



Universidade Federal  
de Campina Grande

**OBSERVAÇÕES DE BOLHAS DE PLASMA IONOSFÉRICAS NA  
REGIÃO EQUATORIAL BRASILEIRA**

Ebenezer Agyei-Yeboah

Dissertação de Mestrado de Pós-Graduação  
em física da UFCG orientada pelos  
professores Dr. Igo Paulino e Dr. Amauri  
Fragoso de Medeiros

UFCG  
Campina Grande  
2017



Universidade Federal  
de Campina Grande

**OBSERVAÇÕES DE BOLHAS DE PLASMA IONOSFÉRICAS NA  
REGIÃO EQUATORIAL BRASILEIRA**

Ebenezer Agyei-Yeboah

Dissertação de Mestrado de Pós-Graduação  
em física da UFCG orientada pelos  
professores Dr. Igo Paulino e Dr. Amauri  
Fragoso de Medeiros

UFCG  
Campina Grande  
2017

A284o Agyei-Yeboah, Ebenezer.  
Observações de bolhas de plasma ionosféricas na região equatorial brasileira / Ebenezer Agyei-Yeboah. – Campina Grande, 2017.  
65 f.

Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.

"Orientação: Prof. Dr. Igo Paulino, Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros".

Referências.

1. Física. 2. Astrofísica. 3. Bolhas de Plasma. 4. Ionosfera Equatorial.  
I. Paulino, Igo. II. Medeiros, Amauri Fragoso de. III. Título.

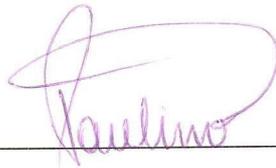
CDU 53:52(043)

**EBENEZER AGYEI-YEBOAH**

**OBSERVAÇÕES DE BOLHAS DE PLASMA IONOSFÉRICAS NA REGIÃO  
EQUATORIAL BRASILEIRA**

Dissertação aprovada em 23/02/2017

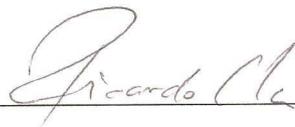
**BANCA EXAMINADORA**



---

(Presidente)

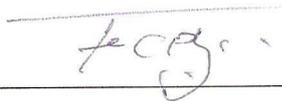
Prof. Dr. Igo Paulino da Silva  
Unidade Acadêmica de Física – UFCG



---

(Membro interno)

Prof. Dr. Ricardo Arlen Buriti da Costa  
Unidade Acadêmica de Física – UFCG



---

(Membro externo)

Prof. Dr. Fernando Celso Perin Bertoni  
Departamento de Física – UEPB

ATENÇÃO! FOLHA  
DE APROVAÇÃO  
SERÃO INCLUÍDA  
APÓS.

*Mestrado em física*

*Meu pai e a minha mãe, senhor e senhora I. K. Agyei*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, eu gostaria de expressar meu agradecimento ao meu supervisor, Dr. Igo Paulino da Unidade Acadêmica de Física (UAF) na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelo seu empenho, entusiasmo e paciência durante essa orientação. Agradeço também pela assistência durante o processo de seleção e admissão do programa de mestrado, pela assistência quando cheguei em Campina Grande e durante todo o tempo de duração do curso de mestrado. Imenso conhecimento de Dr Paulino na área, a sua compreensão dos métodos de investigação, juntamente com sua humildade e natureza amigável faz-me uma pessoa de muita sorte de ter trabalhado com ele. Eu não poderia ter pedido por um melhor orientador.

Novamente, eu gostaria de expressar minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Amauri Fragoso de Medeiros, que atuou como Co-orientador, e ao Prof. Dr. Ricardo Arlen Buriti por suas observações perspicazes, excelente orientação, carinho, paciência e encorajamento, não esquecendo de fornecer-me com um ambiente propício para fazer pesquisas ao longo dos últimos anos. Eu também gostaria de agradecer a todo o corpo docente no departamento de física, UFCG.

Agradeço também a meus colegas, alunos e amigos: Patrick Essien, Solomon Otoo Lomotey, Stephen Owusu, Prosper Nyassor, Maxwell Opoku Mensah, Biasmark Abeiku Kushiator, Vera Browne, Adamu Issifu, Elijah Anettey e Especialmente Débora Maria dos Santos pelas discussões, conselhos e conversas que tivemos enquanto tentava cumprir os prazos do trabalho e por toda diversão que tivemos juntos.

Finalmente, gostaria de agradecer à minha família: meus pais, Sr. e Sra I. K. Agyei, meus irmãos e irmãs por seus imensuráveis apoios ambos fisicamente e espiritualmente através de minha vida.

# OBSERVAÇÕES DE BOLHAS DE PLASMA IONOSFÉRICAS NA REGIÃO EQUATORIAL BRASILEIRA

## RESUMO

Observações da emissão do OI 630 nm (OI6300) da aeroluminescência noturna foram realizadas ao longo de um período de quase onze anos, abrangendo setembro de 2000 a dezembro de 2010 em São João do Cariri (7,4oS; 36,5oW), Brasil usando um imageador all-sky para observar bolhas de plasma equatoriais na base da região F ionosférica. No total, foram observadas 1107 noites e cerca de 648, que representa 58,5%, mostraram a ocorrência de bolhas de plasma. Certas características tais como o aparecimento e desaparecimento das bolhas, estruturas múltiplas e simples e bifurcações de bolhas de plasma foram observadas nas imagens do OI6300. O tamanho do banco de dados permitiu analisar estas características durante quase um ciclo solar completo. Os resultados mostraram que os meses de setembro a abril (Primavera-Verão) tiveram a maior taxa de ocorrência de bolhas de plasma (69,3%) e a menor taxa de ocorrência (30,6%) foi observada de maio a agosto (inverno). As características, exceto para estruturas simples, mencionado acima, tiveram padrões sazonais semelhantes. No entanto, para os meses de maio, junho e julho não foram observadas bifurcações. Estruturas simples de bolhas de plasma tiveram menor ocorrência e apresentaram padrões aleatórios com três ocorrências em maio, uma em janeiro, uma março e uma dezembro para os onze anos de estudo. Muitas das bolhas que ocorreram durante o período de inverno surgiram mais tarde da noite, em oposição aos períodos de primavera e verão, que começaram mais cedo. A taxa de ocorrência é maior em torno do período de alta atividade solar (2000-2005) (cerca de 57,3%) em relação ao período de baixa atividade solar (2006-2010) (42,7%) mesmo que a variação sazonal é semelhante para esses períodos. Análise de hora de início das bolhas de plasma revelaram oscilações de 3-4 dias, 5-6 dias maiores que 7 dias indicando uma clara variabilidade dia a dia. Estes períodos de oscilações podem ser resultado dos efeitos de ondas planetárias na ionosfera, modulando o pico pré-reversão, que é condição necessária para a instabilidade de Rayleigh-Taylor, que é o mecanismo principal de geração da bolha de plasma equatorial.

**Palavra-chave:** bolhas de plasma, bifurcações, ionosfera equatorial

# OBSERVATION OF IONOSPHERIC PLASMA BUBBLES OVER BRAZILIAN EQUATORIAL REGION

## ABSTRACT

Observations of OI 630.0 nm (OI6300) nightglow emission was carried out over a period of almost eleven years, spanning September 2000 to December 2010 over São João do Cariri (7.4oS; 36.5oW), Brazil using an all-sky imager (ASI) in order to observe equatorial plasma bubble (EPB) in the bottomside of ionospheric F region. In total, there were 1107 nights of observation, and out of these, about 648, representing 58.5%, showed the occurrence of EPBs. Certain characteristics such as onset, disappearance and other visible characteristics of plasma bubbles, such as bifurcation, multiple and single structure were observed in the monochromatic OI6300 airglow images. The large size of the database made it possible to analyze these characteristics during almost an entire solar cycle period. It showed from the analysis that from September to April (spring-summer) had the highest occurrence rate of 69.3% and the least occurrence rate of 30.6% was from May to August (winter). The characteristics, except for single, mentioned above have similar seasonal patterns. However, for the months of May, June and July we observed no bifurcations. Single plasma bubbles were the least observed in the analysis and their occurrence is rather random (show no seasonal pattern) with the highest number of 3, occurring in May and 1 in January, March and December for the 11 years of study. Many of the bubbles that occurred during the winter period started late in the evening as opposed to the spring and summer periods which started earlier in the evening. However, the occurrence rate is greater around period of high solar activity (2000-2005) (about 57.3%) compared to period of low solar activity (2006-2010) (42.7%) even though the seasonal variation is similar for those periods. Analysis of the start time produced oscillations of 3-4 days, 5-6 days and greater than 7 days periods, which show clear day-to-day variability in the start time. These periods may have resulted from the effects of planetary waves in the ionosphere, modulating the pre-reversal enhancement. The pre-reversal, which is a necessary condition for Rayleigh-Taylor instability, which is the main mechanism of generation of the equatorial plasma bubble.

**Keywords:** plasma bubbles, bifurcations, equatorial ionosphere

## LISTA DE FIGURAS

<u>Fig.</u>		<u>Pág.</u>
2.1	Configuração de instabilidade de Rayleigh-Taylor.....	7
2.2	Bolhas de plasma observadas usando OI6300 aeroluminescência noturna óptica.....	9
2.3	Diagrama esquemático mostrando o crescimento 2-D do análogo plasmático da instabilidade de Rayleigh-Taylor na geometria equatorial plasma pode gerar distúrbios de escala muito maior.....	10
2.4	Série de esboços mostrando a hidrodinâmica instabilidade de Rayleigh-Taylor onde o fluido pesado é inicialmente suportado por um fluido mais leve.....	11
3.1	Diagrama esquemático do imageador all-sky e foto do equipamento utilizado localizada em São João do Cariri.....	18
3.2	Localização do imageador all-sky em São João do Cariri (estrela branca) e campo de visão (linhas pontilhadas) no mapa brasileiro. Também é mostrada uma imagem de aeroluminescência do OI6300 mostrando EPBs (512 km × 512 km para 21 de setembro de 2003) .....	21
3.3	Uma imagem 6300 típica a partir de imageador all-aky sobre São João do Cariri em 25/03/2003 às 19:36:34 LT .....	22
3.4	Uma captura de tela do programa IDL usado na execução da animação bolha plasma (esquerda) e janela de animação (à direita) mostrando bolha de plasma com a data e hora de observação .....	23
3.5	As imagens de amostra que representam as diferentes características mencionadas acima; a) surgimento b) múltiplas c) bifurcação d) simples e e) desaparecimento.....	25
3.6	Uma sequência de imagens da noite de 21/09/2003 mostrando a inicialização, a bifurcação e o desaparecimento das bolhas de plasma.....	27
4.1	A figura mostra o número de observações (dias) por mês para cada ano no período de quase onze anos (painel superior) e a ocorrência correspondente (painel médio) e a taxa de ocorrência para cada ano (painel inferior) .....	30

4.2	Gráficos de número das observações para cada mês durante todo o período de estudo (painel superior) com taxas correspondentes de ocorrência (painel inferior) de bolhas de plasma.....	31
4.3	A representação da taxa mensal de ocorrência e variabilidade sazonal de bolhas de plasma de a) múltiplo, b) bifurcação, c) simples.....	34
4.4	Um gráfico da ocorrência de bolhas de plasma para todos os meses de observação e atividade solar para período quase 11 anos de estudo.....	37
4.5	O painel superior representa a média mensal de horas surgimento e desaparecimento das bolhas de plasma e o painel inferior representa a média mensal vezes após o pôr do sol dos horários de surgimento e desaparecimento.....	40
4.6	Um gráfico de todas as horas de surgimento das bolhas de plasma observadas durante todo o período de análise.....	41
4.7	Pontos ajustados mostrando oscilações na bolha de plasma hora de surgimento com períodos de 3 dias (painel superior) e 4,5 dias (painel inferior), em janeiro de 2001 e janeiro de 2008, respectivamente.....	44
4.8	Mostra Oscilações nas horas de surgimento das bolhas de plasma com um período de 5 dias em novembro de 2008.....	45
4.9	mostra os pontos ajustados mostrando oscilações nas bolhas de plasma horas de surgimento com períodos de 10 dias (painel superior) e 14,5 dias (painel inferior), em setembro de 2003 e outubro de 2009 respectivamente.....	46

## LISTA DE TABELAS

<u>Tab.</u>		<u>Pág.</u>
3.1	Filtros informações e altura média para algumas emissões de aeroluminescência.....	20
4.1	Oscilações observaram em hora de início de bolhas de plasma e a frequência de ocorrência dos intervalos de período observado na análise.....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS

A maior parte das abreviaturas utilizadas nesse estudo vem da Língua Inglesa e são listadas a seguir:

2-D	Two-dimensional
ASI	all-sky imager
CCD	charged-coupled detector
CEIS	convective equatorial ionospheric storm
EPB	equatorial plasma bubbles
ESF	equatorial Spread F
EW	east-west
FAI	field aligned irregularities
GPS	global position system
$h'F$	f-layer virtual height
HAS	high solar activity
IDL	Interactive Data Language
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IS	incoherent scatter
LSA	low solar activity
LT	local time
MPB	multiple plasma bubble
MLT	mesosphere-lower thermosphere
OH	hydroxide
PRE	pre-reversal enhancement
PW	planetary wave
QPB	quasi periodic plasma bubble
RTI	Rayleigh-Taylor instability
SPB	single/solitary plasma bubble
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

## LISTA DE SÍMBOLOS

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
$g$	aceleração da gravidade
$L$	comprimento de escala gradiente
$n_0$	Densidade de elétrons de fundo
$V_{in}$	colisão neutro íon
$\gamma$	crescimento da instabilidade RT

## TABELA DE CONTEÚDO

DEDICAÇÃO	
AGRADECIMENTOS	
RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE ABREVIATURAS	
LISTA DE SÍMBOLOS	
	<b><i>Pág.</i></b>
<b>CAPÍTULO UM</b>	
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação.....	3
1.2 Objetivos da pesquisa.....	4
1.3 Estrutura da dissertação.....	4
<b>CAPÍTULO DOIS</b>	
2 Revisão literária da teoria de bolhas de plasma.....	6
2.1 Definição.....	6
2.2 Instabilidades.....	8
2.3 Bolhas de plasma.....	8
2.4 Instabilidade de Rayleigh-Taylor.....	9
2.5 Revisões sobre alguns temas de bolha de plasma.....	12
2.5.1 Pico pré- inversão.....	12
2.5.2 Efeitos de onda de gravidade.....	14
<b>CAPÍTULO TRÊS</b>	
3 Instrumentação e metodologia.....	17
3.1 O imageador “all-sky”.....	17
3.2 Período de observação e área de estudo.....	20
3.3 Observações.....	21
3.4 Ocorrência das bolhas de plasma e suas características.....	23
3.5 Hora de surgimento e desaparecimento das bolhas.....	27
3.6 Variabilidade dia a dia das horas de surgimento.....	28

## **CAPÍTULO QUATRO**

4 Resultados e discussão.....	29
4.1 Introdução.....	29
4.2 Ocorrência das EPBs e suas características.....	29
4.3 Efeitos do ciclo solar.....	37
4.4 Hora de surgimento e desaparecimento das bolhas.....	39
4.5 Variabilidade diária da hora de surgimento.....	41

## **CAPÍTULO CINCO**

5 Conclusão e recomendações.....	48
5.1 Conclusões.....	48
5.2 Recomendações.....	50

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>51</b>
--	-----------

# CAPÍTULO UM

## 1. INTRODUÇÃO

Bolhas de Plasma Equatoriais (EPBs, do Inglês “Equatorial Plasma Bubbles”) são irregularidades de grande escala da região-F ionosféricas. Estas irregularidades são áreas de densidade de plasma reduzido (íons e elétrons) em relação à densidade do plasma ambiente da ionosfera da Terra. As EPBs são responsáveis por degradação das comunicações e navegações trans-ionosféricas por produzirem flutuações na fase e amplitude de ondas eletromagnéticas (Maruyama, 2002; Nava, 2011). As bolhas de plasma se estendem por milhares de quilômetros através do equador magnético com larguras de várias centenas de quilômetros de oeste para leste, e são quase alinhados na direção norte a sul (Webber et al., 1978) dependendo do vento temoférico (Fagundes et al., 1999; Sahai et al., 2000, 2004; Sharma, 2013). As EPBs são geradas na parte inferior da região-F da ionosfera equatorial (Abalde et al., 2004). Acredita-se que o principal mecanismo de geração das EPBs é a instabilidade de Rayleigh-Taylor (RT), que atua no forte gradiente verticalal do plasma que se forma na região-F noturna, um processo que ocorre na baixa ionosfera e faz com que as regiões inferiores praticamente desapareçam (Haerendel, 1973; Sahai et al., 2004; Taori et al., 2010; Taori et al., 2011; Kelley et al., 2011). As bolhas ao atingirem altitude elevadas se estendem para baixas latitudes e podem, por exemplo, ser observada a partir de imagens de aeroluminescência.

Diferentes técnicas têm sido usadas para observar bolhas de plasma equatorial que incluem técnicas de rádio (por exemplo ionossonda, radar, cintilações) e técnicas ópticas (por

exemplo, por observar a aeroluminescências noturna da região-F tais como OI 630 nm, OI 557.7 nm and OI 777.4 nm usando fotômetros convencionais ou sistemas de imageamento).

As emissões do OI 630 nm são importantes porque podem ser usada para visualmente e remotamente observar e estudar o desenvolvimento e a dinâmica das bolhas de plasma equatoriais. Imagens da emissão do OI 630 nm obtidas por sistemas de imageamento mostram faixas escuras (regiões de densidade de plasma reduzido) contra um fundo brilhante que são as assinaturas das bolhas de plasma. Embora as emissões sejam demasiado fraca para serem vistas a olho nu, essas bolhas são prontamente gravadas com uma câmera de 180° de visada que é equipada com filtros de interferências que selecionam os comprimentos de onda das emissões da aeroluminescência provindas da ionosfera (Mendillo et al., 1997; Sahai, 1998; Wiens et al., 2006). Essas imagens da aeroluminescência noturna podem ser usadas para estudar estatisticamente a ocorrência das bolhas de plasma e suas características morfológicas e dinâmicas. Com isso, podemos estudar as variações sazonais e longitudinais que podem ajudar a entender melhor os mecanismos que geram as bolhas de plasma e suas outras características físicas como surgimento, evolução, dinâmica e variabilidades. Características das bolhas de plasma foram estudadas no setor indiano a partir de fotômetros (Mukherjee e Shetti, 2008; Jagtap et al., 2010; Sharma et al., 2013). No setor brasileiro, as bolhas de plasma foram estudadas com fotômetros e imageadores (Fagundes et al., 1999, Sahai et al., 1999, 2000; Pimenta et al., 2001, 2008; Paulino et al., 2007, 20011; Sobral et al., 2011) a fim de entender suas evoluções dinâmica e efeitos da atividade solar sobre as características das bolhas.

Paulino et al. (2011) estudaram sete casos de bolhas de plasma vista com imageador de aeroluminescência e encontram uma relação quase linear entre as distâncias das bolhas e o

comprimento de onda horizontal de ondas de gravidade observadas simultaneamente, o que indica que as ondas de gravidade podem ser um agente iniciador do mecanismo de instabilidade Rayleigh-Taylor.

## **1.1 MOTIVAÇÃO**

A estrutura e a dinâmica da ionosfera da Terra estão sujeitas tanto às variações espaciais quanto temporais oriundas da baixa atmosfera e do meio interplanetário. As mudanças que ocorrem na ionosfera são diferentes em diferentes altitudes devido à ionização relativa, processo de produção e perda e fenômenos de transporte. Irregularidades na ionosfera geralmente incluem condições que não podem ser descritas com precisão por modelos padrão da ionosfera, e eventos que não seguem os padrões convencionais. Como é bastante difícil prever e diagnosticar todos os efeitos e fenômenos que influenciam a dinâmica e estrutura da ionosfera, é interessante fazer estudos estatísticos para identificar padrões dominantes ao longo do tempo (Hargreaves, 1992; Zolesi e Cander, 2014).

O ciclo de atividade solar e variações sazonais, bem como dependência de hora local, são decisivos para ocorrência de bolha de plasma (Hargreaves, 1992; Sahai et al., 2004; Zolesi e Cander, 2014). Neste trabalho, observou-se a ocorrência de bolhas de plasma por um longo período, praticamente, um ciclo solar e foram investigados em detalhes a sazonalidade, efeito da atividade solar, o horário de surgimento e desaparecimento das bolhas e variabilidade dia a dia. Também foi possível observar as estatísticas da ocorrência de bolhas de plasma com múltiplas franjas, bifurcações e estruturas simples (únicas) de bolha de plasma.

## **1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Vários pesquisadores (e.g. Sobral et al., 2002; Sahai et al., 2004; Burke et al., 2004; Wiens et al., 2005; Paulino et al., 2010; Taori et al., 2011; Sharma et al., 2013; Adebessin et al., 2015) estudaram extensivamente o surgimento, a morfologia e a dinâmica do ESF e de bolhas de plasma na região equatorial e em outras faixas de latitude.. Ocorrência, variabilidade diária, dependência do ciclo solar, dinâmica e outras características de bolhas de plasma equatoriais foram identificadas ao redor do mundo (Sahai et al., 1999; Pimenta et al., 2001; Pimenta et al., 2001; Makela et al., 2004; Abalde et al., 2009). No entanto, estudos com um grande banco de dados de imagens de aeroluminescências noturna OI 630 nm não é muito comum. Este estudo relata observações de quase onze anos de imagens de OI 6300 (de setembro de 2000 a dezembro de 2010) cobrindo quase um ciclo solar inteiro, sobre São João do Cariri (7.40°S, 36.50°W). Os objetivos do estudo são

- estudar as variações sazonais das EPBs;
- caracterizar a estrutura dos EPBs;
- analisar os efeitos do ciclo solar nos EPBs;
- estudar os horários de início e final da EPBs;
- estudar a variabilidade dia a dia das horas de início da EPBs.

## **1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Os capítulos aqui darão detalhes sobre o estudo. A dissertação começa com Capítulo Um, que apresenta os conceitos gerais sobre bolhas de plasma equatoriais e as características que podem ser detectadas visualmente a partir das imagens aeroluminescência noturna. O

Capítulo Dois discutirá a teoria da bolha de plasma, formação e características, seguidas de uma apresentação da instabilidade de Rayleigh-Taylor (RT) e, finalmente, a revisão de alguns tópicos de plasma, incluindo o processo de produção e perde. O Capítulo Três segue dando uma breve descrição do imageador all sky, uma visão geral da metodologia de como as observações e caracterizações foram feitas e, por último, a determinação da variabilidade dia a dia as bolhas de plasma. Os Resultados e Discussão sobre a ocorrência de bolha de plasma serão apresentados no Capítulo Quatro. Os horários de surgimento e desaparecimento, tempo de vida médio das bolhas de plasma serão também apresentados neste capítulo. Também serão apresentados os resultados e discussão sobre as estatísticas de ocorrência de estruturas múltiplo, simples e estruturas de bifurcação de bolhas de plasma e, finalmente, a variabilidade dia a dia da hora de início das EPBs. Por último, O Capítulo Cinco irá fornecer uma síntese dos resultados obtidos e algumas recomendações para estudos adicionais.

# CAPÍTULO DOIS

## 2. REVISÃO LITERÁRIA DA TEORIA DE BOLHAS DE PLASMA

### 2.1 DEFINIÇÃO

Instabilidades do plasma da região-F da ionosfera equatorial são geralmente agrupados sob um nome genérico que vem do Inglês, “Equatorial Spread-F” (ESF). Isto decorre das primeiras observações utilizando ionossondas, que mostrou na ocasião, que o eco refletido não exibia um padrão bem-comportado, mas foi "espalhado" nos ionogramas. Um nome baseado literatura da física para este fenômeno é tempestade ionosférica equatorial convectiva (CEIS, do Inglês “convective equatorial ionospheric storm”). O fenômeno ocorre principalmente à noite, apesar de ocorrerem eventos isolados durante o dia (Woodman et al., 1985). A era moderna das pesquisas do ESF (CEIS) começou com uma nota teórica em 1970 com a publicação da primeira compilação de medições feita pelo Observatório de Radar Jicamarca no Peru (Farley et al., 1970; Kelley, 2009).

Espalhamentos da região-F são irregularidades ionosféricas que ocorrem em regiões de baixas latitudes próximo ao equador magnético e que têm efeito sobre a propagação de ondas de rádio na faixa de frequência abaixo de alguns GHz, uma banda usada por navegação e sistemas comunicações tais como satélites de GPS (Sahai et al, 1999; Maruyama, 2002; Yokohama et al., 2014).

As irregularidades espaciais das distribuições de densidade eletrônica distorcem as superfícies de fases constantes das ondas de rádio e levam a variações irregulares da intensidade de campos elétricos em estações receptoras decorrentes da interferência entre ondas adjacentes com, diferentes fases (difração de Fresnel). Este é o fenômeno conhecido

como a cintilação ionosférica. Os efeitos das cintilações decorrentes dos espalhamentos da região-F equatorial são significativos. Cintilações intensas provocam perda de informações e fase das ondas devido ao bloqueio de sinais de satélites, estudos do mecanismos de spread-F são importantes para prever a ocorrência de perturbações nas ondas rádio emitidas por satélite (Maruyama, 2002).

Por um lado, o estudo do ESF engloba uma ampla gama de interesses em pesquisas sobre ionosfera, incluindo instabilidade do plasma (bolhas de plasma), o efeito do dínamo e o acoplamento termosfera-ionosfera. A instabilidade Rayleigh-Taylor é o mecanismo fundamental para iniciar as irregularidades de densidade de plasma e precisa de um gradiente eletrônico (gradiente de plasma) antiparalelo à direção da gravidade. A instabilidade Rayleigh-Taylor assim explicaria apenas a instabilidade na base da ionosfera como é evidente na Figura 2.1.

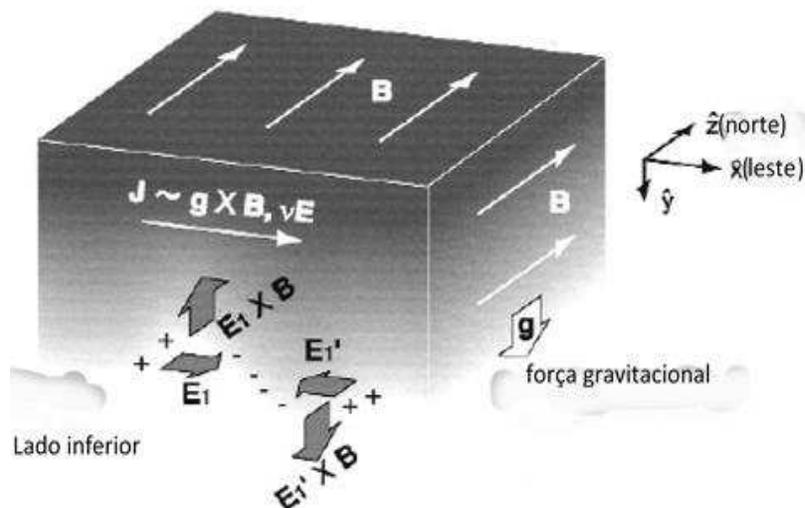


Figura 2.1 Configuração de instabilidade de Rayleigh-Taylor.

FONTE: Maruyama (2002)

## **2.2 INSTABILIDADES**

Quando o meio (ambiente do plasma ionosférico) produz um elemento de 'feedback' positivo, faz com que instabilidades surjam. O meio pode ser perturbado pela ação de forças externas. Então, esta perturbação propaga-se para outras partes do meio e se um destes efeitos for capaz de aumentar a perturbação inicial, então isso será reforçado e aumentará em crescimento positivo (em inglês “positive feedback”). Também pode ser que outros fatores que tendem a reduzir a perturbação, mas que não sejam capazes de superar a crescimento positivo, então uma instabilidade ocorre. Uma instabilidade é mais propensa a desenvolver se crescer rapidamente, a fim de evitar o desvio de energia para outro lugar. A taxa de crescimento é, portanto, uma consideração importante. Devido a esta competição entre os fatores positivos e negativos, o que pode ser não-linear, algum limiar pode ter que ser excedida antes de a instabilidade pode crescer (Hargreaves, 1992).

## **2.3 BOLHAS DE PLASMA**

Bolhas de plasma, também chamadas de bolhas de plasma equatorial (EPBs) ou depleções de plasma, são estruturas em grande escala de densidade de plasma reduzida na região-F da ionosfera que primeiro aparecem no base da região-F (200 km) e se estendem verticalmente para os níveis mais elevados da ionosfera. Esses fenômenos são assim chamados porque eles parecem semelhantes a bolhas subindo através de um fluido quando um fluido pesado está sobre um fluido mais leve (Sultan, 1996; Nava, 2011). Vários estudos foram feitos sobre bolhas de plasma utilizando diferentes técnicas e instrumentos, incluindo radar espalhamento incoerente, análises de ionogramas (ionosondas), detecção via imageadores (imageador “all sky”), sondagens de foguete, medições in situ satélites e sistemas de rede GPS (Pimenta et al., 2001). Uma imagem que mostra um exemplo de

bolhas de plasma observadas utilizando imagem de aeroluminescência noturna OI6300 é mostrada na Figura 2.2. Neste trabalho, a observações de bolhas de plasma utilizando o imageador all sky foram dificultads pela presença de nuvens e fontes de luz externas (Kelley, 2009).



Figura 2.2 Bolhas de plasma observadas usando OI6300 aeroluminescência noturna

#### **2.4 INSTABILIDADE DE RAYLEIGH-TAYLOR**

Dungey (1956) propôs pela primeira vez a instabilidade Rayleigh-Taylor (RTI, do Inglês “Rayleigh-Taylor instability”) como o processo de condução CEIS. Este mecanismo foi temporariamente rejeitado, juntamente com todas as outras teorias candidatas Farley et al. (1970), como parece que foi somente capaz de gerar única estruturas no base do perfil de densidade do plasma F-região. A maneira em que o RTI pode causar irregularidades de crescer na ionosfera equatorial é ilustrada na Figura 2.3, usando um modelo bidimensional.

A Figura 2.1 mostra um diagrama esquemático da instabilidade da plasma no base da ionosfera próximo ao Equador magnético. Desde que as linhas de campo magnético são orientadas horizontalmente para o norte e o plasma da região-F pode ser aproximada como tendo uma distribuição uniforme ao longo da linha de campo devido a difusão no equador magnético, este sistema pode ser representado razoavelmente bem por uma aproximação de 2-D num plano vertical leste para oeste contendo a linha do Equador, como visto na Figura 2.3.

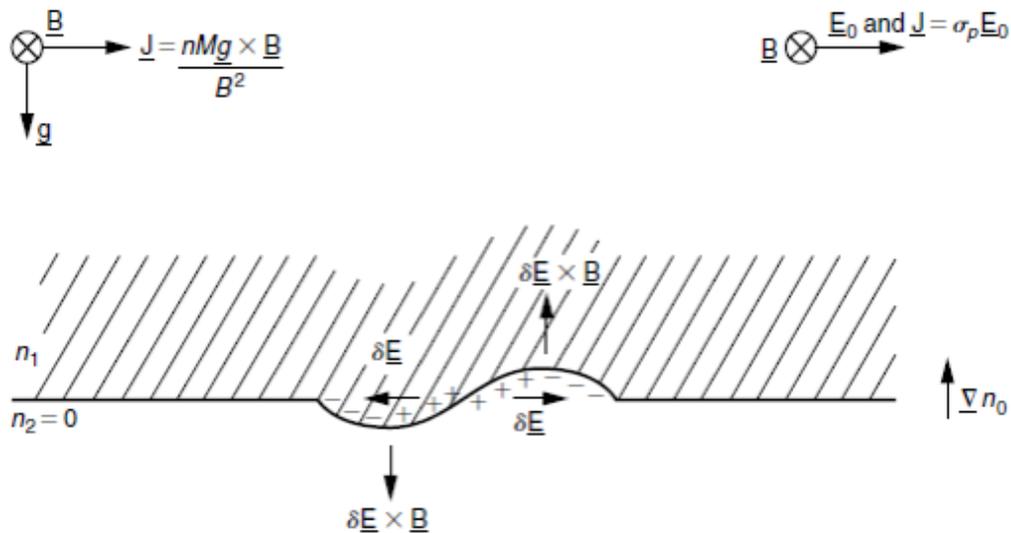


Figura 2.3 Diagrama esquemático mostrando o crescimento 2-D do análogo plasmático da instabilidade de Rayleigh-Taylor na geometria equatorial.

FONTE: Kelly (2009)

Na Figura 2.4, vemos um fenômeno hidrodinâmico análogo ilustrado na série dos desenhos. A Figura 2.1 mostra a corrente eléctrica para o leste gerado pela diferença de forças gravitacionais que actuam sobre os elétrons e íons. Suponha que uma pequena flutuação de densidade é produzida no lado inferior da ionosfera por alguma razão, causando uma ondulação da superfície das isolinhas de densidade. Os íons movem-se para

direção mencionada acima (direção da corrente eléctrica), assim os elétrons e íons se separados, resultando em acúmulo de carga positiva ou negativa local. Estes campos elétricos de polarização localizados têm orientações para leste e oeste em regiões de baixa e alta densidade respectivamente. Então a deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  devido a este campo de polarização será para cima e para baixo nas regiões de baixa e alta densidade respectivamente. Como resultado, a flutuação de densidade é amplificada. Esta condição é chamada de instabilidade de plasma com taxa de crescimento, como mostrado na Equação 2.1. Ao mesmo tempo, a deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  empurra o plasma para cima (Maruyama, 2002; Kelley, 2009).

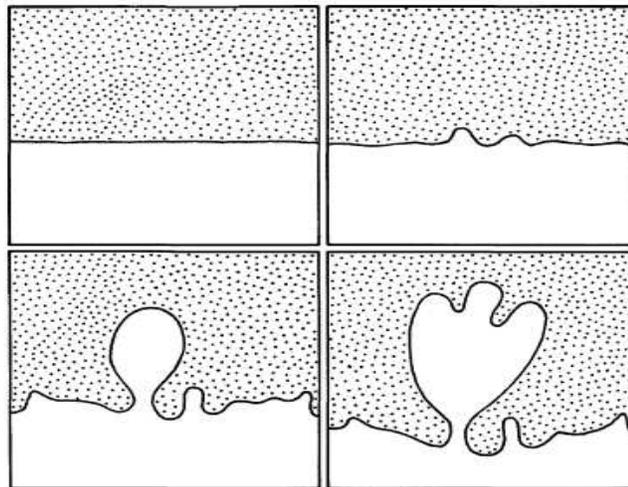


Figura 2.4 Série de esboços mostrando a hidrodinâmica instabilidade de Rayleigh-Taylor onde o fluido pesado é inicialmente suportado por um fluido mais leve.

FONTE: Kelley (2009)

O parâmetro  $\gamma$  é a taxa de crescimento da instabilidade e é dado por

$$\gamma = -\frac{g}{Lv_{in}} \quad 2.1$$

neste caso  $L = \left[ \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial z} \right]^{-1}$  é a escala de comprimento do gradiente de plasma,  $g$  é a

aceleração gravitacional,  $v_{in}$  a frequência de colisão íon-neutro, e  $n_o$  a densidade de elétrons (Maruyama, 2002; Kelley, 2009). O eixo z é positivo no sentido ascendente. Esta equação afirma que quando a força gravitacional eo gradiente de densidade eletrônica são anti-paralelos, a taxa de crescimento é positiva (Observe o sinal negativo do lado direito da equação) e que sua magnitude é proporcional ao gradiente de densidade (Maruyama, 2002).

Desde que o gradiente de densidade se inverte acima do pico da região-F , a flutuação não cresce ea ionosfera se torna estável. O gradiente de densidade na base da região-F aumenta rapidamente devido à recombinação após as reações de ionização cessarem depois pôr do sol. As bolhas de plasma, portanto, são essencialmente um fenômeno noturno. O termo para efeitos gravitacionais contém a frequência de colisão íons-partículas neutras em seu denominador, que é determinada pelo perfil vertical da atmosfera neutra. Como a frequência de colisão íons-partículas neutras diminui com a altitude, a ionosfera torna-se mais instável como resultado da camada ionosférica crescente (Maruyama, 2002).

## **2.5 REVISÃO SOBRE ALGUNS TEMAS DE BOLHA DE PLASMA**

### **2.5.1 PICO PRÉ-INVERSÃO**

O movimento da ionosfera equatorial devido à deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  é geralmente para cima durante o dia e para baixo a noite. Este campo elétrico é produzido pelo efeito do dínamo dos ventos neutros da região-E. A ionosfera de baixas latitudes é suscetível a instabilidades durante as horas após o pôr do sol. A ausência de luz solar leva a uma recombinação muito mais rápida em altitudes mais baixas. Isso faz com que um forte gradiente de densidade de plasma ascendente exista entre a ionosfera inferior e a região-F superior. Ao entardecer, a

velocidade de deriva para cima aumenta entre uma a duas horas antes da inversão de deriva, e isso é conhecido como o pico pré-inversão (PRE, do Inglês “pre-reversal enhancement”) (Abdu, 2001; Maruyama, 2002; Dabas et al., 2003). Sob a ação da PRE, a ionosfera é rapidamente erguida e desestabiliza ainda mais, em seguida, o plasma menos denso das alturas inferiores pode subir verticalmente sob a forma de bolhas de plasma equatoriais (Abdu, 2001; Dabas et al., 2003).

O PRE constitui um importante mecanismo de alimentação para a geração de irregularidade da região-F. Este aumento do campo elétrico zonal ocorre durante todas as estações, exceto nos solstícios e mínimos de atividades solar (Kelley, 2009). A breve duração do PRE tem um forte campo elétrico para o leste e é significativa desde que o plasma da camada F é empurrado para cima para maiores altitudes onde a recombinação e colisões são raras e, portanto, a taxa de crescimento da instabilidade de Rayleigh-Taylor é grande (Kelley, 2009).

Medições de densidade eletrônica e de deriva de íons são usadas para examinar a correlação entre as variações / sazonais longitudinais noturnas do PRE e deriva vertical do plasma próximo ao equador magnético (Li et al., 2008). Análises e observações mostraram que a ocorrência de bolha de plasma equatorial é aproximadamente proporcional ao PRE, e que variações do PRE desempenham um papel importante na distribuição global da ocorrência de bolha de plasma (Li et al., 2008).

A associação da ascensão rápida da região-F equatorial após o por do sol com a ocorrência de spread-F foi sugerida pelas observações iniciais. Alguns estudos têm demonstrado que a altura da camada noturna F é um parâmetro importante para controlar a geração de spread-F (por exemplo Abdu et al., 1983; Kelley e Maruyama, 1992). Esta altura é

determinada pela velocidade de deriva vertical equatorial. Dabas et al. (1998, 2003, 2007) sugeriram que perto do Equador magnético, os valores de limiar de  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  podem ser usados para a previsão de noite a noite da ocorrência de cintilação. Fejer et al. (1999) fizeram observações de radar de espalhamento de Jicamarca para estudar os efeitos da velocidade da deriva vertical da região-F sobre a geração e a evolução do ESF e explicaram a ocorrência de irregularidades como resultante dos efeitos correspondentes sobre as derivas verticais noturnas.

Whalen (2003) analisou a dependência do ESF na deriva vertical e informou que a ocorrência do ESF é dependente e aumenta aproximadamente linearmente com o máximo  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  durante o solstício de junho equinócios. Como sugerido por Basu et al., (1996), a deriva vertical da noite é muito importante na geração de irregularidades e parecem ter uma relação direta com a ocorrência de ESF (Li et al., 2008).

### **2.5.2 EFEITOS DE ONDA DE GRAVIDADE**

Ondas de gravidade atmosféricas (GW, do Inglês “gravity waves”) só podem existir quando a atmosfera é estavelmente estratificada para que uma parcela de fluido possa sofrer oscilações verticais de fluabilidade. As fontes de ondas de gravidade pode incluir fluxo sobre terrenos montanhosos, fluxo sobre nuvens convectivas e cisalhamento vertical de vento. Boa parte das fontes de ondas de gravidade está na troposfera. Porém, as ondas de gravidade propagam-se para a estratosfera e na mesosfera, dependendo das condições de vento e temperatura da atmosfera básica. Ondas de gravidade são encontradas em todos os lugares na atmosfera e se propagam tanto vertical como horizontalmente. Acredita-se que as ondas de gravidade sejam mecanismos importantes para o transporte de energia e momentum de uma região para outra da (Wallace e Hobbs, 2006; Holton, 2004).

Observações de temperatura fornecem evidência clara de propagação ascendente das ondas de gravidade, com período de onda de 20 min – 2 h. As observações simultâneas de deriva da altura instabilidade alinhada ao campo (FAI, do Inglês “field aligned instability”), da região-E que foram atribuídas à deriva de  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ , mostraram variações semelhantes. Analisando o comprimento de onda vertical obtido a partir do perfil de altura dos dados de temperatura, Taori et. al., (2011) encontraram uma correlação notavelmente alta entre a temperatura e as variações da deriva do FAI da região-E que indicam que há propagação de ondas de gravidade da atmosfera média para a região-E. Nas noites de tais observações, Taori et al., (2011) observaram atividades periódicas de pluma que mostraram uma boa correlação entre os períodos de ondas de gravidade na atmosfera média, região-E FAI deriva e a separação temporal da ocorrência de plumas que suportam os efeitos das ondas de gravidade sobre a geração de ESF.

Acredita-se que o ESF seja causado por ondas de gravidade na atmosfera neutra que têm o mesmo comprimento de onda horizontal (Takahashi et al., 2009). Uma das questões relacionadas à ocorrência de GWs é sua capacidade de inicializar a geração de bolhas de plasma (Taori et al., 2011). As ondas de gravidade propagando-se para cima, presumivelmente geradas em altitudes atmosféricas mais baixas, são candidatas prováveis para o iniciar o mecanismo do RTI (Taori et al., 2011).

Trabalhos (e.g. DasGupta et al., 2008; Tsunoda et al., 2010) demonstraram a presença de estruturas em grande escala de onda antes do início da EPB. Estudos de simulação foram muito bem-sucedidos em reproduzir algumas das características observadas do ESF nos mapas de radar de espalhamento (Huang e Kelley, 1996).

Kudeki et al., (2007) sugeriram o fluxo de cisalhamento como sendo capaz de gerar estruturas de plasma na base da região-F e fornecer perturbação sementes que são propícias para o crescimento de instabilidade RT. A vantagem deste mecanismo é que a semente vem da instabilidade de cisalhamento gerada pelo fluxo de cisalhamento como uma consequência natural da ionosfera após o pôr do sol e, portanto, não precisa de agente externo, como as ondas de gravidade. Esses estudos, no entanto, não levam em conta da irregularidade periódicas tendo separação espacial mais de 100 km e, portanto, o papel de ondas de gravidade continua a ser tão importante como originalmente pensado. Também é verdade que as ondas de gravidade estão frequentemente presentes na ionosfera (Paulino et al., 2016), quaisquer que sejam suas origens, suas importâncias precisam de uma avaliação adequada. Mais observações são necessárias para estudar o papel da propagação de ondas de gravidade na geração de EPB para garantir sua presença/ausência e avaliar seu verdadeiro papel na inicialização de instabilidade RT, apesar de alguns esforços têm sido feitos nessa direção (Fritts et al., 2009; Taori et al., 2011).

## CAPÍTULO TRÊS

### 3. INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA

A descrição do instrumento utilizado para a aquisição das imagens das OI 6300 emissões da aeroluminescência noturnas e o método usado para obter a ocorrência e as características das bolhas de plasma equatorial são discutidos neste capítulo. O imageador “All-sky” foi utilizado para observar imagens do OI 630 nm de setembro de 2000 a dezembro de 2010 sobre São João do Cariri (7,40° S and 36,50° W), Brasil.

#### 3.1 O IMAGEADOR “ALL-SKY”

O imageador “All-sky” é um instrumento que fornece mapas monocromáticos de intensificação de aurora e emissões da aeroluminescência para várias linhas de interesse. A capacidade do imageador “All-sky” em ajustar eletronicamente o comprimento de onda de seus filtros em todo o espectro eletromagnético visível e infravermelho faz dele um candidato ideal para tratamento de imagens hiperespectrais (Sigernes et al., 2000).

A técnica de imagem com amplo campo de visão oferece uma capacidade única para caracterizar simultaneamente estruturas de bolhas de plasma sobre regiões abrangendo vários milhares de quilômetros (Pimenta et al., 2003). Com os recentes avanços na tecnologia CCD (do Inglês, “Charge Coupled-Device”), a capacidade do ASI (do Inglês “all-sky imager”) para observar a aeroluminescência na termosfera/ionosfera sobre grandes áreas geográficas (1,742,400 km<sup>2</sup> a 250 km de altitude) melhorou consideravelmente a resolução das imagens que permite com que diversos fenômenos de aeroluminescência podem ser observados (Mendillo et al., 1997; Taylor et al., 1997; Pimenta et al., 2001b, Pimenta et al., 2003). Esta seção descreve o desenho óptico e desempenho do instrumento

utilizado para fazer imagens de aeroluminescência, principalmente para emissão do OI6300 que é o foco deste trabalho..

A Figura 3.1 mostra o sistema montado e detalhado do ASI, uma imagem do equipamento utilizado e sua localização em São João do Cariri. Observações de aeroluminescência usando sistema um ASI está em operação em São João do Cariri desde setembro de 2000 que, por sua vez, tem um esquema semelhante ao mostrado na Figura 3.1. Este equipamento é um instrumento óptico que utiliza imagens de alta resolução e foi projetado com uma lente olho de peixe, uma câmera CCD (do Inglês “charge-coupled device”), um sistema óptico e uma roda de filtro de interferência. Todo o sistema é sendo controlado por um microcomputador.

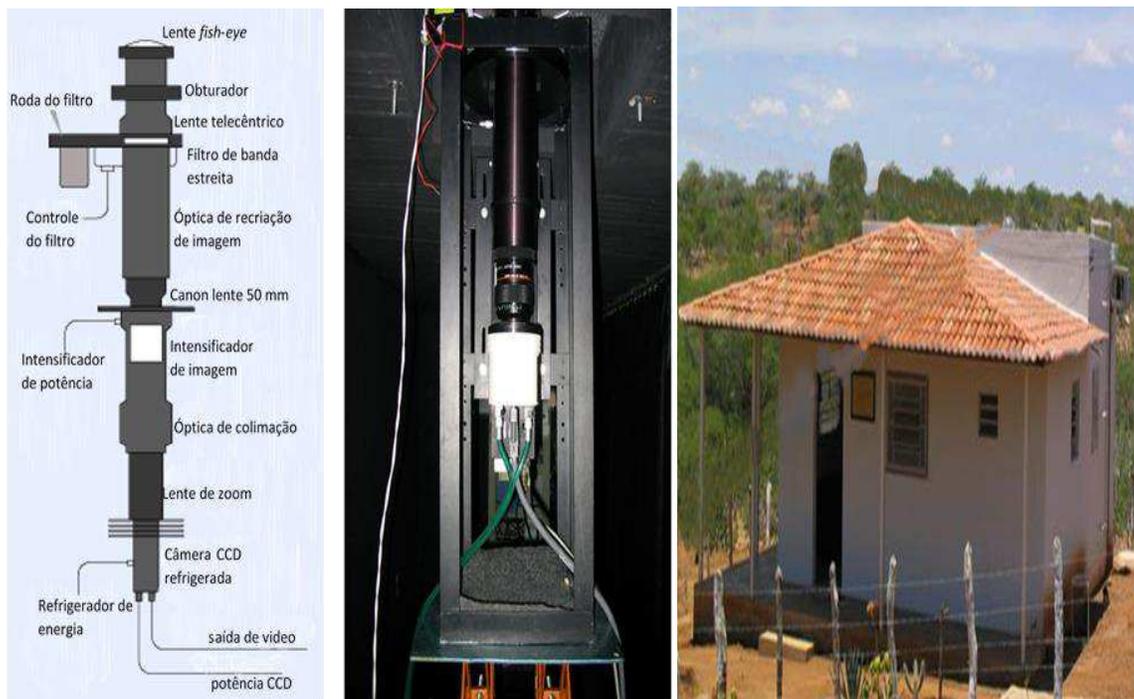


Figura 3.1 Diagrama esquemático do imageador all-sky e foto do equipamento utilizado localizada em São João do Cariri.

O imageador tem uma CCD de área igual a  $6,45\text{cm}^2$ , matriz iluminada de preto de alta resolução  $1024 \times 1024$  com tamanho de pixel de 14 bits. A alta eficiência quântica (80% em comprimentos de onda visíveis), nível baixo de ruído escuro (0,5 elétrons /pixels/ s), ruído de leitura baixo (rms de 15 elétrons) e alta linearidade (0,05%) torna possível obter medições de aeroluminescência.

O imageador usa um Lente telecêntrica rápida ( $f / 4$ ) com visão de  $180^\circ$  que é capaz de obter uma alta relação sinal-ruído de imagens de 20:1, com integração de tempo de 15 s para emissão do OH no infravermelho próximo (banda de passagem de nm 715-930) e 90 s para emissões de OI6300. As imagens foram arranjadas para uma resolução de  $512 \times 512$  para melhorar a relação sinal ruído. Para obter informações físicas das imagens, uma calibração espacial precisa é essencial calibração é necessária e essencial. Isto pode ser feito usando as estrelas em cada imagem como referência e fazendo comparações com mapas astronômicos. A função da lente é determinada através da realização de um ajuste de mínimos quadrados medindo posição das estrelas na imagem original (Wrasse et al. 2006a).

Sabe-se que existem várias camadas de aeroluminescência atmosférica que resultam de reações quimioluminescentes de espécies atômicas e moleculares na mesosfera e baixa termosfera. A Tabela 3.1 lista as características das principais emissões na faixa de 80-100 km de altura. Estas emissões apresentam consideráveis flutuações espaciais e temporais que têm sido atribuídas à passagem de ondas de gravidade atmosféricas através das camadas de aeroluminescência (Krassovsky e Shagaev, 1977; Takahashi et al., 1985; Taylor e Garcia, 1995). De interesse específico é a aeroluminescência noturna do OI6300

resultando do processo de recombinação dissociativa mostrado abaixo na qual surgem da região-F de baixa latitude na faixa de altura de 250-300 km (Pimenta et al., 2001).

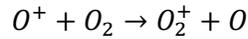


Tabela 3.1 Filtros informações e altura média para algumas emissões de aeroluminescência FONTE: Medeiros (2001)

Filtro	Comprimento de onda do filtro (nm)	Largura de banda do filtro (nm)	Altura da camada (km)
OI	557.7	2.67	~96
Na	589.0	2.0	~90
OI	630.0	2.37	~250
NIR OH	715-930	215	~87
O <sub>2</sub> (0,1)	856.5	12.0	~94
fundo	572.5	2.65	-

### 3.2 PERÍODO DE OBSERVAÇÃO E ÁREA DE ESTUDO

O imageador que está localizado em São João do Cariri (7,40°S, 36,50°W) é operado pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) em cooperação com Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A Figura 3.2 mostra bolhas de plasma observadas sobre São João do Cariri em parte do mapa do Brasil. Esta imagem foi linearizada com uma resolução

de 1536 km X 1536 km e centrada sobre o observatório (asterisco branco). As imagens usadas neste estudo correspondem a um ângulo de visão de  $170^\circ$  e um círculo de diâmetro de  $\sim 2500$  km a uma altura de  $\sim 250$  km.

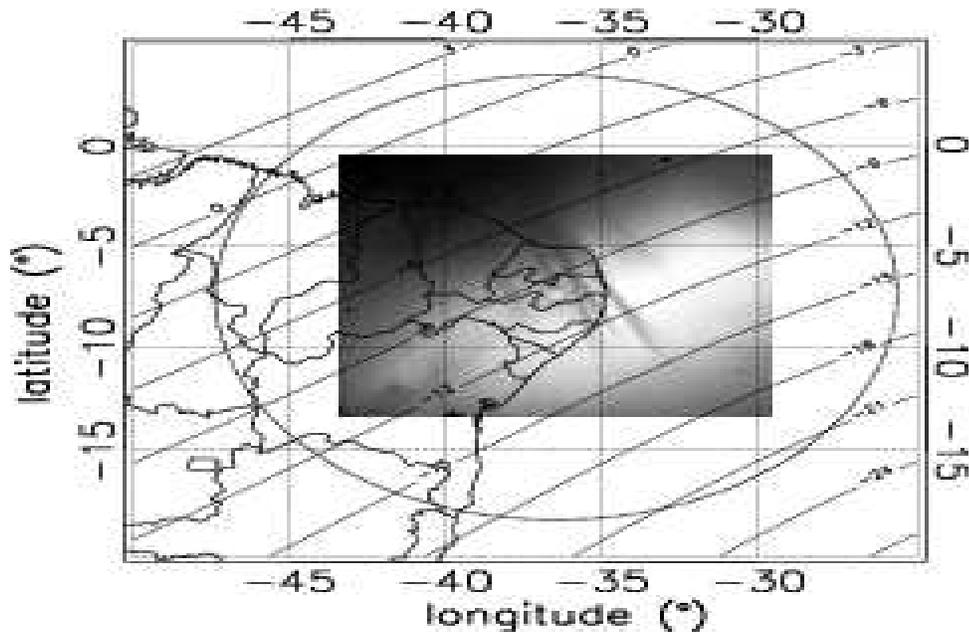


Figura 3.2 Localização do imageador all-sky em São João do Cariri (estrela branca) e campo de visão (linhas pontilhadas) no mapa brasileiro. Também é mostrada uma imagem de aeroluminescência do OI6300 mostrando EPBs ( $512 \text{ km} \times 512 \text{ km}$  para 21 de setembro de 2003).

### 3.3 OBSERVAÇÕES

As observações das bolhas de plasma equatoriais e suas características foram realizadas durante o período de setembro de 2000 a dezembro de 2005, e do período de setembro de 2006 a dezembro de 2010. A Figura 3 mostra uma imagem de OI 6300 aeroluminescência noturna, a partir do qual as estruturas de bolhas de plasma pode ser observadas (estrias escurecidas, na imagem o norte está acima, o oeste é à esquerda, o zenith é o centro eo horizonte é o círculo).

Nesta mesma imagem, vemos uma bolha de plasma com três estruturas bem definidas (múltipla) cruzando o céu do lado esquerdo (oeste) para o leste (direita) e quase alinhado na direção do campo geomagnético. As EPBs são visíveis nas imagens devido ao contraste entre elas (região de pequena densidade de plasma) e o fundo de emissão OI6300. Elas são geralmente bem definidas, mas às vezes difíceis de observar.

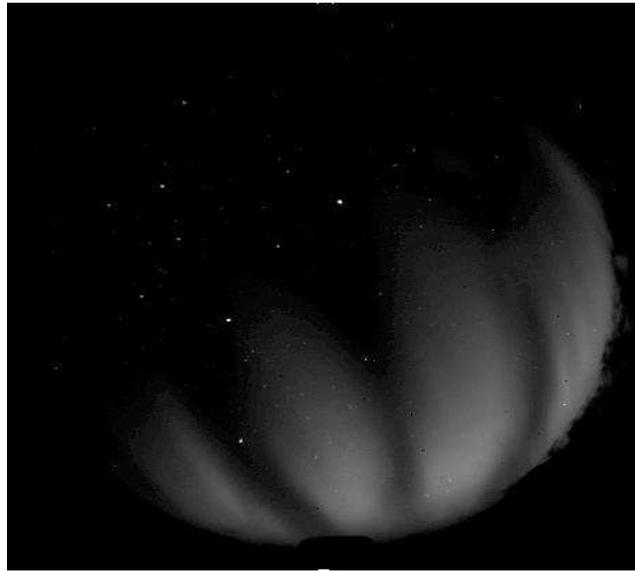


Figura 3.3 Uma imagem 6300 típica a partir de imageador all-aky sobre São João do Cariri em 25/03/2003 às 19:36:34 LT.

As imagens das emissões OI6300 coletadas pelo ASI são armazenadas de acordo com as noites que as medições foram feitas em um microcomputador. As imagens captadas para cada noite de um mês são armazenadas em uma pasta específica. Em seguida são arquivados de acordo com os meses do ano e finalmente, em anos. Cada imagem é gravada com o nome da emissão, ano, mês, dia, hora, minuto e segundo. Com o auxílio de um programa IDL (Viewer\_CCD2Lume) escrito pelo Dr. Delano Gobbi em 2000 e posteriormente modificado para o nosso propósito específico em 2006 pelo Dr. Amauri Fragoso, a série de imagens de uma noite em particular pode ser animada para mostrar a

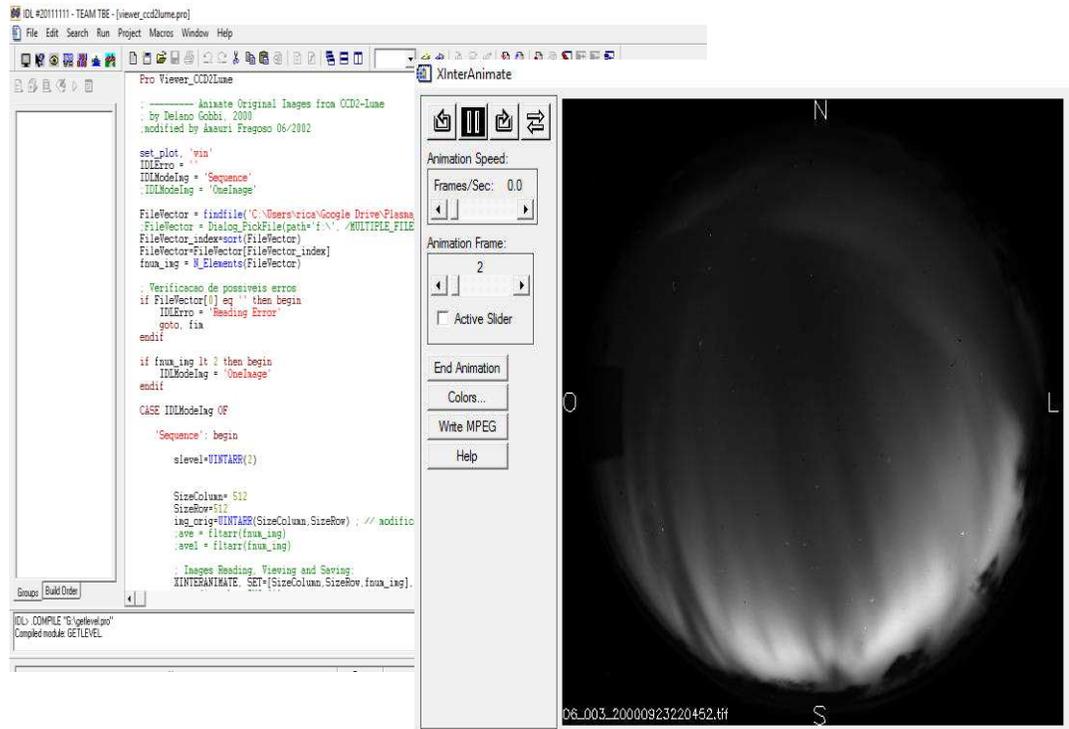


Figura 3.4 Uma captura de tela do programa IDL usado na execução da animação bolha plasma (esquerda) e janela de animação (à direita) mostrando bolha de plasma com a data e hora de observação

morfologia as bolhas de plasma que permite a observação do surgimento, evolução, desaparecimento e características (como estruturas simples, múltiplas e bifurcações) das bolhas de plasma é mostrado na Figura 3.4. O programa para executar a animação das imagens do OI6300 da aeroluminescência noturna para uma noite e a janela sobreposta mostra a animação das imagens.

### 3.4 OCORRÊNCIA DAS BOLHAS DE PLASMA E SUAS CARACTERÍSTICAS

As características como surgimento, evolução, desaparecimento e estruturas (simples, múltiplas e bifurcações) são mostradas na Figura 3.5. EPBs são muitas vezes tão definidas que muitas vezes podem ser vistas claramente, mas às vezes eles são muito fracas para ser vista ou até mesmo ausente em certos casos. Para as estatísticas de ocorrência de bolhas de plasma e suas características, uma EPB é dita ter ocorrido se for observada visualmente em

qualquer lugar dentro do campo de visão do imageador naquela noite. EPB é dito ter ocorrido em uma determinada noite, se a uma assinatura da bolha de plasma é vista na animação, independentemente de quando ele aparece ou quanto tempo ele persiste no campo de visão do imageador para aquela noite. Quando uma estrutura representando uma bolha de plasma ou sua característica é observada, ela é copiada para uma pasta nomeada e contada para taxa de ocorrência.

As características; hora de surgimento, hora da desaparecimento, estruturas simples, múltiplas e bifurcações também podem ser observadas visualmente na animação. Se uma ou mais das características é vista em uma noite particular, ainda é contada como uma para a ocorrência EPB como é possível ver mais de uma das cinco características em uma noite, podem ser anotadas em uma noite. Então, contando todas as imagens copiadas para as pastas diferentes que representam as características e ignorando duplicatas (uma bolha de plasma por noite) durante todo o período de observação, obtemos as estatísticas de ocorrência para os onze anos de observação. A data da ocorrência da bolha é a data do dia antes da meia-noite no qual ela ocorreu.

A inicialização (Figura 3.5 a) é observada quando vemos a bolha de plasma entrando no campo de visão do imageador, a hora de desaparecimento (Figura 3.5 e) por outro lado, é quando a bolha de plasma se dissipa antes de atingir a borda oriental da câmera em uma clara, noite sem nuvens. Estruturas múltiplas (Figura 3.4 b) surgem Quando vemos mais de um estria nas imagens, enquanto estruturas simples mostram apenas uma única estria (figura d 3.5 d), durante a noite. Bifurcações (Figura 3.5 c) são ramos na estrutura da bolha de plasma

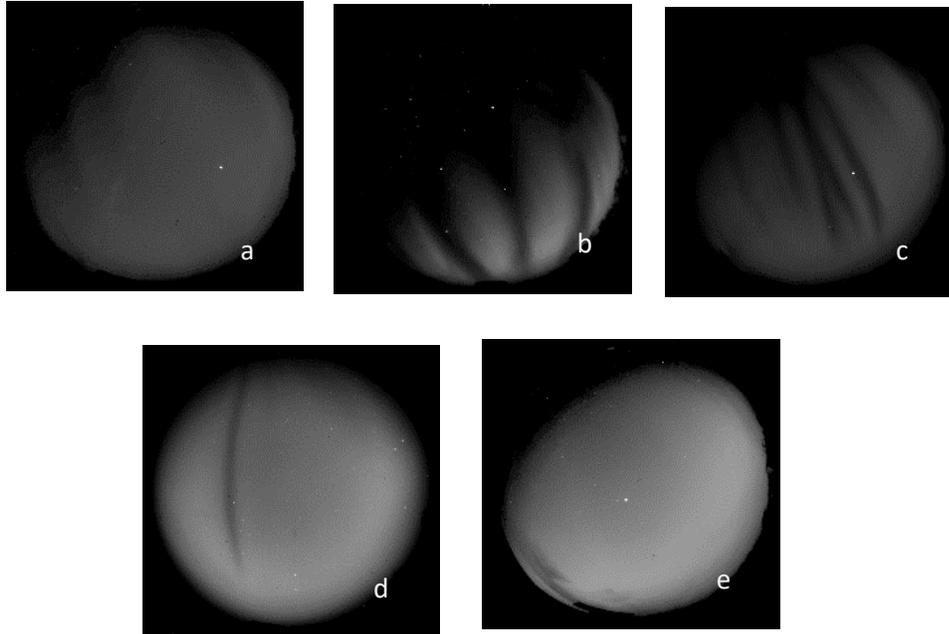


Figura. 3.5. As imagens de amostra que representam as diferentes características mencionadas acima; a) surgimento b) múltiplas c) bifurcação d) simples e e) desaparecimento

As estatísticas de características de bolha de plasma, inicialização, estruturas múltiplas, simples, bifurcação e hora de desaparecimento, como pode ser vista a partir das imagens de OI6300 emissão da aeroluminescência noturna são adicionados para cada mês para cada característica para os onze anos de estudo. A taxa de ocorrência é a razão entre a ocorrência ea observação para cada característica multiplicada por 100. Por exemplo, os surgimentos das bolhas são representadas pelo número de dias (ocorrência), onde as bolhas de plasma são vistas surgindo no campo de visão do imageador (borda noroeste da imagem) dividido pelo número das noites das observações multiplicado por 100 dá a taxa de ocorrência do surgimento.

A imagem que representa o surgimento da bolha é copiada para uma pasta nomeada para ser contada, o número de imagens copiadas para um mês representa a ocorrência de inicialização de bolhas de plasma para esse mês. Uma bolha de plasma múltipla ocorre

quando uma série de bolhas de plasma são vistas passando sobre o campo de vista do gerador de imagens de uma dada noite. Na mesma noite, apenas uma das bolhas de plasma múltiplas ou únicas foi observada no presente estudo, no entanto, a bifurcação pode ser observadas em bolhas múltiplas ou simples e assim pode ocorrer qualquer noite. As imagens que mostram estas estruturas são registradas nas estatísticas de surgimento das bolhas. O desaparecimento das bolhas de plasma é quando em uma uma clara, noite sem nuvens, uma bolha que está se movendo desaparece do campo de visão do imageador antes de atingir o horizonte leste.

A última imagem que mostra a bolha de plasma antes que ele desapareça é copiada para aquela noite e posteriormente contado e tratada para a ocorrência de desaparecimento das bolhas de plasma.

A Figura 3.6 mostra uma sequência das imagens sobre São João do Cariri em 21 de outubro de 2003. A aparência da bolha de plasma no campo de visão da câmera às 19:13 LT (hora local do inglês, local time) é indicada na primeira imagem pelo oval vermelho e a partir daí a bolha desenvolve, cruzando o campo de visão do oeste para leste. Às 19:33 LT, a bolha de plasma começa a bifurcar (mostrada pelo círculo amarelo) e mais de uma estria (múltiplas) é visto durante a noite. A bolha de plasma dissipa-se completamente após 21:53 LT.

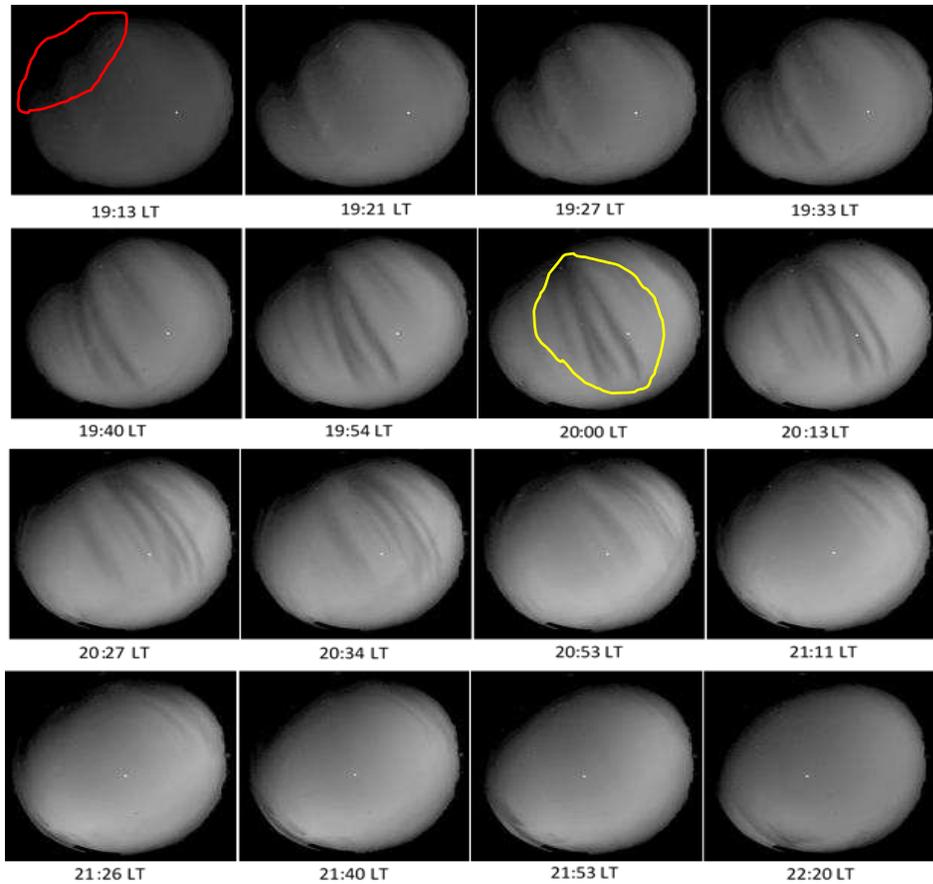


Figura 3.6. Uma seqüência de imagens da noite de 21/09/2003 mostrando a inicialização, a bifurcação e o desaparecimento das bolhas de plasma. Ver texto para discussão.

### 3.5 HORA DE SURGIMENTO E DESAPARECIMENTO DAS BOLHAS

As datas e horas (LT) atribuídas para a ocorrência referem-se às datas e horários em que as imagens que retratam a ocorrência de bolhas e características de plasma foram observadas. De muito interesse são as horas de surgimento e fim das bolhas que dão o tempo de aparição das bolhas de plasma no campo de visão do imageador. Com esses registros foram calculados mensalmente o período de ocorrência das bolhas de plasma. Foram também considerados o horário do pôr do sol em São João do Cariri para estudar a evolução temporal do surgimento e término das atividades das bolhas de plasma ao longo do ano.

### **3.6 VARIABILIDADE DIA A DIA DAS HORAS DE SURGIMENTO**

Os horários de surgimento das bolhas de plasma observados nesse estudo são extraídos dos arquivos de imagens, como mencionado nas seções anteriores. As horas locais para todos de início das bolhas são obtidas a partir dos nomes dos arquivos das imagens. O tamanho desses banco de dados nos dá a oportunidade de estudar a variabilidade do dia a dia da ocorrência de bolhas de plasma. Podemos comparar o padrão com diferentes fenômenos atmosféricos/ionosféricos, atividades solares e distúrbios magnéticos para determinar como a ocorrência de bolhas de plasma varia de dia a dia. Usando o método de ajuste de mínimos quadrados, oscilações com períodos de vários dias foram obtidas nas horas de surgimento. Estes periodicidades foram comparados períodos de onda planetárias para determinar o efeito de tais oscilações na ionosfera e mais especificamente sobre as variações na hora de surgimento das bolhas de plasma.

# CAPÍTULO QUATRO

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Observações da emissão do OI6300 da aeroluminescência noturna realizadas em São João do Cariri foram feitas para um total de 1107 noites e cerca de 58,5% dessas noites mostraram assinaturas típicas de bolhas de plasma. Os resultados das taxas de ocorrência de bolhas de plasma e suas características durante o ciclo solar 23-24, sobre a região equatorial brasileira são apresentados a seguir.

### 4.2 OCORRÊNCIA DAS EPBs E SUAS CARACTERÍSTICAS

A Figura 4.1 mostra as observações anuais (painel superior), ocorrência (painel central) e taxas de ocorrência (no painel inferior) para os anos de estudo. Essa figura dá o número de dias de observações para cada ano e em quantos desses dias as bolhas de plasma foram detectadas. A Figura 4.1 mostra mais observações nos anos de 2003, 2008 e 2009, enquanto, houve menos observações nos anos de 2000 e 2006. Deve ser mencionado que as diferenças no número de dias de observações foram devido às falhas técnicas nas observações e/ou as condições climáticas. A taxa de ocorrência (93,5%) para o ano 2000 é a mais elevada, mesmo que tenha um dos menores números de dias de observação. Isso porque o período completo de observações em 2000 foi de setembro a dezembro, que é período que tem maior ocorrência de bolha de plasma. Por outro lado, em 2006 o período de observação foi semelhante a 2000, mas teve apenas 59,57% taxa de ocorrência de bolhas de plasma. A menor taxa de ocorrência das EPBs foi de 48,6% em 2007, mesmo com um número das observações sendo um dos mais altos.

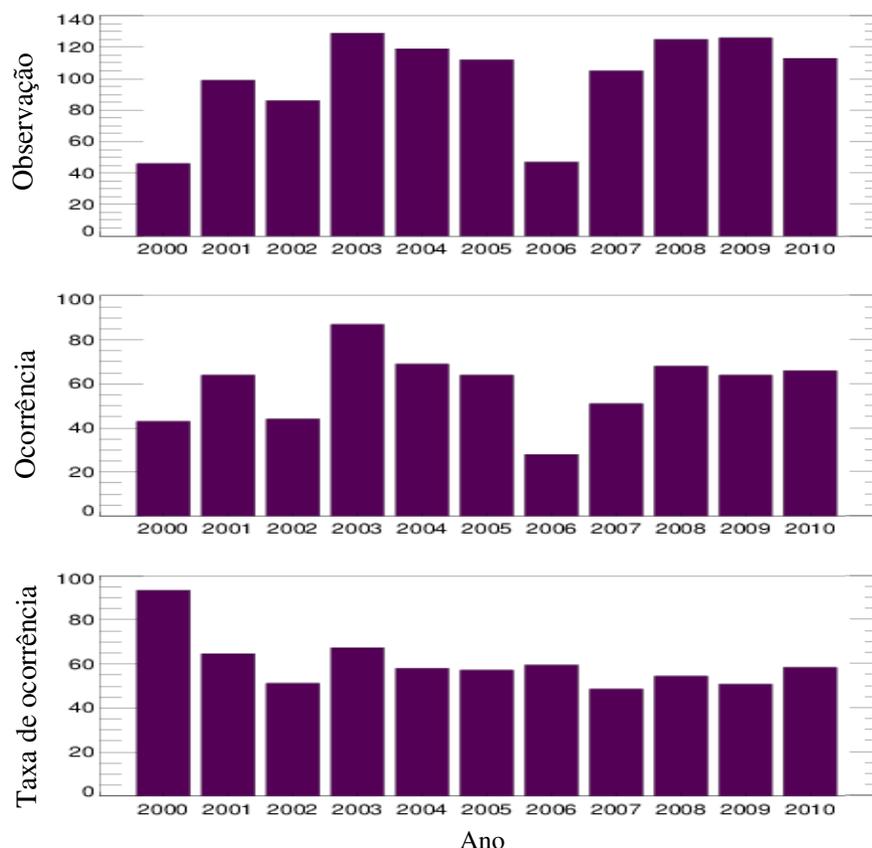


Figura 4.1 a figura mostra o número de observações (dias) por mês para cada ano no período de quase onze anos (painel superior) e a ocorrência correspondente (painel médio) e a taxa de ocorrência para cada ano (painel inferior)

Os resultados da Figura 4.1 é reorganizado na Figura 4.2 considerando a ocorrência ao longo do ano para todos os meses de observações a fim de estudar a ocorrência sazonal (variabilidade) das EPBs. O painel superior mostra as observações mensais e o painel inferior mostra a taxa de ocorrência das EPBs para o período de quase onze anos de observação durante o ciclo solar 23 - 24 (que nos dá dois períodos de atividade solar, alta e baixa para estudar o que será discutido mais tarde). Este resultado mostra uma clara variabilidade sazonal na ocorrência das EPBs, em que podemos ver ocorrência máxima das

EPBs nos equinócios e nos meses verão (setembro-abril) e nos meses do inverno (maio-agosto) podemos observar uma menor ocorrência de EPBs.

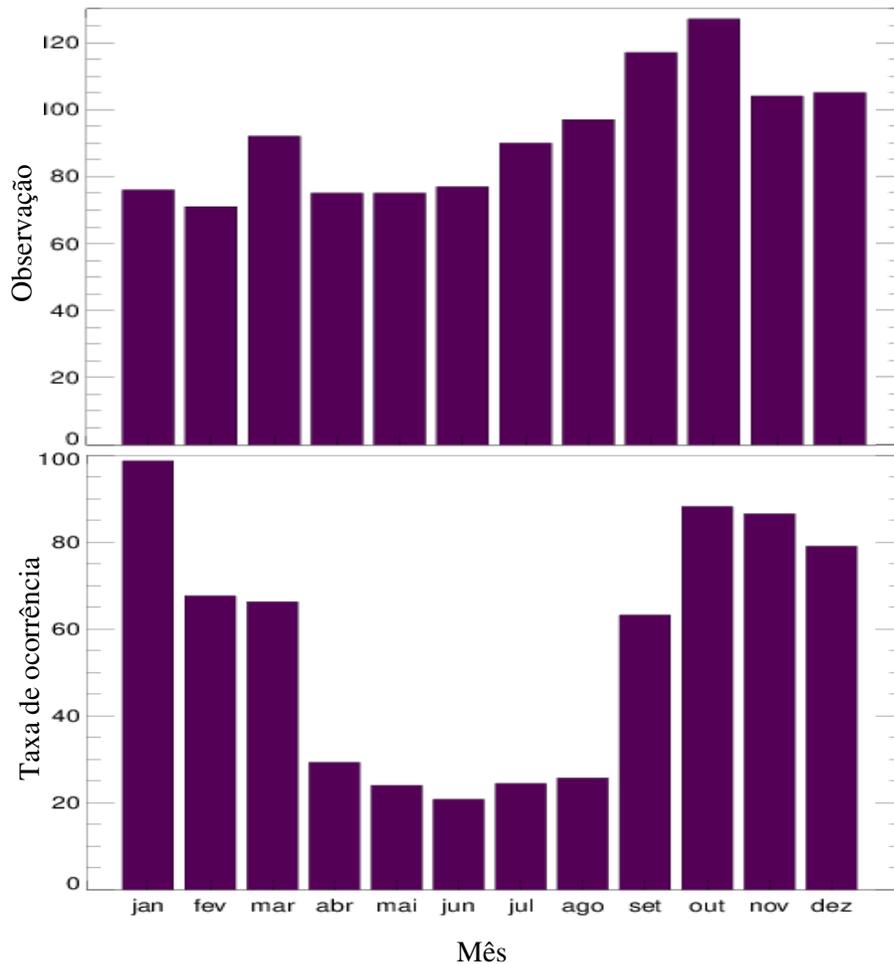


Figura 4.2 gráficos de número das observações para cada mês durante todo o período de estudo (painel superior) com taxas correspondentes de ocorrência (painel inferior) de bolhas de plasma

O resultado apresentado aqui é coerente com os resultados publicados anteriormente, por exemplo Sahai et al., (1998) que relatou ocorrência de EPBs nos meses de inverno só nas noites geomagneticamente perturbados. Outros trabalhos (Sahai et al., (2000), Pimenta et al., (2001), Sobral et al., (2002)) também relatam resultados semelhantes das análises de imagem de aeroluminescência no setor brasileiro. Sharma et al., (2013), usando medidas

de aeroluminescência para os períodos entre 2010-2011 e 2011-2012, mostraram resultados semelhantes para de Kolhapur, Índia. Chapagain et al., (2009) relataram baixa ocorrência de plumas, vistas por radar de espalhamento de Jicamarca, Peru, nos meses de inverno, ao contrário dos meses de equinócio e verão. Outros trabalhos também apresentaram resultados semelhantes, usando medições de cintilações de sinal de GPS (Aarons et al., 1980; Tsunoda, 1985). Chandra, (2003) foram observados padrões sazonais semelhantes para o ESF. Lin et al., (2007) e Sharma et al., (2013) sugeriram que ventos neutros termosféricos são agentes decisivos para os padrões sazonais das EPBs observados em baixas latitudes.

A sazonalidade das EPBs é controlada pelo alinhamento relativo entre o meridiano local e o terminador solar de modo que o PRE próximo ao equador magnético seja maximizado. Trabalhos utilizando 23 receptores de GPS localizados ao redor do equador magnético entre 2000 e 2006 estudaram a ocorrência de EPBs, incluindo variabilidade sazonal/longitudinal e relatado diferentes taxas de ocorrência mensal em diferentes regiões (Tsunoda, 1985; Sultan, 1996). Nishioka et al., (2008). Seus resultados para a região Atlântica mostraram variabilidade sazonal semelhante ou taxa de ocorrência mensal ao resultado apresentado aqui, que também está de acordo com trabalho de Tsunoda, (1985). Sobral et al., (2002) também relataram resultados similares no setor brasileiro e indicaram que o padrão sazonal deve ser devido a declinação magnética que controla a variação sazonal do pico pré-inversão noturno.

Sendo assim, outro fator que influencia a sazonalidade da ocorrência de EPBs é a variação sazonal do pico pré-inversão que ocorre logo após o por do sol e possui um campo elétrico predominante para o leste. No trabalho de Lee et al., (2005), eles relataram que no verão e

meses de equinócios, a magnitude do PRE é maior e fornece uma condição favorável para o desenvolvimento da ESF e, conseqüentemente, EPBs. Em contraste com o inverno quando a deriva do PRE é menor ocorre uma taxa reduzida de ocorrência de bolhas de plasma. Fessen et al., (2000) simularam o PRE e as derivas zonal e vertical do plasma para os equinócios de junho e dezembro para baixa, média e alta atividade solar. Fessen et al., (2000) mostraram o mesmo padrão sazonal de ocorrência de bolhas de plasma apresentado aqui na Figura 4.2. Usando dados observacionais de radar de espalhamento incoerente de Jicamarca, entre os anos de 1968 e 1988, Fejer et al., (1991) também mostraram variações sazonais no PRE e na deriva vertical do plasma ionosférico. Smith et al., (2015) mostraram que quando o PRE está bem desenvolvido, a ocorrência de ESF é mais comum.

Esses resultados são esperados porque PRE aumenta a taxa de crescimento linear da instabilidade de Rayleigh-Taylor (Sultan, 1996) pela deriva vertical  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ . O PRE também move a região-F para altitudes mais elevadas, onde a frequência de colisão de íons e partículas neutras é reduzida. Esta redução da frequência de colisão também leva a um aumento na taxa de crescimento de instabilidade RT (Kelley, 2009).

Estruturas do sistema de vento podem também ser um fator importante que influencia a variação sazonal da ocorrência de EPBs. Muldrew, (1980) mencionou que sistemas de vento neutro na região de dínamo e deslocamento entre os equadores geomagnético e geográfico são contribuidores importantes para a início de formação das bolhas de plasma e ESF. Maruyama e Matuura (1984) sugeriram que os ventos termosféricos talvez sejam um candidato plausível para a variação sazonal da ESF e EPB. Baseado em seus resultados a partir da análise dos dados de satélite, eles acreditavam que a assimetria Norte-Sul da densidade do plasma é uma consequência dos ventos meridionais (ventos transequatoriais)

que podem estar aumentando a densidade do plasma da ionosfera inferior, reforçando a condutividade integrada de Pedersen ao longo das linhas de campo magnético para suprimir o ESF. Enquanto a declinação magnética é de longitude específica, os ventos zonais termosféricos são governados mais por coordenadas geográficas do que coordenadas magnéticas o ângulo formado pelo plano meridional magnético e os ventos médio termosférico varia de longitude para longitude e estação para estação.

Na Figura 4.3, podemos ver que a taxa de ocorrência e variabilidade sazonal das bolhas de plasma considerando características específicas como múltiplas estruturas, bifurcação e estruturas simples nos painéis a, b, c respectivamente. A determinação dessas características foi descrita no Capítulo Três e foi estabelecida a partir das imagens das

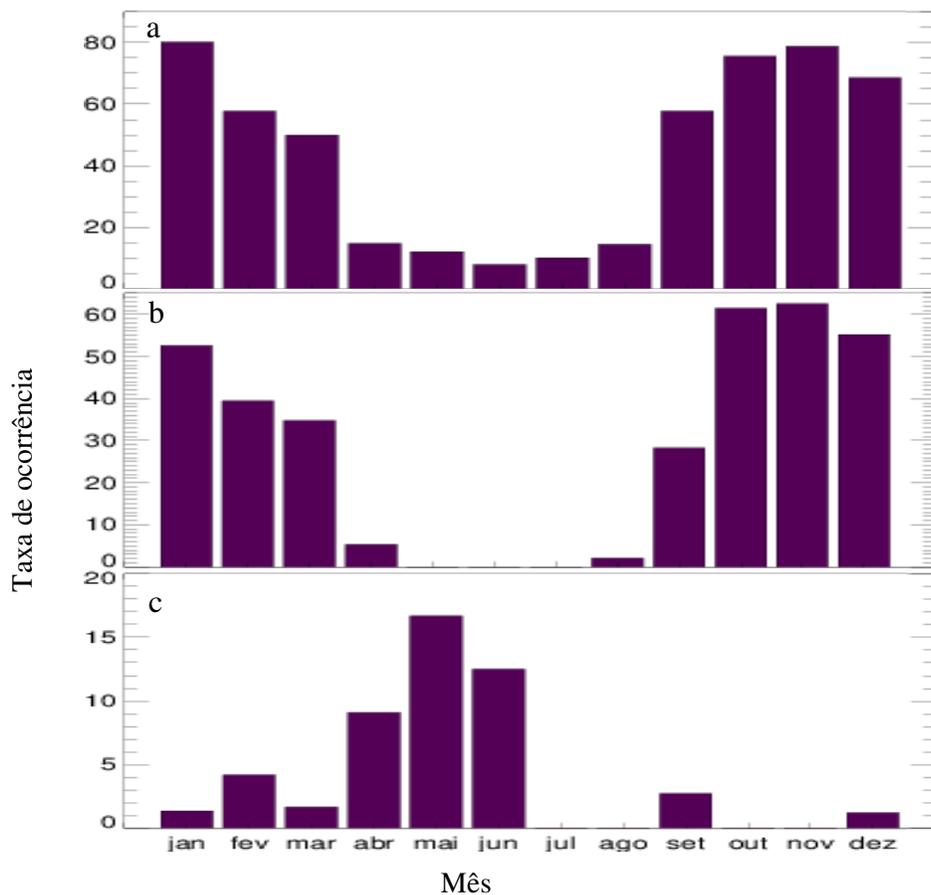


Figura 4.3 A representação da taxa mensal de ocorrência e variabilidade sazonal de bolhas de plasma de a) múltiplo, b) bifurcação, c) simples

aeroluminescências noturnas. Bolhas de plasma com estruturas múltiplas mostraram a taxa da ocorrência mais alta entre as todas as outras características enquanto que estruturas simples são mais raras de serem observadas.

No caso da variabilidade sazonal, as bifurcações têm padrão sazonal semelhante ao de bolhas de plasma discutidas acima. Alguns dos trabalhos acima mencionados sugerem que bifurcação é um subconjunto da ocorrência de bolha de plasma. Pimenta et al., (2001) mostraram a frequência das bifurcações de bolhas de plasma usando imagens de aeroluminescência. Outros trabalhos, como Weber et al., (1980), Mendillo e Tyler, (1983) também observaram bifurcações de bolhas de plasma utilizando instrumentos ópticos. Outras técnicas como radar (Woodman e La Hoz, 1976) e satélite (Laakso, 1997) têm sido utilizadas para observar bifurcações de bolha de plasma. Pimenta et al., (2001) relataram que bifurcações de bolha de plasma tem padrão de ocorrência sazonal semelhante ao apresentado nos nossos resultados. No entanto, Pimenta et al (2001) não observaram quaisquer ocorrências nos meses de junho e julho como os resultados apresentados aqui.

As causas da bifurcação de EPB foram estudadas por por alguns pesquisadores, incluindo Huang e Kelley, (1996) que, em suas simulações de bolhas de plasma ionosféricas, consideraram ondas de gravidade como iniciadores da instabilidade da RT. Eles mostraram que se o tamanho da escala de leste a oeste de um EPB é influenciado pela homogeneidade do campo elétrico que faz com que o movimento para cima seja capaz de separar uma estrutura simples em dois ramos. Por consequência, o que determinará o surgimento da bifurcação é a razão entre a condutividade integrada dentro e fora das bolhas. Se esta relação for inferior a 10, a bifurcação da bolha é mais provável de ocorrer e menos provável de ocorrer se a razão for maior que 100 (McDonald et al., 1981; Zalesak et al., 1982).

Bolhas de plasma Equatorial são classificadas em três tipos característicos, com base na sua estrutura e incluem bolhas de plasma solitária os simples (SPBs, do Inglês “single plasma bubbles”), bolhas de plasma quase periódicas (QPBs, do Inglês “quasi-periodic plasma bubbles”) e bolhas de plasma múltiplas (MPBs, do Inglês “multiple plasma bubbles”) sugerindo que mecanismos diferentes os geram. No entanto, os QPBs não são discutidas neste estudo (Watanabe e Oya, 1986; Oya et al., 1986).

Os MPBs de acordo com Oya et al (1986), são mais frequentemente observados e caracterizam-se pela formação de grupo de bolhas de plasma separados por distâncias aleatórias em contraste com as SPBs que não são comumente observados e são caracterizadas por suas características solitárias. MPBs desenvolvem a partir da noite antes da meia-noite com taxa de depleção grande de densidade de eletrônica. Por outro lado, SPBs são independentes de hora local (Watanabe e Oya, 1986).

É conhecido que a região-F da ionosfera é influenciada por tempestades magnéticas e radiações solares que notavelmente afetam a densidade de elétrons e a distribuição de densidade na ionosfera que afetam a formação de bolhas de plasma. A ocorrência de MPBs aumenta com o aumento da radiação solar, mas diminuiu com atividade magnética no período pré-meia-noite, no entanto, Fejer et al (1999) reportaram que a atividade magnética pode realmente aumentar a taxa de ocorrência. SPBs, por outro lado, não são afetadas por radiação solar ou efeitos magnéticos (Watanabe e Oya, 1986). Isto pode mostrar porque a ocorrência de MPB no estudo atual é muito alta e tem um um padrão de ocorrência sazonal, mas SPB tem uma menor taxa de ocorrência e não parece mostrar alguma variabilidade clara, a não ser uma anticorrelação como pode ser visto nas Figura 4.3 a, c. Pode-se inferir

a partir disso, embora com muita evidência estatística, que SPB tem taxa de ocorrência máxima nos meses de inverno, ao contrário, do equinócio e do verão.

### 4.3 EFEITOS DO CICLO SOLAR

Na Figura 4.4, apresentamos a ocorrência mês a mês de bolhas de plasma para todos os anos de observações e mostramos a média mensal do número de manchas solares (atividade solar) para o mesmo período. As áreas sem barras mostram meses onde não houve observações. Os resultados mostram uma clara variação sazonal na maioria dos anos que é consistente com os resultados já discutidos. Dividimos o período em dois; um período de atividade solar alta relativa (HSA do Inglês “high solar activity”, 2000-2005) e um período de relativa baixa atividade solar (LSA do Inglês “low solar activity”, 2006-2010). Isto foi conseguido calculando os números de manchas solares médios anuais obtidos do site <http://www.sws.bom.gov.au/Educational/2/3/6>.

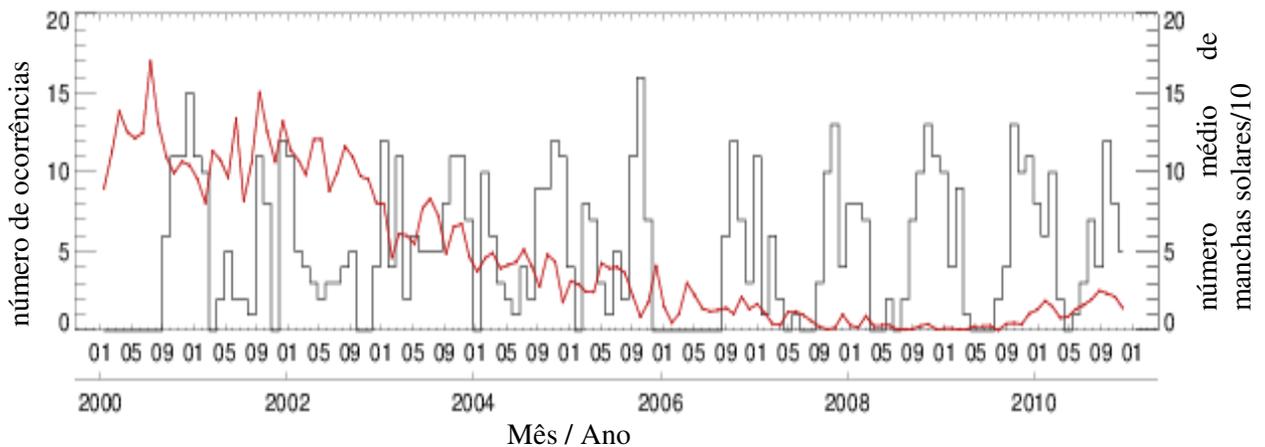


Figura 4.4 Um gráfico da ocorrência de bolhas de plasma para todos os meses de observação e atividade solar para período quase 11 anos de estudo

Os anos que tinham valores médios abaixo da média calculada foram considerados um período de atividade solar relativamente baixa e os anos que tinham valores maiores que a

média calculada foram considerado como um período de atividade solar relativamente alta. A exceção foi também 2005, porque teve um valor menor que a média calculada e foi considerados com um período de relativa alta atividade solar. Pode ser visto que um número maior (57,3%) de bolhas de plasma estão concentradas em torno dos anos de HSA, enquanto um número menor (42,7%) está concentrado em torno dos anos de LSA.

Sahai et al., (1999, 2002), usando imagens de aeroluminescência relatou que a frequência de bolha de plasma é maior em HSA do que na LSA. Outros pesquisadores como Pimenta et al., (2001), Sobral et al., (2002) e Sharma et al., (2013) também relataram que a ocorrência de bolhas de plasma depende fortemente da atividade solar. Abdu et al., (1985) também relataram um forte aumento na ocorrência de ESF de baixa para alta atividade solar em Cachoeira Paulista, mas nenhum efeito foi observado em Fortaleza no setor brasileiro. Rastogi, (1982) também encontrou muito pouco efeito da atividade solar na ocorrência das cintilações. Batista et al., (1996) e Sahai et al., (1998, 2000) relataram que durante a alta atividade solar, há um a deriva vertical da plasma mais forte que pode ser responsável pelas variações observadas do ciclo solar na ocorrência de EPBs. Calculando a média das velocidades de deriva vertical nos equinócios, verão e inverno para períodos de atividade solar diferente. Fejer et al., (1991) mostraram que o fluxo de plasma vertical aumenta com a atividade solar. Eles sugeriram que o aumento da força do PRE com atividade solar é devido aos aumentos correspondentes O vento zonal equatorial e a razão entre o campo magnético ea condutividade média Pedersen nas regiões F e E. Este resultado é ainda mais reforçado pela simulação feita por Fessen et al., (2000).

Sobral et al., (2002) sugere que a amplitude do PRE aumenta com aumento do fluxo solar e, por consequência, surge como um potencial candidato para o aumento significativo na

ocorrência de bolhas de plasma da LSA para HSA. Pimenta et al., (2001) também mostraram que bifurcações de bolha de plasma ocorre mais em HSA do que na LSA, o que poderia ser resultado de um aumento na densidade de elétrons no período HSA. Nossos resultados também mostram similar variabilidade sazonal da ocorrência de EPB em HSA e LSA, consistente com os resultados relatados pelos trabalhos acima mencionados. Comparando os resultados de 2000 (HSA) e 2006 (LSA) da Figura 4.1, que têm quase o mesmo período e número de observações, a taxa de ocorrência de 2000 é mais de 90%, enquanto que a de 2006 é de cerca de 60%. A diferença nos resultados pode ser atribuída à dependência da taxa de ocorrência de EPB com a atividade solar.

#### **4.4 HORA DE SURGIMENTO E DESAPARECIMENTO DAS BOLHAS**

A maior parte das EPBs ocorre perto da hora do PRE quando a região-F atinge a sua maior altitude e a taxa de crescimento da instabilidade de RT é o máximo (Fejer et al., 1999). O surgimento de EPB ocorre após o  $h'F$  atingir o seu auge, que é uma consequência direta do PRE com referência a Figura 2 do trabalho de Abaldi et al., (2015). A ocorrência ESF tem sido observada em noites que as inversões na deriva da região-F são intensas (Abdu et al., 1981; Kil e Oh, 2011). O PRE atinge o seu pico muito cedo após o pôr do sol nos meses de equinócio e verão e mais tarde no inverno (Abdu et al., 1981), o que é consistente com o resultado apresentado aqui. A Figura 4.5 (painel superior) mostra a variação mensal da hora média de surgimento das bolhas de plasma (hora média de primeiro avistamento de EPB) observadas no campo de visão do imageador all-sky e a hora média de desaparecimento (hora média do último avistamento de EPB) das EPBs.

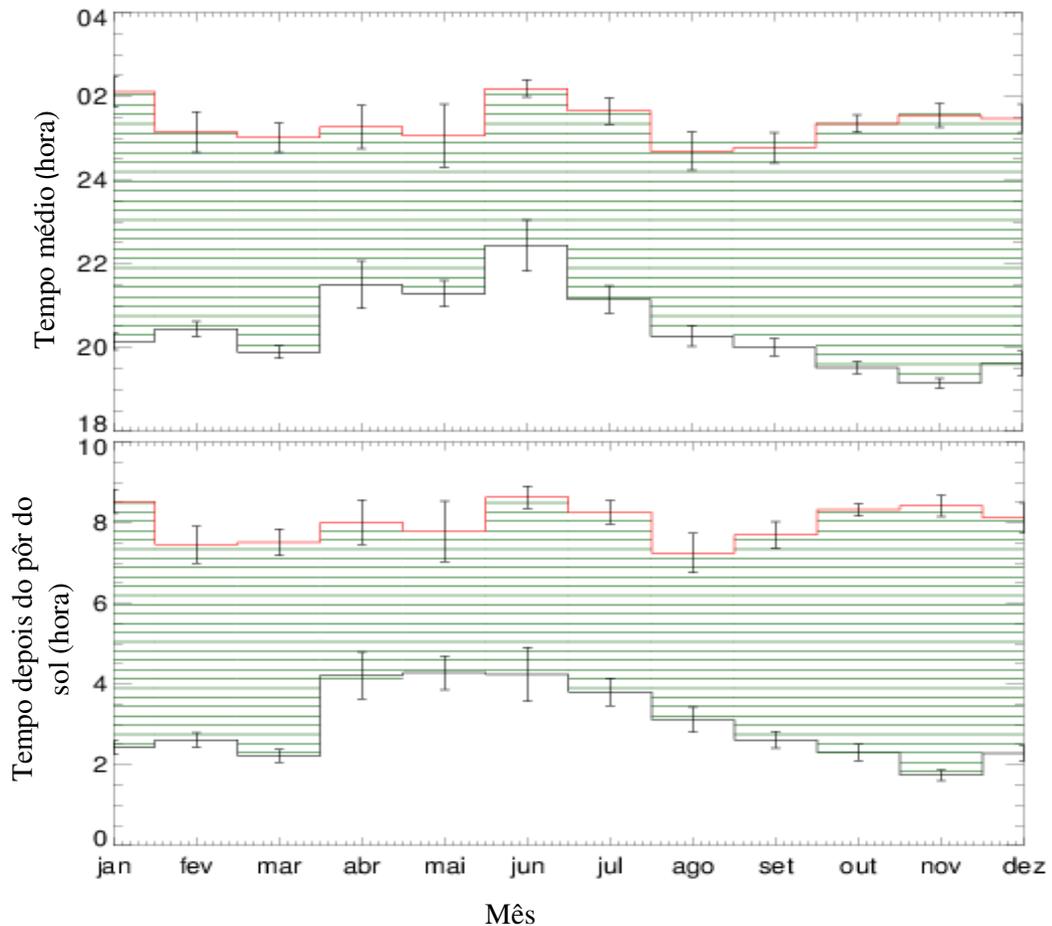


Figura 4.5 O painel superior representa a média mensal de horas surgimento e desaparecimento das bolhas de plasma e o painel inferior representa a média mensal vezes após o pôr do sol dos horários de surgimento e desaparecimento

Durante o período de observação, nos meses de inverno, em média, as horários de surgimento das bolhas de plasma ocorreram mais tarde 21:30 LT e 22:30 LT e persistem por um curto período de tempo, cerca de 3 – 4 horas. Nos meses de verão e equinocial, começaram mais cedo entre 19:00 LT e 21:00 LT e persistiram por cerca de 5-6 horas. Patil et al., (2016) sugeriram em seu relatório que as bolhas de plasma que surjam tarde têm uma tempos dos vidas relativamente curta, contrária àquelas que começam cedo, que têm tempos dos vidas relativamente mais longas. A Figura 4.5 (painel inferior) Mostra o horários médios após o pôr do sol para a hora de surgimento e desaparecimento e a duração

média de vida das bolhas de plasma para cada mês pode ser calculada de gráfico. Nesse último caso, a variação típica anual do horário de pôr do sol é removida. Mesmo assim, existe um forte variação anual para o início e fim das bolhas de plasma.

#### 4.5 VARIABILIDADE DIÁRIA DA HORA DE SURGIMENTO

A Figura 4.6 mostra todos os tempos de início das bolhas de plasma que foram observados nesse estudo. Prever o surgimento ou a formação dia a dia das EPBs é uma tarefa bastante difícil para os pesquisadores, mesmo com o entendimento considerável da dinâmica das bolhas de plasma acumulado ao longo dos anos (Vineeth et al., 2011). Já é sabido que as formações de EPBs variam muito em curto e médio prazos. O PRE, que provoca a formação de bolha também possui a variabilidade dia a dia acentuada (Maruyama, 2002).

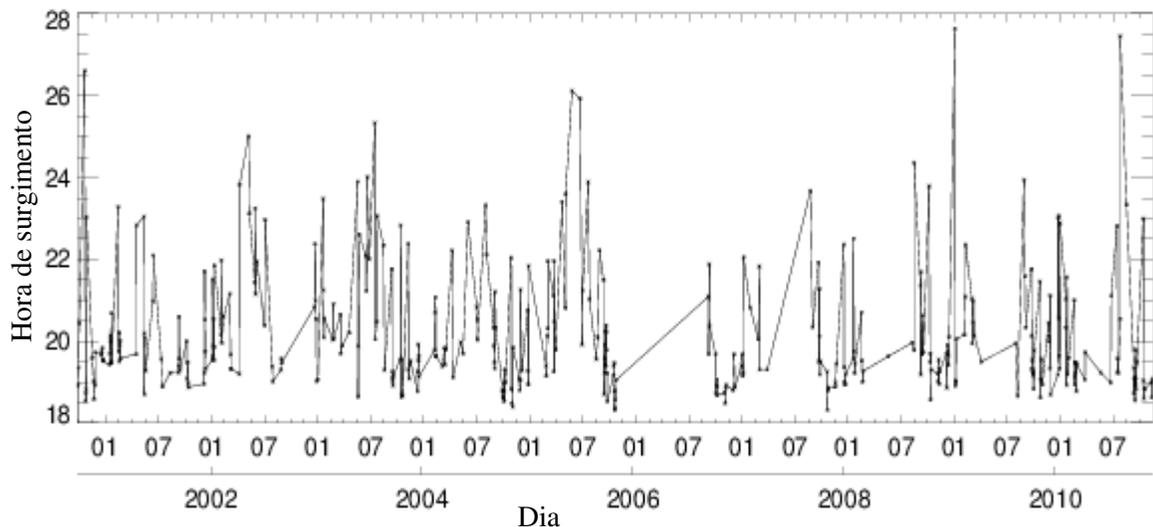


Figura 4.6 Um gráfico de todas as horas de surgimento das bolhas de plasma observadas durante todo o período de análise.

Várias tentativas foram feitas para encontrar uma maneira de prever o surgimento EPB usando condições básicas da ionosfera que ocorrem algumas horas antes do início das EPBs (Vineeth et al., 2011). A atividade magnética é conhecida por ser a principal causa da

variabilidade ionosférica, embora as causas meteorológicas transmitidas a partir de baixo possam contribuir comparativamente. Estas influências meteorológicas sobre a ionosfera surgem da propagação ascendente da gravidade, ondas de maré e planetárias. (Altadill et al., 2004).

A Figura 4.6 mostra todas as horas de surgimento das bolhas de plasma observadas no estudo onde pode ser observado que a maioria das bolhas começam entre as 18:30 LT e as 23:00 LT enquanto algumas são vistas para começarem depois das 23:30 LT. Para procurar as oscilações nas horas surgimento, o método dos mínimos quadrados foi aplicado aos dados de tal forma que apenas os resultados que foram agrupados em um conjunto com pelo menos cinco pontos de dados (cinco dias) foram escolhidos. Estes conjuntos de dados escolhidos foram todos dentro de um mês. A partir de ajuste dos dados foram determinados os períodos de oscilações, amplitude e fase e observaram-se oscilações de períodos variáveis de 3 a 14,5 dias. Períodos de dois dias ou menos foram ignorados, uma vez que há apenas um ponto de dados por dia dia.

A Tabela 4.1 mostra os resultados obtidos a partir da análise dos dados de hora de surgimento e os resultados são categorizados em três grupos de períodos; 3-4 dias, 5-6 dias e > 7 dias. Essas oscilações podem ter sido resultado de ondas planetárias, propagando-se verticalmente dentro da mesosfera e baixa termosfera (MLT, do Inglês “Mesosphere-Lower Thermosphere”).

A modulação da onda planetária (PW, do Inglês “planetary wave”) por marés atmosféricas ou ondas de gravidade que se propagam verticalmente produzem variações na ionosfera via fluxo de plasma vertical ou transporte vertical de massa (Altadill et al., 2004).

Tabela 4.1 oscilações observaram em hora de início de bolhas de plasma e a frequência de ocorrência dos intervalos de período observado na análise.

<b>Data</b>	<b>Período (dia)</b>	<b>Amplitude (hora)</b>	<b>Fase (dia)</b>	<b>Ocorrência</b>
16/01/2001 - 21/01/2001	3 - 4	0.3347	-1.0265	
15/02/2001 - 22/02/2001		0.2985	-0.8795	4
01/01/2008 - 07/01/2008		0.2228	1.1271	
19/03/2009 - 27/03/2009		0.6624	1.0795	
06/09/2004 - 13/09/2004	5 - 6	0.8689	1.0634	
06/11/2004 - 12/11/2004		0.8524	-1.3786	3
21/11/2008 - 27/11/2008		0.3681	-1.1351	
20/09/2003 - 25/09/2003	> 7	0.3401	0.4645	
14/10/2006 - 20/10/2006		0.3802	0.1581	3
11/10/2009 - 21/10/2009		0.7141	1.0539	

Altadill et al., (2004) referindo-se a PWs dos períodos entre 2 - 16 dias no trabalho realizado sob a COST (do ingles European cooperation in science and technology) 271 ação. Eles concluíram que o PWs são importantes fontes de variabilidade na ionosfera que pode contribuir até 50-60% da variabilidade na faixa periódica de 2-35 dias.

As ondas planetárias têm um papel significativo na variabilidade dia a dia da região da mesosfera-baixa termosfera (MLT). Embora não acredita-se que as PWs penetrem diretamente para altitudes ionosféricas, estudos recentes têm mostrado a influência de PWs em vários parâmetros ionosféricos, por meio de uma variedade de mecanismos indiretos (Abdu et al., 2006).

De importância específica é o seu efeito na PRE que foi relatada por Abdu et al., (2006). Eles encontraram a presença de oscilações de PW de periodicidades  $\sim 4$  dias e  $\sim 7$  dias no PRE e concluíram que as oscilações no PRE causam grandes variações na intensidade do ESF após o pôr do sol e em essência sugerindo que PWs desempenham um papel significativo na modulação do dia-a-dia ionosfera equatorial.

Na Figura 4.7 observamos as oscilações no período de 3-4 dias, o gráfico no painel superior mostra uma oscilação com período de  $\sim 3$  dias, amplitude de 0,333 horas e uma fase de -1,024 dias representando tempos de início de bolhas de plasma de 16 a 21 de janeiro 2001, enquanto no painel inferior, de 1 a 7 de janeiro de 2008, temos um período de 4,5 dias, amplitude de 0,222 horas e uma fase de 1,127 dias.

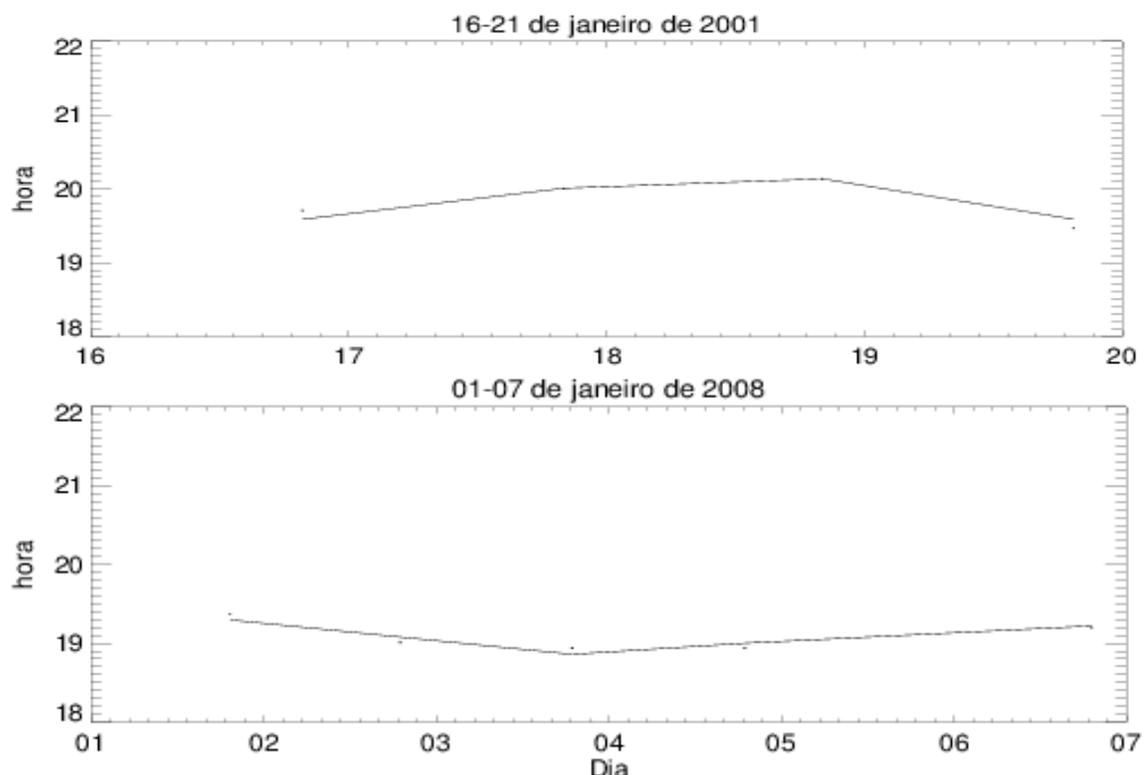


Figura 4.7 pontos ajustados mostrando oscilações na bolha de plasma hora de surgimento com períodos de 3 dias (painel superior) e 4,5 dias (painel inferior), em janeiro de 2001 e janeiro de 2008, respectivamente

Na Figura 4.8 temos oscilações com período de 5 dias, amplitude de 0,368 horas e fase de -1,35, representando as variações no hora de surgimento das bolhas de plasma de 21 a 27 de novembro de 2008.

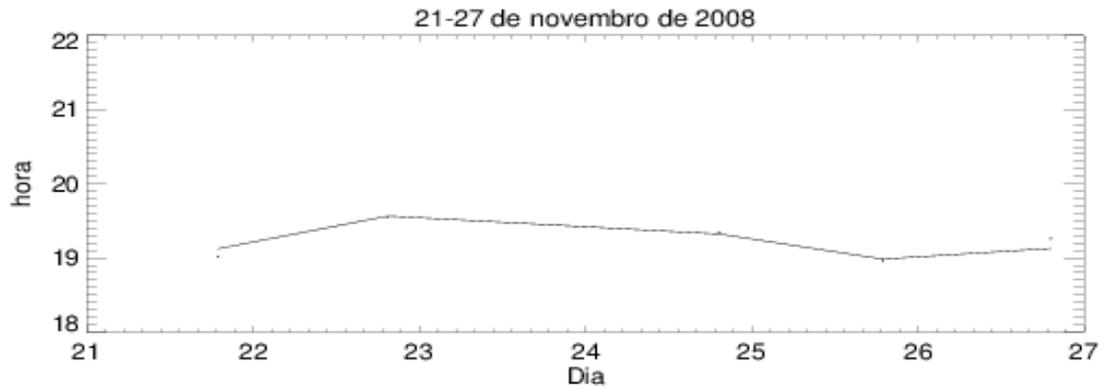


Figura 4.8 Mostra Oscilações nas horas de surgimento das bolhas de plasma com um período de 5 dias em novembro de 2008.

Mostramos oscilações com períodos maiores que 7 dias na Figura 4.9. As horas de surgimento das bolhas de plasma de 20-25 de setembro de 2003 tiveram um período de 10 dias, uma fase de 0,465 dias e uma amplitude de 0,340 horas (painel superior), de 11 a 21 de outubro de 2009, um período de 14,5 dias, fase de 1,054 dias e uma amplitude de 0,714 horas foram observadas.

Estes resultados apresentados na Tabela 4.1 e nas Figuras 4.7, 4.8 e 4.9 mostram que as horas de surgimento das bolhas de plasma podem ter resultado de ondas planetárias. Desde que PWs não são acreditados para penetrar as altitudes da região-F, uma possível explicação para que as PWs estejam presentes na região-F é pela da modificação da eletrodinâmica da região E. A modificação do campo elétrico da região E pela presença de assinaturas de PWs afeta os campos elétricos do dínamo da região-F e, assim, modula a deriva  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  da região-F inferior produzindo efeitos sobre o PRE.

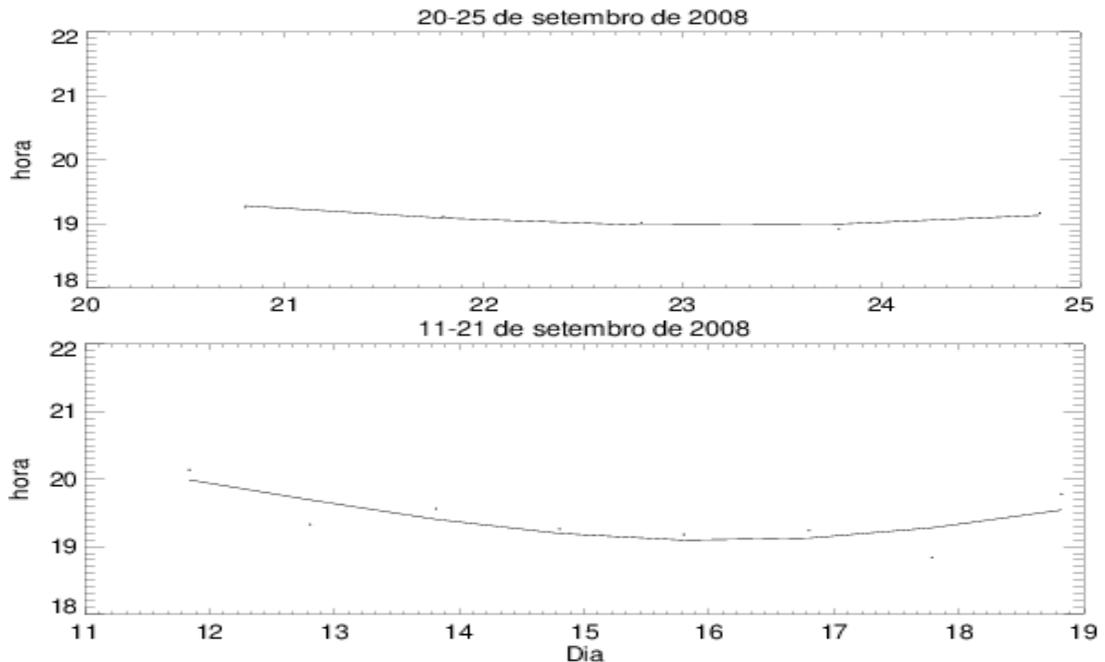


Figura 4.9 mostra os pontos ajustados mostrando oscilações nas bolhas de plasma horas de surgimento com períodos de 10 dias (painel superior) e 14,5 dias (painel inferior), em setembro de 2003 e outubro de 2009 respectivamente

Isto desempenha um papel importante na geração da instabilidade de Rayleigh-Taylor, que se acredita ser o mecanismo responsável pelo desenvolvimento do ESF (Farley et al., 1986; Hysell e Kudeki, 2004).

As oscilações presentes no PRE podem causar grandes variações na ocorrência e na intensidade do Spread-F após pôr do sol através de modificações do mecanismo de instabilidade RT que é conhecido por ser uma das condições de fundo importantes para a ocorrência da EPB (Vineeth et al., 2011). Assim, os resultados apresentados neste trabalho indicam que a variabilidade diária da hora de surgimento da EPB talvez seja controlado pelo processo de acoplamento vertical, através da interação onda-maré planetária, modificando assim a eletrodinâmica equatorial.

Takahashi et al., (2006) observaram oscilações de 3-4, 6, 12-16 dias em ventos zonais e no parâmetro,  $h'F$  da ionosfera. Eles sugeriram que as ondas de 3,5 e 6,5 na ionosfera, obtidos como resultado de análises espectrais, poderiam ter um papel importante na formação e início da EPB e como tal, tem efeito sobre a variabilidade diária da hora de início. Estas ondas propagam-se para cima a partir da estratosfera para o MLT e podem interagir com a ionosfera modulando a elevação da base da camada-F após o pôr do sol ou o PRE via indução do vento termosférico zonal e condutividade da região-E (Takahashi et al., 2006). Isto pode ser a explicação para as oscilações no horário de surgimento das EPBs observadas nesse trabalho.

# CAPÍTULO CINCO

## 5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

### 5.1 CONCLUSÃO

Este trabalho focou nas características de ocorrência de bolhas de plasma equatoriais sobre Brasil usando um período de quase onze anos (2000-2010) de medidas de imagens da aeroluminescência noturna da emissão do OI6300 sobre São João do Cariri (7,40° S. 36,5° W). O banco de dados ofereceu uma oportunidade única para efetuar as análises em diferentes épocas e condições de atividade solar. Três características diferentes das bolhas de plasma foram observados visualmente nas análises incluindo inicialização, estruturas múltiplas de bolhas de plasma, bifurcação, estruturas simples e hora de desaparecimento das bolhas. A ocorrência das bolhas de plasma mostrou uma variação sazonal (maior ocorrência de setembro a março) consistente com outros resultados obtidos outros locais e épocas no Brasil e e no mundo. Correlação da atividade solar com a ocorrência das bolhas de plasma também parece estar de acordo com relatos de outros trabalhos em que existe um número maior de bolhas surgindo em períodos de atividade solar alta. O trabalho também discutiu o início, fim e duração das bolhas sob diferentes condições. O efeito de ondas planetárias na ionosfera foi considerado para discutir a variabilidade diária da hora de início, principalmente, nos casos, em que observou-se períodos de oscilações no horário de ocorrência de bolhas de 3-4, 5-6 e >7 dias.

Os principais resultados são resumidos como segue.

- Análise de imagens de OI 6300 observadas sobre São João do Cariri fornece uma maneira visualmente importante para identificar e caracterizar as bolhas de plasma ionosféricas;
- O estudo estatístico da variação sazonal da ocorrência e tempos de bolhas de plasma também ajudam a compreender os mecanismos que as causam. Existe uma variação sazonal na ocorrência de bolhas de plasma com ocorrência máxima nos equinócio e verão (setembro a março) e ocorrência mínima no inverno (maio-agosto);
- As características de bolhas de plasma discutidas, como bifurcações, e estruturas múltiplas também seguem a mesma variação sazonal da ocorrência total das bolhas;
- Bolhas de plasma com estruturas simples têm taxas de ocorrência muito baixa e mostraram variações diferentes com máximos em maio, junho e julho.
- Não foram observadas bifurcações das bolhas de plasma nos meses de maio, junho e julho;
- A ocorrência de bolhas de plasma foi maior durante a atividade solar alta (57,3%) do que durante a atividade solar baixa (33,7%);
- Maiores ocorrências em tanto na atividade solar alta quanto na baixa foram observadas nos meses de setembro a abril e a menor ocorrência foi de maio a agosto;
- As horas de início parecem ter também uma variação sazonal em que as bolhas de plasma são vistas mais cedo de setembro a março e mais tarde de abril a agosto;

- Bolhas de plasma têm vida útil mais longa (5-6 h) nos meses de equinócio e verão do hemisfério sul e mais curta (3-4 h) no inverno;
- Foram observadas oscilações com 3-4 dias, 5-6 dias e > 7 dias na hora de surgimento das bolhas de plasma que pode resultar da interação de ondas planetárias na ionosfera que modulam PRE.

## **5.2. RECOMENDAÇÕES**

Os seguintes pontos podem ser considerados em promover uma ampliação para esses estudos:

- As bolhas de plasma múltiplas e simples podem ser estudadas mais detalhadamente, considerando suas ocorrências em relação a diferentes atividades solares e magnéticas, a fim de determinar uma relação mais forte entre elas;
- Dados reais de ondas planetárias e parâmetros ionosféricos podem ser usados em conjunto com o horário de início para determinar correlações entre as ondas planetárias e o horário de surgimento das EPBs.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aarons, J., Whitney, H., E., Recent observations of equatorial and high latitude scintillations. **Propagation Effects in Space/ Earth Paths**, 284, 31/1 – 17, 1980,

Abadi, P., Otsuka, Y., Tsugawa, T., Effects of pre-reversal enhancement of  $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$  drift on the latitudinal extension of plasma bubble in Southeast Asia. **Earth, Planets and Space**, 67, 74, 2015. DOI 10.1186/s40623-015-0246-7.

Abalde, J.R., Fagundes, P.R., Sahai, Y., Pillat, V.G., Pimenta, A.A., Bittencourt, J.A. Height-resolved ionospheric drifts at low latitudes from simultaneous OI777.4 nm and OI630.0 nm imaging observations. **Journal of Geophysical Research**, 109, A11308, 2004. <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010560>

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 De Freitas, T. F., Day-to-day variability in the development of plasma bubbles associated with geomagnetic disturbances. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 114, 1-11, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JA013788>.

Abdu, M. A., Bittencourt, J.A., Batista, I.S., Magnetic declination control of the equatorial F region dynamo electric development and Spread F. **Journal of Geophysical Research**, 83, A13, 11443-1446, 1981.

Abdu, M. A., Batista I. S., Sobral, J. H. H., de Paula, E. R., Kantor, I. J., Equatorial ionospheric plasma irregularity occurrence on the zonal velocities under quiet and disturbed conditions from polarimeter observations. **Journal of Geophysical Research**, 90, 9921-9928. 1983.

Abdu, M. A., Medeiros, R. T., Bittencourt, J. A., and Batista, I. S., Vertical ionization drift velocities and range type spread F in the evening equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, 88, 399–402, 1983.

Abdu, M. A., Sobral, J. H A., Nelson, O. R., Batista, I. S., Solar cycle related range type spread-F occurrence characteristics over equatorial and low latitude stations in Brazil. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, 47, 901-905, 1985. DOI: 10.1016/0021-9169(85)90065-0

Abdu, M. A., Outstanding problems in the equatorial ionosphere- thermosphere electrodynamics relevant to spread F. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 63, 869–884, 2001.

Abdu, M. A., Ramkumar, T.K., Batista, I.S., Brum, C.G.M., Takahashi, H., Reinisch, B.W., Sobral, J.H.A., Planetary wave signatures in the equatorial atmosphere ionosphere system, and mesosphere-E- and F-region coupling. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 68, 509– 522. 2006.

Adebesin, B. O., Rabiou, A. B., Adeniyi, J. O., Amory-Mazaudier C., Nighttime morphology of vertical plasma drifts at Ouagadougou during different seasons and phases of sunspot cycles 20–22. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 120, 2015. DOI: 10.1002/2015JA021737.

Altadill, D., Apostolov, E. M., Boska, J., Lastovicka, J., S, Petra, Planetary and gravity wave signatures in the F-region ionosphere with impact on radio propagation predictions and variability. **Annals of Geophysics**, 47, 2-3 SUPPL, 1109-1119, 2004. DOI: 10.4401/ag-3288.

Basu, S., Kudeki, E., Basu, S., Valladares, C. E., Webber, E. J., Zengingonal, H. P., Bhattacharyya, S., Sheehan, R., Meriwether, J. W., Biondi, M. A., Kuenzler, H., Espinoza, J., Scintillations, plasma drifts and neutral winds in the equatorial ionosphere after sunset. **Journal of Geophysical Research**, 101, 26 795–26 809, 1996.

Batista, S. I., Medeiros, R.T., Abdu, M.A., Souza, J.R., Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the Brazilian region. **Journal of Geophysical Research**. 101, 10,887, 1996.

Burke, W. J., Huang, C. Y., Gentile, L. C., Bauer, L., Seasonal-longitudinal variability of equatorial plasma bubbles. **Annales Geophysicae**, 22, 3089–3098, 2004.

Chandra, H., Sharma, S., Abdu, M., Batista, I., Spread-F at anomaly crest regions in the Indian and American longitudes. **Advances in Space Research**, 31, 3, 717-727, 2003.

Chapagain, N.P., Fejer, B.G., Chau, J.L., Climatology of post-sunset equatorial spread F over Jicamarca. **Journal of Geophysics Research**. 114, A07307, 2009 <http://dx.doi.org/10.1029/2008JA013911>.

Dabas, R. S., Das, R. M., Sharma, K., Garg, S. C., Devasia, C.V., Subbarao, K. S. V., Niranjana, K., and Rama Rao, P. V. S., Equatorial and low latitude spread-F irregularity characteristics over the Indian region and their prediction possibilities. **Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 69, 685–696, 2007.

Dabas, R. S., Lakshmi, D. R., and Reddy, B. M., Day-to-day variability in the occurrence of equatorial and low latitude scintillations in the Indian zone. **Radio Science**, 33, 89–96, 1998.

- Dabas, R. S., Singh, L., Lakshmi, D. R., Subramanyam, P., Chopra, P., and Garg, S. C., Evolution and dynamics of equatorial plasma bubbles: Relationships to  $E \times B$  drift, post-sunset total electron content enhancements, and equatorial electrojet strength. **Radio Science**, 38(4), 1075, doi: 10.1029/2001RS002586, 2003.
- DasGupta, A., Paul, A., Ray, S., Das, A., Ananthakrishnan S., A study of precursors to equatorial spread F using the Giant Meterwave Radio Telescope. **Radio Science**, 43, RS5002, 2008. doi: 10.1029/2007RS003667.
- Dungey, J. W., Convective diffusion in the equatorial F-region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**. 9, 304. 1956.
- Fagundes, P. R., Sahai, Y., Batista, I. S., Abdu, M. A., Bittencourt, J. A., Takahashi, H., Observations of day-to-day variability in precursor signatures to equatorial F-region plasma depletions. **Annales Geophysicae**, 17, 8, 1053-1063, 1999.
- Farley, D. T., Balsley, B. B., Woodman, R. F., and McClure, J. P., Equatorial spread F: Implications of VHF radar observations. **Journal of Geophysical Research**, 75, 7199. 1970.
- Farley, D. T., Bonelli, E., Fejer, B. G., The pre-reversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, 91, 13723–13728. 1986.
- Fejer, B. G., de Paula, E. R., Gonzalez, S. A., Woodman, R. F., Average vertical and zonal F region plasma drifts over Jicamarca. **Journal Geophysical Research**, 98, A8, 13,901-13,906, 1991.

Fejer, B. G., Scherliess, L., and de Paula, E. R., Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread F. **Journal Geophysical Research**, 104, 19 859–19 869, 1999.

Fessen, C. G., Crowley, G., Roble R. G., Richmond A. D., Fejer, B. G., Simulation of the pre-reversal enhancement in the low latitude vertical drift, **Geophysical Research Letters**, 27, 13, 1851-1854, 2000.

Gérard, J., Soret, L., Libert, L., Lundin, R., Stiepen, A., Radioti, A., Bertaux, J., Concurrent observations of ultraviolet aurora and energetic electron precipitation with Mars Express, **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 120, 8, 6749-6765, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JA021150>.

Haerendel, G., "Theory of equatorial spread F", **report, Max-Planck Institute. für Phys. Astrophys., Federal Republic of Germany**, 1973

Haerendel, G., Eccles, J.V., Çakir, S., "Theory for modeling the equatorial evening ionosphere and the origin of the shear in the horizontal plasma flow". **Journal of Geophysical Research**, 97, 1209-1223, 1992.

Holton, J. R., an introduction to dynamic meteorology. **International Geophysics Series**, 88. 2004. ISBN: 0-12-354015-1.

Huang, C.-S. Kelley, M. C., Nonlinear evolution of equatorial spread F: 2. Gravity wave seeding of the Rayleigh- Taylor instability. **Journal Geophysical Research**, 101, 293–302, 1996. Doi: 10.1029/95JA02210.

Hysell, D. L., Kudeki, E., Collisional shear instability in the equatorial F Region Ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, 109, A11301, 2004. doi: 10.1029/2004JA010636.

Jagtap, U.S., Sharma, A.K., Patil, P.T., Signature of plasma depletions using OI630.0 nm nightglow observations from 17°N latitude. **Asian Journal of Chemical & Environmental Research**, 3, 70–73, 2010.

Kelley, M. C. and Maruyama, T.: A diagnostic method for equatorial spread F 2. the effect of magnetic activity. **Journal of Geophysical Research**, 97, A21, 1271-1277, 1992.

Kelley, M. C., the Earth's Ionosphere - Plasma Physics and Electrodynamics. **International Geophysics**, 96. 2009. DOI: 10.1016/S0074-6142(09)60228-X.

Kelley, M.C., Makela, J.J., de La Beaujardiere, O., Retterer, J., Convective ionospheric storms: a review. **Reviews of Geophysics**, 49, RG2003, 2011. <http://dx.doi.org/10.1029/2010RG000340>.

Kil, H., Oh, S- J., Dependence of the evening pre-reversal enhancement of the vertical plasma drift on geophysical parameters. **Journal of Geophysical Research**, 116, A05311, 2011. doi: 10.1029/2010JA016352.

Krassovsky, V. I., Shagaev, M. V. On the nature of internal gravity waves observed from hydroxyl emission. **Planetary and Space Science, Elsevier**, 25, 2, 23, 200–201, 1977.

Kudeki, E., Akgiray, A., Milla, M., Chau, J. L., Hysell, D. L., Equatorial spread F initiation: Post-sunset vortex, thermospheric winds. Gravity waves. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 69, 2416–2427. 2007. doi:10.1016/j.jastp.2007.04.012007.2

Laakso, H., Maynard, N.C., Pfaff, R.F., Aggson, T.L., Cole), W.R., Janhunen, P., Herrero, F.A., Electric field diagnostics of the dynamics of equatorial density depletions. **Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial. Physics**, 59, 1625, 1997.

Lee, C. C., Liu, J. Y., Reinisch, B. W., Chen, W. S., Chu, F. D., The effects of the pre-reversal  $E \times B$  drift, the EIA asymmetry, and magnetic activity on the equatorial spread F during solar maximum. **Annales Geophysicae**, 23, 3, 745-751, 2005. DOI: 10.5194/angeo-23-745-2005.

Li, G., Ning, B., Liu, L., Ren, Z., Lei, J., Su, S.-Y., The correlation of longitudinal/seasonal variations of evening equatorial pre-reversal drift and of plasma bubbles. **Annales Geophysicae**, 25, 12, 2571–2578, 2008. [www.ann-geophys.net/25/2571/2007/](http://www.ann-geophys.net/25/2571/2007/).

Lin, C.H., Liu, J.Y., Fang, T.W., Chang, P.Y., Tsai, H.F., Chen, C.H., Hsiao, C.C., Motions of the equatorial ionization anomaly crests imaged by FORMOSAT-3/COSMIC. **Geophysical Research Letters**, 34, L19101, 2007. <http://dx.doi.org/10.1029/2007GL030741>.

Maruyama, T., Matuura, N., Longitudinal Variability of Annual Changes in Activity of Equatorial Spread F and Plasma Bubbles. **Journal of Geophysical Research**, 89, A12, 10,903-10,912, 1984.

Maruyama, T., Ionosphere and Thermosphere. **Journal of the Communications Research Laboratory**, 49(3), 163–179, 2002.

Makela, J. J., Ledvina, B. M., Kelley, M. C., & Kintner, P. M., Analysis of the seasonal variations of equatorial plasma bubble occurrence observed from Haleakala, Hawaii.

**Annales Geophysicae European Geosciences Union**, 22(9), 3109–3121, 2004.

Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00317623>

McDonald, B. E., Ossakow, S. L., Zalesak, S. T., and Zabusky, N. J., Scale sizes and lifetimes of F region plasma cloud striations as determined by the condition of marginal stability. **Journal of Geophysical Research**, 86(A7), 5775–5784, 1981

Medeiros, A. F., **Observacoes de ondas de gravidade atraves do imageamento da aeroluminescencia**. São José dos Campos. 187p, (INPE-10478-TDI/932). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

Mendillo, M, Tyler, A., Geometry of depleted plasma regions in the equatorial ionosphere. **Journal of Geophysical Research**, 88, 577, 1983.

Mendillo, M., Baumgardner, J., Nottingham, D., Aarons, J., Reinisch, B., Scali, J., & Kelley, M., Investigations of thermospheric-ionospheric dynamics with 6300 images from the Arecibo Observatory. **Journal of Geophysical Research**, 102(1), A4, 7331–7343, 1997.

Mukherjee, G.K., Shetti, D.J., Plasma drift motion in F-region of ionosphere using photometric nightglow measurements. **Indian Journal of Radio & Space Physics**, 37, 249–257, 2008.

Muldrew, D. B., The formation of ducts and spread F and the initiation of bubbles by field-aligned currents. **Journal of Geophysical Research**, 85, 613-625, 1980.

Nava, O. A., Analysis of plasma bubble signatures in the ionosphere. **Thesis- Department of the Air Force Air University, Air Force Institute of Technology**, 81, 2011.

Nishioka, M., Saito, A., Tsugawa, T., Occurrence characteristics of plasma bubble derived from global ground-based GPS receiver networks. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 133, 5, 2008. DOI: 10.1029/2007JA012605.

Oya, H., Takahashi, T., Watanabe, S., Observation of Low Latitude Ionosphere by the Impedance Probe on Board the Hinotori Satellite. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, 38, 111-123, 1986.

Patil, P. T., Ghodpage, R. N., Taori, A. K., Patil, R. P., Gurubaran, S., Nikte, S. N., Nade, D.P., Sharma, A. K., Banola, S., Narayanan, V. L., Siingh, D., The study of equatorial plasma bubble during January to April 2012 over Kolhapur (India). **Annals of Geophysics**, 59, 2, 2016. <https://doi.org/10.4401/ag-6868>.

Paulino, I., Medeiros, A. F., Buriti, R. A., Sobral, J. H. A., Takahashi, H., Gobbi, D., Optical observations of plasma bubble westward drifts over Brazilian tropical region. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 72, 521-527, 2010.

Paulino, I., Takahashi, H., Medeiros, A. F., Wrasse, C. M., Buriti, R. A., Sobral, J. H. A., Gobbi, D., Mesospheric gravity waves and ionospheric plasma bubbles observed during the COPEX campaign, **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 73, 1575-1580, 2011.

Paulino, I., Medeiros, A. F., Vadas, S. L., Wrasse, C. M., Takahashi, H., Buriti, R. A., Filgueira, S., Bageston, J. V., Sobral, J. H. A., Gobbi, D., Periodic waves in the lower thermosphere observed by OI630 nm airglow images. **Annales Geophysicae**, 34, 2, Copernicus GmbH, 293-301293–301, 2016. <https://doi.org/10.5194/angeo-34-293-2016>.

- Pimenta, A. A., Fagundes, P. R., Bittencourt, J. A., & Sahai, Y., Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions. **Advances in Space Research**, 27, 6-7, 1213-1218, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00200-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00200-9).
- Pimenta, A. A., Fagundes, P. R., Bittencourt, J. A., Sahai, Y., Gobbi, D., Medeiros, A. F., Taylor, M. J., Takahashi, H., Ionospheric plasma bubble zonal drift: A methodology using OI 630 nm all-sky imaging systems. **Advances in Space Research**, 27, 6-7, 1219-1224, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00201-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00201-0).
- Pimenta, A. A., Fagundes, P. R., Sahai, Y., Bittencourt, J. A., & Abalde, J. R. Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations. **Annales Geophysicae European Geosciences Union**, 21, 2315–2322, 2003.
- Pimenta, A.A., Amorim, D.C.M., Candido, C.M.N., Thermospheric dark band structures at low latitudes in the Southern Hemisphere under different solar activity conditions: a study using OI 630 nm emission all-sky images. **Geophysical Research Letters**, 35, L16103, 2008. <http://dx.doi.org/10.1029/2008GL034904>.
- Rastogi, R.G., Solar-cycle effects on radio scintillations at Huancayo. **Indian Journal of Radio and Space Physics**, 11, 215–221, 1982.
- Sahai, Y., Fagundes, P. R., & Bittencourt, J. A., solar cycle effects on large-scale equatorial F-region plasma depletions. **Pergamon Advances in Space Research**, 24, I, 1477–1480, 1999.
- Sahai, Y., Fagundes, P. R., Bittencourt, J. A., Transequatorial F-region ionospheric plasma bubbles: solar cycle effects. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 62, 15, 1377-1383, 2000. ISBN: 1364-6826.

Sahai, Y., Fagundes, P.R., Bittencourt, J.A., Abdu, M.A. Occurrence of large-scale equatorial F-region plasma depletions during geo-magnetic disturbances. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 60, 1593–1604, 1998.

Sahai, Y., Fagundes, P. R., Abalde, J. R., Pimenta, A. A., Bittencourt, J. A., Otsuka, Y., Rios, V. H., Generation of large-scale equatorial F-region plasma depletions during low range spread-F season. **Annales Geophysicae**, 22, 1, 15-23, 2004.

Sharma, A. K., Nade, D. P., Nikte, S. S., Patil, P. T., Ghodpage, R. N., Vhatkar, R. S., Rokade, M. V., Gurubaran, S., Occurrence of equatorial plasma bubbles over Kolhapur. **Advances in Space Research: Elsevier** , 54, 3, 435-442, 2014.

Shiokawa, K., Otsuka, Y., Ogawa, T., & Wilkinson, P. Time evolution of high-altitude plasma bubbles imaged at geomagnetic conjugate points. **Annales Geophysicae**, 22, 3137–3143, 2004.

Sigernes, F.; Lorentzen, D. A.; Heia, K.; Svenoe, T. Multipurpose spectral imager. **Applied optics, Optical Society of America**, 39, 18, 3143–3153, 2000.

Smith, J. M., Rodrigues, F. S., Fejer, B. G., Milla, M. A., Coherent and incoherent scatter radar study of the climatology and day-to-day variability of mean F region vertical. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 1466-1482, 2015. DOI: 10.1002/2015JA021934.

Sobral, J. H. A., Abdu, M. A., Takahashi, H., Taylor, M. J., De Paula, E. R., Zamlutti, C. J., de Arquino, M. G., Borba, G. L., Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977-1998) of 630 nm airglow observations. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 64, 12-14, 1517-1524, 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S1364-6826\(02\)00089-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00089-5).

Sultan, P. J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F. **Journal of Geophysical Research**, 101(A12), 26875, 1996. <https://doi.org/10.1029/96JA00682>.

Takahashi, H., Batista, P., Sahai, Y., Clemesha, B., Atmospheric wave propagations in the mesopause region observed by the oh (8, 3) band, NaD, O<sub>2</sub> a 8645 aa band and OI 5577 aa nightglow emissions. **Planetary and space science, Elsevier**, 33, 4, 381–384, 1985.

Takahashi, H., Wrasse, C. M., Pancheva, D., Abdu, M. A., Batista, I. S., Lima, L. M., Batista, P. P., Clemesha, B. R., Shiokawa, K., Signatures of 3–6 day planetary waves in the equatorial mesosphere and ionosphere, **Angeo**, 24, 12, 3343-3350, 2006. DOI: 10.5194/angeo-24-3343-2006.

Taori, A., Makela, J.J., Taylor, M., Mesospheric wave signatures and equatorial plasma bubbles: a case study. **Journal of Geophysical Research**, 115, A6, 2010. <http://dx.doi.org/10.1029/2009JA015088>.

Taori, A., Patra, A. K., Joshi, L. M., Gravity wave seeding of equatorial plasma bubbles: An investigation with simultaneous F region, E region, and middle atmospheric measurements. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 116, 5, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JA016229>. ISBN: 0148-0227.

Taylor, M. J., Garcia, F. J., A two-dimensional spectral analysis of short period gravity waves imaged in the oi (557.7 nm) and near infra-red oh nightglow emissions over Arecibo, Puerto Rico. **Geophysical research letters, Wiley Online Library**, 22, 18, 2473–2476, 1995.

Taylor, M. J.; Pendleton, W. R.; Clark, S.; Takahashi, H.; Gobbi, D.; Goldberg, R. A. Image measurements of short-period gravity waves at equatorial latitudes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 102, D22, 26283–6299, 1997. ISSN 2156-2202. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1029/96JD03515>.

Tsunoda, R. T., Bubenik, D. M., Thampi, S. V., Yamamoto, M., On large-scale wave structure and equatorial spread F without a post-sunset rise of the F layer. **Geophysical Research Letters**, 37, L07105, 2010. Doi: 10.1029/2009GL042357.

Tsunoda, R. T., Control of seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillation by the longitudinal gradient in integrated E region Pederson conductivity. **Journal of Geophysical Research**, 90, 447-456, 1985.

Vineeth, C., Jose, Lijo, Pant, T. K., Planetary wave oscillations in the occurrence time of equatorial spread-F. **30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSIGASS**, 30-33, 2011. DOI: 10.1109/URSIGASS.2011.6050977.

Wallace, J. M., Hobbs, P. V., Atmospheric science, an introductory survey. **Analysis**, 7, P 504, 2006. <https://doi.org/10.1007/s007690000247>

Watanabe, S., Oya, H., Occurrence Characteristics of Low Latitude Ionosphere Irregularities Observed by Impedance Probe on Board the Hinotori Satellite. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, 38, 125-149, 1986.

Weber, E. J., Buchau, J., Eather, R. H., Mende, S. B., North-South aligned equatorial airglow depletions. **Journal of Geophysical Research**, 83, 712, 1978. DOI: 10.1029/JA083iA02p00712.

Weber, E. J., Buchau J., and Moore, J. G., Airborne Studies of Equatorial F-Layer Ionospheric Irregularities. **Journal of Geophysical Research**, 85, 4631–4641, 1980.

Whalen, J. A., Dependence of the equatorial anomaly and of equatorial spread F on the maximum pre-reversal  $E \times B$  drift velocity measured at solar maximum. **Journal of Geophysical Research**, 108 (A5), 1193, 2003. DOI : 10.1029/2002JA009755.

Wiens, R. H., Ledvina, B. M., Kintner, P. M., Afewerki, M., & Mulugheta, Z., Equatorial plasma bubbles in the ionosphere over Eritrea: occurrence and drift speed. **Annales Geophysicae**, 24, 5, 1443–1453, 2006. Retrieved from [www.ann-geophys.net/24/1443/2006/](http://www.ann-geophys.net/24/1443/2006/)

Woodman, R. F., and La Hoz, C., Radar observations of F-region equatorial irregularities. **Journal of Geophysical Research**, 81, 5447, 1976.

Woodman, R. F., Pingree, J. E., and Swartz, W. E., Spread-F-like irregularities observed by the Jicamarca radar during the daytime. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, 47, 867, 1985.

Wrasse, C., Nakamura, T., Tsuda, T., Takahashi, H., Medeiros, A., Taylor, M., Gobbi, D., Salatun, A., Suratno, Achmad, E., Admiranto, A., Reverse ray tracing of the mesospheric gravity waves observed at 23°S (Brazil) and 7°S (Indonesia) in airglow imagers. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, 68, 2, 163 – 181, 2006.

Yokoyama, T., Shinagawa, H., Jin, H., Nonlinear growth, bifurcation, and pinching of equatorial plasma bubble simulated by three-dimensional high-resolution bubble model. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, 119, 12, 10474-10482, 2014. <https://doi.org/10.1002/2014JA020708>

Zalesak, S. T., Ossakow, S. L., and Chaturvedi, P. K., Non-linear equatorial spread F: the effect of neutral winds and background Pederson conductivity. **Journal of Geophysical Research**, 87(A1), 151– 166, 1982.

Zolesi, B., Cander, R., Ionospheric Prediction and Forecasting. **Springer Geophysics**, 240, 2014. ISBN: 978-3-642-38430-1, DOI 10.1007/978-3-642-38430-1.