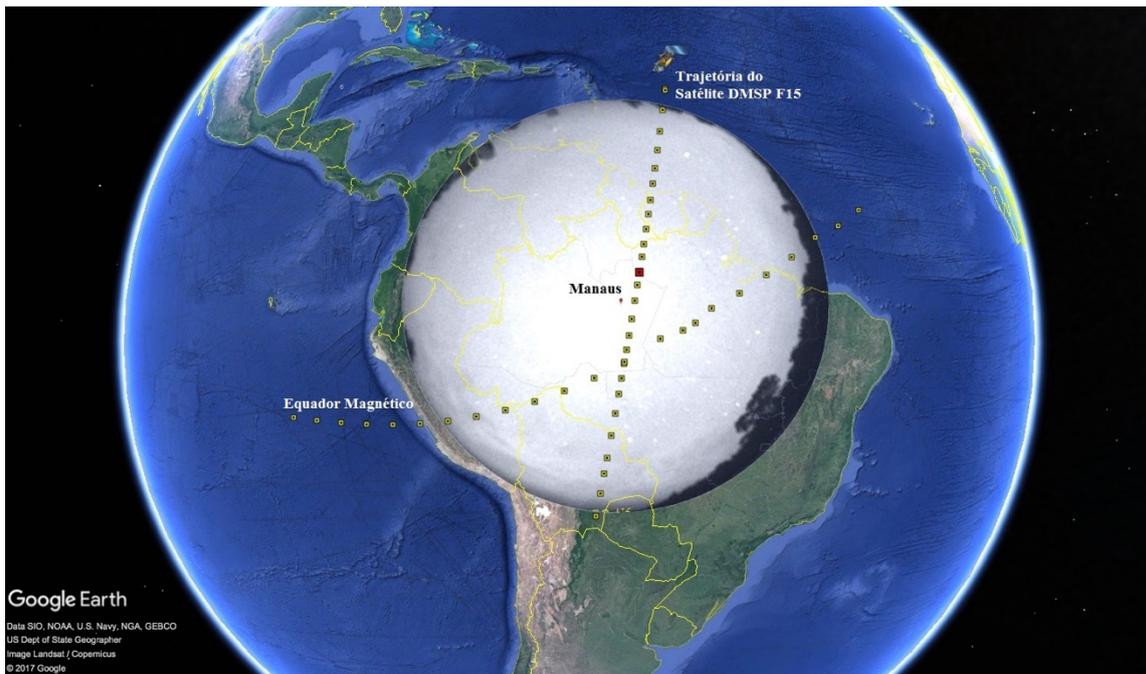
Esta blob teve uma dimensão média norte/sul e leste/oeste de 209 km e 222 km, respectivamente.

d) Noite de 20 - 21 de outubro de 2015 (blobs independente)

Nessa noite, o imageador começou a operar às 03:08 UT, e registrou imagens de OI 630,0 nm a cada 4 minutos aproximadamente. A blob foi visualizada a partir das 03:29 UT. Nessa noite não houve ocorrências de bolhas de plasma associadas.

Dados do satélite DMSP F15 mostram o perfil da densidade eletrônica próxima à área onde a blob de plasma foi identificada. A Figura 39 mostra a imagem da blob de plasma sob a cobertura do fotômetro imageador e a trajetória do satélite.

Figura 39 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O; dip. latitude 12,1°N), com a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite do dia 20 - 21 de outubro de 2015.



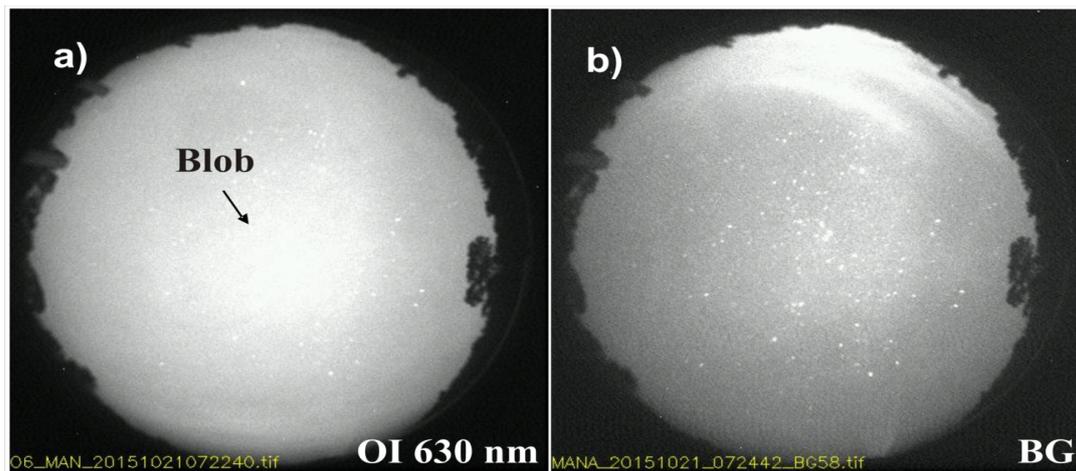
Fonte: A autora

Na Figura 39, a blob sob o mapa é referente à imagem observada pelo imageador às 06:32 UT, o ponto em vermelho sobre a trajetória do satélite é exatamente a latitude de 0,75°S, longitude 58,32°O e horário das 06:33 UT ou 6,56 em decimal, este é o ponto onde o satélite está medindo a densidade eletrônica sobre a região. A Figura 40 (a) mostra uma imagem do filtro de interferência OI 630 nm em um horário onde há a presença de blob de plasma na noite de 20-21 de outubro de 2015. A Figura 40 (b) mostra o horário coincidente sem filtro de interferência.

A Figura 40 (a) mostra uma imagem obtida da emissão OI 630,0 nm, pelo fotômetro imageador. O forte brilho visto na imagem de OI 630,0 nm (indicado por uma seta) é a

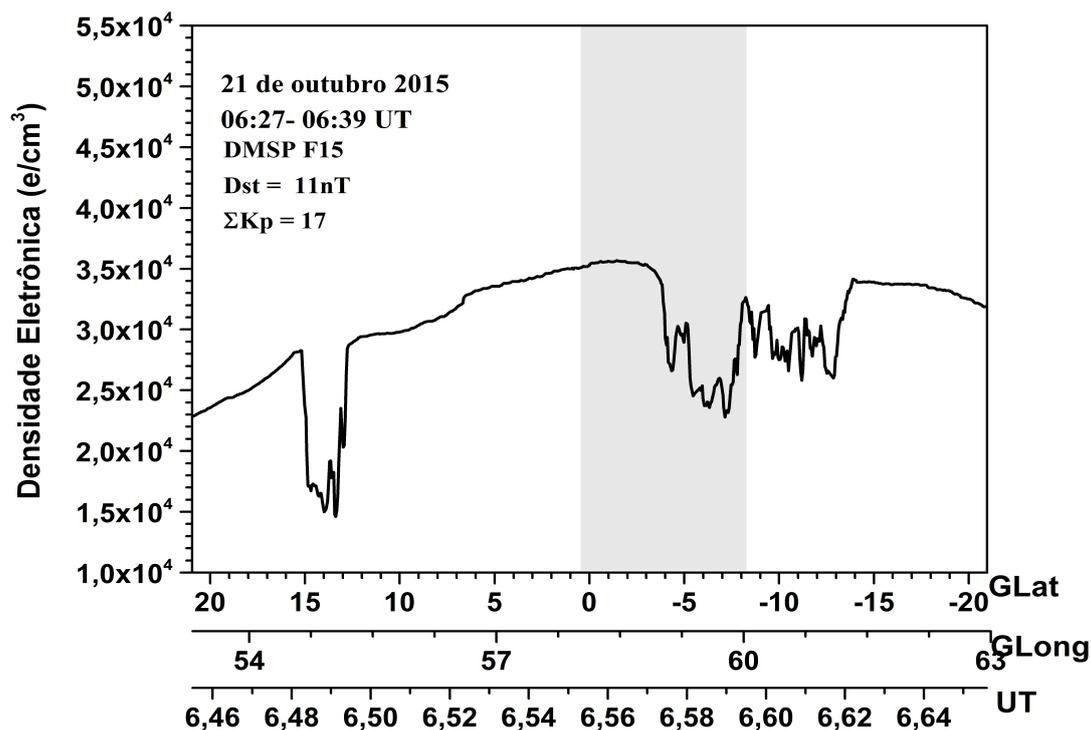
região de maior densidade do plasma (blob). A Figura 40 (b) ilustra o céu noturno. Nota-se que a blob aparece apenas na emissão OI 630,0 nm, por se tratar de uma emissão, é apenas visualizada através do filtro de interferência.

Figura 40 – Imagens de fotômetro imageador (a) com o filtro de interferência na emissão OI 630 nm com a presença de uma blob de plasma às 07:22 UT, e (b) sem o filtro de interferência às 07:24 UT.



Fonte: A autora

Figura 41 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 20 - 21 de outubro de 2015. A banda em cinza corresponde ao aumento na densidade do plasma (blobs de plasma) medidas pelo satélite.



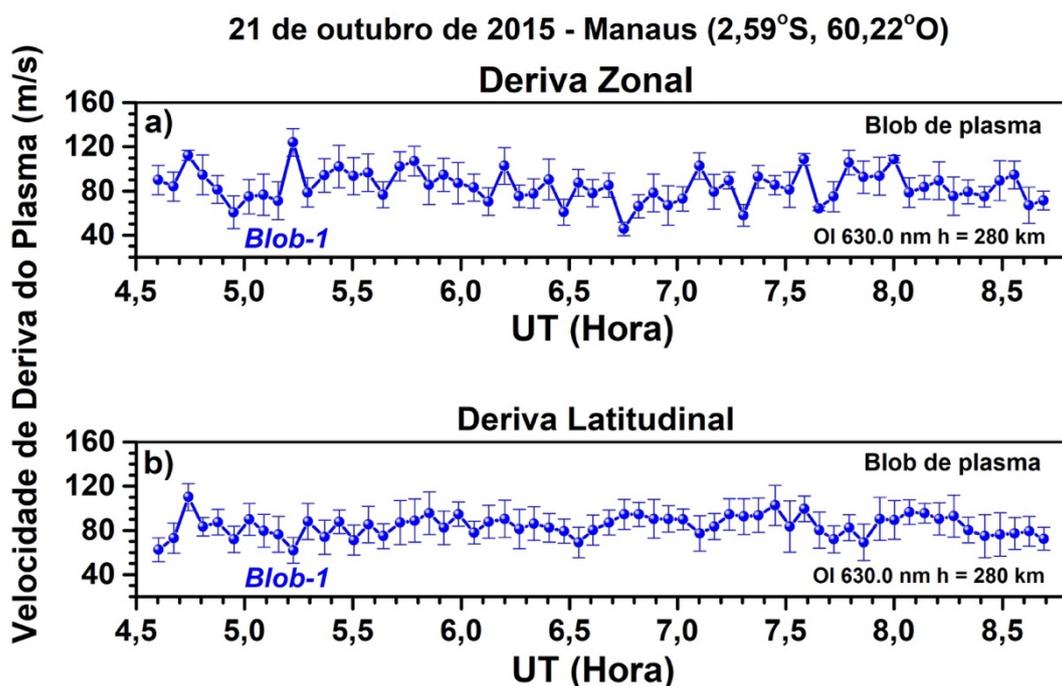
Fonte: A autora

A Figura 41 é a representação gráfica do perfil da densidade eletrônica obtidas através dos dados do satélite DMSP F15, entre 06:27 UT até 06:39 UT. É claramente observado um extenso aumento no perfil da densidade eletrônica do plasma, que coincide com a imagem do fotômetro, apresentando uma ampla região de forte brilho, Figura 39.

Os dados do satélite, Figura 41, permitem confirmar a interpretação da presença de uma blob de grande amplitude, e a presença de grandes irregularidades dentro dela, ou seja, depleções internas à própria blobs.

A análise da velocidade de deriva zonal da blob de plasma nesta noite começou às 04:32 UT e seguiu acompanhando a evolução e desenvolvimento da mesma blob por toda noite até o fim das imagens que foi por volta das 08:41 UT. O processo de linearização foi utilizando o filtro de interferência OI 630,0 nm, numa altitude de 280 km e uma área de 1024 km x 1024 km. A Figura 42 (a) apresenta o comportamento dessa deriva.

Figura 42 – Velocidades de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630,0 nm, em uma altitude de 280 km na noite de 20 - 21 de outubro de 2015. (a) Velocidades de deriva zonal e (b) velocidade de deriva latitudinal.



Fonte: A autora

Foi feito também o cálculo de velocidade de deriva latitudinal dessa mesma blob, durante o mesmo período, a Figura 42 (b) mostra os resultados encontrados para essa velocidade na noite de 20 - 21 de outubro de 2015.

A Figura 42 (a) apresenta o resultado da velocidade de deriva zonal da blob de plasma analisada nesta noite, com um comportamento semelhante ao já visto nas noites anteriormente analisadas, com valor médio de 84 ± 13 m/s.

A Figura 42 (b) é o gráfico dos valores da velocidade de deriva latitudinal da blob analisada nessa noite. O valor médio encontrado de 84 ± 14 m/s, também mostra comportamento e similaridade com os valores encontrados nas noites anteriores.

A média da dimensão norte/sul da blob analisada nesta noite foi de 204 km e leste/oeste de 223 km.

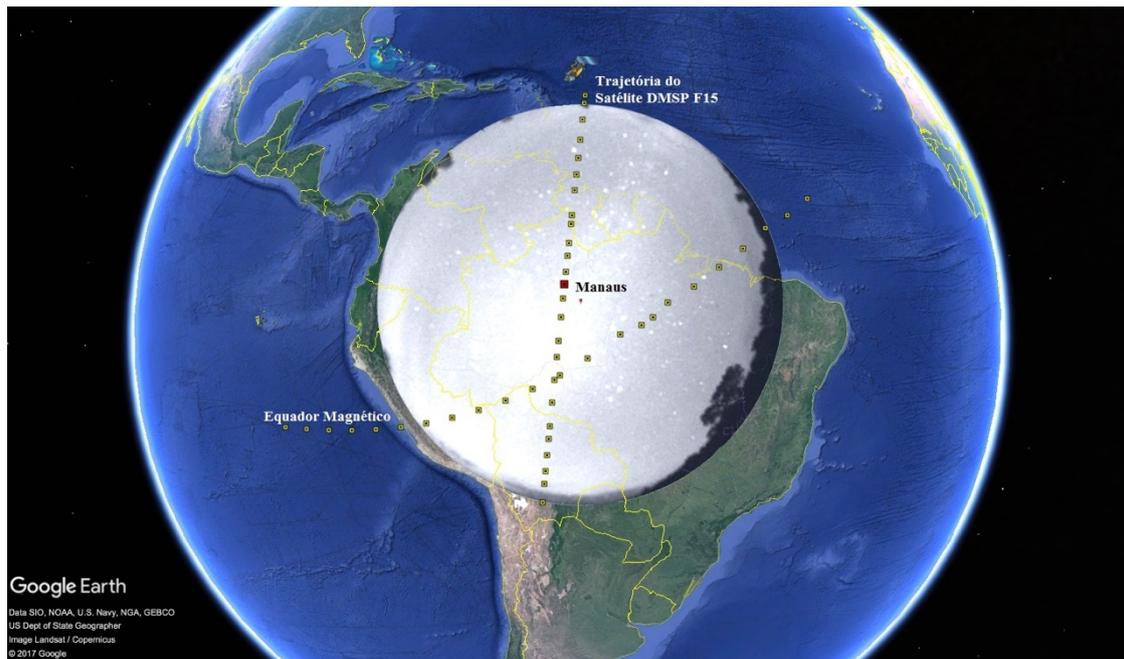
e) Noite de 20 - 21 de novembro de 2015 (blobs independente)

Nessa noite o imageador começou a operar às 04:33 UT, e registrou imagens de OI 630 nm a cada 4 minutos, aproximadamente. Não houve ocorrência de bolhas de plasma associada. Apenas uma blob foi analisada nesta noite no período de 06:09 UT até às 06:59 UT. Nesta noite o satélite DMSP F15 passou por duas coordenadas e identificou blobs de plasma. A Figura 43 mostra a imagem da blob de plasma sob a cobertura do fotômetro imageador e a trajetória do satélite.

Na Figura 43, as blobs sob o mapa é referente à imagem captada pelo imageador às 06:42 UT, o primeiro ponto em vermelho (de cima para baixo), sobre a trajetória do satélite é a latitude $0,94^{\circ}\text{S}$, longitude $61,08^{\circ}\text{O}$ e horário 06:43 UT, 6,73 em decimal, horário em que o satélite fornece dados para gerar o perfil de densidade eletrônica. No segundo

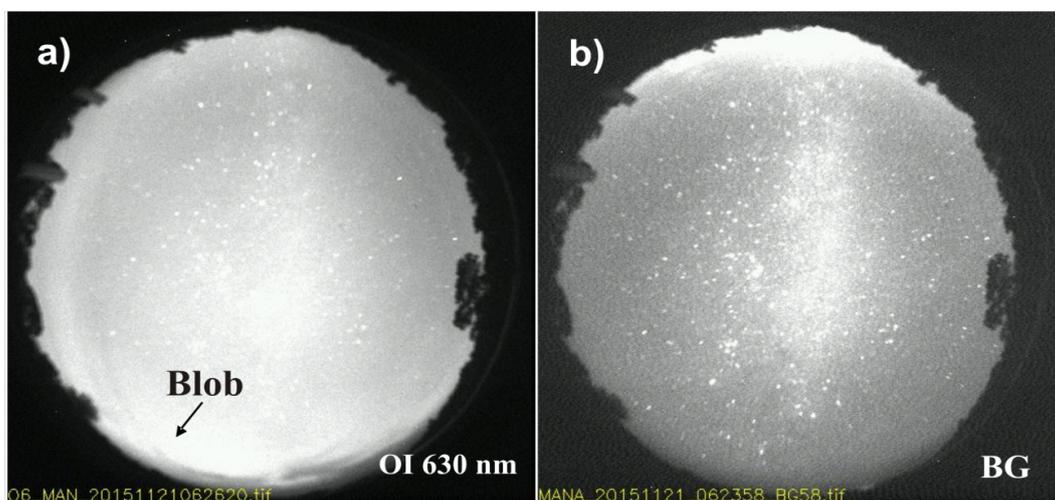
ponto em vermelho, o satélite está passando na latitude $15,81^{\circ}\text{S}$, longitude $64,47^{\circ}\text{O}$ e o horário às 06:47 UT ou 6,80 em decimal.

Figura 43 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus ($2,59^{\circ}\text{S}$, $60,22^{\circ}\text{O}$; dip. latitude $12,1^{\circ}\text{N}$), indicando a linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite do dia 20 - 21 de novembro de 2015 às 06:42 UT.



Fonte: A autora

Figura 44 – Imagens do fotômetro imageador com o filtro de interferência e sem o filtro de interferência na noite de 20 - 21 de novembro de 2015. (a) Apresenta uma imagem na emissão OI 630,0 nm às 06:26 UT com a presença de blob e (b) refere-se a imagem do céu noturno a um horário próximo (06:23 UT) sem o filtro de interferência.

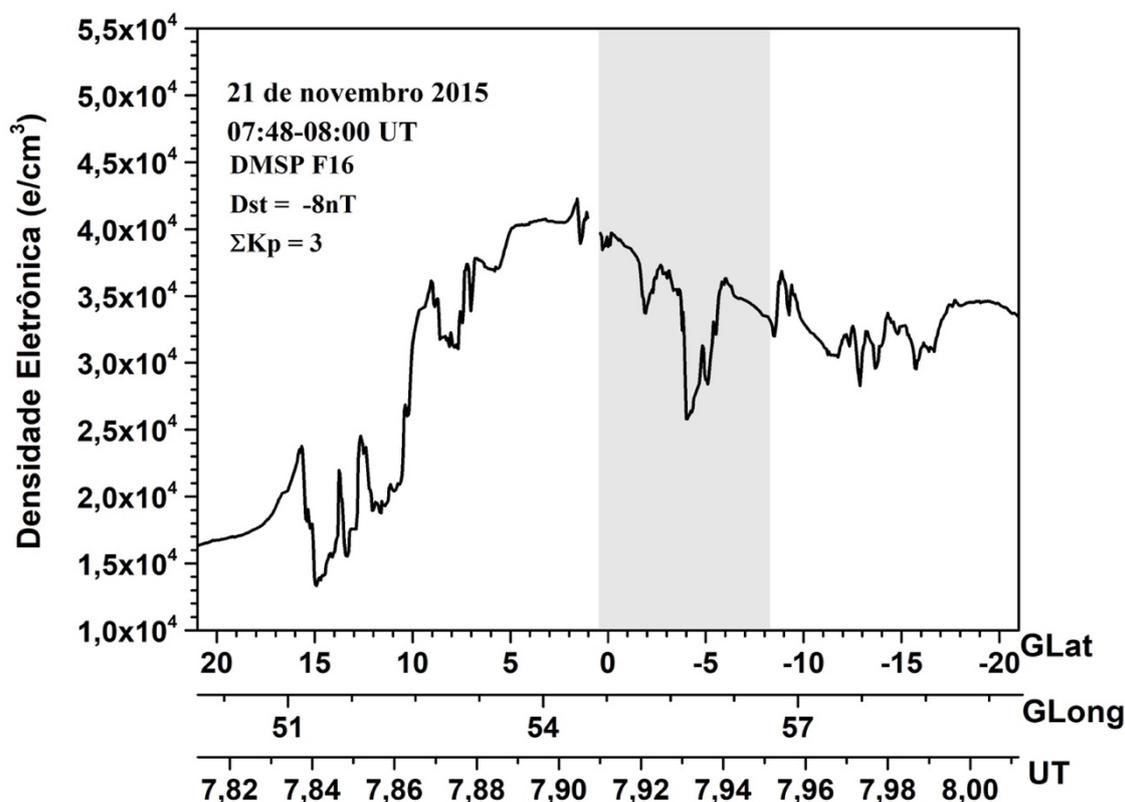


Fonte: A autora

A Figura 44 (a) mostra uma imagem do filtro de interferência OI 630 nm no horário das 06:26 UT, onde há a presença de blob de plasma (indicada por uma seta). A Figura 44 (b) mostra um horário próximo (06:23 UT) sem o filtro de interferência.

A Figura 45 é a representação gráfica do perfil da densidade eletrônica dos dados do satélite DMSP F15, entre 06:37 UT até 06:49 UT. É possível notar o aumento da densidade eletrônica do plasma por um fator de dois ou mais quando comparado ao plasma de fundo. A Figura 43 mostra a imagem do fotômetro nesse mesmo horário, assim, percebe-se que o forte brilho observado pela lente do imageador, é uma blob. Nessa noite, os dados do imageador coincidiu com os de satélite duas vezes às 06:42 UT ou 6,73 em decimal e às 06:47 UT ou 6,80 em decimal.

Figura 45 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 20 - 21 de novembro de 2015. A banda em cinza corresponde ao aumento na densidade eletrônica do plasma (blobs de plasma) medidas pelo satélite.

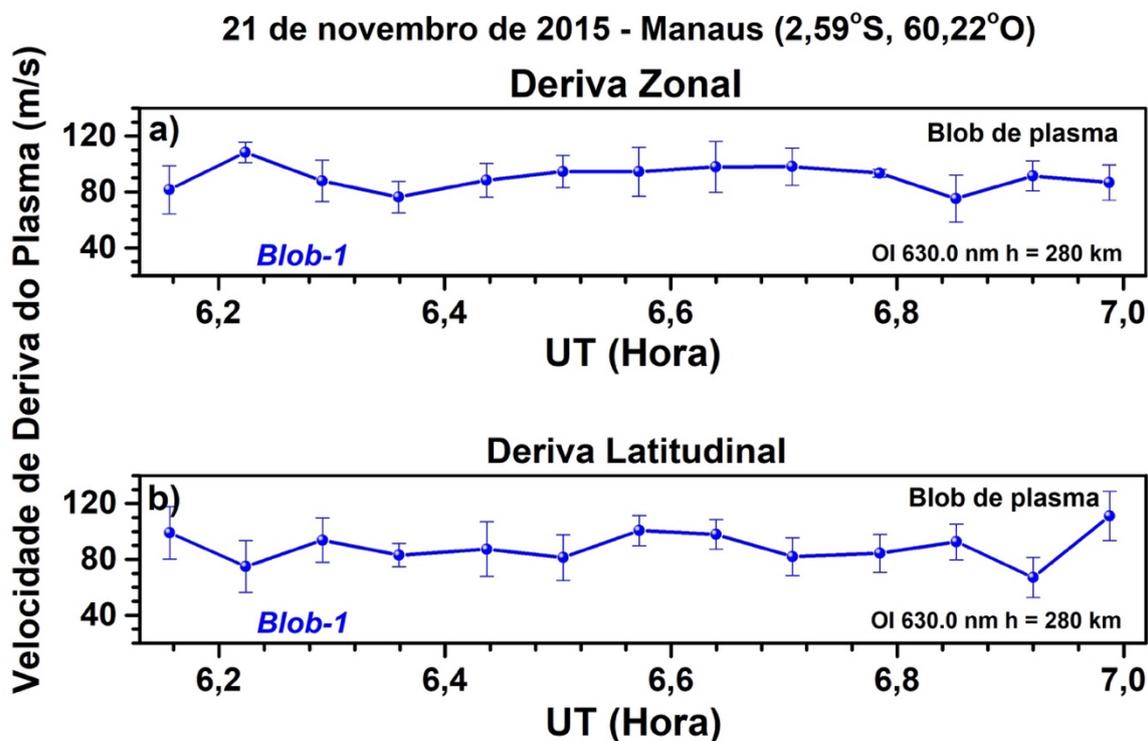


Fonte: A autora

Da mesma forma que a noite anterior, pode-se afirmar que se trata de uma grande blob de plasma, que apresenta irregularidades no seu perfil de densidade. A Figura 45 indica o perfil de densidade parcial da blob que deve-se estender no hemisfério norte, latitudes geográficas negativas em grandes extensões.

Nesta noite, o registro de dados e cálculo da velocidade de deriva zonal da blob de plasma começou às 06:09 UT e seguiu sem interrupção até as 07:03 UT. O gráfico da Figura 46 (a) são os valores da velocidade de deriva zonal ou leste/oeste e a Figura 46 (b) é o gráfico com o comportamento da velocidade de deriva latitudinal ou norte/sul da blob observada e estudada na noite de 20 - 21 de novembro de 2015.

Figura 46 – Velocidade de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, observadas por imageador, em uma altitude de 280 km. Painel (a) deriva zonal, painel (b) deriva latitudinal, referentes à blob analisada na noite de 20-21 de novembro de 2015.



Fonte: A autora

A Figura 46 (a) com os valores da velocidade de deriva zonal da blob de plasma analisada nesta noite, mostra um comportamento constante na maior parte do período estudado. O valor médio encontrado foi de 90 ± 12 m/s. A Figura 46 (b) mostra os valores da análise da velocidade de deriva latitudinal da blob analisada nessa noite, percebeu um comportamento similar às noites anteriores. O valor médio foi de 88 ± 14 m/s.

A média da dimensão norte/sul da blob analisada nesta noite foi de 116 km e leste/oeste de 252 km.

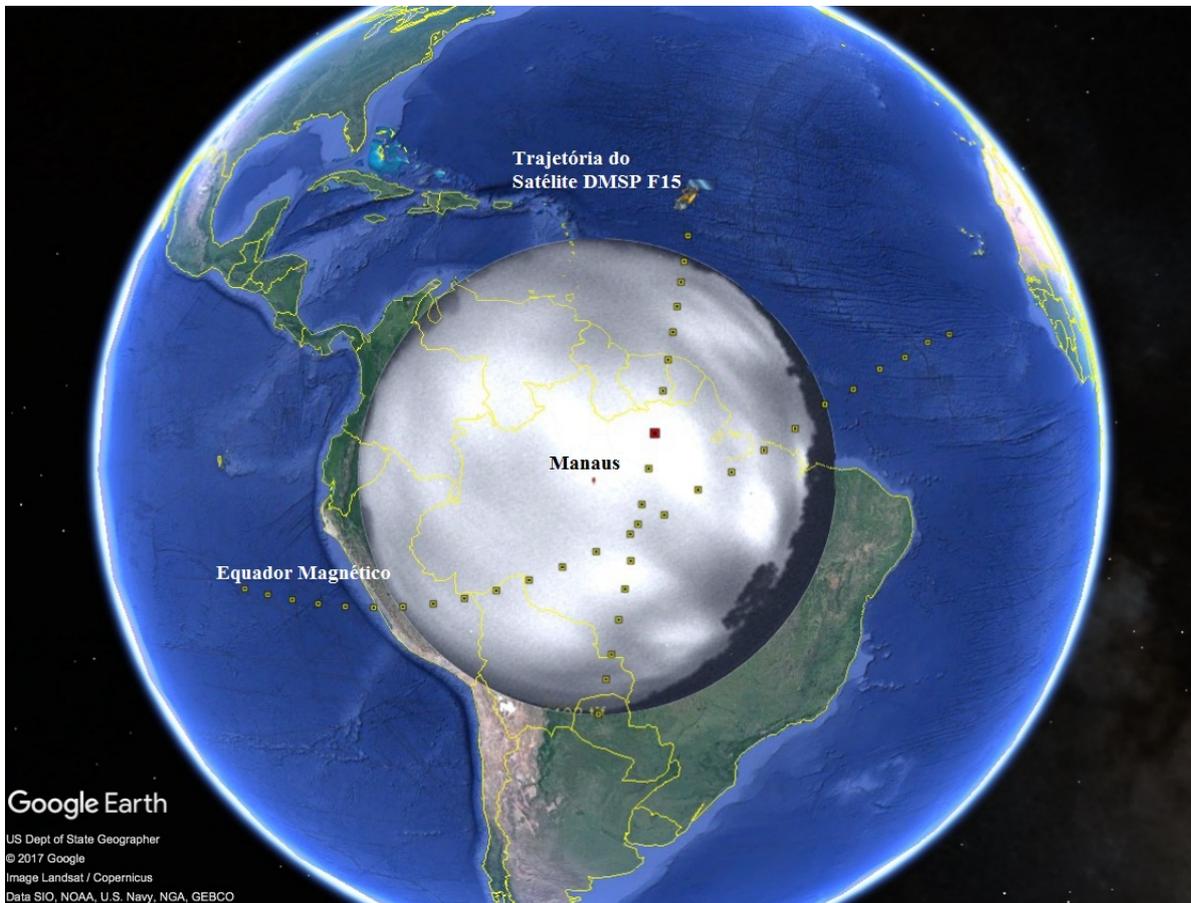
f) Noite de 04 - 05 de dezembro de 2015 (blobs independente)

Nessa noite, o imageador começou a operar as 22:47 UT, e registrou imagens de OI 630 nm a cada 4 minutos, aproximadamente. Não houve ocorrência de bolhas de plasma associada e foram analisadas três blobs. As análises começaram as 00:06 UT e permaneceram até as 06:16 UT. A Figura 47 mostra a imagem da blob de plasma sob a cobertura do fotômetro imageador e a trajetória do satélite.

A blob sob o mapa na Figura 47 é referente à imagem das 06:21 UT observada pelo imageador, o ponto em vermelho sobre a trajetória do satélite é a latitude $1,44^{\circ}\text{S}$, longitude $55,19^{\circ}\text{O}$ e horário 06:21 UT ou 6,36 em decimal. Nesse ponto, os dados do satélite coincidiram com a imagem observada pelo imageador.

As Figuras 48 (a) e 48 (b) apresentam dois diferentes momentos onde a blob de plasma é visualizada. O forte brilho visto nas imagens de OI 630 nm (indicado por uma seta) é a região de maior densidade do plasma, as blobs. Nas Figuras 48 (c) e 48 (d) ilustram o céu de fundo, novamente é notável que as blobs aparecem apenas através do filtro de interferência OI 630,0 nm, indicando que refere-se a uma irregularidade que é visível nessa faixa de emissão.

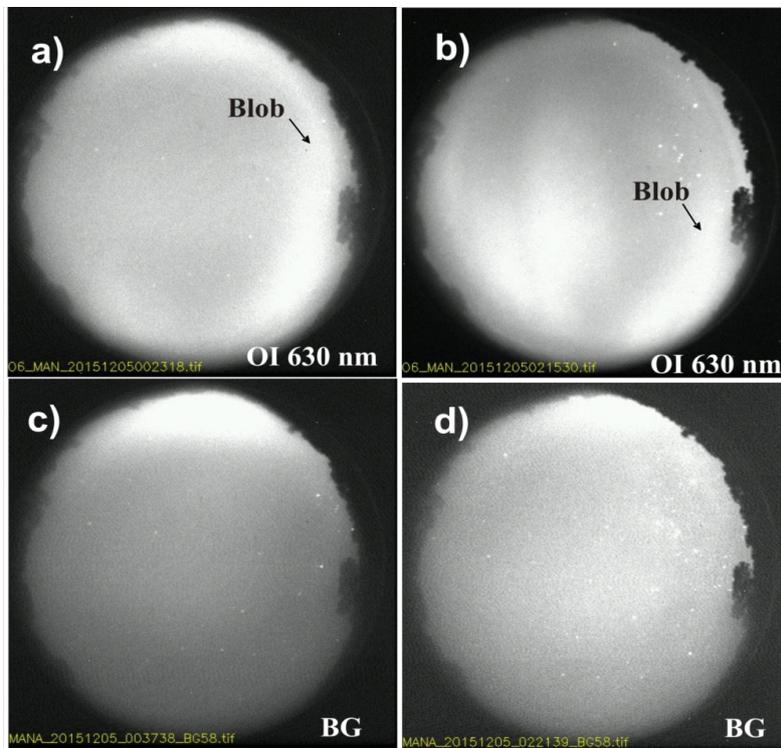
Figura 47 – Ilustração da área de cobertura do fotômetro imageador instalado em Manaus (2,59°S, 60,22°O dip. latitude 12,1°N), com a indicação da linha do equador magnético e geográfico e a trajetória do satélite DMSP F15 para a noite de 04 - 05 de dezembro de 2015 às 06:21 UT.



Fonte: A autora

O perfil da densidade eletrônica é visto na Figura 49 e foi obtido pelos dados do satélite DMSP F15, entre 06:16 UT até 06:28 UT. O aumento na densidade eletrônica do plasma é notado entre 06,36 e 06,44 em decimal (eixo da hora universal na Figura 49), no horário das 06,36 o imageador detectou uma blob, Figura 47. Percebe-se claramente o aumento na densidade do plasma, não somente ao indicado pela banda em cinza, mas em outros pontos mostrado graficamente, lembrando que esse sensor do satélite DMSP mede densidade eletrônica, ou seja, a quantidade de elétrons por cm^3 .

Figura 48 – Imagens obtidas do fotômetro imageador para a noite de 04-05 de dezembro de 2015; (a) e (b) mostram duas imagens com o filtro de interferência OI 630 nm em 00:23 UT e 02:15 UT, respectivamente e (c) e (d) apresentam os horários próximos sem o filtro de interferência às 00:37 UT e 02:21 UT, respectivamente.



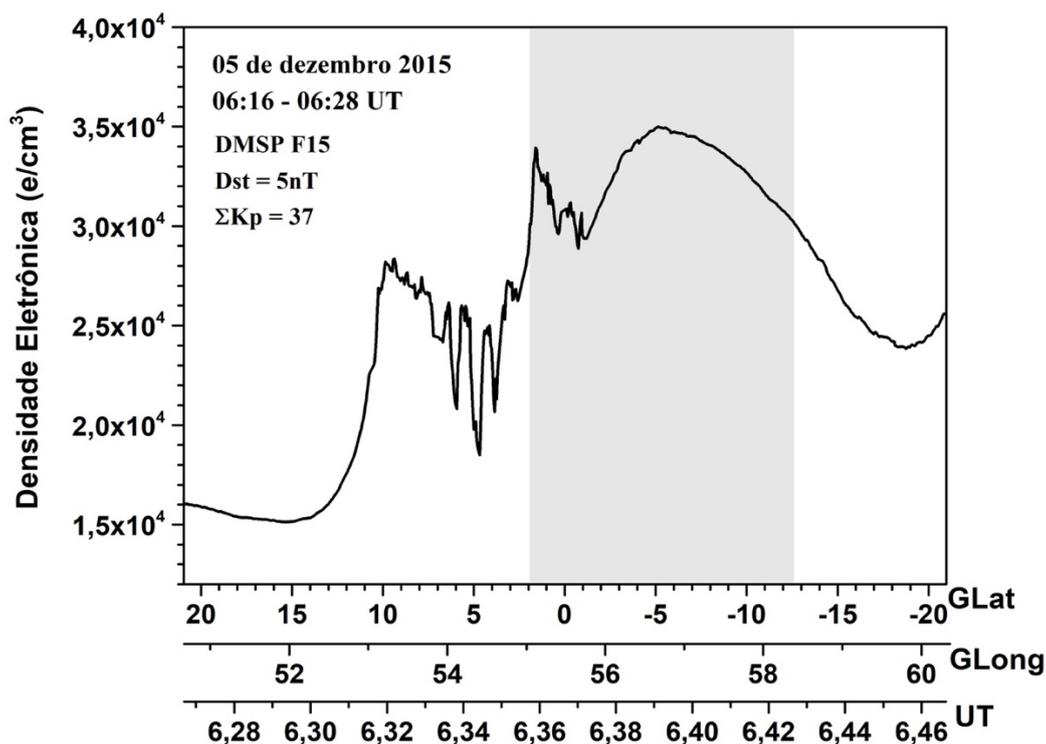
Fonte: A autora

Novamente, tem-se o perfil de uma intensa blob de plasma, apresentando perfil de depleção dentro dela. Este tipo de perfil também pode ser interpretado como a presença de bolha de plasma na região da anomalia ionosférica equatorial ou como é apresentado aqui irregularidades internas a uma grande blob de plasma. Os valores absolutos no perfil da densidade eletrônica de plasma é os critérios na definição de bolhas e blobs determinam para cada autor qual é a interpretação correta.

Nesta sexta e última noite analisada para a região de MAN, mantiveram-se os mesmos valores para o cálculo da linearização das imagens obtidas pelo fotômetro imageador, com seu filtro de interferência OI 630,0 nm e altitude de 280 km em uma área de 1024 km x 1024 km. Nesta noite, foram observadas 03 blobs, houve momentos em que as análises

tiveram que ser interrompidas devido às nuvens que entraram no campo de visão do imageador, a primeira interrupção foi logo após o término da blob-2 e em dois momentos da análise da blob-3.

Figura 49 – Perfil da densidade eletrônica obtida pelo satélite DMSP F15, na ionosfera noturna, em 04-05 de dezembro de 2015. A banda em cinza corresponde ao aumento na densidade (blobs de plasma) medidas pelo satélite.

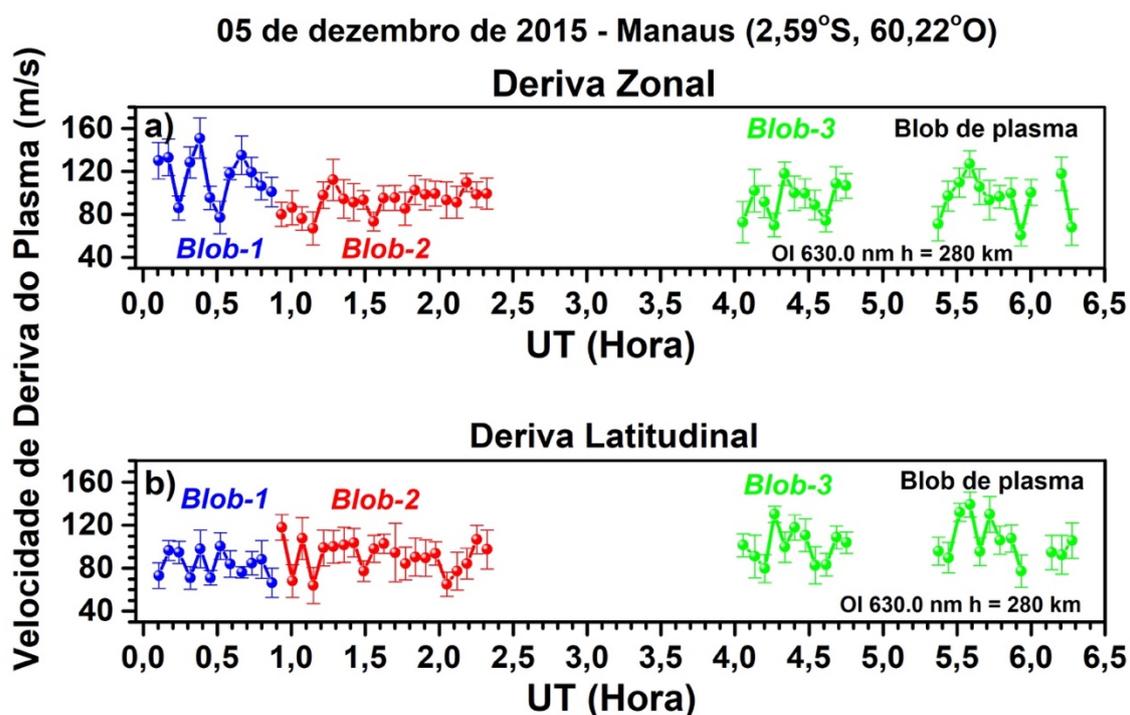


Fonte: A autora

A Figura 50 (a) é o gráfico com os valores calculados para a velocidade de deriva zonal, ela mostra o comportamento das três blobs de plasma analisada nesta noite, elas estão identificadas por cores, a blob-1 está em azul, a blob-2 em vermelho e a blob-3 em verde. A blob-1 teve valores bem maiores que as duas seguintes, blobs 2 e 3, e um comportamento com valores máximos e mínimos ao longo de toda noite. Os valores médios da velocidade de deriva zonal encontrado para as três blobs analisadas são blob-1 115 ± 13 m/s, blob-2 92 ± 14 m/s e blob-3 95 ± 14 m/s.

O cálculo de velocidade de deriva latitudinal dessas mesmas blobs durante o mesmo período, Figura 50 (b) para a noite de 04-05 de dezembro de 2015, mostra comportamento similar à velocidade de deriva zonal. Neste caso a terceira e última blob é que apresenta maiores valores, mas as 03 têm valores variando do máximo ao mínimo no decorrer de toda noite. Os valores médios da velocidade de deriva latitudinal encontrados foram 91 ± 15 m/s, 100 ± 12 m/s e 105 ± 14 m/s, respectivamente.

Figura 50 – Velocidade de deriva do plasma inferida a partir da emissão de OI 630 nm, em 280 km de altitude. Painel (a) velocidade de deriva zonal e (b) velocidade de deriva latitudinal das três blobs de plasma observadas e analisadas na noite de 04-05 de dezembro de 2015.



Fonte: A autora

A média da dimensão norte/sul da blob-1 analisada nesta noite foi de 167 km e leste/oeste de 137 km, a blob-2 teve uma media de dimensão norte/sul e leste/oeste de 354 km e 258 km, respectivamente e a blob-3 norte/sul foi de 211 km e leste/oeste de 204 km.

A Tabela 3 apresenta um resumo dos valores médios da deriva zonal das bolhas de plasma analisadas em ambas as regiões e a Tabela 4 os resultados das derivas zonais

e longitudinais e das dimensões norte/sul e leste/oeste das blobs de plasma estudada neste trabalho.

Tabela 3 Valores médios das velocidades de deriva zonal das 03 bolhas de plasma estudadas em SJC e MAN.

Data	Evento	Local	LT (Local Time)	Velocidade zonal (m/s)
23-24/02/07	bolha	SJC	22:44 às 00:20	74
14-15/10/15	bolha	MAN	22:33 às 00:22	96
14-15/10/15	bolha	MAN	00:26 às 01:07	83
15-16/10/15	bolha	MAN	22:00 às 23:11	90
15-16/10/15	bolha	MAN	23:15 às 23:57	80

Tabela 4 Valores médios das velocidades de deriva zonal e latitudinal e dimensões norte/sul e leste/oeste das 07 blobs de plasma estudadas.

Data	Evento	Local	LT (Local Time) Deriva Zonal	Velocidade zonal (m/s)	LT (Local Time) Deriva Latitudinal	Velocidade latitudinal (m/s)	Dimensões norte/sul (km)	Dimensões leste/oeste (km)
23-24/02/2007	blob	SJC	22:44 às 00:30	65	22:44 às 23:33	85	591	328
23-24/02/2007	blob	SJC	00:34 às 01:28	53	--	--	--	263
14-15/10/2015	blob	MAN	00:01 às 00:18	123	00:01 às 00:18	104	220	155
14-15/10/2015	blob	MAN	00:22 às 02:26	99	00:22 às 02:26	88	422	496
14-15/10/2015	blob	MAN	02:30 às 03:12	107	02:30 às 03:12	96	586	592
15-16/10/2015	blob	MAN	22:37 às 23:15	98	22:50 às 23:15	81	363	300
15-16/10/2015	blob	MAN	23:19 às 23:53	86	23:19 às 23:53	88	432	342
15-16/10/2015	blob	MAN	23:19 às 23:53	104	23:19 às 23:53	84	482	491
15-16/10/2015	blob	MAN	23:57 às 00:16	78	23:57 às 00:16	86	465	511
19-20/10/2015	blob	MAN	01:02 às 04:50	83	01:02 às 04:50	94	209	222
19-21/10/2015	blob	MAN	00:32 às 04:41	84	00:32 às 04:41	84	204	223
20-21/11/2015	blob	MAN	02:09 às 03:03	90	02:09 às 03:03	88	116	252
04-05/12/2015	blob	MAN	20:06 às 20:52	115	20:06 às 20:52	91	167	137
04-05/12/2015	blob	MAN	20:56 às 22:19	92	20:56 às 22:19	100	354	258
04-05/12/2015	blob	MAN	00:03 às 02:16	95	00:03 às 02:16	105	211	204

8.2 Discussões

Os fotômetros imageadores fornecem um conjunto de dados, temporal e espacial, bastante completo a partir do qual podem ser feitas excelentes estimativas das velocidades

de deriva das bolhas e blobs. No entanto, algumas ressalvas são necessárias ao interpretar os resultados obtidos a partir das imagens em um sentido físico.

Primeiro, para relacionar a velocidade de deriva das bolhas e blobs com a velocidade de deriva do plasma, presume-se que irregularidades em grande escala de depleções e incrementos derivam à mesma velocidade que o plasma ambiente. Isto não é o que ocorre sempre, [Martinis et al. \(2003\)](#) mostraram que durante a fase inicial de desenvolvimento exponencial das bolhas esta suposição não é válida.

Segundo, como apontado por [Pimenta et al. \(2003\)](#), a altura assumida da camada de emissão pode ter um efeito sobre as velocidades de deriva estimadas. Eles mostram que se as derivas são calculadas assumindo que a emissão OI 630.0 nm ocorre em 300 km, em vez de 250 km como normalmente é feito, as velocidades aumentam em 20%. Assim, as discrepâncias no valor das velocidades derivadas de imagens e por outras técnicas e instrumentos podem ser atribuídas a uma altura incorreta assumida para a camada de emissão. De acordo com isso, [Abalde et al. \(2004\)](#), mostram que as estimativas de velocidade obtidas com a emissão de OI 630,0 nm são inferiores às calculadas utilizando imagens simultâneas a partir da emissão de OI 777,4 nm. Suas estimativas melhoraram, produziram menos dispersão, quando a altura local temporal medida por uma ionosonda foi usada nos cálculos em vez de assumir uma altura típica para toda a noite em análise.

Terceiro, às vezes não é claro exatamente ao que se refere a velocidade estimada. Como [Mendillo e Baumgardner, \(1982\)](#), afirmam, essa dificuldade surge de "tentar identificar pequenos deslocamentos em características nebulosas", eles estavam se referindo a estimar as velocidades meridionais das imagens, o que pode ser muito mais difícil. No entanto, o mesmo pode ser dito no cálculo da deriva zonal quando bifurcações, irregularidades secundárias e imagens desfocadas são predominantes nas imagens. [Pimenta et al. \(2003\)](#), sugerem minimizar os problemas obtendo a velocidade de deriva a partir da parede oeste

da bolha, a qual em geral, tende a ter um gradiente mais nítido e mais estável do que o da parede leste.

Todas estas considerações podem ser aplicadas para o caso das blobs e foi a técnica usada e apresentada no Capítulo 7, Metodologia.

Levando tudo isso em consideração, surge uma visão consistente da velocidade de deriva zonal das bolhas. Em geral as bolhas apresentam uma diminuição gradual da velocidade de deriva zonal com um máximo no início da observação, logo após o pôr-do-sol, valores entre 100 m/s e 200 m/s em torno das 22:00 LT e diminuindo para 50 m/s ou valores menores após a meia-noite local (Mendillo e Baumgardner, 1982; Mendillo et al. 1997; Taylor et al. 1997; Sinha e Raizada, 2000; Pimenta et al. 2003). No entanto, outros pesquisadores viram um pequeno aumento na velocidade da deriva perto da meia-noite local (Tinsley et al. 1997; Santana et al. 2001; de Paula et al. 2002; Makela e Kelley, 2003; Mukherjee, 2003); outros, viram velocidades de deriva zonal tão rápidas quanto 400 m/s (Fagundes et al. 1997).

Para o caso das blobs não se tem muita informação. Nossos resultados mostram que na região de SJC a deriva zonal média da bolha de plasma foi maior que a das blobs, ver Tabela 3 e 4, comportamento similar ao de Pimenta et al. (2004), que mostraram resultados para uma região de baixa latitude, com valores da velocidade de deriva zonal da bolha de plasma maior do que a velocidade deriva zonal da blob de plasma. Os valores encontrados por Pimenta et al. (2004) foram de 145 m/s para a velocidade média da bolha de plasma e 130 m/s para a velocidade média da blob de plasma; os nossos foram de 74 m/s para a velocidade média da bolha de plasma e 65 m/s e 53 m/s para a velocidade média da duas blobs de plasma estudadas na noite de 23-24 de fevereiro de 2007.

Para MAN a velocidade de deriva zonal das blobs de plasma, associadas com bolhas de plasma apresentadas neste trabalho, em sua maioria, os valores foram maiores do

que a deriva zonal da bolha de plasma, ou seja, um comportamento inverso a SJC. Os valores calculados foram de 80 m/s a 95 m/s para as velocidades médias das bolhas de plasma e de 81 m/s a 104 m/s para as velocidades médias das blobs de plasma nas noites de 14-15 de outubro e 15-16 de outubro de 2015.

Um fato importante notado neste estudo foi que a velocidade zonal das blobs de plasma não decai no decorrer da noite, como é o comportamento acima apresentado na velocidade das bolhas de plasma. Para as blobs as 3 noites estudadas em ambas regiões, SJC e MAN, apresentaram comportamento similar, no qual os valores da velocidade de deriva zonal variam entre máximos e mínimos relativos durante todo o período de observação noturno.

A inversão de comportamento das derivas zonais de bolhas e blobs nas regiões de SJC e MAN podem estar associadas as características dos ventos termosféricos locais, campos elétricos e condutividades, fatores estes geradores das derivas zonais, comportamento sazonal e períodos noturnos nos quais as observações foram feitas.

Estudos abordam a variação latitudinal da velocidade de deriva zonal obtida a partir de imagens, utilizando vários fotômetros. [Pimenta et al. \(2003\)](#), usaram fotômetros imageadores de São João do Cariri, Brasil ($7,4^{\circ}\text{S}$, $36,5^{\circ}\text{W}$, latitude magnética $1,19^{\circ}\text{S}$) e Cachoeira Paulista, Brasil ($22,7^{\circ}\text{S}$, $45,0^{\circ}\text{O}$, latitude magnética $15,8^{\circ}\text{S}$), próximo a SJC, que cobrem a região de cerca de 5°S a 25°S (geográfico) no estudar a dependência latitudinal da velocidade de deriva zonal das bolhas. Eles descobriram que as derivas em relação à latitude e ao tempo local seguiram muito de perto os ventos zonais do modelo climatológico HWM-90 ([Hedin et al. 1991](#)), sugerindo que os ventos zonais da região-F são a fonte dos campos elétricos que por sua vez dirigem a deriva de íons nas latitudes tropicais.

Um estudo semelhante foi realizado por [Martinis et al. \(2003\)](#) usando dados do imageador de Tucumán, Argentina ($26,9^{\circ}\text{S}$, 65°O , latitude magnética $13,2^{\circ}\text{S}$) e Arequipa,

Peru ($16,5^{\circ}\text{S}$, $71,5^{\circ}\text{O}$, latitude magnética $2,7^{\circ}\text{S}$). Seus resultados mostram que, no período após o pôr-do-sol, as derivas do plasma para o leste no equador magnético (Arequipa) são menores do que perto da região de anomalia (Tucumán). No entanto, essa relação inverte-se perto das 23:00 LT, o que pode ser aplicado em nossos resultados em SJC e MAN a depender da época do ano e horário em que os dados e resultados obtidos.

Em recente trabalho de [Sukanta Sau et al. \(2017\)](#) com observações de imageadores na Índia em Tirunelveli ($8,7^{\circ}\text{N}$, $77,8^{\circ}\text{L}$, latitude magnética $1,7^{\circ}\text{N}$) e Kolhapur ($16,7^{\circ}\text{N}$, $74,3^{\circ}\text{L}$, latitude magnética $11,5^{\circ}\text{N}$) observaram a deriva zonal das bolhas para o leste com diferentes valores de acordo as diferentes latitudes e horários. Em noite geomagneticamente perturbada com os efeitos de uma tempestade solar e perturbações no dínamo do campo elétrico induzido, observaram a reversão para o oeste da deriva zonal do plasma noturno na região, quase 10 horas após o início da fase principal da tempestade. A inclinação para o oeste que as bolhas normalmente apresentam foi maior e atribuída ao gradiente latitudinal nas velocidades de deriva, e a ocorrência da reversão de deriva ocorreu durante um período relativamente curto. Apresentaram também interessante estudo da assimetria na inclinação das bolhas em pontos conjugados e uma análise do comportamento latitudinal da deriva zonal e a inclinação das bolhas durante o tempo de tempestade da região de depleção do plasma equatorial.

Calculadas, pela primeira vez, as derivas latitudinais das blobs nas noites selecionadas na região equatorial, observatório de MAN, em geral os valores das velocidades de derivadas latitudinais mostram valores menores quando comparadas aos valores encontrados para as velocidades das derivas zonais, ver Tabela 4. Por exemplo na noite de 14-15 de outubro de 2015 foi observada a dinâmica de 3 blobs, em todos eles a deriva latitudinal, valores de 104 m/s, 88 m/s e 96 m/s, foi menor à deriva zonal, valores de 123 m/s, 99 m/s e 107 m/s.

Com a limitação de termos somente analisado uma noite para SJC, região de baixas latitudes, vemos um comportamento inverso. Para a única blob em que foi obtido os valores para ambas derivas, a velocidade de deriva latitudinal de blob de plasma é maior que sua velocidade de deriva zonal.

Novamente a inversão de comportamento das velocidades de deriva latitudinal dos blobs respeito às respectivas velocidades de deriva zonal nas regiões de SJC e MAN podem estar associadas as características dos ventos termosféricos locais, campos elétricos e condutividades, fatores estes geradores das derivas zonais, e principalmente a comportamentos sazonais e variações relativas ao longo da noite. As observações em SJC, 23 de fevereiro de 2007, foram no verão e antes da meia noite local, das 22:40 LT às 00:20 LT. Em MAN e para a noite do 14-15 de outubro de 2015, primavera e foram após a meia-noite local, das 00:00 LT às 03:20 LT.

Os resultados apresentados para 4 das 6 noites estudadas em MAN mostram que blobs de plasma podem ser fenômenos independentes das bolhas, ou seja, a presença de bolhas de plasma não é pré-requisitos para a ocorrência de blobs, corroborando assim, com resultados apresentado por [Kil et al. \(2011\)](#).

Embora alguns perfis da densidade eletrônica obtida por satélite e apresentados nesse Capítulo, para todas as 7 noites em estudo, possam ser em um primeiro momento, interpretados como a presença de bolhas de plasma na região da anomalia ionosférica equatorial, seus valores absolutos e o acompanhamento da sua dinâmica em todo o horário noturno não denotam seu aparecimento. Os dados por imageador mostram que durante todas as 4 noites da ocorrência de blobs de plasma, não há a presença de bolhas de plasma. Lembrando que bolha de plasma tem origem no equador magnético, na base da camada F, sendo perfeitamente registradas por imageador, em diferentes emissões. Nas 4 noites em questão analisadas, o céu estava limpo, podendo desta forma acompanhar a

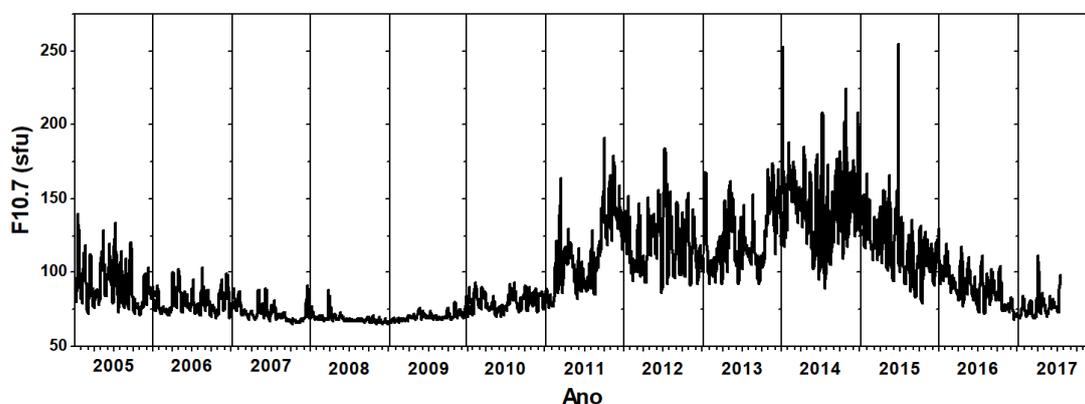
geração e desenvolvimento de possíveis bolhas que se formassem no equador magnético e evoluíssem derivando para baixas e médias latitudes em ambos hemisférios, além de sua possível deriva zonal.

Assim analisados, os perfis de densidade eletrônica selecionados para essas noites na forma de confirmar o aumento zonal e irregular da densidade, não são considerados como assinaturas de bolhas de plasma, pois não houve registro em imagens de sua formação e evolução na região de MAN. Os perfis são interpretados como aumentos zonais significativos (valores se duplicam como mínimo respeito aos valores do meio local) da densidade; blobs de plasma e com irregularidades, pequenas depleções dentro delas.

8.2.1 Blobs em relação aos valores do fluxo solar $F_{10.7}$ e dos índices Kp e Dst

As noites estudadas neste trabalho correspondem ao período de decaimento no 23º ciclo solar, noite de 23-24 de fevereiro de 2007 no fotômetro operando em SJC, e na fase de descida no 24º ciclo solar, noites de outubro (15-16, 16-17, 19-20 e 20-21), novembro (20-21) e dezembro 04-05) de 2015 com dados do imageador instalado em MAN, como pode ser visto na Figura 51, que apresenta o perfil do índice $F_{10.7}$ nos anos 2005 a 2017.

Figura 51 – Perfil da variação média diária do valor do índice $F_{10.7}$ para o período de 2005 a 2017.

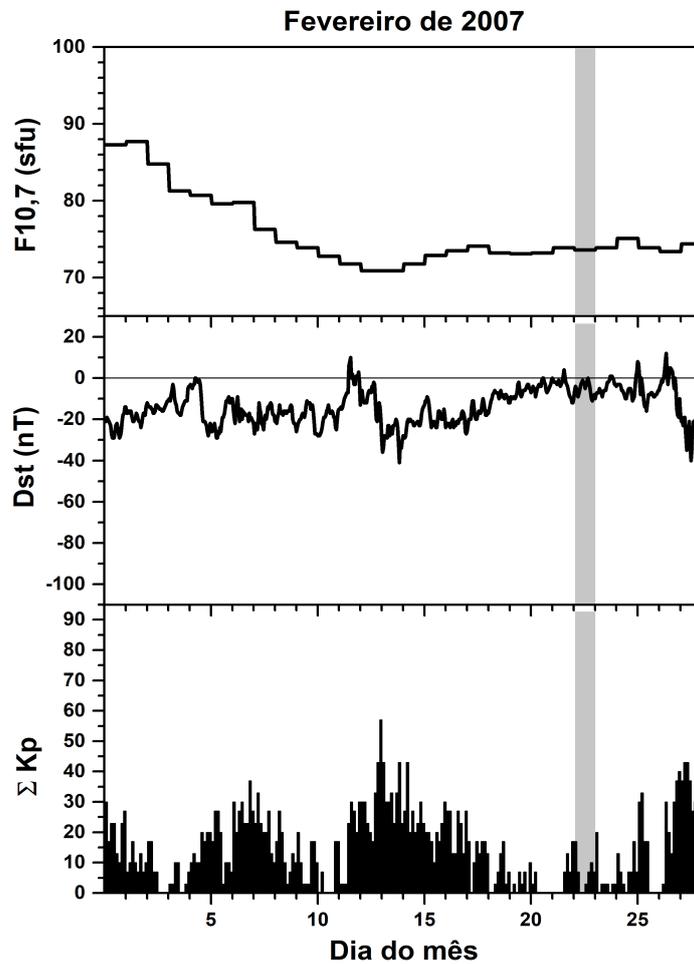


Fonte: A autora

O fluxo de rádio solar no comprimento de onda de 10,7 cm (2800 MHz) é um excelente indicador da atividade solar. Chamado de índice $F_{10.7}$, é um dos registros mais longos que acompanham a atividade solar. As emissões de rádio $F_{10.7}$ originam-se na alta cromosfera e baixa coroa solar. O $F_{10.7}$ se correlaciona bem com o número de manchas solares, bem como com vários registros na banda do ultravioleta (UV) e irradiação solar visível. O $F_{10.7}$ vem sendo medido de forma consistente desde 1947, primeiro em Ottawa e, em seguida, no Penticton Radio Observatory na Colúmbia Britânica. Ao contrário de muitos índices solares, o fluxo de rádio $F_{10.7}$ pode ser facilmente medido de forma confiável no dia-a-dia na superfície da Terra, em todos os tipos de clima. Relatado em "unidades de fluxo solar", (s.f.u.), o $F_{10.7}$ pode variar de entre valores abaixo de 50 s.f.u. e acima de 300 s.f.u., ao longo de um ciclo solar. (Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA, <http://www.swpc.noaa.gov/phenomena/f107-cm-radio-emissions>).

Para a noite de 23-24 de fevereiro de 2007 analisada e com a ocorrência registrada de bolhas e blobs de plasma, para a região de baixas latitudes em SJG, temos de maneira geral, valores baixos nos índices $F_{10.7}$, K_p e Dst , como mostrado na Figura 52, denotando uma noite geomagneticamente calma. Os valores variaram entre 73,3 e 73,9 para o $F_{10.7}$, de 0_0 a 2_0 para o K_p , e entre -10 e 1 no Dst .

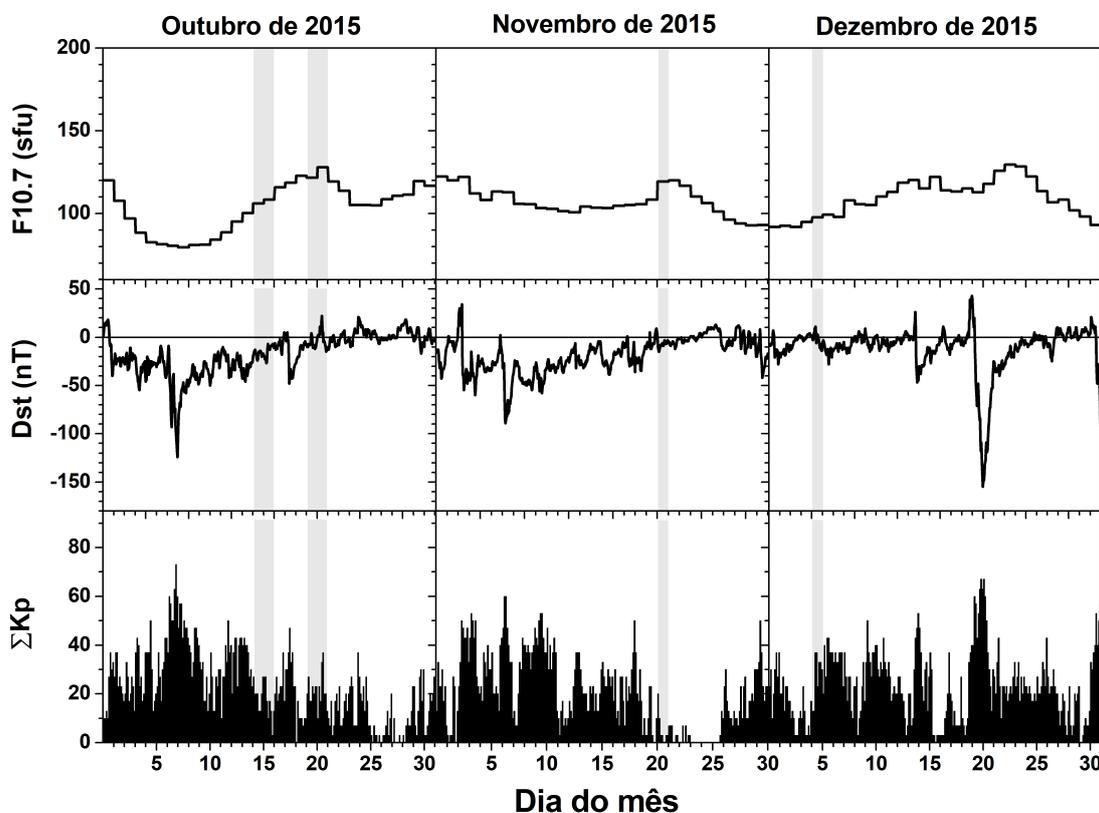
Figura 52 – Perfis das variações dos valores dos índices $F_{10.7}$, Kp e Dst, para o mês de fevereiro de 2007. A banda cinza sobre a imagem corresponde à noite analisada de 23-24.



Fonte: A autora

A Figura 53 apresenta os valores dos 3 índices, $F_{10.7}$, Kp e Dst, para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2015, condições geofísicas pertinentes para as 6 noites no estudo de ocorrência de blobs de plasma na região equatorial brasileira, observações em MAN.

Figura 53 – Perfis das variações dos valores dos índices $F_{10.7}$, K_p e Dst , para os meses de outubro, novembro e dezembro de 2015. As bandas cinza sobre a imagem são as noites selecionadas e analisadas nesse trabalho com a presença de bolhas ou blobs.



Fonte: A autora

O valor dos 3 índices, Figura 53, indicam que estamos nas condições de períodos geomagneticamente calmos ou fracamente perturbados para as 6 noites analisadas em MAN. Os valores são de noites sem perturbações geomagnéticas em 3 delas e de fracamente perturbada nas outras 3, 15-16 de outubro de 2015 com um K_p máximo de 4^+ , e 20-21 de outubro de 2015 e a última noite analisada do 04-05 de dezembro de 2015 quando o índice K_p atinge valores de 4^- .

Nas noites de 14-15 e 15-16 de outubro de 2015, o fluxo solar $F_{10.7}$, foi entre 100,2 e 108,4, o índice Dst variou entre -46 e -7 e o maior K_p foi de 4^+ , indicando que foram noites geomagneticamente calma. Nas noites de 19-20 e 20-21 de outubro de 2015 houve um pequeno aumento no fluxo solar, o valor do índice $F_{10.7}$ atinge 127,8 mas relativamente

baixo para a categoria de perturbado, os valores máximos dos índices Dst igual a -26 e Kp de 4⁻ indica que não houve nenhuma perturbação significativa no campo geomagnético. Para a noite de 20-21 de novembro de 2015, o fluxo solar teve um comportamento similar as noites estudadas do mês de outubro, suave aumento, mas considerado ainda um fluxo médio baixo, valor de 119,2. Os índices Kp e Dst demonstraram que esse dia foi calmo, valores de 2+ e -15 respectivamente. Finalmente para a noite de 04-05 de dezembro de 2015 o fluxo solar F_{10.7} estava baixo, 97,6 e o índice Dst estava a -14, e o índice Kp chegou a 4⁻, indicando um nível de fracamente perturbado.

Estas análises mostram que há formação de blobs de plasma nos períodos de baixa atividade solar, na fase do decaimento e média atividade solar no 24 ciclo solar e em períodos geomagneticamente calmos ou pouco perturbados.

Segundo [Watanabe e Oya \(1986\)](#) e [Choi et. al. \(2012\)](#) a probabilidade de ocorrência de blobs aumenta quando a intensidade de F_{10.7} está baixa e que a ocorrência de blobs é baixa durante o período perturbado. Isto foi confirmado neste trabalho, foram noites calmas, sem tempestade geomagnética, ou mesmo, sem um grande aumento do fluxo solar F_{10.7}, indicando que há ocorrência de blobs de plasma em períodos geomagneticamente calmos e quando o fluxo solar é baixo.

9. CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi revelar e caracterizar as ocorrências de blobs de plasma no setor brasileiro, através de técnica óptica, utilizando imagens de fotômetro imageador no filtro de interferência OI 630 nm, e de técnicas de rádio, com dados da densidade eletrônica local obtida através de satélite para confirmar a presença destas irregularidades de grande escala onde a densidade de elétrons tem um acentuado aumento do dobro ou mais respeito ao valor de fundo ou meio ambiente.

Neste trabalho, foram analisadas as ocorrências de blobs de plasma sobre duas regiões brasileiras distintas, em São José dos Campos – SP (SJC; 23,21° S, 45,86° O; dip. latitude 18,3° S), região de baixa latitude e bem próxima à crista da Anomalia Ionosférica Equatorial, e em Manaus – AM (MAN; 2,59°S; 60,22°O; dip. latitude 12,1°N), região próxima ao equador magnético.

Este estudo foi realizado coletando e analisando as imagens obtidas na operação de um fotômetro imageador instalado em SJC ao longo de 8 anos, período de 2001 a 2008, e os dados de um segundo imageador em MAN no período de julho de 2015 a abril de 2016. Foram selecionadas 35 noites em que as imagens dos fotômetros identificam claramente a presença de blobs de plasma na ionosfera noturna. Quando se cruzam os dados destas noites com os dados disponíveis de satélite para essas noites no intuito de confirmar o aumento localizado da densidade eletrônica local, permite selecionar somente 07 noites, 01 noite em SJC e 06 noites em MAN.

A presença de blob analisada em SJC, noite de 23-24 de fevereiro de 2007, estava associada a bolhas de plasma, ou seja, nessa noite pode-se identificar perfeitamente bolhas e blobs; em MAN as blobs que ocorreram nas noites de 14-15 e 15-16 de outubro de 2015 também estavam associadas as bolhas de plasma e as noites de 19-20 e 20-21 de outubro,

20-21 de novembro e 04-05 de dezembro de 2015, foram blobs independentes, ou seja, não houve a presença de bolhas de plasma que possam ser associadas a elas.

Bolhas e blobs são fenômenos distintos que ocorrem na região da ionosfera terrestre, as primeiras se caracterizam por ser amplas regiões com valores de menor densidade eletrônica que o plasma ao redor, e as segundas por serem regiões extensas onde o valor desta densidade é maior comparado a densidade de fundo do plasma.

Nas 07 noites selecionadas onde identificamos a presença de blobs, juntamente com a sua confirmação pelos dados de perfil de densidade eletrônica por dados obtidos com satélite, foi feita uma análise geral com o cálculo dos valores das velocidades de deriva zonal e latitudinal e suas dimensões.

Nas 03 noites selecionadas em que temos a presença de blobs e bolhas de plasma, foi calculado a velocidade de deriva zonal das bolhas associadas presentes junto com o cálculo das velocidades de deriva zonal e latitudinal dos blobs.

É importante destacar que pela primeira vez foram apresentados cálculos de velocidade da deriva latitudinal de blobs de plasma presentes no setor brasileiro, e não temos conhecimento que isto tenha sido feito e publicado para qualquer outra região.

Os principais resultados desse trabalho são descritos abaixo:

1. Nas 3 noites em que se observaram blobs de plasma ionosférico associados com bolhas de plasma, através de imagens do imageador na emissão OI 630,0 nm, observa-se que o valor médio da velocidade de deriva zonal das bolhas de plasma são similares para ambos os observatórios SJC e MAN com valores ligeiramente maiores em MAN em algumas noites. Valores são apresentados na Tabela 4 com um resumo geral das magnitudes obtidas. Não foi possível realizar uma comparação dos valores das derivas zonais com a

variação de latitude nos pontos de observação por não termos dados de observatórios diferentes para uma mesma noite. Os valores obtidos também podem estar associados com o comportamento decrescente dos valores na noite, a partir do pôr-do-sol e até a meia noite e com horários locais diferentes das noites observadas.

Alguns estudos que abordam a variação latitudinal da velocidade de deriva zonal obtida a partir de imagens, utilizando múltiplos fotômetros imageadores. [Pimenta et al. \(2003\)](#) usaram equipamentos em São João do Cariri - PB (7.4°S , 36.5°O , latitude magnética 1.19°S) e Cachoeira Paulista - SP (22.7°S , 45.0°O , latitude magnética 15.8°S) e obtiveram velocidades de deriva zonal relacionadas à latitude e ao tempo local por seguirem muito de perto os ventos zonais do modelo climatológico HWM-90 ([Hedin et al. 1991](#)). Um estudo semelhante foi realizado por [Martinis et al. \(2003\)](#) usando dados de imageadores em Tucumán, Argentina (26.9°S , 65°W , latitude magnética 13.2°S) e Arequipa, Peru (16.5°S , 71.5°W , latitude magnética 2.7°S) que mostram derivas do plasma para o leste na região do equador magnético (Arequipa) sendo menores que aquela próxima à crista da Anomalia de Ionização Equatorial - EIA (Tucumán). Essa relação inverte-se perto da meia noite local. Usando um modelo acoplado ionosfera - campo elétrico, esse padrão foi interpretado como uma dependência latitudinal da deriva da velocidade zonal à influência combinada das condutividades Pedersen da região-E e região-F e ao cisalhamento do vento neutro em ambas altitude e latitude.

2. Verificou-se que as velocidades da deriva zonal das bolhas de plasma nas 3 noites estudadas, 23-24 de fevereiro de 2007, 14-15 e 15-16 de outubro de 2015, diminuíram no decorrer das noites, com um máximo no início logo após o pôr-do-sol e um mínimo perto da meia noite. Estes resultados estão de acordo com observações anteriores ([Woodman 1972](#); [Otsuka et al. 2002](#); [Terra et al.; 2004](#); [Abalde et al. 2004](#)). O quadro geral é o de uma diminuição gradual da velocidade de deriva zonal de entre 100 m/s e 200 m/s em torno da

entardecer até as 22:00 LT diminuído para 50 m/s após a meia-noite local, embora alguns pesquisadores viram um ligeiro aumento na velocidade da deriva perto da meia-noite local (Tinsley et al. 1997; Santana et al. 2001; de Paula et al. 2002; Makela e Kelley, 2003; Mukherjee, 2003), e outros, às vezes, viram velocidades de deriva zonal tão rápidas quanto 400 m/s (Fagundes et al. 1997). Boas estimativas dos valores das derivas de velocidade zonal a partir de estudos de imagem e a climatologia derivada de técnicas de radar sugerem que derivas de velocidades precisas podem ser derivadas de estudos de imagem. As diferenças observadas em alguns dos estudos simplesmente destacam o fato de que a variabilidade significativa nas derivas ocorre no dia a dia, e entre diferentes estações, latitudes e longitudes.

3. Nas 2 noites de MAN, região do equador, associadas com bolhas de plasma, 14-15 e 15-16 de outubro de 2015, a velocidade de deriva zonal média das blobs de plasma é ligeiramente maior que a deriva zonal da bolha de plasma, 78 m/s a 123 m/s para 80 m/s a 95 m/s respectivamente. Na única noite analisada em SJC, região da Anomalia de Ionização Equatorial o comportamento é inverso com a velocidade de deriva zonal média das blobs de plasma, 53 m/s a 65 m/s, é menor que a deriva zonal da bolha de plasma, 74 m/s. Dada, as poucas noites analisadas, não se pode deduzir um comportamento geral e na média essa velocidade de deriva zonal das blobs mostrou um comportamento semelhante com as bolhas de plasma associadas e de acordo com observações semelhantes em região próxima a SJC (Pimenta et al. 2004). Também estes valores podem estar associados com uma variação latitudinal dos observatórios e suas imagens e a variação ou gradiente em altitude dos ventos termosféricos.

4. A velocidade de deriva zonal média das blobs de plasma nas 04 noites de MAN, independentes, ou seja, sem bolhas de plasma associadas a elas, apresentam resultados semelhantes às outras 03 noites onde bolhas estavam presentes; 83 m/s a 115 m/s para a

primeira situação e 53 m/s a 123 m/s. Os valores da velocidade de deriva zonal das blobs não apresentam um comportamento de decréscimo no decorrer da noite, como o que se observa no comportamento das bolhas de plasma. No caso das blobs de plasma os valores obtidos das derivas da velocidade variam entre máximos e mínimos relativos em todo o período noturno de cada uma das 07 noites analisadas.

5. A velocidade de deriva latitudinal média das blobs de plasma, nas 7 noites analisadas, apresentam resultados semelhantes e valores pouco maiores aos da deriva zonal média para cada uma das noites. Assim como, nos resultados dos cálculos da deriva zonal, os valores oscilam entre máximos e mínimos em todo o período noturno analisado e estas oscilações ou valores máximos e mínimos são maiores que os da deriva zonal. Os valores decrescentes das velocidades de derivas das bolhas de plasma estão associados a seu crescimento em altitude e deslocamentos ao longo do meridiano magnético e consequentemente às variações do campo elétrico e dos ventos termosféricos. Uma confirmação da conduta de variabilidade das velocidades de deriva das blobs indicariam uma menor dependência em sua dinâmica com fatores como campo elétrico e ventos.

6. As 7 noites selecionadas com imagens na emissão OI 630 nm mostram uma excelente resolução e características de nitidez em suas formas e dimensões completas durante um longo período de tempo noturno, o que nos permitiu calcular, pela primeira vez, a velocidade deriva latitudinal das blobs de plasma sobre o setor brasileiro. Esta qualidade nas imagens nas 07 noites com longos períodos de tempo em que se tem nitidas e completas blobs de plasma no campo de visão do imageador é a razão fundamental pelo número reduzido de noites obtidas na seleção e análise.

7. Nos dados obtidos e disponibilizados em publicações nas últimas décadas, observa-se que bolhas e blobs apresentam grandes variações em suas dimensões para cada evento registrado. Estas características podem ser observadas nos valores obtidos nas 7

noites em estudo. A dimensão média norte/sul da blob de plasma, na noite de 23-24 de fevereiro de 2007 foi de 591 km e para a noite de 20-21 de novembro de 2015 foi de 116 km, a dimensão leste/oeste foi de 511 km na noite de 15-16 de outubro de 2015 e de 137 km na noite de 04-05 de dezembro de 2015. As dimensões das bolhas de plasma não foram calculadas porque apresentaram altas irregularidades e variações temporais nestas noites, e não era o foco do trabalho.

8. Fora o típico "espalhamento-F sazonal", estes fenômenos das bolhas e blobs de plasma apresentam grande variabilidade no dia a dia. A presente investigação indica claramente esta grande variabilidade para cada uma das 7 noites selecionadas e ainda durante cada uma delas nos valores dos fatores geomagnéticos, nas dimensões do fenômeno e nos valores das velocidades de derivas zonal e latitudinal de bolhas e blobs de plasma ionosférico.

9.1 Sugestões para trabalhos futuros

Imagens bidimensional de irregularidades equatoriais e em baixas latitudes são uma área de pesquisa muito ativa nos últimos 40 anos. Muitas coisas foram aprendidas sobre as características, as velocidades de deriva e a ocorrência dessas bolhas e blobs de plasma através do trabalho dedicado de muitos pesquisadores. Esforços planejados em combinar observações ópticas com outras técnicas para entender melhor os processos das instabilidades responsáveis pelas bolhas e blobs de plasma, com a esperança de poder entender melhor sua geração, desenvolvimento e decadência (seeding, development and decay) estão sendo aplicados. No entanto, ainda é necessário um maior esforço para coordenar as observações em diferentes setores de latitude e longitude, como vem sendo feito por vários grupos de pesquisa. Somente assim, seremos capazes de responder a muitas das questões pendentes referentes as irregularidades ionosféricas de pequenas a gran-

des amplitudes nas regiões equatoriais e de baixas latitudes. Essas imagens também precisam ser obtidas com outros tipos de instrumentos, além dos fotômetros imageadores, especialmente aqueles que podem medir parâmetros que não são facilmente obtidos das imagens. A operação de todos estes equipamentos, instalados e operando em terra, também precisa ser coordenada com as passagens de satélites para que os dados obtidos por seus instrumentos sensores possam ser incluídos em uma análise coordenada e mais completa. Isso levará a um entendimento sem precedentes da ionosfera terrestre e a uma compreensão mais completa dos processos das irregularidades que nela acontecem.

São poucos e recentes os estudos e a caracterização de blobs de plasma. As sugestões para trabalhos futuros são no sentido de verificar e ampliar os primeiros resultados obtidos deste fenômeno ionosférico. Sugestões:

- Fazer uma abordagem de modelagem numérica e estudar os possíveis fatores e suas condições iniciais na geração, desenvolvimento e evolução na formação de blobs;
- Ampliar os períodos de estudos de blobs sobre a região equatorial, baixas latitudes, assimetrias e sazonalidade;
- Estudar a formação e evolução de blobs de plasma independentes e das associadas a bolhas de plasma;
- Fazer uma análise estatística considerando fatores como região, época do ano, hora local, ciclo e atividade solar e atividade geomagnética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABALDE, J.R.; FAGUNDES, P.R.; SAHAI, Y.; PILLAT, V.G.; (2004). Height-resolved ionospheric drifts at low latitudes from simultaneous OI 777.4 nm and OI 630.0 nm imaging observations, *J. Geophys. Res.*, 109, A11308.
- ABALDE, J.R.; SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BECKER-GUEDES, F.; BITTENCOURT, J.A.; PILLAT, V.G.; LIMA, W.L.C.; CANDIDO, C.M.N.; FREITAS, T.F.; (2009). Day-to-day variability in the development of plasma bubbles associated with geomagnetic disturbances, *J. Geophys. Res.*, 114, A04304.
- ABDU, M.A.; BATISTA, I.S.; REINICH, B.W.; DE SOUZA, J.R.; SOBRAL, J.H.A.; PEDERSEN, T.R.; MEDEIROS, A.F.; SCHUCH, N.J.; DE PAULA, E.R.; GROVES, K.M.; (2009). Conjugate Point Equatorial Experiment (COPEX) campaign in Brazil: Electrodynamics highlights on spread F development conditions and day-to-day variability, *J. Geophys. Res.*, 114, A04308.
- ANDERSON, D.N.; HAERENDEL G.; (1979). The motion of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 84, 4251.
- ARRUDA, D.C.S.; SOBRAL, J.H.A.; ABDU, M.A.; CASTILHO, V.M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A.F.; BURITI, R.A.; (2006). Theoretical and experimental zonal drift velocities of the ionospheric plasma bubbles over the Brazilian region, *Adv. Space Res.*, 38, 2610-2614.
- BASU, B.; RETTER, J.M.; de LA BEAUJARDIER, O.; VALLADARES, C.E.; KUDEKI, E.; (2004). Theoretical relationship between maximum value of the post-sunset drift velocity and peak-to-valley ratio of anomaly TEC, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L03807.
- BOOKER, H.G.; WELLS, H.W.; (1938). Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 43(3), 249-256.
- CALVERT, W.; COHEN, R.; (1961). The interpretation and synthesis of certain spread-F configurations appearing on equatorial ionograms, *J. Geophys. Res.*, 66, 3125-3140.
- CANDIDO, C.M.N.; (2008). Tese de Doutorado em Geofísica, Estudos de irregularidade do plasma da camada ionosférica F equatorial e de baixas latitudes no setor latitudinal brasileiro, INPE.

- CHOI, H.S.; KIL, H.; KWAK, Y.S.; PARK, D.Y.; CHO, K.S.; (2012). Comparison of the bubble and blob distributions during the solar minimum, *Journal Geophys. Res.*, 117, A04314.
- CROWLEY, G.; RIDLEY, A.J.; DEIST, D.; WING, S.; KNIPP, D.J.; EMERY, B.A.; FOSTER, J.; HEELIS, R.; HAIRSTON, M.; REINISH, W.; (2000). Transformation of high-latitude ionospheric F region patches into blobs during the March 21, 1990, storm, *J. Geophys. Res.*, 105, 5215-5230.
- CHU, F.D.; LIU, J.Y.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J.H.A.; TAYLOR, M.J.; MEDEIREIROS, A.F.; (2005). The Climatology of ionospheric plasma bubbles and irregularities over Brazil. *Ann. Geophys.* 23, 379–384.
- CHU, F.D.; LEE, C.C.; CHEN, W.S.; LIU, J.Y.; (2008). A study of long-term climatology of ionospheric irregularities by using GPS phase fluctuations at the Brazilian longitudes. *Adv. Space Res.*, 41, 45-649.
- DE ABREU, A.J.; (2012). Tese de Doutorado em Física e Astronomia, Estudo do papel das ondas planetárias e dos distúrbios ionosféricos na geração de irregularidades ionosféricas equatoriais, UNIVAP.
- DE PAULA, E.R.; KANTOR, I.J.; SOBRAL, J.H.A.; TAKAHASHI, H.; SANTANA, D.C.; GOBBI, D.; DE MEDEIROS, A.F.; LIMIRO, L.A.T.; KIL, H.; KINTNER, P.M.; TAYLOR, M.J.; (2002). Ionospheric irregularity zonal velocities over Cachoeira Paulista. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 64 (12-14), 1511-1516.
- DUNGEY, J.W.; (1961). Interplanetary magnetic field and auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, 6(2), 47-48.
- FAGUNDES, P.R.; SAHAI, Y.; MEDEIROS, R.T.; BATISTA, I.S.; BITTENCOURT, J.A.; TAKAHASHI, H.; (1997). Nighttime F2 – Layer peak height changes due to thermospheric winds. *Adv. Space Res.*, 20(6), 1141-1144,
- FEJER, B.G.; DE PAULA, E.R.; GONZALEZ, S.A.; WOODMAN, R.F.; (1991). Average vertical and zonal F-region plasma drifts over Jicamarca. *J. Geophys. Res.* 96, 13901–13906.
- HAASE, J.S.; DAUTERMANN, T.; TAYLOR, M.J.; CHAPAGAIN, N.; CALAIS, E.; PAUTET, D.; (2011). Propagation of plasma bubbles observed in Brazil from GPS and airglow data, *Adv. Space. Res.*, 47, 1758–1776.

- HEDIN, A.E.; BIONDI, M.A.; BURNSIDE, R.G.; HERNANDEZ, G.; JOHNSON, R.M.; KILLEEN, T.L.; MAZAUDIER, C.; MERIWETHER, J.W.; SALAH, J.E.; SICA, R.J.; SMITH, R.W.; SPENCER, N.W.; WICKWAR, V.B.; VIRDI, T.S.; (1991). Revised global-model of thermosphere winds using satellite and ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, 96(A5), 7657-7688.
- ISHIDA, T.; OGAWA, Y.; KADODURA, A.; HOSOKAWA, K.; OTSUKA, Y.; (2015). Direct observations of blob deformation during a substorm, *Ann. Geophys.*, 33, 525-530.
- KELLEY, M.C.; (1989). *The Earth's Ionosphere - Plasma Physics Electrodynamics*. School of Electrical Engineering Cornell University, Ithaca, New York: International Geophysics Series, 43.
- KELLEY, M.C.; (2009). *The Earths Ionosphere - Plasma Physics Electrodynamics*. School of Electrical Engineering Cornell University, Ithaca, New York: International Geophysics Series, 96.
- KIL, H.; PAXTON, L.J.; OH, S.-J.; (2009). Global bubble distribution seen from ROCSAT-1 and its association with the pre-reversal enhancement, *J. Geophys. Res.*, 114, A06307.
- KIL, H.; CHOI, S.; HEELIS, A.R.; PAXTON, L.J.; COLEY, W.R.; MILLER, E.S.; (2011). Onset conditions of bubbles and blobs: A case study, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L06101.
- KUDEKI, E.; BHATTACHARYYA, S.; (1999). Post-sunset vortex in equatorial F-region plasma drifts and implications for bottomside spread-F. *J. Geophys. Res.* 104, 28163–28170.
- LE, G.; HUANG, C.S.; PTAFF, R.F.; SU, S.Y.; YEH, H.C.; HEELIS, R.A.; RICH, F.J.; HAIRSTON, M.; (2003). Plasma density enhancements associated with equatorial spread F: ROCSAT-1 and DMSP observations, *Journal Geophys. Res.*, 108(A8), 1318.
- MAKELA, J.J.; KELLEY, M.C.; (2003). Field-aligned 777.4nm composite airglow images of equatorial plasma depletions. *Geophys. Res. Lett.* 30(8), 1442-1445.
- MARTINIS, C.; ECCLES, J.V.; BAUMGARDNER, J.; MANZANO, J.; MENDILLO, M.; (2003). Latitude dependence of zonal plasma drifts obtained from dual-site airglow observations. *Journal Geophys. Res.* 108(A3), 1129-1138.

- MARTINIS, C. R.; MENDILLO, M. J.; AARONS, J. (2005). Toward a synthesis of equatorial spread F onset and suppression during geomagnetic storms. *J. Geophys. Res.*, v.110, n. A07306.
- MACLURE, J.P.; HANSON, W.B.; HOFFMAN, J.F.; (1977). Plasma bubbles and irregularities in the equatorial ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 82(19), 2650-2656.
- MENDILLO, M.; BAUMGARDNER J.; (1982). Airglow characteristics of equatorial plasma depletions, *J. Geophys. Res.*, 87, 7641-7652.
- MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; COLERICO, M.; NOTTINGHAM, D.; (1997). Imaging science contributions to equatorial aeronomy: initial results from the MISETA program. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 59(13), 1587–1599.
- MUKHERJEE, G.K.; (2003). Studies of the equatorial F-region depletions and dynamics using multiple wavelength nightglow imaging. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 65(3), 379-390.
- NADE, D.P.; SHARMA, A.K.; NIKTE, S.S.; GHODPAGE, R.N.; GURUBARAN, S.; TAORI, A.; SAHAI, Y.; (2013). Zonal velocity of the equatorial plasma bubbles over Kolhapur, India, *Ann. Geophys.*, 31, 2077-2084.
- NADE, D.P.; SHARMA, A.K.; NIKTE, S.S.; CHAVAN, G.A.; GHODPAGE, R.N.; PATIL, P.T.; GURUBAN, S.; (2014). Observations of plasma blobs by OI 630 nm using ASI and photometer over Kolhapur, India. *Earth Moon Planets*, 112, 89-101.
- OYA, H.; TAKAHASHI, T.; WATANABE, S.; (1986). Observation of low latitude ionosphere by the impedance probe on board the Hinotori satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 111-123.
- PAULINO, I.; DE MEDEIROS A.F.; BURITI, R.A.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J.H.A.; GOBBI, D.; (2011). Plasma bubble zonal drift characteristics observed by 120 airglow images over Brazilian tropical region. *Brazilian J. Geophys.* 29(2), 239-246.
- PARK, J.; WOOK MIN, K.; LEE, J.J; KIL, H.; KIM, V.P.; KIM, H.J.; LEE, E.; LEE D.Y.; (2003). Plasma blob events observed by KOMPSAT-1 and DMSP F15 in the low latitude nighttime upper ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 30(21), 2114.

- PARK, J.; LÜHR, H.; STOLLE, C.; ROTHER, M.; MIN, K.W.; MICHAELIS, I.; (2010). Field-aligned current associated with low-latitude plasma blobs as observed by the CHAMP satellite, *Ann. Geophys.*, 28, 697-703.
- PASNUKHOV, V.V.; CARRANO, C.S.; DOHERTY, P.H.; GROVES, K.M.; CATON, R.G.; VALLADARES, C.E.; SEEMALA, G.K.; BRIDGWOOD, C.T.; ADENIYI, J.; AMAESHI, L.L.N.; DAMTIE, B.; D'UJANGA MUTONYI, F.; NDEDA, J.O.H.; BAKI, P.; OBROU, O.K.; OKERE, B.; TSIDU, G.; (2012). Equatorial plasma bubbles and L-band scintillations in Africa during solar minimum, *Ann. Geophys.*, 30, 675-682.
- PILLAT, V.G.; FAGUNDES, P.R.; (2009). UDIDA – Univap Digital Ionosonde Data Analysis, IV Encontro Latino Americano de Pós Graduação.
- PIMENTA, A.A.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A.; SAHAI, Y.; GOBBI, D.; MEDEIROS, A.F.; TAYLOR, M.J.; TAKAHASHI, H.; (2001). Ionospheric plasma bubble zonal drift: a methodology using oi 630 nm all-sky imaging systems. *Adv. Space Res.*, 27(6/7), 1219-1224.
- PIMENTA, A.A.; (2003). Tese de Doutorado em Geofísica, Estudos da deriva zonal e dinâmica das Bolhas de Plasma na região Tropical, INPE.
- PIMENTA, A.A.; FAGUNDES, P.R.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.A.; ABALDE, J.R.; (2003). Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations, *Ann. Geophys.*, 21, 2315-2322.
- PIMENTA, A.A.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.A.; ABDU, M.A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M.J.; (2004). Plasma blobs observed by ground-based optical and radio techniques in the Brazilian tropical sector, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L12810.
- PIMENTA, A.A.; KELLEY, M.C.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.A.; FAGUNDES, P.R.; (2008). Thermospheric dark band structures observed in all-sky OI 630 nm emission images over the Brazilian low-latitude sector, *J. Geophys. Res.*, 113, A01307.
- PIMENTA, A.A.; SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.A.; RICH, F.J.; (2007). Ionospheric plasma blobs observed by OI 630,0 nm all-sky imaging in the Brazilian tropical sector during the major geomagnetic storm of April 6-7, 2000, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02820.
- RISHBETH, H.; GARRIOT, O.K.; (1969), *Introduction to Ionospheric Physics*, Academic Press.
- RISHBETH, H.; (1971). The F-layer dynamo, *Planetary and Space Science*, 19(2), 263-267.

- RISHBETH, H.; BAUER, P.; HANSON, W.B.; (1972). Molecular ions in the F2 layer. *Planet. Space Sci.* 20, 1287-1293.
- SAHAI, Y.; BITTENCOURT, J.A.; TEIXEIRA, N.R.; TAKAHASHI, H.; (1981). Plasma irregularities in the tropical F-region detected by OI 777.4 and OI 630.0 nm nightglow measurements, *J. Geophys. Res.*, 86, 3496.
- SAHAI, Y., AARONS, M., MENDILLO, M., BAUMGARDNER, J., BITTENCOURT, J.A.; TAKAHASHI, H.; (1994). OI 630 imaging observations of equatorial plasma depletions at 16 ° S dip latitude, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 56(11), 1461-1475.
- SAHAI, Y., FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A.; (1999). Solar cycle effects on large scale equatorial F-region plasma depletions. *Adv. Space Res.*, 24, 1477–1480.
- SAHAI, Y.; FAGUNDES, P.R.; BITTENCOURT, J.A.; (2000). Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: Solar cycle effects. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 40, 767-784.
- SANTANA, D.C.; SOBRAL, J.H.A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M.J.; (2001). Optical studies of the ionospheric irregularities over the Brazilian region by nocturnal images of the oi 630 nm emission. *Adv. Space Res.*, 27(6/7), 1207-1212.
- SAU, S.; NARAYANAN, V.L.; GURUBARAN, S.; GHODPAGE, R.N.; PATIL, P.T.; (2017). First observation of interhemispheric asymmetry in the EPBs during the St. Patrick's Day geomagnetic storm of 2015. *J. Geophys. Res.*, 10.1002/2017JA024213.
- SHARMA, A.K.; NADE, D.P.; NIKTE, S.S.; GHODPAGE, R.N.; PATIL, P.T.; ROKADE, M.V.; VHATKAR, R.S.; GURUBARAN, S.; (2014). Development of fast image analysis technique for All – Sky images, *Current Sci.*, 106(8), 1085-1093.
- SINHA, H.S.S.; RAIZADA, S.; (2000). Some new features of ionospheric plasma depletions over the Indian zone using all sky optical imaging. *Earth Planets Space* 52(8), 549-559.
- SOBRAL, J.H.A.; ABDU M.A.; BATISTA I.S.; (1980a). Airglow studies on the ionosphere dynamics over low latitude in Brazil. *Ann. Geophys.*, 36(2): 199–204.
- SOBRAL, J.H.A.; ABDU M.A.; ZAMLUTTI C.J.; BATISTA I.S.; (1980b). Association between plasma bubble irregularities and emission disturbance over Brazilian low latitudes. *Geophys. Res. Lett.*, 11: 980–982.

- SOBRAL, J.H.A.; ABDU, M.A.; (1990). Latitudinal gradient in the plasma bubble zonal velocities as observed by scanning 630-nm airglow measurements. *J. Geophys. Res.*, 95(A6), 8253-8257.
- SOBRAL, J.H.; ABDU, M.A.; (1991). Solar activity effects on equatorial plasma bubble zonal velocity and its latitude gradient as measured by airglow scanning photometers, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 53, 729–742.
- SOBRAL, J.H.A.; ABDU, M.A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M.J.; DE PAULA, E.R.; ZAMLUTTI, C.J.; AQUINO, M.G.; BORBA, G.L.; (2002). Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630 nm airglow observation, *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, 64, 1517-1524.
- SOBRAL, J.H.A.; DE CASTILHO, V.M.; ABDU, M.A.; TAKAHASHI, H.; PAULINO, I.; GASPARELO, U.A.C.; ARRUDA, D.C.S.; MASCARENHAS, M.; ZAMLUTTI, C.J.; DENARDINI, C.M.; KOGA, D.; MEDEIROS, A.F.; BURITI, R.A.; (2011). Midnight reversal of ionospheric plasma bubble eastward velocity to westward velocity during geomagnetically quiettime: Climatology and its model validation. *J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys.*, 73: 1520–1528.
- TAYLOR, M.J.; ECCLES, J.V.; LABELLE, J.; SOBRAL, J.H.A.; (1997). High resolution OI (630 nm) image measurements of F-region depletion drifts during the Guara´ campaign. *Geophys. Res. Lett.*, 24(13), 1699–1702.
- TAYLOR, M.J.; JAHN, J.-M.; FUKAO, S.; SAITO, A.; (1998). Possible evidence of gravity wave coupling into the mid-latitude F region ionosphere during the SEEK campaign. *J. Geophys. Res.*, 25(11), 1801-1804.
- TSUNODA, R.T.; (2010). On seeding equatorial spread F during solstices, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L05102.
- TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; SOBRAL, J.H.A.; MEDEIROS, A F.; GOBBI, D.; SANTANA, D.C.; (2001). Fine structure of the ionospheric plasma bubbles observed by the OI 6300 and 5577 airglow images. *Adv. Space Res.*, 27(6), 1189-1194.
- TARDELLI-COELHO, F.; (2013). Dissertação de Mestrado em Geofísica, Deriva zonal do plasma ionosférico no setor brasileiro durante um período de mínima extrema atividade solar, UNIVAP.

- TARDELLI-COELHO, F.; ABALDE, J.R.; TARDELLI, A.; de ABREU, A.; (2016). Interference of geomagnetic storms in ionospheric plasma bubbles over a last solar minimum period, *Astron. Soc. Pacific*, 504, 147-149.
- TARDELLI-COELHO, F.; PIMENTA, A.A.; TARDELLI, A.; ABALDE, J.R.; VENKATESH, K.; (2017). Plasma blobs associated with plasma bubbles observed in the Brazilian sector. *Adv. Space Res.*, in press.
- TERRA, P.M.; SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; SOUZA, J.R.; TAKAHASHI, H.; (2004). Plasma bubble zonal velocity variations with solar activity in the Brazilian region, *Ann. Geophys.*, 22 (9), 3123-3128.
- TINSLEY, B.A.; ROHRBAUGH, R.P.; HANSON, W.B.; BROADFOOT, A.L.; 1997. Images of transequatorial F region bubbles in 630- and 777-nm emissions compared with satellite measurements. *J. Geophys. Res.* 102(A2), 2057-2077.
- WATANABE, S.; OYA, H. (1986). Occurrence characteristics of low latitude ionosphere irregularities observed by impedance probe on board the Hinotori Satellite, *J. Geomag. Geoelectr.*, 38, 125-149.
- WEBER, E.J.; BUCHAU, J.; EATHER, R.H.; MENDE, S. B.; (1978). North-south aligned equatorial airglow depletions, *J. Geophys. Res.*, 83(A2), 712-716.
- WEBER, E.J.; BUCHAU, J.; MOORE, G.; (1980). Airborne studies of equatorial F layer ionospheric irregularities. *J. Geophys. Res.*, 85(9), 4631-4641.
- WOODMAN, R.F.; (1972). East-west ionospheric drifts at the magnetic equator. *Space Res.* XII, 969-974.
- WOODMAN, R.F.; LAHOZ, C.; (1976). Radar observations of F region equatorial irregularities. *J. Geophys. Res.*, 81(31), 5447-5466.
- YAO, D.; MAKELA, J.J.; (2007). Analysis of equatorial plasma bubble zonal drift velocities in the Pacific sector by imaging techniques, *Ann. Geophys.*, 25(3), 701-709.