



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.18.16.55-TDI

**ELETRODINÂMICA DAS IRREGULARIDADES
IONOSFÉRICAS EM BAIXAS LATITUDES E
CARACTERIZAÇÃO DAS PLUMAS EM TRÊS
SETORES DE LONGITUDE**

Ricardo Yvan de La Cruz Cueva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Eurico Rodrigues de Paula, Ivan Jelinek Kantor, e Emanuel Paiva de Oliveira Costa, aprovada em 28 de março de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3BTG5KH>>

INPE
São José dos Campos
2013

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.18.16.55-TDI

**ELETRODINÂMICA DAS IRREGULARIDADES
IONOSFÉRICAS EM BAIXAS LATITUDES E
CARACTERIZAÇÃO DAS PLUMAS EM TRÊS
SETORES DE LONGITUDE**

Ricardo Yvan de La Cruz Cueva

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelos Drs. Eurico Rodrigues de Paula, Ivan Jelinek Kantor, e Emanuel Paiva de Oliveira Costa, aprovada em 28 de março de 2013.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/3BTG5KH>>

INPE
São José dos Campos
2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C894e Cueva, Ricardo Yvan La Cruz.
Eletrodinâmica das irregularidades ionosféricas em baixas latitudes e caracterização das plumas em três setores de longitude / Ricardo Yvan de La Cruz Cueva. – São José dos Campos : INPE, 2013.
xxvi + 151 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m18/2012/05.18.16.55-TDI)

Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

Orientadores : Drs. Eurico Rodrigues de Paula, Ivan Jelinek Kantor, e Emanuel Paiva de Oliveira Costa .

1. ionosfera 2. eletrodinâmica 3. radar VHF 4. spread F.
I.Título.

CDU 551.510.535

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Doutor(a)** em
Geofísica Espacial

Dr. Polinaya Muralikrishna



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Dr. Eurico Rodrigues de Paula



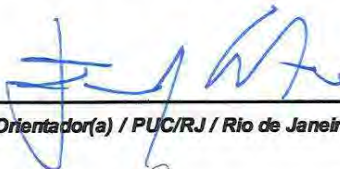
Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Ivan Jelinek Kantor



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Dr. Emanuel Paiva de Oliveira Costa



Orientador(a) / PUC/RJ / Rio de Janeiro - RJ

Dra. Alícia Luiza Clúa de Gonzalez Alarcon



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

Dr. Marcio Tadeu Assis Honorato Muella



Convidado(a) / UNIVAP / São José dos Campos - SP

Dr. Cesar E. Valladares



Convidado(a) / Boston College / Bagé - RS

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): **Ricardo Yvan De La Cruz Cueva**

São José dos Campos, 28 de Fevereiro de 2013

A meus pais

Mario Adelmo e Reyna Cueva

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos são em primeiro lugar para Deus por ter me dado saúde mesmo depois de tanto tombo ao longo desses anos de estudo e pesquisa.

Meus mais sinceros agradecimentos ao meu orientador e professor Dr. Eurico Rodrigues de Paula, pela confiança ao me aceitar como aluno de doutorado, pelo incentivo, amizade e pelos valores que impensavelmente me ensinou em todas as fases deste trabalho, onde o compromisso e a humildade são exemplos que levarei para a vida.

Agradeço à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela bolsa concedida (projeto 200800138-4) para a realização das minhas atividades de ensino e pesquisa no INPE. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida nos primeiros meses do doutorado. Assim como agradeço à Força Aérea America e ao Boston College pela bolsa concedida durante o período do estágio de pesquisa no ISR - BC.

Agradeço ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), e ao programa de doutorado em Geofísica Espacial e a todos os professores e pesquisadores que enriqueceram a minha formação e que, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Dr. Emanuel Costa, pelo empenho e a paciência com que se dedicou na orientação deste trabalho desde a PUC-Rio de Janeiro, e principalmente pelo fornecimento do seu modelo "irregularidades para predição de cintilação" para a conclusão desta tese de doutorado. Um agradecimento ao meu co-orientador Ivan Jelinek Kantor. Ao Dr. Cesar Valladares e Dr. Keith Groves pelo apoio na pesquisa e hospitalidade, assim como paciência durante o estágio de um ano que passei sob supervisão deles, no ISR - Boston College, Boston, USA. Meu agradecimento muito especial ao Dr. B. Fejer pelo interesse, contribuição e colaboração no decorrer deste trabalho de doutorado.

À minha família, e principalmente a meus pais Mario Adelmo e Reyna Cueva, a meus irmãos Juan José (J.J.), Maria Reyna (Puchi), Ingrid Ivonne (Moncha), Haniel (Conejo) e Rosina del Pilar (Pollito), Luis Henrique e Miguel Angel Diego, agradeço a Luciane Teixeira. A todos eles por terem torcido o tempo todo acreditando em mim (mais que eu mesmo).

Aos meus caros amigos e colegas do INPE que por aqui estão e também aos outros que já seguiram novos rumos, Igo Paulino, Ana Paulino, Fabio do Egito, Edjane do Egito, Cláudia Ely, Paulo Alexandre, Patrícia Mara, Marison Fernandes, Márcio Muella, Arian Ojeda, Jorgue e Jaqui, e muitos outros aqui não mencionados. Muito grato pela amizade, intimidade, companherismo e apoio durante longos anos e muitos mais por virem. Um agradecimento especial ao team do ISR Boston College pelo apoio durante o ano de 2010 que passei nessa casa de pesquisas, especialmente à Dra. Patricia Doherty, Dr. Endawoke G. e Dr. Gopi K. Seemala pelo constante apoio e confraternização.



Eu, em Trieste, trabalhando nesta Tese de Doutorado. Na visão é o Adriático.



Meu orientador Dr. Eurico R. de Paula, no congresso científico SBGf (foto da esquerda) e na limosine em San Francisco (foto da direita).

RESUMO

O spread F equatorial (ESF) é consequência do desenvolvimento da instabilidade Rayleigh-Taylor (RT) na base da camada F no equador magnético e esta cresce de forma não linear até o topo da camada. O pico pré-reversão (PRE) do plasma noturno é responsável por criar as condições para a geração da instabilidade RT devido ao incremento de ambos termos gravitacional e eletrodinâmico da taxa de crescimento. Foi estabelecido que o PRE após o pôr-do-Sol é o parâmetro mais importante no controle da geração do spread F, mas não é o único. Uma perturbação inicial é requisito necessário para o início da instabilidade RT. A propagação de ondas de gravidade na termosfera equatorial tem um papel importante como geradores da perturbação inicial na baixa ionosfera, que é requisito para o crescimento da instabilidade GRT e consequentemente a formação do ESF. No presente estudo a estatística de vários aspectos da ocorrência do spread F são apresentados usando radar HF/VHF e radar de espalhamento incoerente localizados em três estações equatoriais: Christmas Island, São Luís and Jicamarca. Os parâmetros do spread F obtidos dos radares apresentados aqui são altura inicial e tempo inicial do bottom-type e da pluma, e a altura pico da pluma de radar os quais estão associados com as características da ocorrência do spread F. O estudo revela resultados originais, como a dependência da ocorrência do spread F com a sazonalidade e fluxo solar sobre Christmas Island/São Luís, e dependência longitudinal das características da ocorrência do spread F destas três estações baseada nesses parâmetros. Desenvolveu-se um modelo empírico gerado a partir da análise estatística das estações equatoriais e separadas longitudinalmente. Este tipo de estudo é importante para entender os mecanismos de geração de irregularidades para programas como previsão em tempo real do clima espacial, e o melhoramento de modelos de alerta de cintilações. Foi realizada uma análise quantitativa do papel do PRE como um mecanismo pré-condicionador que através do processo de instabilidade RT leva ao desenvolvimento de bolhas de plasma sobre a América do Sul. Para alcançar este objetivo as detecções de depleções nos valores de TEC foi usado um algoritmo de detecção de bolhas de plasma. O algoritmo de detecção de bolhas na ionosfera, e os parâmetros da digissonda nos fornecem informações sobre as condições do ambiente ionosférico, e ambos estão relacionados à geração e evolução das bolhas de plasma. Encontrou-se que em condições de mínimo solar, a camada F está relativamente em baixa altitude, as perturbações tipo onda verticalmente propagantes, que podem alcançar a parte baixa da região F e contribuem para a geração da instabilidade RT e seus processos de cascata. Estas perturbações podem ser originadas por ondas de gravidade, e servindo como mecanismo gerador/precursor do spread F equatorial. As ondas de rádio são afetadas por fenômenos de reflexão, refração, difração, absorção, despolarização e espalhamento. Este sinal de rádio é afetado pelas mudanças do perfil vertical da temperatura e do vapor de água na troposfera e densidade de ionização na ionosfera. Como fatores que influenciam a propagação de sinais de rádio na ionosfera temos a camada E esporádica, espalhamento F equatorial, estruturas alongadas

(bolhas de plasma) na camada ionosférica, explosões solares, tempestades geomagnéticas, e outros eventos solares. A turbulência do plasma associada a bolhas de plasma equatorial é geralmente a mais intensa encontrada no globo e sua ocorrência está associada à sazonalidade, longitude, ciclo solar, atividade magnética, exibindo um grande grau de variabilidade dia a dia. O Modelo de Irregularidades para a Predição de Cintilação usado como base desta tese é descrito nos artigos COSTA e BASU (2002), COSTA et al. (2011), valendo-se da técnica “multiple phase screen” (técnica numérica eficiente para simular a propagação de ondas de rádio através de um meio aleatório, gerando flutuações na fase e na amplitude do sinal para acumulá-los dentro do meio) para modelar o índice de cintilação S_4 no solo. Encontrou-se que os parâmetros instrumentais do radar de São Luís assim como os parâmetros espectrais das irregularidades ionosféricas são determinantes e ao mesmo ponto críticos para a melhor predição do índice de cintilação no solo.

ELECTRODYNAMICS OF THE LOW LATITUDE IONOSPHERIC IRREGULARITIES AND CHARACTERIZATION OF PLUMES IN THREE LONGITUDINAL SECTORS

ABSTRACT

ESF is formed by the Rayleigh-Taylor instability in the bottomside F layer above the geomagnetic equator and it grows non-linearly to the topside. The evening plasma prereversal enhancement is responsible to create conditions for the initiation of the Rayleigh-Taylor instability by increasing both the gravitational and electrodynamic terms of the growth rate. It has been established that the height of the post-sunset F layer is the most important parameter controlling the generation of equatorial spread F, but is not the only one. A seed perturbation is a necessary requirement for the initiation of the Gravitational Rayleigh Taylor (GRT) instability. Atmospheric gravity waves generated at tropospheric altitudes and propagating upward to ionospheric altitudes are a potential source for the initial seeding, which is necessary for the growth of GRT and ESF formation. In the present study, statistics of various aspects of spread F occurrence are presented from HF/VHF radars and incoherent scatter radars located at three equatorial stations: Christmas Island, São Luís and Jicamarca. The spread F parameters obtained from radars presented here are the onset altitude and onset time of the bottom-type and plume, and the peak altitude of the plume which are known to be associated with the spread F occurrence characteristics. The study reveals novel features namely, seasonal and solar flux dependence of spread F occurrence over Christmas Island /São Luís, and longitudinal dependence of spread F occurrence characteristics from these three stations based on the chosen parameters. It was generated a radar parameter empirical model developed combining statistical analysis of three equatorial and longitudinally separated stations, which is important to study the irregularity generation mechanisms, for space weather forecasting and nowcasting programs, and to improve scintillation warning models. It was made a quantitative analysis of the role of the PRE as a preconditioning mechanism through the Rayleigh-Taylor instability process leading to the development of ionospheric plasma bubbles over SA. To reach this objective the depletions detection was made with TEC values using bubble detection algorithm. The bubble detection algorithm in the ionosphere, and the digisonde parameters give information about the ionosphere background conditions, and both are related to the generation and evolution of plasma bubbles. Due to the fact that during solar minimum conditions, the F-layer is relatively at low-height, the upward propagating wave-like perturbations that can reach the lower part of the F layer can contribute to the RT instability and its cascading processes. These perturbations could be originated by Gravity Wave, serving as seeding/precursor mechanisms for equatorial spread-F. The radio waves are affected by reflection, refraction, diffraction, absorption, unpolarization and spreading phenomenon. The radio wave is affected by changes in the temperature vertical profile and tropospheric water vapor and ionization density in the ionosphere. As factors influencing the propagation of radio signals in the ionosphere there are the sporadic E layer, equatorial spread F, ionospheric layer elongated structures (plasma bubbles), solar flares, geomagnetic storms, and other solar events. The plasma turbulence associated to equatorial plasma bubbles are generally

the higher found at the globe and their occurrence is associated to season, longitude, latitude, solar cycle, magnetic activity, showing a high variable degree from day to day. The irregularity model to scintillation prediction used as base of one chapter of this thesis is described in the papers COSTA e BASU (2002), COSTA et al. (2011), using the multiple phase screen technique (efficient numerical technique to simulate radio waves propagation through the random medium, generating fluctuations in the signal phase and amplitude to cumulate inside itself) to model S_4 , the scintillation index at the ground. We found out that the São Luís radar instrumentation parameters and the ionospheric irregularities spectral parameters are crucial and at the same time critical for a better prediction of scintillation index at the ground.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 (a) Perfil da ionosfera segundo a função de Chapman.(b) Perfil da ionosfera nos períodos diurno e noturno.	6
2.2 O modelo do eletrojato equatorial em geometria horizontal.	9
2.3 Esquema simplificado de formação do dínamo da região F.	15
2.4 (a) Deriva zonal do plasma da região F tropical medido em Jicamarca para diferentes estações e diferentes condições solares (FEJER et al., 1981). (b) Mesmo que (a), só que para deriva vertical (FEJER et al., 1979).	16
2.5 Modelo simplificado para o estudo do pico pré-reversão da região F com um vento uniforme \mathbf{U} na região \mathbf{F}	17
2.6 Configuração esquemática dos meridianos magnético e geográfico em relação ao terminadouro.	17
2.7 No painel esquerdo a imagem ilustrativa das equações 2.13 e 2.14. No painel direito imagem ilustrativa da taxa de crescimento para a região com colisões e sem colisões.	23
3.1 Esquerda: Diagrama da instabilidade Rayleigh-Taylor no plasma da ionosfera equatorial. Direita: Ilustração da evolução da bolha. FONTE: KELLEY (1989).	27
4.1 Exemplo de Ionograma para o dia 22 de Novembro de 2002. Adaptado de REINISCH et al. (2004).	37
4.2 Irregularidades de 5 metros observado pelo radar de São Luís. (a) Estrutura denominada Bottom-type sem pluma para o dia 01/04/2002, e (b) estrutura bottom-type com plumas para o dia 18/12/2002.	41
4.3 A imagem da esquerda mostra as redes GPS LISN,OSU, IGS e SIRGAS. A imagem da direita mostra os nomes dos receptores GPS espalhados no continente SA sem distinção da rede à que pertencem.	44
4.4 Imagem ilustrativa do satélite C/NOFS lançado em 2008.	46
5.1 Variabilidade morfológica de estruturas presentes nos gráficos RTI sobre a estação de Jicamarca. Painel superior mostra dias 24 a 28 de Setembro de 2008 (mínimo solar), e o painel inferior mostra os dias 14 a 18 de Setembro de 2002 (máximo solar).	52

5.2	(a) Características da Pluma de radar observado na estação de São Luís em 01 Dezembro, 2002, (b) características da pluma observada na estação de Christmas Island em 25 Agosto, 2003. Os parâmetros de radar VHF estão destacados em texto de cor preta.	56
5.3	Ocorrência sazonal das irregularidades spread F combinando os períodos em estudo (independente do fluxo solar).	58
5.4	Parâmetros de radar VHF para a estação de Christmas Island como função do fluxo solar para equinócio.	61
5.5	Parâmetros de radar VHF para a estação de Christmas Island como função do fluxo solar para solstício de verão para o hemisfério norte.	62
5.6	Parâmetros de radar VHF para a estação de Christmas Island como função do fluxo solar para solstício de inverno para o hemisfério norte.	63
5.7	Parâmetros de radar VHF para a estação de São Luís como função do fluxo solar para equinócio.	64
5.8	Parâmetros de radar VHF para a estação de São Luís como função do fluxo solar para solstício de verão.	65
5.9	Parâmetros de radar VHF para a estação de Jicamarca como função do fluxo solar para equinócio.	66
5.10	Parâmetros de radar VHF para a estação de Jicamarca como função do fluxo solar para solstício de verão.	67
5.11	Comparação longitudinal para equinócio dos parâmetros de radar VHF. O quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10.	68
5.12	Comparação longitudinal para o solstício nov-fev dos parâmetros de radar VHF. O quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10.	69
5.13	Comparação sazonal/longitudinal dos parâmetros de tempo do radar. Os símbolos quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10. A linha CXI2 representa a estação de CXI correspondente a mai-ago.	69
5.14	Comparação sazonal/longitudinal dos parâmetros de altitude do radar. Os símbolos quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10. A linha CXI2 representa a estação de CXI correspondente a mai-ago.	70
5.15	Ocorrência dos parâmetros T_i (em vermelho) e T_p (em azul) como função da hora local, mostrando variação sazonal, e irrespectivo do fluxo solar.	71

5.16	Variação temporal do parâmetro T_i em apresentação tipo “fatias de pizza”, com o tempo representado por círculos concêntricos variando das 1900 LT a 0200 LT, onde o último círculo concêntrico representa das 2400 LT a 0200 LT.	72
5.17	Variação temporal do parâmetro T_p em apresentação tipo “fatias de pizza”, com o tempo representado por círculos concêntricos variando das 1900 LT a 0200 LT, onde o último círculo concêntrico representa das 2400 LT a 0200 LT.	73
6.1	Rede GPS LISN (em verde) e 3 outras redes Osu-Cap, SIRGAS e IGS (em vermelho). As setas indicam a localização das digissondas de Jicamarca e São Luís, e um diamante indica a posição do imageador de São João do Cariri.	79
6.2	Exemplo do método ABDA para detecção de bolhas de plasma usando valores de TEC. Detecção feita sobre os dados de TEC calculados a partir do satélite PRN 14, sobre a estação de Alta Floresta, no Brasil. O painel inferior (lilás) mostra o zoom dos valores do TEC apresentados no painel acima em azul.	82
6.3	Detecção de depleções TEC na América do Sul. No painel esquerdo as detecções foram feitas para março de 2008, e no painel da direita para dezembro de 2008. Cortesia de G. Seemala e C. Valladares (2012) em comunicação pessoal.	83
6.4	Detecção do número de bolhas de plasma no continente Sul Americano por dia e longitude para o ano 2008. Cortesia de G. Seemala e C. Valladares (2012) em comunicação pessoal.	84
6.5	Altura real da Digissonda de São Luís para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.	85
6.6	Altura real da Digissonda de Jicamarca para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.	86
6.7	Velocidade de deriva vertical da Digissonda de São Luís para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.	86

6.8	Velocidade de deriva vertical da Digissonda de Jicamarca para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.	87
6.9	Evento 10/11/2009. À esquerda: no topo, os parâmetros de Jicamarca (altura e velocidade vertical) e na base, os parâmetros de São Luís (altura e velocidade vertical). À direita: mapa de depleções TEC sobre o continente, onde as cores diferentes são representativos de intervalos diferentes de horário universal.	89
6.10	Evento 08/11/2009. À esquerda: no topo, os parâmetros de Jicamarca (altura e velocidade vertical) e na base, os parâmetros de São Luís (altura e velocidade vertical). À direita: no topo, mapa de depleções TEC sobre o continente, onde as cores diferentes são representativos de intervalos diferentes de horário universal, e na base, estrutura bottom-type observada no radar de Jicamarca (não tem dados para o radar de São Luís).	91
6.11	Evento 26/12/2009. À esquerda: no topo, os parâmetros de Jicamarca (altura e velocidade vertical) e na base, os parâmetros de São Luís (altura e velocidade vertical). À direita: no topo, mapa de depleções TEC sobre o continente, onde as cores diferentes são representativos de intervalos diferentes de horário universal, e na base, estrutura bottom-type observada no radar de Jicamarca (não tem dados para o radar de São Luís).	93
6.12	Ocorrência das depleções TEC detectadas com o ABDA de Setembro a Dezembro 2009 e Janeiro 2010. As barras pretas/brancas representam que as bolhas foram detectadas ou não (SIM/NÃO) com o algoritmo ABDA.	94
6.13	Ocorrência do PRE de Setembro a Dezembro 2009 e Janeiro 2010. A estatística foi tomada dos dados de Digissonda. As barras pretas/brancas representam observações ou não (SIM/NÃO) de PRE para cada mês.	94
6.14	Porcentagem de ocorrência do PRE contra as depleções TEC (ABDA) de Setembro a Dezembro 2009 e Janeiro 2010. As barras preta/branca representam SIM/NÃO observações PRE para cada mês, e as barras de cor azul representam a porcentagem de ocorrência de depleções TEC quando PRE é observado (sobre as barras pretas) ou não observadas (sobre as barras brancas).	96

6.15	Resultado similar ao da Figura 6.14 mas para Jicamarca e Fortaleza, de Setembro a Dezembro de 2008. Os valores em percentagem sobre as barras substituem as barras azuis no gráfico 6.14.	98
6.16	Estruturas tipo onda durante um evento bottom-type no dia 323, 19 de Novembro de 2009. Painéis (a) apresentam o sinal TEC (em azul) e as perturbações no TEC depois de aplicado o filtro passa-banda (vermelho), o painel (b) mostra as trajetórias dos satélites sobre as estações usadas. O painel (c) mostra o mapa RTI para este evento, sobre a estação de São Luís.	100
6.17	Evidência de ondas de gravidade sobre a região leste de América do Sul. No painel (a) é o mapa de TECds sobre a América do Sul, no painel (b) mostram-se as perturbações no TEC. Painéis (c) e (d) mostram a emissão airglow sobre a estação de São João do Cariri, e o painel (d) mostra os parâmetros da digissonda na estação de São Luís.	102
6.18	Sequência temporal de TIDs na região brasileira viajando em direção leste-norte.	103
7.1	O painel esquerdo mostra a geometria do sinal atravessando a ionosfera até o receptor em solo (GPS). A ilustração da direita mostra a técnica de MPS aqui aplicada. Imagens adaptadas de GRIMAULT (1998).	108
7.2	Esquema completo do modelo tri-dimensional, combinando a geração das flutuações da densidade eletrônica e o algoritmo de propagação das ondas de rádio, com os mapas RTI de São Luís para o dia 5 de Dezembro, 2002. Adaptado de COSTA et al. (2011).	114
7.3	Variação do S4 medido e S4 calculado em função do tempo e ângulo de elevação, quando a constante do radar é 2.8×10^{11} , para os dias do período de máximo (2001, 2002) solar. Veja-se dados do radar de São Luís no painel esquerdo para cada dia.	117
7.4	Variação do S4 medido e S4 calculado em função do tempo e ângulo de elevação, quando a constante do radar é 2.8×10^{11} , para os dias do período de mínimo (2008, 2010) solar. Veja-se dados do radar de São Luís no painel esquerdo para cada dia.	118
7.5	Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel superior) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel inferior), para o período de Solar Máximo. As cores vermelho, azul e verde representam os dias 16 de novembro 2001, 06 de outubro 2002, e 05 de dezembro 2002, respectivamente.	123

7.6	Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel superior) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel inferior), para o período de Solar Mínimo. As cores vermelho, azul e verde representam os dias 09 outubro 2008, 03 dezembro 2008 e 27 outubro 2010, respectivamente.	124
7.7	Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel da esquerda) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel da direita), para o período de Solar Máximo. O código de cores representa, de baixo pra cima, o valor da constante de radar de menor para maior valor.	125
7.8	Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel da esquerda) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel da direita), para o período de Solar Mínimo. O código de cores representa, de baixo pra cima, o valor da constante de radar de menor para maior valor.	126
7.9	Análise para os dias 16/11/2001 (painel superior) e 06/10/2002 (painel inferior). À esquerda observam-se os gráficos polares-horários com as posições/identificações de cada satélite. À direita superior, o radar VHF de São Luís e dados S4 medidos/calculados em função do tempo. Nos gráficos da direita inferior, os satélites que seguiram a irregularidade observada no radar.	127
7.10	Análise para os dias 05 de dezembro 2002 (painel superior) e 27 outubro 2010 (painel inferior). Análise similar à figura anterior.	128
7.11	Análise para os dias 09 de outubro 2008 (painel superior) e 03 dezembro 2008 (painel inferior). À esquerda observam-se os gráficos polares com as posições e identificações para cada satélite GPS, de hora em hora. À direita, o gráfico RTI do radar VHF de São Luís juntamente com dados S4 medidos e calculados em função do tempo local.	129

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
5.1 Tabela 1. Coordenadas geográficas e geomagnéticas das estações ionosféricas equatoriais.	54
5.2 Número de eventos spread F separados por tipo de assinatura, e sobre as estações de São Luís, Jicamarca e Christmas Island.	59
5.3 Modelo empírico do radar VHF baseado nas relações dos parâmetros de tempo e altitude para as estações SLZ, ROJ e CXI, obtidos a partir das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10.	74
6.1 Número de dias disponíveis em cada mês para as digissondas e receptores GPS. Os números entre parênteses referem-se a dados de Jicamarca, e os sem parênteses referem-se a São Luís, quando referido à digissonda. . . .	78
6.2 Conjunto de dados de PRE e depleções TEC (TECd) para as estações de São Luís e Jicamarca para Setembro de 2009 a Janeiro de 2010. Os números entre parênteses indicam o total de dias em que não foram observados TECd ou PRE, respectivamente.	79
7.1 Dias no período de máximo e mínimo solar. Dados RTI do radar VHF da estação ionosférica equatorial de São Luís, Brasil.	115
7.2 Parâmetros do radar VHF de São Luís, e dados de parâmetros espectrais obtidos a partir de dados do satélite C/NOFS.	116

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDA	–	Automatic Bubble Detection Algorithm
CME	–	Coronal Mass Ejection
C/NOFS	–	Communication/Navigation Outage Forecasting System
EPB	–	Equatorial Plasma Bubble
ESF	–	Equatorial Spread F
EEJ	–	Equatorial Electrojet (Eletrojato Equatorial)
EIA	–	Equatorial Ionization Anomaly
ISR	–	Incoherent Scatter Radar
IEF	–	Interplanetary Electric Field (Campo elétrico interplanetário)
IBGE	–	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IMF	–	Interplanetary Magnetic Field (Campo Magnético Interplanetário)
FAC	–	Field Aligned Current (Corrente Alinhada ao Campo)
GW	–	Gravity Wave
GWBA	–	Gravity Wave B-Alignment
GNSS	–	Global Navigation Satellite System
GPS	–	Global Positioning System
GRT	–	Generalized RT
JPL	–	Jet Propulsion Laboratory
LISN	–	Low-Latitude Ionospheric Sensor Network
LSWS	–	Large Scale Wave Structure
LT	–	Local Time (Hora Local)
NOAA	–	National Oceanic and Atmospheric Administration
MLT	–	Magnetic Local Time (Hora Local Magnética)
PRE	–	Prereversal Enhancement (Pico pré-reversão)
RBMC	–	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RT	–	Rayleigh Taylor
STBA	–	Solar Terminator B-Alignment
TAD	–	Travelling Atmospheric Disturbances (Perturbações Atmosféricas Propagantes)
TID	–	Travelling Ionospheric Disturbances (Perturbações Ionosféricas Propagantes)
TEC	–	Total Electron Content (Conteúdo Eletrônico Total)
TECU	–	Total Electron Content Unit (Unidade de Conteúdo Eletrônico Total)
UT	–	Universal Time (Hora Universal)

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da Tese	3
2 FÍSICA DA IONOSFERA	5
2.1 A Ionosfera	5
2.1.1 Antecedentes históricos do descobrimento da Ionosfera	5
2.1.2 Formação e Estrutura da Ionosfera	6
2.2 Eletrodinâmica da Ionosfera na Região Equatorial	8
2.2.1 Dínamo da Região E	8
2.2.2 Efeito Fonte e Anomalia Equatorial	10
2.2.3 Formação do dínamo da região F	11
2.2.4 O pico de “pré-reversão” da deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ do plasma ionosférico	15
2.3 Espalhamento Equatorial da Região F	18
2.4 Plumas de radar VHF	20
2.4.1 Morfologia:	20
2.4.2 Variabilidades no ESF	22
2.4.3 Estruturas verticais e inclinadas de plumas	23
3 GERAÇÃO DE IRREGULARIDADES NA REGIÃO F	25
3.1 Teoria da Instabilidade Rayleigh-Taylor (RT)	25
3.1.1 Mecanismo de instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor (GRT)	26
3.1.2 A taxa de crescimento da Instabilidade linear RT	28
3.1.3 Teoria Generalizada da IRT	29
3.2 Mecanismo de Instabilidade “Cross-Field” (ICF)	31
3.3 Ondas de Gravidade	32
4 INSTRUMENTAÇÃO	35
4.1 Digissonda	35
4.1.1 Sobre Ionogramas	36
4.1.2 Cálculo da deriva vertical do plasma ionosférico	37
4.2 Radar VHF	39

4.3	GPS	42
4.3.1	Sobre GPS	42
4.3.2	Cálculo de TEC	45
4.4	Satélite C/NOFS	45
5	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE ESF OBTI-	
	DOS DE RADARES VHF EM TRÊS SETORES LONGITUDI-	
	NAIS.	49
5.1	Introdução	49
5.2	Distribuição de parâmetros de plumas ionosféricas equatoriais	50
5.3	Base de dados	54
5.4	Metodologia	54
5.5	Resultados e Discussões	56
5.5.1	Ocorrência Sazonal dos parâmetros do Spread F sobre CXI e compa- ração com São Luís e Jicamarca	57
5.5.2	Parâmetros do spread F em função do fluxo solar durante diferentes sazonalidades.	60
5.5.3	Efeito longitudinal nos parâmetros de radar	62
5.6	Conclusões	70
6	VARIAÇÃO LONGITUDINAL DA OCORRÊNCIA DO	
	SPREAD F NA AMÉRICA DO SUL.	75
6.1	Introdução	75
6.2	Base de Dados	77
6.2.1	Método utilizado para obter a depleção do TEC - ABDA	80
6.3	Análise de Dados	83
6.3.1	Estudo da Variabilidade Longitudinal	87
6.3.1.1	Caso 1: 10 de Novembro 2009 (DoY 314)	88
6.3.1.2	Caso 2: 08 de Novembro 2009 (DoY 312)	90
6.3.1.3	Caso 3: 26 de Dezembro 2009 (DoY 360)	90
6.3.2	Estatística do PRE e de depleções de TEC	92
6.3.3	Análise Quantitativa da efetividade do PRE como mecanismo gerador do spread F	95
6.3.4	Evidência de iniciadores tipo onda	98
6.4	Discussões e Conclusões	103
7	MODELO DE IRREGULARIDADES PARA PREDIÇÃO DE	
	CINTILAÇÃO.	105

7.1	Introdução	105
7.2	Algoritmo de espalhamento de ondas de rádio - “Método da Tela de Fase Múltipla (Multiple Phase Screen) (MPS)”	106
7.3	Teoria do Modelo	108
7.4	Base de dados	115
7.5	Resultados e Discussões	116
8	CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	131
8.1	Conclusões	131
8.1.1	Parâmetros de radar	131
8.1.2	Ocorrência Longitudinal do Spread F	132
8.1.3	Modelo de Irregularidades	132
8.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	135
	ARTIGOS DESENVOLVIDOS NA TESE	153

1 INTRODUÇÃO

Esta tese é direcionada à área de investigação da Ionosfera, especificamente da região F equatorial sobre o continente Sul Americano. Os trabalhos de pesquisa aqui apresentados fazem parte do programa de pós-graduação do INPE, na grande área de Geofísica Espacial - Aeronomia. O principal propósito deste capítulo é justificar a necessidade desta tese, destacar a motivação científica e a metodologia empregada/desenvolvida para sua realização.

1.1 Motivação

A ionosfera é uma das altas camadas da Terra, que localiza-se entre 60 a 1000 km de altitude e conhecida como um plasma magnetoionizado. Esta região apresenta diferentes estratificações devidas à sua composição iônica e densidade (por exemplo D, E, F), variando sua composição com o dia e a noite. Nossa pesquisa limita-se ao estudo da região F da ionosfera equatorial.

As irregularidades do plasma ionosférico podem ser observadas em seus diferentes estágios de desenvolvimento. Como exemplos podemos citar as camadas de bottom-type, bottomside e plumas (observadas nos dados de radar VHF), cujas ocorrências/características encontram-se confinadas a uma faixa de altitude dentro da região F ionosférica. A faixa de altitude na qual ocorrem estas irregularidades varia em função da sazonalidade, hora local, posição geográfica e geomagnética, atividade geomagnética, fluxo solar, assim como da intensidade da deriva vertical no horário do pôr-do-Sol.

Estas estruturas no plasma ionosférico equatorial no período noturno, amplamente conhecidas como irregularidades de espalhamento F equatorial (equatorial spread F - ESF), continuam sendo um problema desafiador para as pesquisas científicas e de predições no âmbito do clima espacial (space weather) assim como para sistemas de comunicações e de navegação. As irregularidades podem ser detectadas usando radares de espalhamento coerente e incoerente, equipamentos de sondagem in-situ, experimentos de rádio-propagação e cintilação, e detectores de emissões air-glow assim como ionossondas. Embora as irregularidades representem um contínuo de escalas, cada técnica de sondagem é sensível a um tamanho de escala particular.

O grande avanço no estudo do fenômeno do ESF vieram dos resultados de medidas de radar VHF de espalhamento incoerente [e.g., FARLEY et al. (1970), WOOD-

MAN e LA HOZ (1976)]. É bem conhecido que irregularidades de escalas de metros observados no radar de espalhamento coerente decaem mais rapidamente que as irregularidades de escala de centenas de metros responsáveis pela cintilação (BASU et al., 1978). Desde então muitos trabalhos têm trazido uma grande melhoria no entendimento do ESF em baixas latitudes e latitudes equatoriais [HYSELL e BURCHAM (1998), HYSELL (2000), DE PAULA e HYSELL (2004), FARLEY et al. (1986), KELLEY (1989), ABDU (2001), TSUNODA (2008), TSUNODA (2010a), TSUNODA (2010b), TSUNODA et al. (2010), DE PAULA et al. (2011)].

1.2 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

Quantificar/analisar a distribuição das bolhas de plasma nos setores da América do Sul e do Pacífico Central, como uma função do ciclo solar.

Determinar o comportamento das irregularidades de plasma na região F equatorial como função da longitude, do ciclo solar e das variações sazonais em três setores de longitude, porque são importantes para o entendimento da física da sua ocorrência e seu desenvolvimento, estudando o comportamento dos parâmetros de spread F obtidos de radares VHF localizados em diferentes longitudes.

Estudar a variabilidade dia a dia da assinatura das irregularidades do plasma ionosférico equatorial sobre a América do Sul durante o período de mínimo solar. De fato há dias em que o pico pré-reversão (PRE) não é observado mas bolhas são encontradas nos instrumentos de sondagem ionosférica, o que sugere que existem outros mecanismos como LSWS (Large Scale Wave Structures) ou GW (Gravity Waves) potencialmente responsáveis pela geração de irregularidades. Portanto, algumas questões podem surgir, como: quão efetivos são os mecanismos de LSWS e GW quando comparados com PRE?, ou quão efetivamente atuam em conjunto?

Comparar a variabilidade do spread F, medido no índice de cintilação para máximo e mínimo solar, com o uso de modelos de irregularidades e de propagação para predição do índice de cintilação S_4 medido em solo, em presença de irregularidades ionosféricas (plumas), na estação de São Luís. Fazer a predição do índice S_4 para o período de máximo e mínimo solar.

1.3 Estrutura da Tese

A presente tese foi estruturada para alcançar os objetivos citados acima da seguinte forma:

O capítulo 2 faz uma descrição detalhada sobre a teoria dos fenômenos físicos que ocorrem na ionosfera noturna, principalmente na região F equatorial. Começa com os antecedentes históricos do descobrimento da ionosfera como a camada refletora das ondas de rádio, assim como sua formação e estrutura. Posteriormente explica a eletrodinâmica da ionosfera equatorial e aborda a descrição teórica dos vários fenômenos que ocorrem para o desenvolvimento de irregularidades no horário do pôr-do-Sol.

O capítulo 3 apresenta as teorias das instabilidades Rayleigh-Taylor e Cross-Field. A importância das ondas de gravidade como mecanismos de geração de irregularidades ionosféricas é também discutida.

O capítulo 4 descreve os instrumentos usados para o desenvolvimento desta pesquisa. Digissondas, radares VHF, receptores GPS, e satélite de Communication/Navigation Outage Forecasting System (C/NOFS) estão entre os principais instrumentos, com o auxílio dos quais foi obtida uma ampla base de dados.

O capítulo 5 apresenta o desenvolvimento físico/estatístico das irregularidades de plasma observadas por três radares VHF/HF. O estudo aqui apresentado começa por explorar a ocorrência/desenvolvimento das estruturas de radar em três setores de longitude diferentes, nos quais estão situadas as estações de São Luís (no Brasil), de Jicamarca (no Perú), e de Christmas Island (em Kwajalein, Pacífico Central). São apresentados os parâmetros das medidas realizadas pelos radares que foram utilizados no estudo destinado a cumprir nosso objetivo. Estes parâmetros de radar (como tempo e altura das estruturas ionosféricas) são obtidos a partir de dados históricos que abrangem máximo e mínimo solar para Jicamarca e São Luís, e mínimo solar para Christmas Island. Com base nestes parâmetros de radar são feitos estudos de variação com o fluxo solar, ocorrência ao longo do ano, ocorrência sazonal, ocorrência em função do tempo, e comparações em função da longitude para estas três estações equatoriais. Os resultados e conclusões são apresentados no final do capítulo.

O capítulo 6 nos traz a ocorrência longitudinal do spread F sobre América do Sul,

principalmente sobre as estações equatoriais de São Luís e Jicamarca para o período de setembro-dezembro 2009 e janeiro 2010. Foram usados dados de GPS das redes espalhadas na América do Sul, e dados das digissonda de São Luís e Jicamarca. É feito um detalhamento da metodologia usada para obtenção dos dados como depleções no conteúdo eletrônico total (do inglês Total Electron Content - TEC), altura real, e velocidade da deriva vertical para o período de interesse. O objetivo é entender a ocorrência do spread F na América do Sul, sua distribuição em longitude assim como sua variabilidade dia a dia. Os parâmetros aqui estudados foram a ocorrência de spread F observada nos dados de digissonda e nos dados de depleções no TEC. Uma comparação entre estes dois parâmetros é feita para São Luís e Jicamarca. Esta variação longitudinal e com o dia a dia é analisada em detalhe para alguns casos, e posteriormente é feita a procura de estruturas do tipo onda que poderiam levar à ocorrência do spread F quando o PRE está presente, ou não. Resultados são apresentados no final do capítulo.

O capítulo 7 começa descrevendo um modelo de previsão do índice S4 em solo a partir de dados de satélite in-situ, usando dados do radar VHF e GPS localizados na estação de São Luís. Após fazer a análise matemática apresentam-se os resultados para máximo e mínimo solar, com variação da constante de radar para melhor ajustar a predição aos valores medidos do índice de cintilação.

Finalmente o capítulo 8 lista os resultados principais das pesquisas aqui desenvolvidas. Apresenta, ainda, trabalhos futuros que poderiam ser desenvolvidos em continuidade a esta tese. Finalizando a tese, este capítulo lista artigos resultantes do trabalho associado, sendo alguns já publicados e outros já submetidos à publicação em periódicos científicos internacionais.

2 FÍSICA DA IONOSFERA

Este capítulo trata da Física que governa a dinâmica na Ionosfera equatorial e de baixas latitudes.

2.1 A Ionosfera

2.1.1 Antecedentes históricos do descobrimento da Ionosfera

Os primeiros indícios que sugeriam a presença na atmosfera terrestre de uma camada elétrica condutora, que agora chamamos de ionosfera, provêm dos estudos do campo magnético terrestre. As pequenas variações diárias do campo magnético se conheciam desde o século XVIII e já em 1839 C.F. Gauss especulou com a idéia que sua origem poderia guardar uma relação com correntes elétricas atmosféricas. A partir dessas variações, Stewart em 1882 deduziu pela primeira vez a existência desta camada e Schuster em 1889 calculou matematicamente as correntes elétricas que deviam fluir nela. Em 1882 na 9th Edição da "Enciclopedia Britânica", Balfour Stewart mostrou que a fonte da perturbação magnética encontrava-se fora da Terra. Ele também sugeriu que o fenômeno poderia ser explicado como devido a uma camada atmosférica condutora sendo arrastada pelo campo geomagnético, através da ação dos ventos. Isto é basicamente a explanação moderna do "dínamo ionosférico" um século depois. Stewart não pode, naquele tempo, formalizar sua teoria devido basicamente à ainda não descoberta do elétron.

Por outro lado, já em 1860 Lord Kelvin também tinha sugerido a existência de uma camada condutora em conexão com o fenômeno de eletricidade atmosférica. G. Marconi teve sucesso ao transmitir ondas de rádio através do Atlântico, em 1901, desde Inglaterra até a América do Norte. Assim foi proposta a existência da camada condutora sugerindo que ela poderia estar constituída de cargas elétricas livres. A justificativa foi trazido por J.E. Taylor e J.A. Fleming, que em 1903 e 1906, respectivamente, sugeriram que a radiação ultravioleta poderia ionizar os constituintes neutros da atmosfera, produzindo as partículas livres carregadas. Estas teorias de uma camada ionizada (ionosfera) são muito próximas às aceitas hoje em dia. Mas não até os trabalhos de Appleton e Barnett, em 1925, e de Breit e Tuve, em 1925, a hipótese de uma camada condutora foi amplamente aceita. Estes autores transmitiram sinais de rádio verticalmente e receberam seus ecos da ionosfera, este experimento

é conhecido como o precursor das modernas ionossondas.

Foi o australiano Sir R. Watson-Watt quem propusera em 1926 o nome de "ionosfera", embora não fora começado a ser usado até uns anos mais tarde. Appleton reconhece a presença de mais de uma camada ionizada, e a ele são devidos os nomes E e F. Depois elétrons foram detectadas na região D estendendo-se abaixo da região E dentro da mesosfera. A ionosfera apresenta uma estrutura vertical típica como é mostrado na Fig. 2.1 (b).

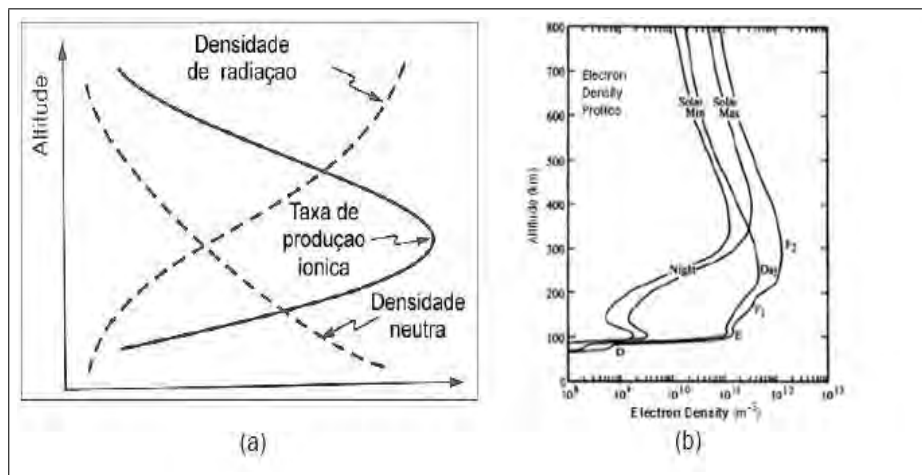


Figura 2.1 - (a) Perfil da ionosfera segundo a função de Chapman.(b) Perfil da ionosfera nos períodos diurno e noturno.

Fonte: Adaptada de SCHUNK e NAGY (2000)

2.1.2 Formação e Estrutura da Ionosfera

A ionosfera localiza-se na parte superior da atmosfera e é parcialmente ionizada rodeando a terra numa faixa de altura de cerca de 60-1000 km, e ela é a interface entre a atmosfera e o espaço. A existência de partículas carregadas é principalmente devido à fotoionização das partículas neutras pela radiação solar UV (ultravioleta) e impacto de partículas energéticas sobre as neutras. Sendo que não é unicamente a ionização que decide a existência do plasma, mas seus processos químicos e de transporte os quais também têm um papel decisivo na ionosfera. A ionosfera também tem um papel importante nas comunicações e navegação tendo utilidade em praticamente todos os aspectos da sociedade moderna. Assim mesmo os sistemas de comunicações dependem da ionosfera ou são afetados por esta. Sua intensidade relativa varia consideravelmente dependendo das altitudes, latitudes, tempo local,

sazonalidade e atividade solar.

A ionosfera é criada principalmente pela radiação EUV (ultravioleta extrema) e raios X que ionizam os constituintes neutros (oxigênio atômico (O), oxigênio molecular (O_2), nitrogênio molecular (N_2), etc.) da alta atmosfera para produzir igual número de íons positivos e elétrons, conhecido como plasma ionosférico. Quando estas emissões solares encontram átomos e moléculas gasosas, transferem energia suficiente para provocar a fotoionização que consiste na liberação de íons carregados positivamente e elétrons livres. A radiação de ionização solar decresce em intensidade, devido à absorção, a medida que penetra na atmosfera mais densa. Por outro lado, a densidade neutra incrementa exponencialmente com o decréscimo da altitude. A combinação desses dois efeitos é responsável pela formação da típica estrutura que apresenta a ionosfera (veja Fig. 2.1).

Devido aos diferentes constituintes neutros com diferentes taxas de absorção em diferentes altitudes, uma série de camadas/regiões estratificadas e superpostas com diferentes densidades de elétrons/íons são criadas. Tais camadas foram representadas pelas letras D, E, F_1 e F_2 . A densidade de ionização de cada uma destas camadas apresentam um valor pico a uma certa altitude, acima e abaixo do qual ela decresce. A camada de ionização acima de 150 km de altitude é denominada como região F. Durante o horário diurno a região F é estratificada em duas camadas, F_1 e F_2 , as quais colapsam para formar uma única camada depois do pôr-do-Sol. A camada F_1 tem um pico de densidade ou uma inflexão ao redor de 200 km. A densidade eletrônica da camada F_2 alcança um valor pico ao redor de 300 km no horário diurno e a região estende-se a altas altitudes durante a noite. A região ionosférica acima do pico da camada F, onde a densidade de ionização decresce exponencialmente com altitude até alcançar níveis abaixo da detecção, é denominado de "topo da ionosfera"(do inglês "topside ionosphere").

Esta região acima do máximo de concentração de elétrons na ionosfera é inacessível pelas técnicas de sondagem com ondas de rádio de alta frequência localizadas no solo. A principal fonte de informação sobre esta região vêm dos satélites in-situ ou satélites de sondagem.

REGIÃO D: É a parte baixa da ionosfera com altitudes de 70 a 90 km. Esta camada desaparece durante o período noturno (Hargreaves, 1992). Na região D existem várias fontes de ionização como radiação Lyman- α , radiação EUV, radiação de raios X, radiação cósmica e partículas energéticas. Durante o período diurno a região D pode refletir ondas de rádio com redução da intensidade das ondas de rádio.

REGIÃO E: Fica acima da região D e estende-se a aproximadamente 160 km. A ionização nessa altitude permanece durante a noite. Esta região é principalmente formada por raios X leves e radiação solar ultravioleta (KELLEY et al., 1979). Normalmente esta camada pode unicamente refletir ondas de rádio com frequências abaixo de 10 MHz e contribui pouco à absorção de frequências maiores. Durante períodos noturnos os níveis de ionização da região E caem devido à falta de radiação solar. Entretanto, um fenômeno significativo na região E, chamada de E esporádica (Es), pode refletir 50 MHz e frequências maiores. Esta camada é caracterizada como transiente, concentrações localizadas de alta densidade eletrônica na região E, que afeta significativamente a propagação de ondas de rádio. A camada Es pode durar por minutos a horas causando cintilação na fase e na amplitude do sinal GPS e apresenta uma forte variação em tempo local e sazonal, assim como acredita-se que tenha uma forte relação com outros processos atmosféricos e ionosféricos (WU et al., 2005).

REGIÃO F: É a região mais alta da ionosfera que fica entre 150 a 1000 km (KELLEY et al., 1979). Ela é principalmente formada pela radiação com comprimentos de ondas entre 20 a 90 nm. A camada F pode ser dividida em sub-camadas F1 e F2. A camada F2 é de grande interesse de pesquisa para propagação de rádio devido a sua grande densidade de elétrons (HARGREAVES, 1992). A região F2 é também muito variável e de predição difícil. Devido ao pico de densidade se localizar entre 350 a 400 km é usada uma camada simples de alta densidade eletrônica para fins de modelagem, assim como para mapeamento de observações do conteúdo eletrônico total (TEC). Eventos de espalhamento F (spread F) é um tipo de irregularidades ionosféricas muito comum depois do pôr-do-Sol (CHEN et al., 2006).

2.2 Eletrodinâmica da Ionosfera na Região Equatorial

Os campos elétricos são importantes por fornecerem as condições físicas necessárias (deriva de plasma vertical por exemplo) para a geração de instabilidades no plasma ionosférico propiciando assim a formação de bolhas, que são o ponto principal deste trabalho de doutorado.

2.2.1 Dínamo da Região E

Para entender melhor a física do dínamo da região E, considerar-se-á uma camada condutora fina, onde o fluxo de corrente está confinado entre 90 e 140 km de altura.

Além disso, correntes verticais podem ser desprezíveis. A Figura 2.2 ilustra o mecanismo do dínamo E, onde a camada estreita está sujeita a um campo elétrico zonal constante ($E\hat{x}$). O campo elétrico perpendicular a \vec{B} , \vec{E}_x , cria uma corrente elétrica na sua própria direção e sentido, a chamada corrente Pedersen ($\sigma_p E_x$). Além disso, E_x cria também uma corrente perpendicular ao plano (\vec{E}_x, \vec{B}), no sentido $-\hat{z}$, a chamada corrente Hall ($\sigma_H E_x$). Já que a corrente Hall não pode fluir através dos limites, as cargas se acumulam em suas fronteiras. Isto gera um campo elétrico de polarização dirigido para cima ($E_z\hat{z}$). Em um estado inicial deste modelo de camada, não há corrente vertical que pode fluir e a corrente Pedersen ($\sigma_p E_x$) (gerado pelo campo de polarização $\sigma_p E_z$) na direção $+\hat{z}$ cancela a corrente Hall ($\sigma_H E_x$). Além disto, o campo elétrico $E_z\hat{z}$ também gera uma corrente Hall na direção $+\hat{x}$ que se soma à corrente Pedersen ($\sigma_p E_x$). Pelo já explicado, a soma das duas correntes verticais leva a:

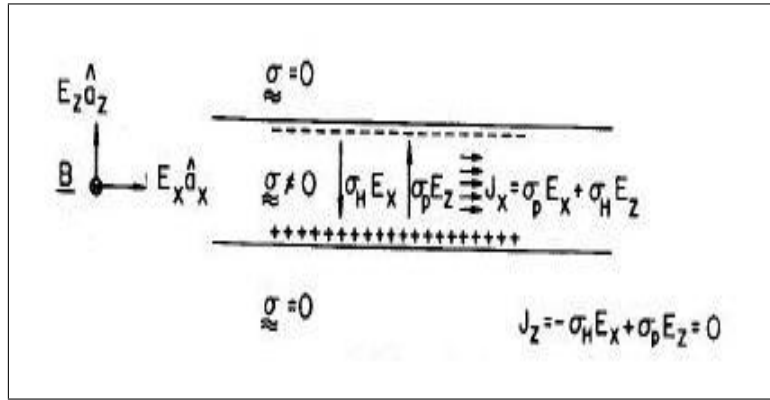


Figura 2.2 - O modelo do eletrojoato equatorial em geometria horizontal.

$$\vec{J}_z = -\sigma_H \vec{E}_x + \sigma_p \vec{E}_z = 0 \quad (2.1)$$

isto implica que $\sigma_H E_x = \sigma_p E_z$, logo:

$$E_z = \frac{\sigma_H}{\sigma_p} \cdot E_x \quad (2.2)$$

Desde que $\sigma_H > \sigma_p$, a componente do campo elétrico vertical excede consideravelmente a componente de campo elétrico zonal. Em resumo, $E_z(z)$ têm a mesma dependência z como a função $\frac{\sigma_p(z)}{\sigma_H(z)}$. Na direção horizontal (\hat{x}) a soma das duas correntes zonais leva ao resultado:

$$J_x = \sigma_H E_z + \sigma_p E_x \quad (2.3)$$

usando o resultado da equação 2.2 a corrente zonal resultante é:

$$J_x = \left[\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1 \right] \sigma_p E_x = \sigma_c E_x \quad (2.4)$$

Este resultado mostra que a condutividade zonal da região condutora é aumentado acima da condutividade Pedersen, por um fator $(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1)$. A grandeza $(\frac{\sigma_H^2}{\sigma_p^2} + 1)\sigma_p$ é conhecido como condutividade Cowling, que aponta perpendicular ao campo magnético da Terra. Assim, a soma destes efeitos gera uma corrente elétrica para leste no hemisfério diurno e para oeste no hemisfério noturno em aproximadamente 105 Km de altitude na região E equatorial. Esta abrange uma faixa de latitude de $\pm 3^\circ$ ao redor do dip equador e é denominado eletrojato equatorial (Equatorial Electrojet-EEJ)(FORBES, 1981).

2.2.2 Efeito Fonte e Anomalia Equatorial

Uma importante característica da região F de baixa latitude é a presença da anomalia equatorial, com pico de densidade de plasma em $\pm 20^\circ$ latitude dip e mínimo no equador magnético. Estes são o resultado do movimento para cima do plasma no equador magnético e sua consequente difusão ao longo das linhas de campo magnético (HANSON e Moffett (1966)). Os picos afastam-se do equador com incremento em tempo local, quando a região F no equador se move para altas altitudes, e alcança um máximo de desenvolvimento em torno das horas da tarde (BASU e DAS GUPTA (1968)).

Em algumas noites uma forte ressurgência da anomalia ocorre; isto é provavelmente devido ao bem conhecido pico pré-inversão (do inglês “prereversal enhancement”) da deriva vertical, o qual geralmente ocorre ao redor das 1900 LT (WOODMAN (1970), TANAKA (1981)).

A anomalia equatorial, que é uma anomalia na distribuição latitudinal de ionização, caracteriza-se por uma menor concentração de partículas ionizadas na região equatorial quando comparada a regiões de mais alta latitude, contrariando o que se poderia esperar pois, no setor equatorial, existe uma maior incidência de fótons solares por unidade de área. Na verdade, nas regiões próximas ao equador geomagnético existe

uma depleção de plasma, havendo picos de concentração eletrônica em torno de aproximadamente $\pm 20^\circ$ de latitude magnética.

O campo elétrico diurno zonal dirigido para leste combinado ao campo geomagnético norte-sul (ambos paralelos à superfície terrestre no equador) gera uma fonte de plasma que se estende por centenas de quilômetros afastados do equador (BALAN et al., 1997). Durante o dia, a deriva ascendente $\vec{E} \times \vec{B}$ eleva o plasma para altas altitudes. O plasma que foi levado para cima, pelo movimento ascendente, difunde-se para baixo, ao longo das linhas de campo magnético, devido à força de gravidade e gradientes de pressão, sendo levado para as regiões afastadas do equador. Esse movimento do plasma, ascendente durante o dia, e descendente, durante a noite, é denominado efeito fonte. Portanto, os picos na concentração eletrônica nas regiões afastadas do equador são mantidos pela difusão do plasma proveniente das regiões sobre o equador.

2.2.3 Formação do dínamo da região F

A teoria do dínamo considera a ionosfera formada por camadas estreitas horizontais, caracterizadas por condutividades anisotrópicas devidas ao campo magnético da Terra, além da presença do campo elétrico. Devido a estas características três correntes elétricas diferentes podem fluir na ionosfera especificamente na região E mas tendo contribuição na camada F, sendo estas a corrente paralela, a corrente Pedersen e a corrente Hall.

Na região F equatorial da ionosfera as condutividades de íons (κ_i) e elétrons (κ_e) são muito altos e daí que as velocidades dos íons e elétrons perpendiculares a \vec{B} são aproximadamente iguais, o que significa que o movimento do fluxo de plasma (velocidade) pode ser definido e relacionado ao campo elétrico. O mecanismo pelo qual os ventos neutros podem gerar estes campos elétricos e também correntes na região F foi primeiramente explicado por RISHBETH (1971) e logo desenvolvido como modelo numérico por HEELIS et al. (1974).

Observações do pico da região F equatorial foram feitas desde alguns séculos atrás, sendo um dos resultados importantes as derivas vertical, e deriva para leste do plasma ionosférico. Estas derivas mostram o comportamento do plasma ao longo do dia, e como se comporta com as estações do ano e a atividade solar. O resultado mais importante e bem conhecido do movimento de deriva do plasma ionosférico da

região F é que durante horas de dia a deriva é para cima e para oeste, a noite é para abaixo e para leste. As características são:

- a) O pico da deriva para leste no horário de noite é duas vezes maior que o pico da deriva para oeste durante o dia.
- b) As derivas zonais são muito maiores que as velocidades verticais.
- c) A deriva vertical é com frequência fortemente afetada logo depois do entardecer, mas não apresenta característica similar perto do amanhecer.
- d) Há forte efeito do ciclo solar na deriva vertical e um moderado efeito sazonal, tanto na deriva vertical como na deriva para leste.

Estas derivas são uma resposta direta do campo elétrico perpendicular local, como segue:

$$\vec{E}_\perp = \vec{V}_i \times \vec{B} \quad (2.5)$$

onde \vec{B} é o campo magnético local, e \vec{V}_i é a velocidade de deriva.

Os campos elétricos segundo a equação de Maxwell ($\vec{\nabla} \times \vec{D} = 0$) implica que:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (2.6)$$

um resultado em palavras é que a diferença de potencial entre os terminadouros entardecer-amanhecer quando o campo elétrico está para oeste seria igual que quando o campo elétrico está para leste (de dia).

Da equação de Poisson:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.7)$$

espera-se que o campo elétrico do lado dia e lado noite observado seja o resultado do surgimento de cargas de polarização nos terminadouros, onde o terminadouro do entardecer seria carregado negativo e o terminadouro do amanhecer positivo.

Os ventos termosféricos governam no movimento do plasma ionosférico na camada F, e de observações de dados de Jicamarca se têm uma correlação na velocidade da deriva do plasma com a velocidade de vento termosférico.

A teoria do dínamo atmosférico explica o surgimento do vento termosférico que praticamente é a bateria do campo elétrico do dínamo da região F. Nessa teoria marés

(HEELIS et al., 1974) atmosféricas (geradas pelo aquecimento solar e pela atração lunar) provocam o surgimento de ventos neutros. Esses ventos neutros, de velocidade \vec{U} , durante o dia sopram em direção aos polos ao longo do campo magnético induzindo a criação de campos elétricos em altas latitudes $\vec{E} = \vec{U} \times \vec{B}$, pois nos pólos a inclinação do campo magnético é maior. Esses campos vão gerar correntes (\vec{J}):

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} \cdot \vec{E} \quad (2.8)$$

onde $\tilde{\sigma}$ é o tensor de condutividade elétrica.

Essas correntes tendem a ser divergentes, mas para os pontos onde $\vec{J} \neq 0$ cargas de polarização serão criadas instantaneamente para modificar a densidade de corrente tornando o campo não divergente. Esse campo elétrico de polarização pode ser representado por um gradiente de potencial escalar $\nabla\Phi$ (KUDEKI et al., 1983).

Desse modo, o campo total do dínamo gerado será:

$$\vec{E}_D = (\vec{U} \times \vec{B}) - \nabla\Phi \quad (2.9)$$

onde $\nabla\Phi$ é o potencial escalar eletrostático.

A densidade de corrente total fica da forma:

$$\vec{J} = \tilde{\sigma} \cdot \vec{E}_D = \tilde{\sigma} \cdot [(\vec{U} \times \vec{B}) - \nabla\Phi] \quad (2.10)$$

Este sistema de correntes vai polarizar positivamente o terminadouro do lado do amanhecer e negativamente do lado do anoitecer. Devido às condutividades, a ação do dínamo é mais efetiva na região do equador magnético, a uma altura entre 90 e 120 quilômetros. Nessa região aparece uma corrente que flui do terminadouro do amanhecer para o terminadouro do anoitecer do lado do dia e para lado da noite. Dessa forma a corrente terá sentido leste no lado do dia e sentido oeste no lado da noite. A intensidade desta corrente do lado dia é superior a do lado noite, devido a densidade eletrônica ser maior do lado dia.

O vento termosférico na região equatorial provê a fonte de energia que mantém o campo elétrico na ionosfera. A corrente gerada pelo vento é vertical para cima e tem

magnitude $J_z = \sigma_P u B$. J_z (considerando $\sigma_P \gg \sigma_H$) é pequena e assume valores da ordem de $0,01 \frac{\mu A}{m^2}$. Entretanto σ_P varia consideravelmente com a altitude devido a sua dependência com a frequência de colisão. Supondo que u quase não varie com a altitude, considera-se esta região como uma camada fina na qual existe uma condutividade constante e nula nas fronteiras, já que não há circulação de correntes nas camadas vizinhas.

Em qualquer altura tem-se um $d(\sigma_P u B)/dZ \neq 0$, e dessa forma um campo elétrico será formado para manter a corrente não divergente. Além disso, supõe-se que nos terminais das linhas de campo o fluxo de corrente seja nulo, não permitindo que flua corrente ao longo das linhas de campo, ou seja, $J_Y = 0$, então seguindo estas aproximações a condição de \vec{J} mantém $\nabla \cdot \vec{J} = 0$.

Também considera-se que o vento zonal dirigido para leste é constante. Os ventos tentam carregar as partículas carregadas na mesma direção que sopram, porém a presença do campo magnético horizontal cria uma deriva proporcional a $\vec{U} \times \vec{B}$. Esta deriva faz que ocorra um acúmulo de cargas nos limites da geometria em estudo, assim um campo elétrico deve desenvolver-se na direção para baixo a fim de produzir uma corrente livre de divergência. Este campo de polarização só existe durante a noite, já que, durante o dia fica neutralizado em virtude do movimento dos elétrons ao longo das linhas do campo magnético, situação que existe apenas quando há suficiente condutividade na região **E** (FORBES, 1981; RISHBETH, 1971).

Esse modelo simplificado é mostrado no esquema da figura 2.3. Sendo assim, a densidade de corrente será $J_z = \sigma_P E_z + \sigma_P u B = 0$, o que implica num campo elétrico vertical de magnitude

$$E_z = -uB \tag{2.11}$$

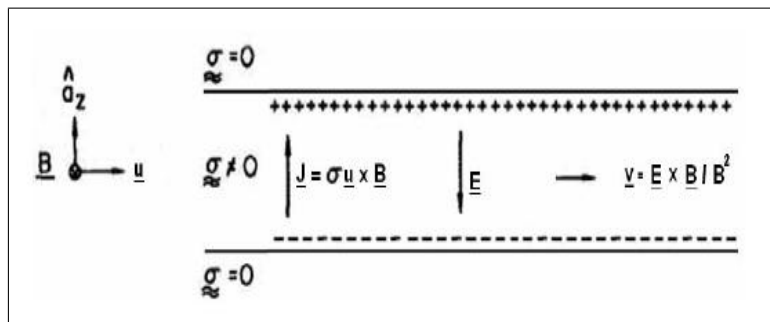


Figura 2.3 - Esquema simplificado de formação do dínamo da região F.
 Fonte: Adaptada de KELLEY (1989)

Nota-se ainda que o plasma dentro do esquema ($\sigma_P \neq 0$) da Figura 2.3 mover-se-á com a velocidade $\frac{\vec{E} \times \vec{B}}{B^2}$ na direção do vento zonal (KELLEY, 1989). As considerações feitas aqui são mais realistas para o período noturno quando pares de íons moleculares da região E se recombinam rapidamente.

Temos a equação 2.12 que nos descreve aproximadamente a situação física explicada acima, definido por HEELIS (2004).

$$\vec{E} = \frac{\sum_F^P}{\sum_E^P + \sum_F^P} (\vec{U}_F \times \vec{B}) \quad (2.12)$$

Durante o horário diurno quando a condutividade Pedersen da região E é muito maior que a condutividade Pedersen da região F o campo de polarização desta fonte é desprezível. Entretanto, durante o horário noturno quando a condutividade Pedersen da região E é praticamente zero, o campo de polarização é diretamente proporcional ao vento do dínamo da região F.

2.2.4 O pico de “pré-reversão” da deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ do plasma ionosférico

A Figura 2.4 foi construída com dados de espalhamento coerente do radar de Jicamarca (FEJER et al., 1981; FEJER et al., 1979). A Figura 2.4(a) mostra o comportamento para a deriva zonal e a Figura 2.4(b) para a deriva vertical. Importantes resultados são obtidos da análise destas figuras: O pico de velocidade zonal é duas vezes maior que para leste; as velocidades zonais são maiores que as velocidades verticais; a deriva vertical é frequentemente mais forte depois do pôr do Sol; existe uma forte influência do ciclo solar nas derivas verticais e efeitos sazonais em ambas componentes são observados.

As derivas de plasma da região F são causadas, principalmente, por ventos termosféricos durante a noite e por ventos de maré durante o dia, conforme explicado na seção 1.3.2.

Como observado, a deriva vertical da região F é controlada pelo campo elétrico leste-oeste através da deriva $\vec{E} \times \vec{B}$. O campo elétrico, por sua vez, é controlado pelos dínamos das regiões E e F, as quais são acopladas através das linhas de campo magnético.

A ação do vento neutro uniforme na região F explica o pico pré-reversão, ilustrado

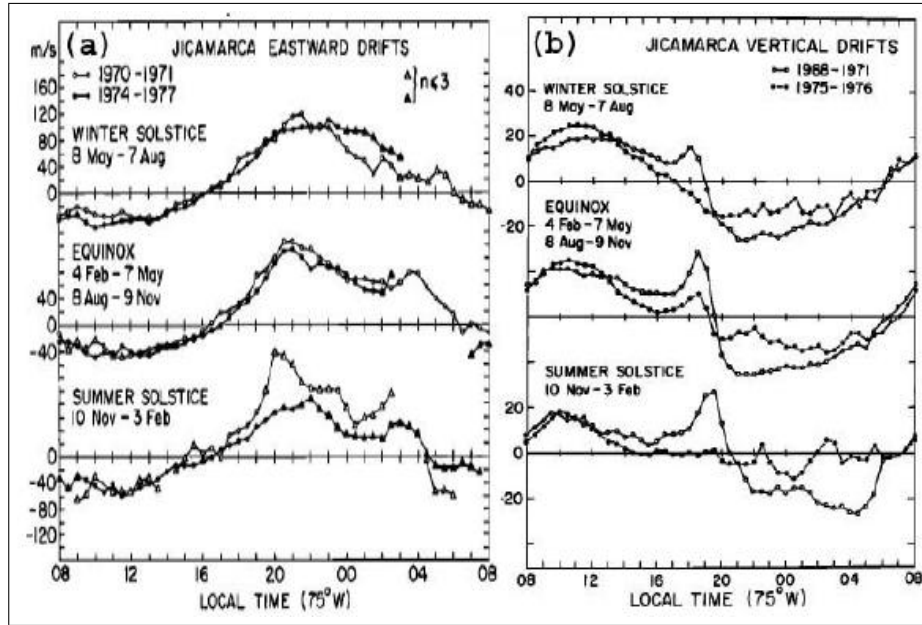


Figura 2.4 - (a) Deriva zonal do plasma da região F tropical medido em Jicamarca para diferentes estações e diferentes condições solares (FEJER et al., 1981). (b) Mesmo que (a), só que para deriva vertical (FEJER et al., 1979).

na Figura 2.5. Próximo ao terminadouro noite-dia, um campo elétrico E_z gerado pelo dínamo da região F ($-\vec{U} \times \vec{B}$) é mapeado até as regiões E conjugadas -através das linhas de campo magnético, dando origem a um campo elétrico E_θ dirigido para o Equador. Por sua vez este campo gera uma corrente Hall $J_{\theta\phi}$ dirigida para oeste. Como nenhuma corrente flui na região F noturna, um acúmulo de cargas negativas se desenvolve no terminadouro, dando origem ao campo E_ϕ e a corrente $J_{\phi\phi}$, como mostrada na Figura 2.5. Este campo E_ϕ é mapeado de volta à região F e causa inicialmente uma deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ do plasma para cima e logo após uma deriva para baixo.

No setor longitudinal brasileiro, onde a declinação magnética é elevada (aproximadamente 20°), a defasagem entre o horário do pôr do Sol nas duas regiões E conjugadas, acarretará taxas distintas na variação das condutividades. As duas regiões E estão ligadas à região F da ionosfera equatorial através de uma linha de campo (idéia de tubo de fluxo) magnético. Quando o terminadouro é paralelo a esta linha de campo (a Figura 2.6), o pôr do Sol é simultâneo nas duas regiões E conjugadas e isto faz com que os dois circuitos sejam interrompidos simultaneamente, favorecendo a aparição de campos elétricos de polarização na região F com magnitudes relativamente maiores, resultando num pico pré-reversão na deriva vertical de plasma maior mas com menor duração (FARLEY et al., 1986; TSUNODA, 1982).

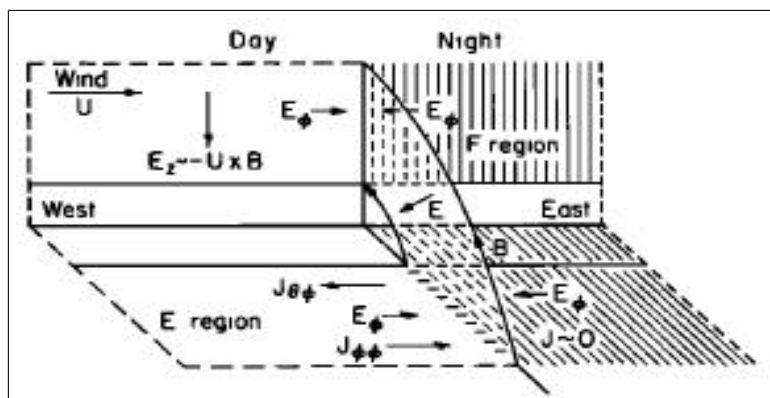


Figura 2.5 - Modelo simplificado para o estudo do pico pré-reversão da região F com um vento uniforme U na região F.
 Fonte: FARLEY et al. (1986)

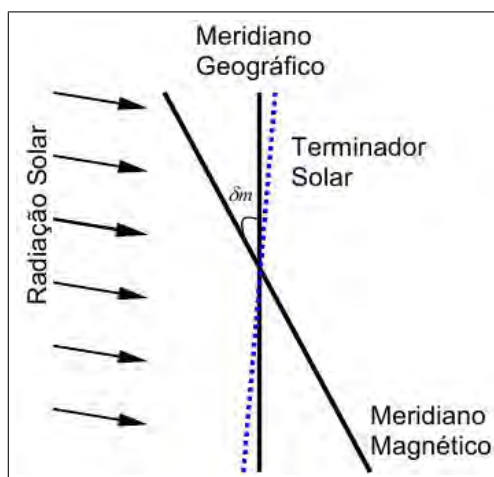


Figura 2.6 - Configuração esquemática dos meridianos magnético e geográfico em relação ao terminadouro.

Por outro lado, enquanto uma das regiões **E** permanecer iluminada pelo Sol, haverá condutividade e, conseqüentemente, mesmo que um dos circuitos seja interrompido, ocorrerá alguma descarga pelo outro lado, o que pode ser traduzido como uma variação mais lenta da condutividade. Neste caso, teremos uma deriva vertical no pico pré-reversão de menor magnitude mas de maior duração. Este comportamento sazonal do pico pré-reversão na deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ irá influenciar de forma considerável o comportamento sazonal da ocorrência das bolhas de plasma.

2.3 Espalhamento Equatorial da Região F

A ocorrência de irregularidades de plasma no período da noite na ionosfera equatorial da região F é comumente referido como espalhamento F equatorial (ESF - "Equatorial Spread F"). Esse termo spread F foi introduzido pela primeira vez por Berkner and Wells, em 1934, de observações de espalhamento nos traços dos ionogramas. Desde então, muitos estudos foram feitos visando observações e teorias da física do ESF, assim como revisões foram publicadas (ex. FEJER e KELLEY (1980), OSSAKOW (1981)). Hoje em dia o termo spread F é usado para indicar uma classe de irregularidades da região F.

A grande subida da camada F no período noturno (após o pôr-do-sol) pelo PRE causa um transporte de plasma do equador magnético a regiões de baixas latitudes o qual incrementa a Anomalia Appleton e os gradientes de densidade latitudinal na ionosfera de baixas latitudes (MUELLA et al., 2008). Devido a esses gradientes latitudinais as depleções de plasma alinhadas ao campo magnético da Terra são também observadas. BALSLEY et al. (1972) e HAERENDEL (1974) desenvolveram uma importante teoria considerando um tubo de fluxo integrado ao longo das linhas de campo e o ambiente ionosférico do pôr-do-sol (KELLEY, 1989).

As depleções de plasma em baixas latitudes são também conhecidas como bolhas de plasma ("plasma bubbles") ionosféricas. Quando observadas no radar de espalhamento coerente são conhecidas como plumas de radar, essas observações indicam que as depleções de plasma começam na base da região F, se desenvolvem verticalmente e eventualmente podem alcançar altas altitudes na região F (topo da região F). Uma vez que estas depleções alcançam altas altitudes, conseqüentemente alcançando linhas de campo magnético mais altas, elas são mapeadas imediatamente para baixas latitudes. As bolhas de plasma se estendem a vários quilômetros de distância na direção norte-sul magnético e podem exceder (mesmo no mínimo solar) 1000 km de altitude. Durante sua geração, as bolhas de plasma crescem verticalmente com grandes velocidades, e uma faixa ampla de tamanho de escala de irregularidades através de processos não lineares é gerada. Estas irregularidades podem causar mudanças grandes/rápidas no índice de refração do meio ionosférico, o qual conseqüentemente causa interferência, difração e/ou múltiplas reflexões de ondas de rádio (WOODMAN e LA HOZ (1976), HYSELL e BURCHAM (1998), GENTILE et al. (2006), ABDU et al. (1998)).

A cintilação observada nos sinais de rádio e sistemas de sondagem (GPS, VLF) pode ser descrita como uma rápida variação na amplitude e fase dos sinais recebidos, cau-

sadas principalmente pelas estruturas irregulares de plasma (bolhas de plasma) com escalas que variam de centímetros a centenas de metros (BASU et al., 1999), causando degradação no sinal de rádio. O período de ocorrência das instabilidades atingem o máximo entre setembro e março na América, África e Oceano Índico, porém, neste mesmo período, na região do Pacífico Central a cintilação é mínima. Entre abril e setembro a situação é oposta. No Brasil, assim como em todo o continente americano o período compreendido entre abril e agosto apresenta pouquíssimos eventos relacionados a instabilidades de plasma equatorial e de baixas latitudes (SOBRAL et al. (2002), BATISTA et al. (1994)).

As ocorrências das instabilidades de plasma, que geram as bolhas ionosféricas durante os períodos de baixa frequência de ocorrência e em dias considerados magneticamente calmos, são informações importantes para o estudo da eletrodinâmica da ionosfera, pois poderão revelar condições físicas críticas necessárias para sua geração. Alguns parâmetros do ambiente ionosférico vêm sendo estudados e analisados exaustivamente em relação ao desenvolvimento das instabilidades, como os distúrbios no campo magnético, a velocidade de deriva vertical (SASTRI et al., 1997), o gradiente de densidade eletrônica, uma forte presença da camada E esporádica (STEPHAN et al., 2002; ABDU et al., 1996; ABDU et al., 2003) e a anomalia equatorial. A previsão de ocorrência de instabilidades na região Peruano/Chileno sendo realizada por ANDERSON (2003), ANDERSON et al. (2004), utilizando a velocidade vertical $\vec{E} \times \vec{B}$ inferida por dados de magnetômetros.

Essas irregularidades podem causar degradação nos sinais de ondas de rádio que utilizam a ionosfera como meio de propagação, provocando grandes danos nas telecomunicações, principalmente via satélite devido à passagem do sinal através destas, prejudicando, por exemplo, o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

Ainda temos os chamados eventos esporádicos como é o caso das tempestades ionosféricas. Estes eventos estão, geralmente, associados aos distúrbios intensos no campo geomagnético que são devidos principalmente às tempestades magnéticas produzidas pelas explosões solares geoefetivas. Durante uma tempestade ionosférica, causada por uma tempestade magnética, a densidade de elétrons e o conteúdo eletrônico total podem sofrer grandes variações, resultando em uma amplificação e/ou inibição da anomalia de ionização equatorial (AIE). De modo que de um evento (tempestade) para outro, devido à grande variabilidade, torna-se difícil de se realizar uma previsão da intensidade do efeito de tal tempestade.

2.4 Plumas de radar VHF

Estruturas de plasma na escala de metros na região F associadas com espalhamento de frequências foram observadas nos dados do radar de espalhamento coerente de Jicamarca (WOODMAN e LA HOZ (1976)). Desde então, o termo “Spread F” (camada F equatorial espalhada - ESF) foi usado para nomear instabilidades numa ampla distribuição de altitude, começando na baixa região F até além de 1000 km de altitude. Estas irregularidades são observadas numa faixa de 7 ordens de magnitude em escala espacial, se estendendo de umas dezenas de centímetros a umas centenas de quilômetros, em direção perpendicular ao campo geomagnético. As ocorrências destas irregularidades variam com a latitude, tempo local, estação do ano, e atividade solar e geomagnética.

2.4.1 Morfologia:

Vários trabalhos detalharam a estrutura e dinâmica das plumas usando radares VHF/UHF sobre Kwajalein Atoll (Mashall Island) (TSUNODA, 1980a; TSUNODA, 1980b; TSUNODA, 1981b), e observações de satélite (TSUNODA et al., 1982), obtendo as seguintes características gerais:

- a) As plumas de radar são estruturas de escala de metros associados com regiões de gradientes de densidade de plasma.
- b) O desenvolvimento das bolhas inicia-se na região de gradiente (positivo) de densidade da parte baixa da região F (ver Fejer and Kelley, 1980).
- c) A velocidade vertical alcançaria da ordem de 100 a 200 m/s, e a velocidade zonal na ordem de 150 m/s, com uma velocidade para oeste com respeito ao movimento do plasma ambiente para leste, presente na fase inicial do crescimento da bolha.
- d) As bolhas crescem para cima com uma inclinação para oeste (geralmente).
- e) As bolhas encontram-se alinhadas ao campo magnético.

Mais recentemente, medidas de radar de espalhamento coerente sobre Brasil, Asia, e Micronesia têm sido usadas para o estudo da variabilidade de espalhamento F e sua relação com o aumento após o pôr-do-Sol da camada F equatorial [e.g. DE PAULA

e HYSELL (2004), YOKOYAMA et al. (2004), PATRA et al. (2005), TSUNODA (2005), TSUNODA e ECKLUND (2007)].

Os mapas RTI (Range-Time-Intensity) obtidos das observações de radar frequentemente revela uma camada espalhada bottom-type como a estrutura antecessora da pluma, e esta última penetra no topo. Embora o desenvolvimento a altas altitudes das estruturas do plasma é espectacular, há uma ampla evidência que o processo começa em baixas altitudes (FARLEY et al. (1970), KRISHNAMURTHY (1966), TSUNODA (1981b), TSUNODA et al. (1982)). Vários foguetes e satélites têm penetrado ambas camadas de irregularidades e as estruturas de plasmas. Estas depleções na densidade (plumas) estão ao longo da direção do campo magnético atingindo centenas de quilômetros (TSUNODA et al. (1982), WEBER et al. (1978)).

Perto do equador, onde o campo magnético da Terra ajuda a aprisionar o plasma, as instabilidades colisional e não colisional podem ser excitadas no bottomside. Entretanto, isso só acontece quando as condições são ideais logo após o pôr-do-Sol, quando a condutividade da região E se reduz e intensificam os gradientes de densidade direcionados para cima.

Devido ao gradiente de densidade e a gravidade serem perpendiculares ao campo magnético, teremos velocidades de derivas para cada componente:

$$\vec{V}_d = \frac{V_{th}^2}{\Omega} \frac{\nabla n}{n} \times \hat{b} \quad (2.13)$$

$$\vec{V}_g = \frac{\vec{g}}{\Omega} \times \hat{b} \quad (2.14)$$

onde V_{th} é a velocidade térmica, e Ω é a girofrequência, n é a densidade numérica, \vec{g} a aceleração da gravidade, \hat{b} é o unitário ao longo da linha de campo magnético.

A deriva devida à gravidade gera corrente finita (\vec{J}) na direção zonal. E quando há uma perturbação (por exemplo senoidal) ao longo da direção zonal, então a divergência de \vec{J} causa a geração de um campo elétrico de polarização, E_P . No limite colisional este campo é mantido pelas colisões, enquanto que no limite sem colisões é mantido pela inércia do ion.

Então a menor densidade de plasma se move para cima com velocidade $\vec{V}_P = \frac{\vec{E}_P}{B} \times \hat{b}$ para alcançar um estado uniforme de equilíbrio termodinâmico. Enquanto isso o

plasma é extraído com uma taxa de $v \cdot \frac{\nabla n}{n}$, onde o gradiente é para cima. Assim temos um volume que vai ficando com baixa densidade de plasma na região de densidade maior. Então podemos dizer que aparece um fluxo vertical para cima de plasma de baixa densidade dentro daquela região, e a bolha apresentaria uma forma alongada nessa direção.

Quando a bolha alcança a altura do pico da região F, a sua densidade é ainda menor que a densidade acima dessa altura e continua elevando-se inclusive onde o gradiente de densidade acima dessa altura é para baixo. A elevação da bolha passa através de ambos regimes colisional (baixas altitudes) e sem colisões (altas altitudes) os quais são definidos como (OTT, 1978):

região com colisões: $\nu_{in}^2 \gg \frac{g}{L}$

região sem colisões: $\nu_{in}^2 \ll \frac{g}{L}$

onde ν_{in} é a frequência de colisão ion-neutro e L é a altura de escala do plasma. As taxas de crescimento nestes regimes são dados respectivamente por OTT (1978):

$$\gamma_{col} = \frac{g}{\nu_{in} L}$$

$$\gamma_{in} = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

e estes modos se propagam perpendicularmente ao campo magnético, na direção zonal com a velocidade de fase: $\frac{\omega}{\kappa_{\perp}} = \frac{g}{\Omega_i}$

Uma característica que esta teoria prediz é a dependência em altura da γ_{col} devido a ν_{in} . Quanto maior altura da camada F, maior a taxa de crescimento. As representações ilustrativas desta seção encontram-se na Figura 2.7. FARLEY et al. (1970) e JAYACHANDRA et al. (1993) reportaram uma forte tendência do ESF para ser gerado quando a camada está numa alta altitude, consistente com a teoria.

2.4.2 Variabilidades no ESF

As observações de radar mostram que o ESF é altamente variável na sua ocorrência quanto à morfologia. Algumas noites se observa espalhamento F enquanto que várias outras noites não se observa. Algumas noites se observa espalhamento F espectacular enquanto que as seguintes noites vemos só a camada “bottomside”.

KELLEY et al. (1981) argumentaram que mecanismos de instabilidade GRT é o mecanismo mais importante para produção de plumas mas que ondas de gravidade

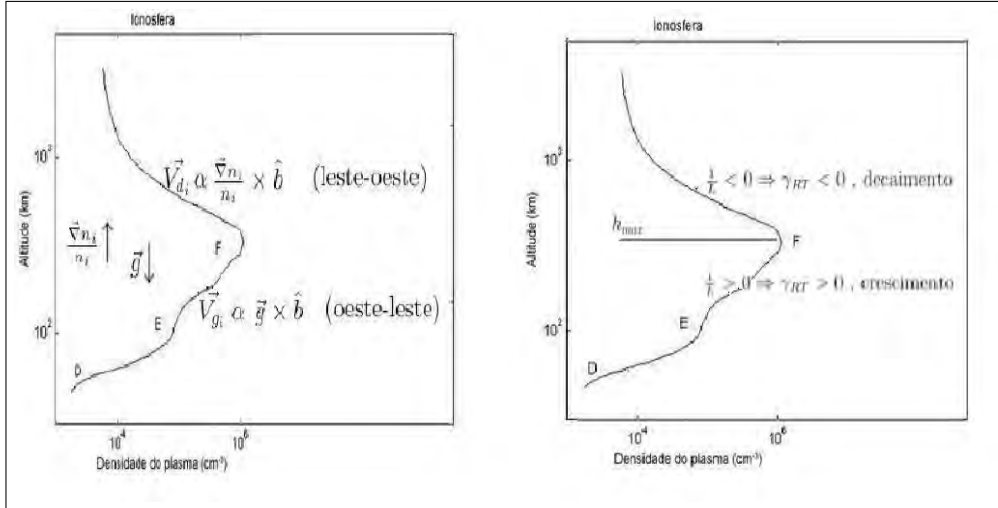


Figura 2.7 - No painel esquerdo a imagem ilustrativa das equações 2.13 e 2.14. No painel direito imagem ilustrativa da taxa de crescimento para a região com colisões e sem colisões.

são fontes extremamente eficientes como perturbações sementes para a excitação de instabilidade GRT de grande escala.

2.4.3 Estruturas verticais e inclinadas de plumas

Como pode ser observado na forma que se apresentam as plumas nos plots RTI de diferentes estações, vemos que as plumas são erectas verticalmente ou inclinadas para oeste. Na estação de Jicamarca são observadas inclinações para leste e para oeste (WOODMAN e LA HOZ (1976)) enquanto que plumas erectas verticalmente são frequentemente observadas em Kwajalein (HYSELL et al. (1994)). Entretanto em Jicamarca as inclinações para oeste das plumas são acompanhadas pela inclinação para leste no bottomside (WOODMAN e LA HOZ (1976)), o que é ausente em Kwajalein.

As inclinações nas plumas são atribuídos ao cisalhamento na deriva do plasma zonal (WOODMAN e LA HOZ (1976), TSUNODA (1981b), ZALESK et al. (1982)). HEELIS et al. (1974) mostram a existência de uma velocidade de cisalhamento entre as 18 e 23 horas LT o qual é experimentalmente confirmado por radar de espalhamento incoerente (KUDEKI et al., 1981; KUDEKI; BHATTACHARYYA, 1999a) sobre Jicamarca e radar de espalhamento coerente (TSUNODA, 1981a) sobre Kwajalein. Estas observações também revelam a existência de cisalhamento positivo em baixas altitudes e cisalhamento negativo em altas altitudes. O cisalhamento positivo (negativo) em baixas (altas) altitudes no plasma fluindo para leste foi mostrado (ZALESK et al.,

1982) com a inclinação das plumas para leste (oeste) o qual a seguir apresenta similarmente a estrutura em forma de “C” da pluma observada em Jicamarca. A inversão da deriva de plasma zonal de oeste para leste acontece durante o pôr-do-Sol local.

A ausência da estrutura em forma de “C” de plumas inclinadas indicaria que o cisalhamento não é significativo em baixas altitudes da região F.

3 GERAÇÃO DE IRREGULARIDADES NA REGIÃO F

As irregularidades (principalmente as de grande escala) do plasma ionosférico são produzidas por processos de instabilidade de plasma que acontecem sob o ambiente ionosférico governado pela eletrodinâmica após o pôr do Sol. Ao anoitecer surge um gradiente abrupto de condutividade longitudinal integrada ao longo do tubo de fluxo geomagnético na região próxima ao terminadouro solar, e a condutividade da camada E cai drasticamente. Consequentemente aparece um rápido aumento do campo elétrico zonal para leste, que na presença do campo magnético promove uma subida abrupta da camada F, conhecida como deriva vertical $E \times B$ ou Pico Pré-reversão.

Em 1970 com a publicação da primeira compilação de medidas feitas pelo Rádio Observatório de Jicamarca (ROJ) no Perú (FARLEY et al., 1970) os autores concluíram que não havia teoria publicada até a data que poderia explicar os dados apresentados. Considerável progresso tem ocorrido desde então, e a teoria tem sido desenvolvida passo a passo no decorrer do último século. Atualmente o desenvolvimento das instabilidades do plasma ionosférico é explicado em função da Instabilidade Rayleigh-Taylor (OSSAKOW (1981), OTT (1978), BASU e KELLEY (1979)).

3.1 Teoria da Instabilidade Rayleigh-Taylor (RT)

DUNGEY (1956) foi o primeiro a propôr a instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor (GR-T), que surge como efeito da força de gravidade na presença do campo magnético da Terra, contribuindo para gerar as irregularidades do plasma na base da região F, o que daria uma explicação aos traços espalhados nos ecos refletidos da região F equatorial observados em ionogramas. Dagg (1957), como citado por FEJER e KELLEY (1980), sugere que as irregularidades surgiam, basicamente do acoplamento das regiões E e F, e que elas eram produzidas inicialmente por um movimento turbulento na região do dínamo (região E), e a seguir elas iriam para a região F graças à alta condutividade das linhas de campo magnético. Martyn (1959), como citado por FEJER e KELLEY (1980), foi o primeiro a propôr que o mecanismo gerador do espalhamento da região F equatorial era a instabilidade $\vec{E} \times \vec{B}$ ou instabilidade de deriva de gradiente. Calvert (1963) (como citado por MUELLA (2008)) sugeriu que o movimento descendente da atmosfera neutra, durante o período

noturno, era o responsável pelo aparecimento das irregularidades de plasma na região F. Esse mecanismo seria semelhante à instabilidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ devido à deriva relativa entre íons e partículas neutras, o que geraria a instabilidade.

De uma maneira geral, a visão teórica discutida por todos os autores está apoiada em processos de instabilidade de plasma, onde a instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor e a instabilidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ têm sido as teorias mais aceitas como mecanismos geradores das irregularidades na região F da ionosfera, mas as condições iniciais que geram o processo de instabilidade ainda não estão completamente estabelecidas (GENTILE et al., 2006; CHU et al., 2005; PIMENTA et al., 2003; BATISTA et al., 1996).

3.1.1 Mecanismo de instabilidade Gravitacional Rayleigh-Taylor (GRT)

Pode-se explicar a formação do espalhamento F equatorial e das bolhas de plasma a partir da instabilidade gravitacional Rayleigh-Taylor, da forma como KELLEY (1989) propõe.

Considera-se, inicialmente, um ambiente que possua duas regiões com densidades de plasma distintas, uma região mais elevada com densidade N_1 e uma outra região localizada logo abaixo com densidade $N_2 = 0$ (Ver Figura 3.1). Ambas as regiões estão submetidas à ação da gravidade \vec{g} e ao campo magnético terrestre \vec{B} , e considerando-se uma perturbação senoidal inicial de densidade que se origina na interface entre as duas regiões, as velocidades das partículas serão proporcionais às suas massas, e com isso, haverá um domínio dos íons. Devido à ação do campo gravitacional \vec{g} na presença do campo magnético \vec{B} , uma corrente \vec{J} se desenvolve perpendicular a \vec{g} e \vec{B} , e flui na direção \hat{x} (direção leste-oeste) entre as regiões fronteiriças de concentrações elevadas e rarefeitas, tendo como amplitude,

$$J_x = \frac{nMg}{B} \quad (3.1)$$

Como a corrente resultante na direção $\vec{g} \times \vec{B}$ é estritamente horizontal, J_x será grande quando n for grande e pequeno quando o valor de n for pequeno. Como ilustra a Figura 3.1, um gradiente na densidade do plasma faz surgir um fluxo de partículas, e como o termo gravitacional é proporcional à massa, a deriva $\vec{g} \times \vec{B}$ faz com que os íons se movam mais rápido que os elétrons. Como consequência da perturbação inicial, qualquer mudança de carga (ρ) na fronteira entre as duas regiões fará com

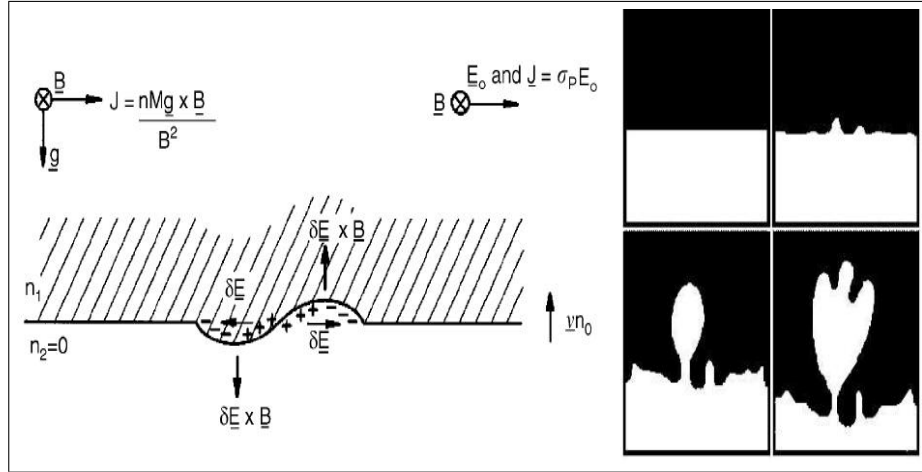


Figura 3.1 - Esquerda: Diagrama da instabilidade Rayleigh-Taylor no plasma da ionosfera equatorial. Direita: Ilustração da evolução da bolha. FONTE: KELLEY (1989).

que o fluxo de corrente não apresente divergência nula, de acordo com a equação da continuidade,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{J} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.2)$$

Esta divergência (não nula) fará com que um acúmulo de cargas seja distribuído sobre as bordas da pequena perturbação inicial, nos pontos em que,

$$\vec{\nabla} \cdot \frac{nM\vec{g}}{B} \neq 0 \quad (3.3)$$

De acordo a Lei de Poisson,

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0} \quad (3.4)$$

onde ε_0 denota a permissividade elétrica no espaço livre, e esta distribuição de cargas acumuladas dá origem aos campos elétricos de polarização $\delta \vec{E}$ na região de perturbação. Estes campos elétricos, que surgem pela perturbação, são estabelecidos afim de continuamente fazerem com que a divergência da corrente total torne-se nula. Os campos elétricos de polarização fazem com que íons e elétrons movam-se com uma velocidade de deriva $\delta \vec{E} \times \vec{B} / B^2$, deslocando a região de depleção na densidade para cima, e uma deriva deslocando a região de densidade maior para baixo. Portanto, estes campos elétricos de polarização provocam uma amplificação na perturbação inicial e o sistema se torna cada vez mais instável.

Vários estudos sugerem que o processo de geração de bolhas ionosféricas pode ser explicado pela teoria de instabilidade Rayleigh-Taylor gravitacional atuando junto

com as derivas eletromagnéticas $\vec{E} \times \vec{B}$ (BASU e KELLEY (1979), KELLEY e McCLUREM (1981), OSSAKOW (1981)). Mas as condições iniciais, necessárias para o processo de geração, ainda não estão totalmente bem esclarecidas.

3.1.2 A taxa de crescimento da Instabilidade linear RT

Uma demonstração acadêmica da derivação algébrica da taxa de crescimento para uma instabilidade Rayleigh-Taylor em um plasma sem colisões e considerando-se apenas a ação externa da força gravitacional é dada por CHEN (1974). KELLEY (1989) explica em detalhes a dedução da taxa de crescimento linear local para a instabilidade GRT com uma visão voltada ao plasma ionosférico equatorial. Existem ainda trabalhos com uma abordagem matemática mais completa voltada à modelagem da instabilidade RT como pode ser encontrado em SULTAN (1996).

O cálculo da taxa de crescimento é determinado a partir da linearização das equações da continuidade e do momentum, levando-se em consideração as quantidades perturbadas quando o plasma sai de seu estado de equilíbrio, e assumindo solução de ondas planas. A expressão da taxa de crescimento linear da instabilidade GRT (dada por SULTAN (1996) e deduzida por OSSAKOW et al. (1979)) pode ser expressa:

$$\gamma_{RT} = \frac{g}{\nu_{in}} \left[\frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial h} \right] - R \quad (3.5)$$

onde γ_{RT} representa a taxa de crescimento da instabilidade, ν_{in} é a frequência de colisão dos íons com as partículas neutras, n_0 é a densidade do plasma, $\partial n_0 / \partial h$ denota o gradiente vertical de densidade, que será positivo se for antiparalelo à aceleração da gravidade \vec{g} , g a gravidade e R a taxa de recombinação química local. A condição para o crescimento de uma perturbação inicial, ou seja, para o crescimento linear da instabilidade RT, ocorre quando $\gamma > 0$, o que portanto favorece ao desenvolvimento de irregularidades na região F.

Esta equação para a taxa de crescimento RT local dá as condições ionosféricas básicas necessárias para a ocorrência do ESF. Um bom resultado obtido com a análise da teoria linear diz respeito ao comportamento da taxa de crescimento γ com a altura. Como se pode ver da equação 3.5, a taxa de crescimento γ_{RT} fica bem maior quando a altura pico (h_{max}) da ionosfera é alta, o qual minimizaria o termo g/ν_{in} (γ é inversamente proporcional à frequência de colisão), quando o gradiente de densidade da parte baixa da ionosfera tem um aumento substancial, como é usualmente observado logo após o pôr do Sol quando a região E desaparece, e em alturas e tempo local onde a recombinação química é minimizada.

As primeiras observações do espalhamento F já mostravam que os ecos, observadas no radar de espalhamento incoerente, ocorriam quando a camada F estava em altitudes mais elevadas (FARLEY et al., 1970). Por outro lado, lembrando que acima do pico da camada F o gradiente de densidade inverte de sinal, espera-se que qualquer instabilidade seja amortecida, o que não concorda com as observações experimentais. Assim, a teoria linear não pode explicar a existência de bolhas de plasma acima do pico de densidade da camada F. Deste modo uma teoria modificada foi proposta.

3.1.3 Teoria Generalizada da IRT

A teoria generalizada da instabilidade Rayleigh-Taylor (IRT) não considera apenas a gravidade como sendo a única influência desestabilizante na ionosfera, termos adicionais são necessários para se adicionar à equação 3.5 devido aos efeitos de vento neutro \vec{u} e campos elétricos ambientes \vec{E} . Vários parâmetros que atuam no desenvolvimento inicial da instabilidade foram observados experimentalmente (MARUYAMA e MATUURA (1984), TSUNODA (1985), ABDU et al. (1981), ABDU et al. (1992)), assim como utilizando modelos numéricos (TSUNODA (1981b), OSSAKOW et al. (1979), ZALESK e OSSAKOW (1980), ZALESK et al. (1982), SEKAR et al. (1994)).

De acordo com Hanson et al. (1986) [citado por MUELLA (2008)], quando só a região F é considerada no processo, e desprezando-se os efeitos da condutividade em altitudes menores, a taxa de crescimento linear da instabilidade GRT baseada em quantidades locais pode ser expressa como:

$$\gamma_L = \left[\frac{E}{B} - \frac{g}{\nu_{in}} \right] \frac{1}{n_0} \frac{\partial n_0}{\partial h} \vec{y} - R_L \quad (3.6)$$

onde E e B denotam o campo elétrico zonal ambiente e a intensidade do campo magnético, respectivamente, n_0 é a densidade eletrônica ambiente, e R_L denota a taxa de recombinação local para as espécies iônicas majoritárias.

De acordo com a equação 3.6, o efeito de um campo elétrico zonal ambiente para leste na presença do campo magnético \vec{B} conduz a um aumento de γ_L . Como efeito do \vec{E} para leste, uma deriva eletrodinâmica $\vec{E} \times \vec{B}$ movimenta a camada para altas altitudes e conduz o plasma para regiões de baixa frequência de colisão (ν_{in}), aumentando, com isso, a taxa de crescimento da instabilidade. Isso ocorre, pois como o termo da gravidade é inversamente proporcional à frequência de colisão, sua importância aumenta com o ganho de altitude da camada ionosférica (como explicado previamente).

Com relação ao termo de perda ionosférica R_L , o processo de recombinação química pode tornar-se importante quando comparada com a taxa de crescimento da instabilidade. Uma perturbação na base da região F somente crescerá efetivamente se a taxa de crescimento da instabilidade excede substancialmente a taxa de recombinação local, ou em outras palavras, quando o gradiente de ionização estiver suficientemente elevado para superar os efeitos de recombinação, haverá o crescimento das flutuações na densidade devido à instabilidade Rayleigh-Taylor.

Esta ultima equação, faz parte da teoria linear da instabilidade RT, porém, ela possui certas limitações, uma vez que o comportamento geométrico e a distribuição do plasma ao longo das linhas de campo, não são uniformes em latitude. O termo gravitacional é importante como já se viu acima e outro fator é o gradiente de densidade na base da camada, o qual é controlado pela condição de assimetria ou simetria na ionização que é controlado pelos ventos meridionais. Os ventos meridionais podem diminuir a taxa de crescimento da instabilidade ao diminuir o gradiente de densidade integrada ao longo da linha de campo, ou tubo de fluxo (OSSAKOW, 1981; ZALESK et al., 1982; SULTAN, 1996; MENDILLO et al., 2001), ao mesmo tempo em que aumenta a condutividade e a taxa de recombinação. Por outro lado, o vento zonal aumenta o campo elétrico zonal pré-reversão o que causa o aumento da taxa de instabilidade.

Neste caso, o equilíbrio do perfil de densidade eletrônico torna-se não estacionário porque praticamente não há fonte de ionização na ionosfera noturna. Se for considerada a taxa de recombinação de transferência de carga da camada F, o crescimento de uma perturbação em relação à ionosfera ambiente é independente deste processo de perda. Se for considerado o processo de recombinação dissociativa, que ocorre em alturas da camada E, o crescimento de uma perturbação torna-se dependente da taxa de recombinação. Desta maneira, os efeitos dos processos de perda podem ser desprezados nas alturas superiores da camada F mas mantidas nas alturas da camada E e na parte baixa da camada F. Sendo assim, a taxa generalizada de crescimento da instabilidade Rayleigh-Taylor fornece uma interpretação mais realista das condições iniciais das irregularidades na região F quando as variações, dos parâmetros geofísicos são integrados ao longo do tubo de fluxo magnético (HAERENDEL et al., 1992; SULTAN, 1996) e a taxa de crescimento da instabilidade é dada por:

$$\gamma = \frac{\sum_P^F}{\sum_P^E + \sum_P^F} (\vec{V}_P - \vec{u}_n - \frac{\vec{g}}{\nu_{in}}) \cdot \frac{1}{N} \frac{\partial N}{\partial h} \vec{y} - R \quad s^{-1} \quad (3.7)$$

onde \vec{V}_P é a velocidade de plasma integrada ao longo do tubo de fluxo perpendicular ao campo magnético \vec{B} , a qual é equivalente ao termo de campo elétrico zonal $\frac{E_\phi L^3}{B_0}$,

dados por KELLEY (1989). \vec{u}_n é a componente meridional dos ventos neutros e R é a taxa de recombinação dos processos de perda. Os termos \sum_P^E , \sum_P^F são as condutividades Pedersen integradas ao longo do tubo de fluxo para as regiões E e F (ZALESAK et al., 1982), nos pontos conjugados ao norte e ao sul do tubo de fluxo, respectivamente.

Os termos dentro dos parêntesis na equação 3.7 representam os efeitos dos campos elétricos zonais, vento neutro meridional e força de gravidade ao longo do tubo de fluxo. Embora, esta equação negligencie os gradientes horizontais de densidade da camada E e o gradiente de condutividade, o efeito da presença da camada E permanece, na razão da condutividade Pedersen integrada.

3.2 Mecanismo de Instabilidade “Cross-Field” (ICF)

Denomina-se Instabilidade “Cross-Field” (ou $\vec{E} \times \vec{B}$) quando o campo elétrico é a força que modula as correntes na região F.

Igualando a equação de movimento de uma partícula em presença de um campo elétrico e magnético (perpendiculares entre si) a zero, obtemos a velocidade de deriva $\vec{E} \times \vec{B}$, que no caso da ionosfera equatorial é vertical. Este mecanismo sugere que num plasma parcialmente ionizado que contém um campo magnético e gradiente na densidade de ionização, e que está sob a influência de um campo elétrico, é favorável para o acionamento de irregularidades na região F.

Na ionosfera equatorial, durante o horário diurno, o campo elétrico é gerado pelos ventos de marés, que estão na direção oeste-leste, e o campo magnético dirigido para o norte, então a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ dá origem a um deslocamento para cima do plasma. Por outro lado, durante horário noturno como o campo elétrico é gerado pelos ventos termosféricos a direção é oposta e a deriva $\vec{E} \times \vec{B}$ desloca o plasma para baixo. No entanto, antes da inversão, próximo ao terminadouro, a deriva eletromagnética vertical sofre um aumento abrupto, mostrado no pico pré reversão, que é o máximo da velocidade de deriva vertical $\vec{E} \times \vec{B}$. Este pico pré-reversão surge quando no pôr do Sol a região E é rapidamente consumida pelo processo de recombinação, e não há condutividade suficiente para curto circuitar os campos elétricos de polarização da região F, e o efeito dínamo da região F torna-se eficiente e contribui para a subida da camada ionizada através do mecanismo de instabilidade $\vec{E} \times \vec{B}$.

3.3 Ondas de Gravidade

Alguns estudos sugerem que ondas de gravidade são capazes de gerar irregularidades de plasma na região F (BASU (2005), HUANG e KELLEY (1996), HUANG et al. (1993), HYSELL et al. (1990), ANDERSON et al. (1982), ROTTGER (1982), KELLEY et al. (1981)). Uma revisão completa de ondas de gravidade na atmosfera pode ser encontrada em MEDEIROS (2001). As ondas de gravidade recebem esse nome porque a força restauradora do equilíbrio é a força de gravidade.

Ondas de gravidade atmosféricas são normalmente geradas através de processos de movimento vertical da parcela de ar forçada por convecção, sistemas frontais, topografia na troposfera, e instabilidade no cisalhamento do vento na mesosfera (TAKAHASHI et al., 2009). Uma vez que a oscilação é gerada, esta se propaga horizontalmente e verticalmente transportando energia e momentum. Como resultado destas oscilações o vento, densidade e campos de temperatura são perturbados. A oscilação horizontal e vertical da parcela de ar na ionosfera gera o movimento de íons e elétrons sob o campo geomagnético da Terra, resultando em perturbação da densidade de plasma ao longo da linha de campo magnético e campo elétrico induzido. Isto poderia, em teoria, levar a ser o gerador da instabilidade de plasma pelo mecanismo de instabilidade Rayleigh-Taylor que pode gerar a formação de bolhas de plasma.

Na região brasileira MEDEIROS et al. (2004) e WRASSE (2004) conseguiram identificar fontes prováveis de ondas de gravidade observadas em Cachoeira Paulista e São João do Cariri e, recentemente, CLEMESHA e BATISTA (2008) mostraram indícios de que a maior parte das ondas de gravidade pode ser gerada na própria mesosfera através de cisalhamento do vento. Esse fenômeno acontece quando o número de Richardson (razão entre o quadrado da frequência de Brunt-Vaisala e a segunda derivada do vento horizontal com respeito a altitude) é inferior a 0,25. Após o pôr do Sol, a camada F se move rapidamente para cima e, com isso, diminui o arraste iônico, sendo assim, o vento horizontal aumenta e é criado um cisalhamento de vento suficiente para gerar ondas de gravidade na base da região F.

Além de aquecer a termosfera devido à dissipação e deposição de energia e momentum, ondas de gravidade podem ser capazes de iniciar irregularidades no plasma na região F (comumente chamados de TFEE). Trabalhos teóricos (BASU, 2005; HUANG; KELLEY, 1996; HUANG et al., 1993; ANDERSON et al., 1982; ROTTGER, 1982;

ROTTGER, 1973, por e.g.) e evidências experimentais (CHAKRABARTY et al., 2004; KELLEY, 1997; HYSELL et al., 1990; KELLEY et al., 1981, por e.g.) têm fortalecido bastante esse argumento. Sobre o mecanismo de geração de espalhamento F, ainda não se tem muita certeza se as ondas geradas na baixa mesosfera contribuem significativamente, ou se apenas ondas geradas na própria termosfera predominam sobre a geração de Spread-F. Mesmo assim, TAKAHASHI et al. (2009) mostraram uma boa correlação entre o comprimento de onda horizontal de ondas de gravidade mesosféricas e a distância entre estruturas de bolhas de plasma ionosféricas.

Uma das grandes dúvidas que se tem atualmente é se ondas de gravidade da baixa atmosfera são capazes de penetrar na termosfera e gerar espalhamento F. Como acabou de ser mencionado, trabalhos teóricos e observacionais apontam ondas de gravidade como as iniciadoras de irregularidades de plasma na base da região F. Por outro lado, o modelo de penetração de ondas de gravidade na termosfera (VADAS, 2007) mostra que existem possibilidades de ondas geradas na troposfera se propagarem até a termosfera.

4 INSTRUMENTAÇÃO

Os resultados que serão apresentados nos próximos capítulos vêm de observações feitas com digissondas localizadas nas estações equatoriais de São Luís e Jicamarca, de três radares VHF localizados em São Luís, Jicamarca e Christmas Island, assim como medidas feitas através da rede de receptores GPS espalhados no continente Sul Americano (SA - acrônimo do inglês "South America"). Neste capítulo apresentaremos os diversos instrumentos usados durante a pesquisa.

A digissonda tem a capacidade de operar ininterruptamente durante longos períodos, produzindo longas séries temporais de dados, e em nosso trabalho foram processados dados das digissondas de São Luís e Jicamarca. Em geral, as ionossondas funcionam de forma a produzir um ionograma a cada 15 minutos (intervalos de tempo menores são geralmente utilizados durante campanhas). O receptor GPS é um instrumento que nos permite medir o índice de cintilação do sinal GPS que se propaga desde o satélite GPS (20.200 km de altitude) atravessando a ionosfera (300 ou 350 km) e é recebido pelo receptor em solo. As frequências do sinal utilizado são as mesmas em toda a constelação de satélites, porém cada satélite apresenta uma sequência de código diferente. Os satélites de GPS transmitem os seus sinais em duas portadoras na banda L, geradas a partir de uma frequência fundamental de 10,23 MHz. Estas portadoras designadas por L1 e L2 transmitem, respectivamente, em 1,57542 GHz e 1,2276 GHz, as quais correspondem, aproximadamente, a comprimentos de onda de 19 cm e 24 cm.

4.1 Digissonda

A seguir será apresentada uma descrição da digissonda usada no presente trabalho e o princípio físico desse instrumento para efetuar as sondagens ionosféricas, assim como o método utilizado para obter a velocidade de deriva vertical do plasma ionosférico.

A ionossonda é um instrumento bastante representativo para medidas de parâmetros ionosféricos. A ionossonda é, essencialmente, um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética verticalmente em relação ao solo, com varredura em frequência que podem variar de 1 e 40 MHz, de acordo com o interesse científico. Em geral, como a ionosfera é um meio magneto-iônico, a onda emitida divide-se em dois modos de propagação: onda ordinária e onda extraordinária. A onda ordinária é refletida nas alturas onde o índice de refração é nulo. Isso ocorre

quando a frequência da onda é igual à frequência de plasma naquela altura. Portanto, emitindo-se ondas em frequências diferentes, que serão refletidas em alturas diferentes, pode-se construir o perfil de densidade da ionosfera, na região abaixo do pico de densidade eletrônica, visto que a frequência de plasma é proporcional à raiz quadrada de sua densidade. Portanto, a frequência da onda está relacionada com a densidade do plasma, onde a mesma é refletida, através da expressão $N_e = 1,24 \times 10^4 f^2$ onde f é a frequência da onda em MHz e N_e é a densidade numérica do plasma em cm^{-3} .

Através desse método, obtemos o perfil de densidade eletrônica até a altura do pico máximo (camada F2). Após o pico máximo, a frequência da onda passa a ser maior que a frequência de plasma, não sendo mais refletida pela ionosfera. Ionossondas colocadas a bordo de satélites fornecem o perfil vertical de densidade eletrônica acima do pico F2.

4.1.1 Sobre Ionogramas

A digissonda faz uma varredura em frequências num intervalo de 1 a 40 MHz e registra as curvas de altura virtual de reflexão em função da frequência transmitida que denominamos de ionogramas.

Atualmente conta-se com o software de redução de ionogramas desenvolvido pela equipe do Centro de Pesquisas Atmosféricas da Universidade de Massachusetts Lowell, EUA, chamado de SAO-Explorer, o qual pode ser baixado e instalado facilmente nos vários sistemas operacionais disponíveis (Windows, Linux, Mac). Este software, desenvolvido em Java, faz uma redução automática do ionograma e permite a revisão por parte do usuário. O SAO-Explorer disponibiliza ao usuário diferentes opções gráficas para a redução do ionograma, e o usuário usando o mouse pode fazer a redução. Posteriormente podem ser gerados arquivos contendo os parâmetros de frequência (foF2, foF1, foE, foEs), de altura (hmF2, h'F, h'E, h'Es), fatores de propagação oblíqua (MUF, M3000), em função do tempo, mostrando assim grande versatilidade e facilidade de trabalho.

O ionograma é essencialmente um gráfico que mostra a variação da altura de reflexão da onda, chamada altura virtual (h'F) em função da frequência dessa onda. O cálculo da altura real já está embutido no algoritmo do programa para redução de ionogramas. Através de ionogramas, baseado na teoria de propagação de ondas na ionosfera, pode-se produzir curvas de densidade eletrônica em função da altura. Os ionogramas podem também ser utilizados para estudar a variação dos vários parâmetros ionosféricos, tais como os nomeados no parágrafo anterior. A seguir na

Figura 4.1 mostra-se um exemplo de ionograma para o dia 22 de Novembro de 2002 na estação de Cachimbo, e pode-se ver o perfil de densidade, assim como outros parâmetro de interesse.

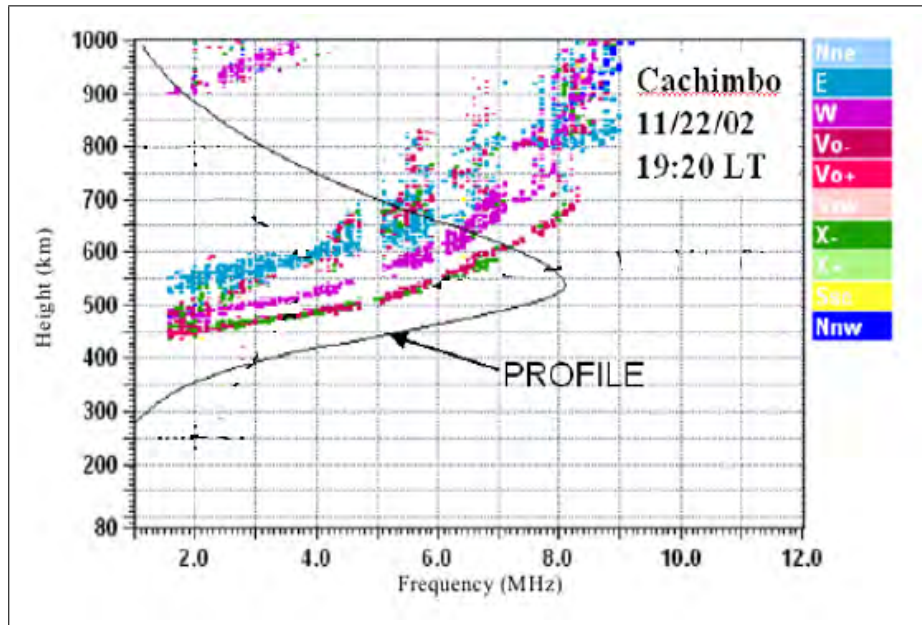


Figura 4.1 - Exemplo de Ionograma para o dia 22 de Novembro de 2002. Adaptado de REINISCH et al. (2004).

Podem ser encontrados na literatura científica diversos trabalhos usando análise de ionogramas (veja-se REINISCH et al. (1996), REINISCH et al. (2004), REINISCH e HUANG (2001), HUANG e REINISCH (2001).

4.1.2 Cálculo da deriva vertical do plasma ionosférico

A deriva vertical do plasma ionosférico pode ser calculada diretamente com o software DDAV (Digisonde Drift Analysis Velocity) desenvolvido pelo grupo da Universidade de Lowell e amplamente usado (ex. Dozois 1983; Bullet 1984; Scali et al., 1993, 1995a). No nosso estudo não foi possível usar esse software, pois não tivemos acesso aos arquivos de saída para o cálculo de deriva vertical, porém foi desenvolvido um programa computacional, que utilizando os valores de frequência reduzidos pelo SAO-Explorer nas frequências especificadas calculamos a deriva vertical.

O cálculo da deriva vertical é feito, neste trabalho, efetuando-se a diferença entre duas medidas sucessivas de altura virtual da camada F (h_F para uma frequência específica) dividida pela diferença entre seus respectivos intervalos de tempos em

hora local (ou universal), isto é,

$$V_Z = \Delta h_F / \Delta t \quad (4.1)$$

A equação acima foi aplicada para o cálculo da deriva vertical em períodos após o pôr-do-Sol. É bom salientar que os resultados de deriva vertical calculados dessa forma só são válidos quando a altura real está acima de 300 km segundo Bittencourt e Abdu (1981). Estes autores mostraram a necessidade de considerar os efeitos de recombinação iônicas no cálculo da deriva vertical já que os processos de produção da região F no horário noturno deixam de atuar. Consequentemente a expressão $d(h_F)/dt$ representa a deriva vertical aparente, ou seja, a soma da deriva vertical real com os processos de recombinação. A deriva vertical aparente é caracterizada quando a fotoionização é desprezada levando a um movimento aparente da camada ionizada para maiores altitudes devido à recombinação iônica.

Para se obter a deriva vertical real é necessário calcular a perda por recombinação que é dada pelo coeficiente de recombinação (βH), obtida de Subbarao e Khrisnamurthy (1983), onde H que é a altura de escala da ionização, e β é o coeficiente de recombinação. Logo temos,

$$V_D = V - \beta H, \quad (4.2)$$

$$V = d(h_F)/dt, \quad (4.3)$$

Para o caso de uma atmosfera em que os constituintes O_2 e N_2 são igualmente importantes nos processos de perda, e a taxa de perda é obtida por:

$$\beta = \kappa_1 [N_2] + \kappa_2 [O_2], \quad (4.4)$$

onde κ_1 é a taxa da reação para:



e κ_2 é a taxa da reação para:



Os coeficientes κ_1 e κ_2 das reações podem ser obtidas na literatura (Anderson e Rusch, 1980; Torr e Torr, 1979; e Rishbeth e Edwards, 1989). Para o nosso trabalho serão usados os valores para κ_1 e κ_2 descritos por Anderson e Rusch (1980) (citado por Krishnamurthy et al., 1990):

$$\kappa_1 = 7, 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (4.7)$$

$$\kappa_2 = 2, 10^{-11} (T_n/300)^{1/2} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (4.8)$$

Os termos $[N_2]$, $[O_2]$ e T_n das equações 4.4 e 4.8 representam a densidade do N_2 e O_2 , e a temperatura neutra na escala Kelvin, respectivamente. Os valores para essas variáveis podem ser obtidos usando o modelo atmosférico MSISE-90 (HEDIN, 1991) ou uma versão mais atualizada como o MSISE-00.

Os valores de altura de escala são dados pela expressão abaixo usando a metodologia de Krishnamurthy et al. (1990):

$$H = n_e (dn_e/dh)^{-1} \quad (4.9)$$

onde n_e é a densidade eletrônica e h é a altura real, o termo dn_e/dh é inferido a partir do perfil de densidade eletrônica obtido pela digissonda.

Finalmente, usando as equações 4.2, 4.3, 4.4 e 4.9 temos,

$$V_D = d(hF)/dt - (\kappa_1[N_2] + \kappa_2[O_2])n_e(dn_e/dh)^{-1} \quad (4.10)$$

onde V_D é a velocidade vertical real devida a campos elétricos, e ela representa a soma da deriva vertical aparente e a contribuição devido aos processos de recombinação.

4.2 Radar VHF

O radar de espalhamento incoerente utiliza o princípio físico de espalhamento Thomson, no qual o eco é o resultado do espalhamento da energia eletromagnética emitida pelo radar e refletida pelos elétrons no plasma ionosférico. Um elétron oscilante radiará radiação eletromagnética na frequência de sua oscilação. O campo elétrico de

uma onda de rádio incidente causará um movimento oscilatório no elétron, e uma parte da energia será transmitida ao elétron e subsequentemente será radiado (refletida) pela partícula. Os sinais transmitidos são emitidos em pulsos, daí a distância da região que emite o eco (altitude) pode ser calculada a partir do tempo de retardo considerando que ela se propaga à velocidade da luz. Só uma quantidade do sinal transmitido muito pequena que é refletida de volta ao receptor pela ionosfera, e o restante passa através da ionosfera para o espaço. Todas as informações da região ionosférica que se está investigando estão contidas no espectro do sinal recebido. Melhor explicação desta técnica tem sido apresentado por vários autores (ex. Kelley, 1989; Hargreaves, 1995).

O radar de espalhamento incoerente é um(a) instrumento/técnica muito poderoso(a) de sondagem que pode ser utilizado para medir algumas das grandezas ionosféricas incluindo densidade eletrônica, temperatura eletrônica, temperatura iônica, assim como propriedades e comportamento da atmosfera neutra. Com o radar podem-se observar os picos de densidade da região ionosférica simultaneamente.

As irregularidades do plasma que produzem ecos de plumas de radar compartilham suas origens com as irregularidades que causam cintilação ionosférica. Maior parte das instabilidades de plasma são detectadas pelos radares de espalhamento coerente, conseqüentemente seus ecos podem ser observados por modestos sistemas de radares. Estes operam na faixa de frequências entre 20-50 MHz. O sinal analisado é usualmente apresentado em um gráfico altura-tempo-intensidade como pode ser observado na Figura 4.2, na qual apresentam-se dois dias de observação. No dia 01/04/2002 foi observado uma estrutura do tipo bottom-type sem pluma e no dia 18/12/2002 foi observado uma estrutura bottom-type seguida por uma pluma. A barra vertical em cores, vai de -10 a 20 dB da razão sinal/ruído.

Os radares de espalhamento coerente usados neste trabalho estão localizados em São Luís (região do leste da América do Sul), Jicamarca (região do oeste da América do Sul) e Christmas Island (região do Pacífico Central).

O radar de São Luís opera em 30 MHz e tem dois transmissores com picos de potência de 4 kW para observação de irregularidades de pequena escala (5 metros) alinhadas ao longo do campo magnético. Inicialmente teve dois módulos de antenas organizados lado a lado na direção leste-oeste magnético para transmissão e recep-

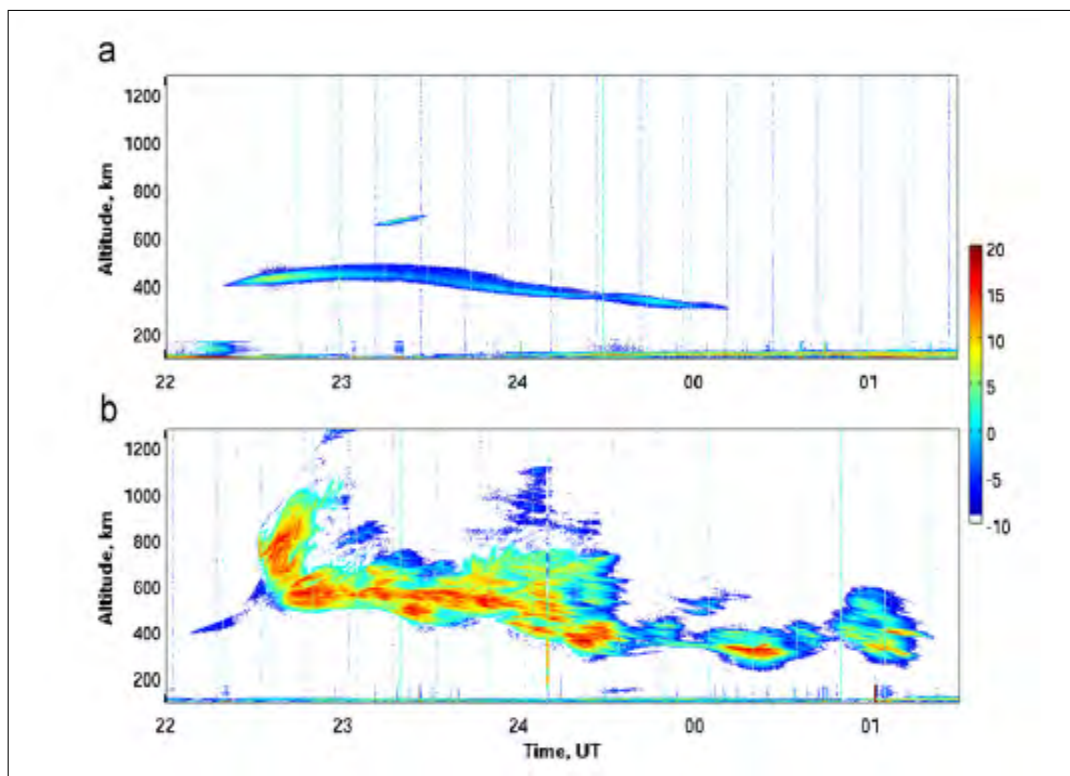


Figura 4.2 - Irregularidades de 5 metros observado pelo radar de São Luís. (a) Estrutura denominada Bottom-type sem pluma para o dia 01/04/2002, e (b) estrutura bottom-type com plumas para o dia 18/12/2002.

Fonte: (DE PAULA et al., 2011)

ção. Cada módulo de antena é composto de um arranjo de 4x4 antenas Yagi. O radar começou sua operação em Dezembro do ano 2000 e foi originalmente habilitado de observações interferométricas baseado em dois conjuntos de antenas. A largura do feixe de potência média é de 10° . Em 2005, o sistema do radar foi melhorado, e mais dois módulos de antenas foram adicionadas ao sistema existente. Mais detalhes da operação e experimentos pode ser encontrados em DE PAULA e HYSELL (2004), DE PAULA et al. (2004), RODRIGUES et al. (2004), RODRIGUES et al. (2008).

O radar de de espalhamento coerente de 50 MHz de Jicamarca (JULIA) tem uma largura de banda receptora de 1 MHz. O radar é equipado com um arranjo de 288 x 288 antenas com uma largura de feixe pequena, ao redor de 1° . O arranjo de antenas é formado por 64 (8x8) módulos independentes de 12x12 dipolos cruzados (WOODMAN e HAGFORS (1969), KUDEKI e BHATTACHARYYA (1999b)).

O radar de espalhamento coerente de 50 MHz de Christmas Island opera em Kiribati,

at Christmas Island. A antena é um arranjo de 100x100. Dois feixes estacionários (cada um com uma largura do feixe de média potência simétrica de $2,3^\circ$) foi instalado desde 2002 (leste) e 2003 (norte). Nesta presente configuração, o radar provê espalhamento na razão sinal-ruído (MILLER et al. (2009), MILLER et al. (2010), MAKELA et al. (2009)).

4.3 GPS

4.3.1 Sobre GPS

O desenvolvimento do Sistema de Posicionamento Global (GPS) iniciou-se nos anos 1970, com o lançamento de um único satélite em 1978, e o sistema alcançou sua total capacidade de operação em 1995. O propósito do sistema GPS é de fornecer uma estimativa precisa de posição, velocidade, e tempo para usuários no globo. O sistema GPS é formado por uma constelação de pelo menos 24 satélites orbitando a uma altura média de 20.200 km sobre a superfície terrestre. Atualmente estão disponíveis vários sistemas de satélites do tipo GPS tanto o termo utilizado é Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS - do inglês "Global Navigation Satellite System"). Em poucas palavras GNSS representa um conjunto de elementos que tem por objetivo permitir a localização em tempo real de um usuário situado em qualquer lugar, quando fala-se da Terra, em qualquer momento e sob qualquer condição meteorológica. Constando basicamente de uma constelação de satélites orbitando ao redor da Terra (orbitando em média 5000 a 20.000 Km de altitude) que emitem sinais de rádio em frequências L1 e/ou L2. Com as frequências L1 e L2 um receptor em terra pode calcular tanto a distância como a posição dos satélites e mediante a triangulação calcular sua própria localização. Embora atualmente contemos com os sistemas GPS, GLONASS e GALILEO de Posicionamento Global, neste trabalho faremos uso unicamente de dados coletados do sistema GPS.

O sistema GPS é, em essência, um sistema de medida de tempos, onde o observável básico é o tempo de retardo entre a emissão do sinal e a chegada do mesmo ao nosso receptor. Cada satélite GPS transmite sinais centradas em duas frequências de rádio de microondas, L1 (1575,42 MHz) e L2 (1227,60 MHz), sendo ambas múltiplas da frequência fundamental de 10,23 MHz, padrão para o sistema. Se os relógios com os quais medimos estes tempos estão perfeitamente sincronizados e os sinais se

propagam no vácuo, este tempo de retardo estaria medindo a distância geométrica de cada satélite.

O sistema GPS consiste de três segmentos: segmento espacial, segmento de controle em terra, e o segmento de usuários.

SEGMENTO ESPACIAL: Consiste de até 32 satélites GPS orbitando a aproximadamente a 20,200 km acima da superfície da Terra, emitindo sinais sincronizados nas mesmas frequências (L1 ou L2) com uma taxa de amostragem de 50 Hz. A informação transmitida pelos satélites GPS incluem o tempo do satélite (s), informação orbital precisa, informação para correção de tempo, data orbital aproximada, sinais de correção para cálculo do tempo de transmissão do sinal, correção do erro ionosférico e estatus de operação do satélite [Kaplan and Hegarty, 2005]. A órbita operacional dos satélites ao redor da Terra consiste de seis órbitas planas com uma inclinação de cinquenta e cinco graus, sendo cada uma dessas órbitas igualmente espaçadas entre si. O período orbital de cada satélite GPS é de 11 horas e 58 minutos, o que significa que este orbita a Terra duas vezes por dia. Cada satélite envia sinais continuamente, o que é recebido pelos receptores GPS. O sistema GPS garante que existem no mínimo quatro satélites sobre o horizonte local para que um receptor GPS possa solucionar sua posição em coordenadas tri-dimensionais mais o erro de relógio recebido.

SEGMENTO DE CONTROLE: Inclui a estação principal de controle (MCS - Master Control Station) localizado em Schriever AFB em Colorado Springs, EUA, cinco estações de monitoramento (MS - Monitor Stations) distribuídos globalmente e responsáveis pela coleta dos dados e monitoramento dos sinais de navegação. O MCS é o suporte em terra e calcula todas as posições e erros de relógio para cada satélite individualmente baseadas em informação vinda das estações de monitoramento. Este também envia de volta as informações de correção requeridas pelos satélites. O MS observa a posição, velocidade e condição de cada satélite orbitando. A órbita do satélite e erros do relógio são previstas com as informações coletadas pelas estações de monitoramento (Kaplan and Hegarty, 2005).

SEGMENTO DE USUÁRIO: Consiste de receptores GPS de uma antena, um oscilador altamente estável e processadores de sinal. Os receptores recebem a solução da posição local através de triangulação de pelo menos 4 satélites calculado a partir das suas posições com as efemérides transmitidas [Parkinson and Spilker, 1996]. O sinal

de rádio transmitido pelo satélite GPS toma em média 67 milissegundos para alcançar o receptor em terra. O receptor mede o tempo de transmissão do sinal a partir do sinal da antena do satélite para a antena do receptor. A técnica de correlação é usada, onde o tempo de transmissão é determinado pelo intervalo de deslocamento onde a máxima correlação é obtida entre o código do satélites PRN e o código gerado pelo receptor. O tempo de deslocamento multiplicado pela velocidade da luz no vácuo é a pseudo distância de um dado satélite ao receptor. O erro introduzido pela atmosfera da Terra deverá ser considerado no cálculo da correção das polarizações.

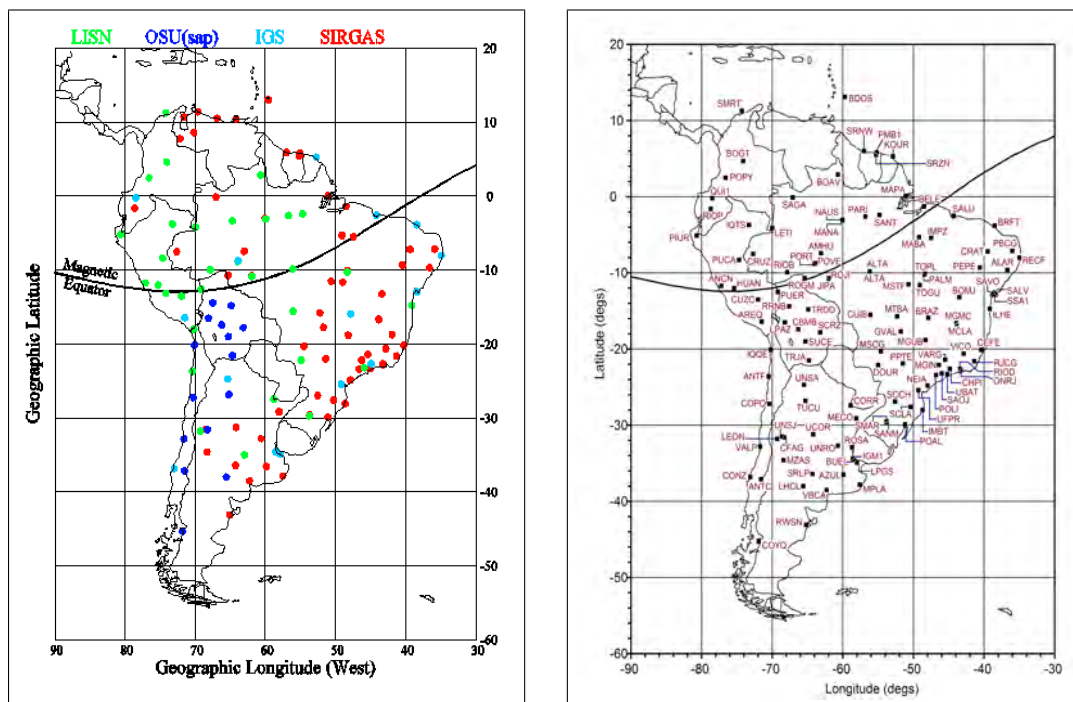


Figura 4.3 - A imagem da esquerda mostra as redes GPS LISN,OSU, IGS e SIRGAS. A imagem da direita mostra os nomes dos receptores GPS espalhados no continente SA sem distinção da rede à que pertencem.

Hoje em dia os receptores usualmente apresentam 12 a 20 canais referentes aos sinais dos satélites GPS que podem ser monitorados simultaneamente. Se mais de quatro satélites são observados então a posição do receptor será solucionado por observações redundantes pelo método de mínimos quadrados solucionando o sistema.

Em nosso estudo usamos dados de quatro redes de GPS com aproximadamente 127 receptores como mostrado nos painéis da Figura 4.3. Estes são a rede LISN (Valladares and Chau, 2012), Ohio State University at Central and Southern Andes GPS Project (OSU-CAP), Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS)

[Brunini et al., 2010] and International GNSS Service (IGS) [Dow et al., 2009]. Estes receptores GPS estão distribuídos ao longo do continente da América do Sul com uma cobertura de longitude geográfica de 35° a 80° oeste e latitude de 45°S a 13°N (latitudes magnéticas na faixa de 35°S a 20°N). É útil mencionar que uma grande população de receptores GPS está localizada ao sul do equador geomagnético, e esta escassez de receptores ao norte (do continente sulamericano) está sendo constantemente ampliada.

4.3.2 Cálculo de TEC

A existência do retardo ionosférico nos sinais GPS pode ser explorado para medir o conteúdo eletrônico ao longo da linha de visada satélite-receptor. O Conteúdo Eletrônico Total (TEC) corresponde à densidade eletrônica ionosférica integrada em altura, de uma coluna cuja área da base é unitária, ao longo da linha de visada satélite-receptor. A unidade de medida é a unidade de TEC (TECU) é igual a $1 \times 10^{16} \frac{ele}{m^2}$. Em termos gerais para fins de modelagem a ionosfera é assumida como sendo uma única camada bem fina a 350 km de altitude.

O TEC é altamente dependente da radiação solar ionizante e apresenta variações diurnas, sazonais e geográficas, assim como variações relacionadas ao nível de atividade solar e às condições magnéticas. Adicionalmente, os efeitos dos campos elétricos e ventos neutros, as variações de temperatura e a composição da atmosfera neutra têm sua parcela de influência no comportamento do TEC (Klobuchar, 1985). As variações diurnas do TEC dependem, entre outros fatores, da latitude, da época do ano e do nível de atividade solar. Em geral, o TEC apresenta um máximo durante o dia e um mínimo um pouco antes do amanhecer (Davis, 1990). Um segundo pico pode ser observado após o pôr-do-Sol, em médias e baixas latitudes.

É bom mencionar que o programa usado para o cálculo do TEC nos entrega os valores de TEC absoluto e relativo. O programa calcula previamente as polarizações dos receptores e dos satélites e nos entrega os valores com erros de ruído praticamente desprezíveis (comunicação pessoal com Seemala e Valladares, 2010) com uma alta precisão. Este processo é feito automaticamente para o usuário.

4.4 Satélite C/NOFS

No dia 16 de abril de 2008 um satélite equipado com grupo de instrumentos para medidas ionosféricas foi lançado em Kwajalein Atoll na ilha Ralik, a bordo da aero-

nave Lockheed L-1011 (veja-se na Figura 4.4 uma ilustração do satélite C/NOFS). O lançamento do satélite faz parte da missão da Força Aérea dos Estados Unidos da America (USAF - United States Air Force). O primeiro objetivo do satélite C/NOFS é fazer a previsão da existência de irregularidades ionosféricas que têm impacto nos sistemas de comunicação e navegação. O satélite tem uma baixa inclinação (a 13 graus do equador), órbita elíptica com seu perigeu em 400 km e seu apogeu em 850 km, e um período de aproximadamente 93 minutos. C/NOFS são as siglas em inglês de The Communication/Navigation Outage Forecast System. As órbitas foram planejadas de modo que este satélite voe através da depleção de densidade na região F da ionosfera.



Figura 4.4 - Imagem ilustrativa do satélite C/NOFS lançado em 2008.

Os objetivos científicos do C/NOFS podem ser organizados em três categorias: (1) compreender os processos físicos ativos no meio ionosférico e termosférico no qual o plasma se desenvolve, (2) identificar mecanismos de geração das irregularidades de plasma responsáveis pela degradação de sinal, e (3) determinar como as irregularidades do plasma afetam a propagação de ondas eletromagnéticas.

O C/NOFS é o primeiro satélite dedicado exclusivamente à previsão de irregularidades ionosféricas e cintilação de ondas de rádio. Este está equipado com sensores que medem a densidade eletrônica do ambiente, temperatura iônica e eletrônica, campos elétricos AC e DC, campos magnéticos, ventos neutros, cintilações ionosféricas, e conteúdo eletrônico ao longo da linha de visada entre o C/NOFS e GPS. Um amplo número de receptores em terra complementarão esta base de dados.

Em nossa pesquisa fazemos uso de dados de densidade iônica obtida pelo instrumento Planar Langmuir Probe (PLP), e este instrumento provê dados de densidade de baixa resolução temporal assim como medidas de alta resolução temporal. O satélite C/NOFS possui diferentes instrumentos para medida in-situ de diferentes parâmetros ionosféricos os quais são:

(1) IVM (Ion Velocity Meter) que mede o vetor de deriva de íons, temperatura de íons, e principalmente a composição de íons com uma resolução espacial de 4 km ao longo do percurso do satélite;

(2) NWM (Neutral Wind Meter) que mede o vetor do vento neutro com uma resolução espacial de 8 km ao longo do percurso do satélite;

(3) VEFI (Vector Electric Field Instrument) mede os campos elétricos DC que causam o movimento da deriva do plasma tornando-a instável, e também mede os campos elétricos quase-DC dentro de uma depleção de plasma para determinar seu movimento relativo ao meio ionosférico;

(4) CERTO (Coherent Electromagnetic Radio Tomography) é um sensor em 3 bandas de frequência (150 MHz, 400 MHz, 1067 MHz) para estudar as cintilações em multifrequência com receptores em solo, assim como para reconstrução tomográfica de perfis de densidade;

(5) CORISS (C/NOFS Occultation Receiver for Ionospheric Sensing and Specification) que é um receptor GPS de dupla frequência, medindo o TEC ao longo do campo de visada entre o C/NOFS e satélites GPS. Provê informações para extrair perfis verticais durante as ocultações.

5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS DE ESF OBTIDOS DE RADARES VHF EM TRÊS SETORES LONGITUDINAIS.

5.1 Introdução

As plumas, desenvolvimento vertical da base da camada F, associadas com eventos de ESF têm sido estudadas com radares de retro-espalhamento VHF/UHF/L-band localizados próximos ao equador geomagnético [e.g. WOODMAN e LA HOZ (1976), TSUNODA et al. (1979), TSUNODA (1980b), TSUNODA (1980a), HYSELL e BURCHAM (1998)]. O ESF é consequência do desenvolvimento da instabilidade Rayleigh-Taylor que se desenvolve na base da camada F no equador magnético e esta cresce de forma não linear até o topo da camada [e.g. OSSAKOW (1981)]. Relacionado à iniciação do ESF, o campo elétrico para leste no lado dia da ionosfera é fortemente intensificado antes da sua reversão ao lado noite. Esta intensificação dá origem ao chamado pico pré-reversão do plasma noturno [e.g. RISHBETH (1971), FARLEY et al. (1986), HAERENDEL et al. (1992), ABDU (2005)] o qual é um dos responsáveis pela geração da instabilidade Rayleigh-Taylor devido ao incremento de ambos termos gravitacional e eletrodinâmico da taxa de crescimento [e.g. FEJER et al. (1999), ABDU (2001)]. Foi estabelecido que a altura da camada F após o pôr-do-Sol é o parâmetro mais importante no controle da geração do spread F [e.g. FARLEY et al. (1970), ABDU et al. (1983), JAYACHANDRA et al. (1993), FEJER et al. (1999)].

Muitos dos avanços no estudo do fenômeno do ESF resultaram de medidas de radar VHF de retro-espalhamento [e.g., FARLEY et al. (1970), WOODMAN e LA HOZ (1976), KUDEKI et al. (2007), RODRIGUES et al. (2004)]. A ocorrência do ESF cobre um amplo espectro de tamanhos de escala que varia de uns poucos centímetros a centenas de quilômetros, e sua ocorrência varia com a longitude, tempo local, estação do ano e atividades solar e geomagnética. As irregularidades podem ser detectadas por radares coerente e coerente, sondadores in situ, rádio propagação, e detectores airglow assim como ionossondas. Embora as irregularidades representem um contínuo de escalas, muitas das técnicas de sondagem para observá-las são sensíveis a certos tamanhos de escala.

Uma série de artigos tem discutido o padrão de ocorrência do bottom-type, bot-

tomside, e ecos topside (plumas) [e.g. HYSELL e FARLEY (1996), HYSELL e BURCHAM (1998), HYSELL (2000), HYSELL e BURCHAM (2002)]. As camadas bottom-type e bottomsides são ambas camadas de espalhamento que existem na base da região F. As camadas bottomsides frequentemente aparecem subsequentes às camadas bottom-type, o contrário não acontece ou pelo menos não temos registro delas. As camadas bottom-type são estruturas finas e confinadas a uma pequena faixa de altura sob o efeito do campo elétrico zonal para oeste. Estas não apresentam um desenvolvimento vertical aparente. Esta camada (bottom-type) causa muito pouco espalhamento nos ionogramas. A camada bottomsides é uma camada de grande espalhamento e consideravelmente mais intensa e estruturada que a camada bottom-type, e ocasionalmente encontram-se nela uma ou outra pluma penetrando no topo da camada F. Camadas bottomsides são aquelas que emergem em regiões da ionosfera controladas pelo dínamo da região F (HYSELL e FARLEY (1996), HYSELL e BURCHAM (1998)), e apresentam uma deriva para leste. As plumas de radar são evidências de grandes diminuições na densidade do plasma elevando-se através do pico da região F sob a influência das instabilidades bem desenvolvidas e atingindo no topo da camada F. Plumadas de radar de grande escala parecem ocorrer frequentemente no tempo do intervalo de transição entre as camadas do bottom-type e o bottomsides, onde a deriva da região F muda de oeste para leste.

Determinar o comportamento das irregularidades do plasma da região F, na ionosfera equatorial noturna, como uma função da longitude é vital para o entendimento da física do seu desenvolvimento/ocorrência. Neste trabalho focamos o estudo na estatística da ocorrência do spread F baseado na diferença longitudinal, dependência com o fluxo solar e variação sazonal para três setores de longitude.

5.2 Distribuição de parâmetros de plumas ionosféricas equatoriais

A pesquisa representa uma distribuição climatológica e comportamento estatístico dos parâmetros de radar VHF como os que são observados nos plots de RTI do radar VHF nas três estações de diferentes setores de longitudes e com diferentes ângulos de declinação magnética.

As três estações usadas no trabalho encontram-se próximo do equador magnético (ver Tabela 5.1), e foram escolhidas devido à disponibilidade de dados de radares VHF nestas latitudes equatoriais. Os dados para gerar as imagens RTI das diversas estações em uso foram fornecidos pelo Dr. Eurico R. de Paula (São Luís), Dr. Marco

Milla (Jicamarca) e por Dr. Keith M. Groves e Dr. Ronald Tsunoda (Christmas Island). Uma vez tendo os dados disponíveis foi desenvolvido um programa para coletar os parâmetros de radar.

A idéia principal do programa é varrer a matriz dos dados RTI segundo os parâmetros de densidade, razão sinal-ruído ou velocidade doppler (cada um com suas peculiaridades).

O programa desenvolvido (não mostrado aqui), em suma, detecta o início do bottom-type (se ela existir), em tempo e altura, a seguir o final do bottom-type, em tempo e altura, e armazena os dados. Posteriormente detecta o início da pluma (se ela existir), em tempo e altura, e o final da pluma, em tempo e altura, e armazena os dados.

Uma vez armazenados os cinco parâmetros de radar foi criado um programa complexo e completo para o processamento destes dados para mostrar sua dependência com fluxo solar, sazonalidade, declinação magnética (juntando resultados das três estações), e variação temporal dos parâmetros de radar. Os parâmetros de tempo e altura em função do fluxo solar (F10.7cm) mostraram-se muito espalhados, por isso foram escolhidos intervalos específicos de dados (escolha manual dependendo do agrupamento dos dados) e aplicou-se média, desvio padrão e contagem dos dados ali agrupados.

As observações de radar, em particular, revelam que a ocorrência e morfologia de ESF é altamente variável dia com dia (WOODMAN e LA HOZ (1976), TSUNODA (1981b)), conforme comprovado por imageadores ópticos (WEBER et al., 1978) e sondas in-situ (KELLEY; AL, 1986). Uma característica interessante das irregularidades ESF, e que foram obtidas usando essas técnicas acima citadas, é a formação de depleções de plasma de larga escala que são comumente referenciados como bolhas de plasma. Essas bolhas manifestam-se nos radares VHF como estruturas do tipo pluma crescendo verticalmente em altura. Essas bolhas de plasma são numericamente simuladas (SCANNAPIECO e OSSAKOW (1976), OSSAKOW (1981), RAGHAVARAO et al. (1992)) pela evolução não linear da instabilidade GRT. Dinamicamente ambas as irregularidades ESF e bolhas de plasma exibem grande variabilidade.

FEJER et al. (1999) mostrou que a climatologia das irregularidades é fortemente influenciado pela climatologia do campo elétrico ionosférico zonal. Sob condições magneticamente quietas, o aumento do fluxo solar (índice F10.7cm por exemplo) implica em aumento substancial do pico pré-reversão e, conseqüentemente, apare-

cimentos mais rápidos, alturas iniciais maiores, e alturas pico também maiores das irregularidades. A variabilidade do campo elétrico zonal em tempo quieto contribui significativamente para a variabilidade da ocorrência do ESF.

Características de eventos isolados são amplamente estudados, e nosso trabalho mostra o estudo climatológico de uma série histórica de dados de radar VHF. Alguns exemplos de variabilidade morfológica, dia com dia, das irregularidades ionosféricas observadas pelo radar VHF são apresentadas a seguir. No painel superior da Figura 5.1 observamos 5 dias consecutivos de imagens RTI para um fluxo solar médio de 70 unidades (F10.7cm), para os dias 24 a 28 de setembro de 2008 sobre a estação de Jicamarca. Este é um exemplo de variabilidade dia a dia de ocorrência de irregularidades na ionosfera equatorial para o período de mínimo solar. Durante as noites dos dias 24 e 25 não foram observados estruturas de tipo bottom-type ou pluma (não houve spread F) na região F e no dia 26 observa-se o aparecimento de um bottom-type prévio à pluma. Posteriormente nos dias 27 e 28 temos plumas praticamente sem bottom-type. Estas plumas estendem-se verticalmente e alcançam alturas ao redor de 600 km.

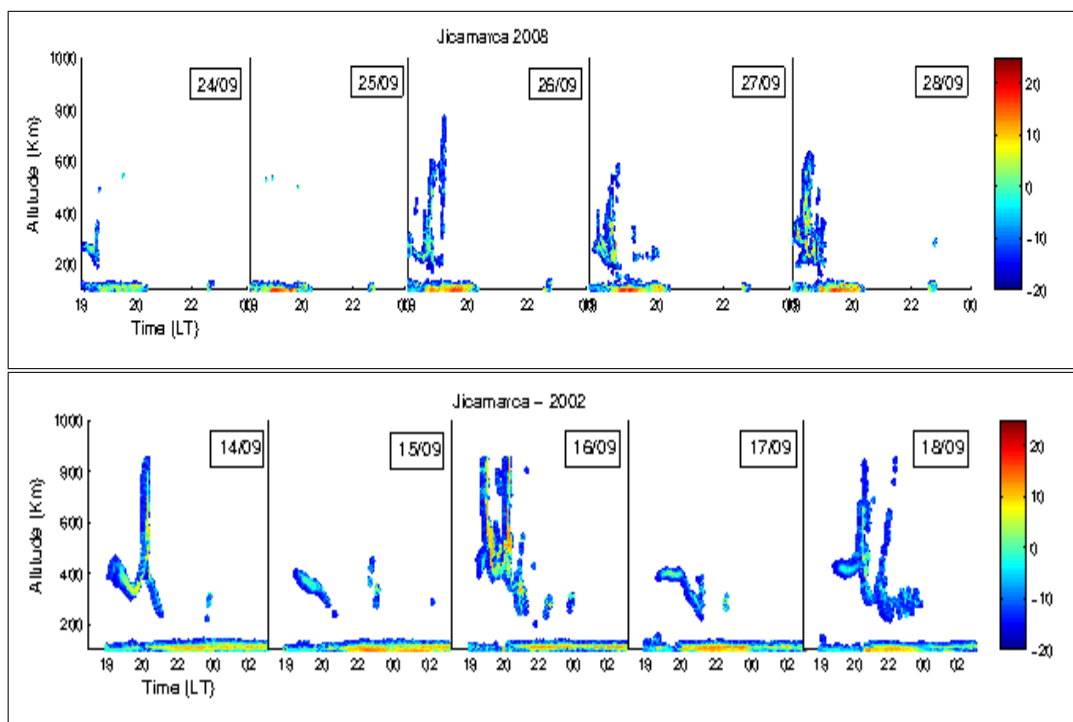


Figura 5.1 - Variabilidade morfológica de estruturas presentes nos gráficos RTI sobre a estação de Jicamarca. Painel superior mostra dias 24 a 28 de Setembro de 2008 (mínimo solar), e o painel inferior mostra os dias 14 a 18 de Setembro de 2002 (máximo solar).

No painel inferior da Figura 5.1 observamos 5 dias consecutivos de imagens RTI para um fluxo solar médio de 120 unidades (F10.7cm), para os dias 14 a 18 de Setembro de 2002 sobre a estação de Jicamarca. Este é mais um exemplo de variabilidade dia a dia de ocorrência de irregularidades na ionosfera equatorial para o período de máximo solar. Temos aparecimento de alguma estrutura de radar todas as noites de observação, algumas vezes bottom-type, outras bottom-type com pluma e outras vezes pluma sem bottom-type, e nos dias 14, 16 e 18 houve o aparecimento de plumas de radar com extensão vertical acima de 900 km, enquanto que os dias 15 e 17 houve o aparecimento de unicamente bottom-type sem desenvolver uma pluma. Nesta série de exemplos durante o máximo solar observa-se uma grande variabilidade dia com dia da ocorrência do spread F e do aparecimento das estruturas de radar aqui observadas.

Cabe salientar que foram observadas algumas plumas principais, quando há o desenvolvimento de uma única pluma, e outras plumas secundárias tanto no mínimo quanto no máximo solar. Uma característica associada ao mínimo solar é a altura alcançada pelas plumas (ao redor de 600 km), embora podem alcançar alturas maiores, enquanto que no máximo solar temos plumas estendendo-se acima de 900 km.

No exemplo acima observamos uma noite com bottom-type sem pluma seguido por um evento de grande ESF na noite seguinte, o mesmo acontece ao contrário. As características da ocorrência do ESF dependem dos parâmetros de plasma ambiente tais como a natureza do aumento pré-reversão (FEJER et al., 1999), vento neutro (RAGHAVARAO et al., 1999), perturbação geradora (SEKAR et al., 1995; HUANG; KELLEY, 1996), vento meridional (MENDILLO et al., 1992) e condutividade da região E. A natureza dos mecanismos geradores (como amplitude da perturbação semeadora) altera substancialmente a ocorrência do spread F.

O spread F equatorial (ESF) é uma manifestação de instabilidades ionosféricas no período noturno da região F equatorial. As irregularidades podem ser detectadas por vários instrumentos tais como digissonda, radar de espalhamento coerente e coerente, sondadores in-situ a bordo de satélites, assim com fotômetros airglow. No presente estudo a estatística de vários aspectos da ocorrência do spread F são apresentados usando radar HF/VHF e radar de espalhamento coerente localizados em três estações equatoriais: Christmas Island (2°N, 202,6°E, 2,9°N dip latitude, Coherent VHF radar), São Luís (2,59°S, 315,8°E, 0,5°S dip latitude, Coherent HF radar) and Jicamarca (12°S, 283,1°E, 0,6°N dip latitude, SR). Os parâmetros de radar apresentados aqui são altura inicial e tempo inicial do bottom-type e da pluma, e a

altura pico da pluma de radar os quais estão associados com as características da ocorrência do spread F. O estudo revela resultados originais, como a dependência da ocorrência do spread F com a sazonalidade e fluxo solar sobre Christmas Island/São Luís, e dependência longitudinal das características da ocorrência do spread F destas três estações baseada nos parâmetros aqui selecionados. A importância deste trabalho reside no desenvolvimento do modelo empírico dos parâmetros de radar gerados combinando a análise estatística das estações equatoriais e separadas longitudinalmente. Este tipo de estudo é importante para entender os mecanismos de geração de irregularidades para programas como previsão em tempo real do clima espacial, e o melhoramento de modelos de alerta de cintilações. Estes parâmetros mostram uma correlação linear com o índice solar F 10.7 cm, e variação com sazonalidade e ângulo de declinação magnética. O ajuste linear com o índice F10.7 cm é mostrado como uma informação útil para implementar um modelo empírico de desenvolvimento do spread F baseado em irregularidades de pequena escala detectados no radar VHF.

5.3 Base de dados

Apresentamos os resultados de observações feitas com três radares. Observações com radar VHF de espalhamento coerente de São Luís (SLZ) e de Christmas Island (CXI), e observações com o radar VHF de espalhamento coerente de Jicamarca (ROJ) foram analisados. As coordenadas geográficas e geomagnéticas destas estações equatoriais são apresentadas na Tabela 5.1. A descrição técnica de cada radar encontra-se na seção 4.2.

Station	Lat. Geog.	Long. Geog.	Declination	Dip. Lat.
SLZ	2,59° S	44,2° W	20,44° W	0,5° S
ROJ	12,0° S	76,9° W	0,30° W	0,6° N
CXI	2,0° N	157,4° W	8,55° E	2,9° N

Tabela 5.1 - Tabela 1. Coordenadas geográficas e geomagnéticas das estações ionosféricas equatoriais.

5.4 Metodologia

No presente trabalho foram usadas medidas de radar de espalhamento coerente sobre as estações de Christmas Island, São Luís e Jicamarca, localizadas próximo do

equador magnético e em setores longitudinais diferentes. Os dados de Christmas Island pertencem ao período de 2003 a 2009, que corresponde à fase descendente da fase do mínimo estendido do último ciclo solar. Os dados de São Luís pertencem ao período de 2001 a 2008, e os dados de Jicamarca pertencem ao período de 2001 a 2009 abrangendo os períodos de máximo e mínimo solar.

Observações das irregularidades do plasma ionosférico, usando o radar VHF, são usualmente exibidos no formato de altura-tempo-intensidade (range-time-intensity - RTI), no qual a potência refletida é graficada em função da altitude e o tempo. As estruturas presentes nos gráficos RTI mostram uma alta variabilidade, em formato, dia com dia com a ocorrência do spread F equatorial (veja-se Figura 5.1). Esta alta variabilidade das estruturas podem ser agrupadas em algumas categorias principais. Estas categorias são as camadas bottom-type, camadas bottomside, camadas topside (plumas de radar), e irregularidades pós meia-noite (este último não é matéria do nosso estudo).

A Figura 5.2, no painel superior, retrata um evento ESF no radar de São Luís em 01 de Dezembro, 2002. A figura mostra a razão sinal/ruído de espalhamento em dB apresentado em função da altitude (kms) e tempo (horas). A barra vertical colorida mostra o índice (S-N)/N com valores entre -5 a 20 dB. A intensidade do sinal indica a presença de irregularidades de plasma intensas com comprimento de onda de 5 metros. Indicados em linhas pretas e etiquetadas estão os parâmetros de radar usados neste estudo. Esta imagem é uma representação clássica do spread F observado sobre a estação de São Luís durante alta atividade de spread F. A Figura 5.2, no painel inferior, apresenta um evento ESF observado sobre a estação de Christmas Island no dia 25 de Agosto 2003, também mostrando os parâmetros de radar VHF.

O estudo estatístico aqui presente está baseado na identificação dos parâmetros de radar VHF, os quais estão relacionados ao bottom-type, bottomside e estruturas de plumas. Se adopta a metodologia de estudo climatológico/estatístico da série de artigos de FEJER et al. (1999), HYSELL e BURCHAM (2002), CHAPAGAIN et al. (2009), DE PAULA et al. (2011). Estes autores fizeram um estudo climatológico das características do ESF usando parâmetros de altitude e tempo do spread F observado com radar VHF, em função da sua dependência com o fluxo solar para estabelecer estratégias de previsão. Estes parâmetros são apresentados em gráficos RTI como o da Figura 5.2. Estes são o tempo inicial (T_i) e altura inicial (H_i) do spread F inicial (bottom-type), assim como o tempo inicial (T_p), altura inicial (H_p) e altura pico

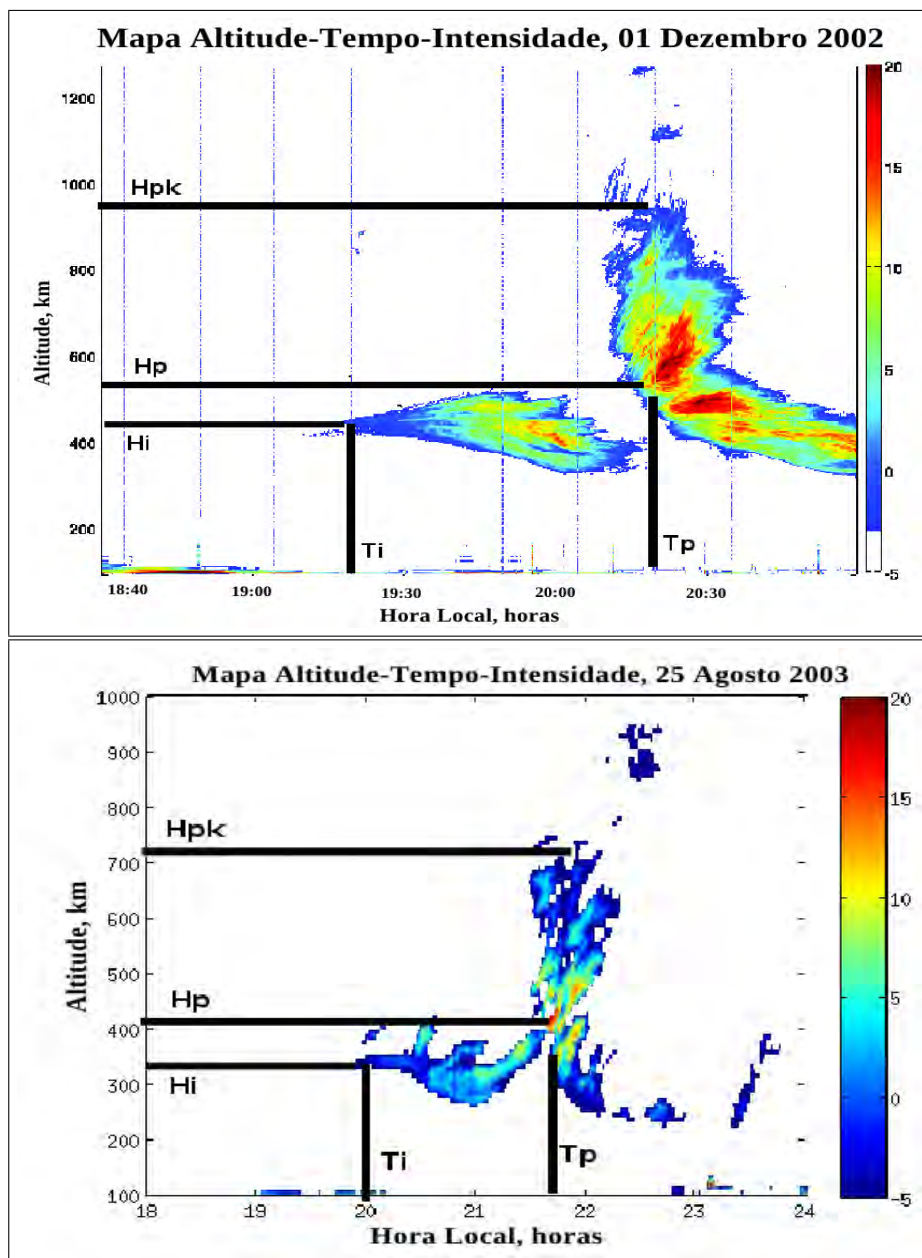


Figura 5.2 - (a) Características da Pluma de radar observado na estação de São Luís em 01 Dezembro, 2002, (b) características da pluma observada na estação de Christmas Island em 25 Agosto, 2003. Os parâmetros de radar VHF estão destacados em texto de cor preta.

(Hpk) das plumas de radar. Estes parâmetros só podem ser determinados quando estiverem presentes claramente nas figuras RTI.

5.5 Resultados e Discussões

Daqui em diante apresentamos a dependência sazonal e fluxo solar dos tempos e alturas iniciais dos parâmetros de spread F observados nos mapas RTI do radar sobre as estações de Christmas Island, São Luís e Jicamarca. Apresentamos todas as observações disponíveis e não as separamos por atividade geomagnética, desde que não foi obtida uma representação estatística suficiente com nossos dados. Embora durante 2001 a 2003 houve uma razoável quantidade de atividade magnética no máximo solar, não houveram dados suficientes para o propósito estatístico de representar as observações em função da atividade geomagnética.

Foram separadas as medidas em três estações representando o equinócio (Março-Abril e Setembro-Outubro), solstício de Dezembro (Novembro-Fevereiro) e solstício de Junho (Maio-Agosto) para São Luís e Jicamarca. Para Christmas Island, que está localizada no hemisfério norte as estações do solstício são opostas. Para não confundir o leitor com a nomenclatura de sazonalidade ao norte ou ao sul usaremos nov-fev e mai-ago referenciando os meses de cada solstício. Além disso, as medidas foram agrupados por conjuntos de pontos para sua melhor representação de dependência sazonal e de fluxo solar. Resultados para o solstício de mai-ago não são apresentados para São Luís nem para Jicamarca devido à falta de dados como resultado da não representação estatística para sua análise.

5.5.1 Ocorrência Sazonal dos parâmetros do Spread F sobre CXI e comparação com São Luís e Jicamarca

Nesta seção apresentamos a ocorrência sazonal das irregularidades da região F observadas pelos radares VHF. A Figura 5.3 apresenta a estatística das observações mensais dos ecos de radar VHF para as estações de Christmas Island (CXI), São Luís (SLZ) e Jicamarca (ROJ) e independente do fluxo solar. A figura é dividida em três painéis, cada um correspondente a uma estação. As barras grossas brancas referem-se às observações do spread F e as barras pretas referem-se a observações de plumas de radar (com ou sem presença de bottom-type), e se observa que a diferença entre as barras indica os eventos bottom-type observados. Nesta figura não são apresentadas as observações de radar VHF sem ecos.

Sobre o Pacífico Central a ocorrência de bolhas é alta durante o equinócio de outono com um pico de máxima ocorrência de Agosto a Outubro. Este comportamento está em concordância com a estatística de ESF sobre a região do Pacífico (MAKELA et al. (2004)). Além do mais, na Figura 5.3 para CXI pode-se observar que ocorrência de estruturas unicamente de bottom-type são menores quando comparados com a ocorrência de estruturas tipo plumas (com ou sem bottom-type). Spread F

com plumas estão principalmente ocorrendo entre Julho e Setembro (corresponde ao solstício mai-ago e começo da estação equinocial). Esta é uma das características novas e interessantes encontradas neste trabalho.

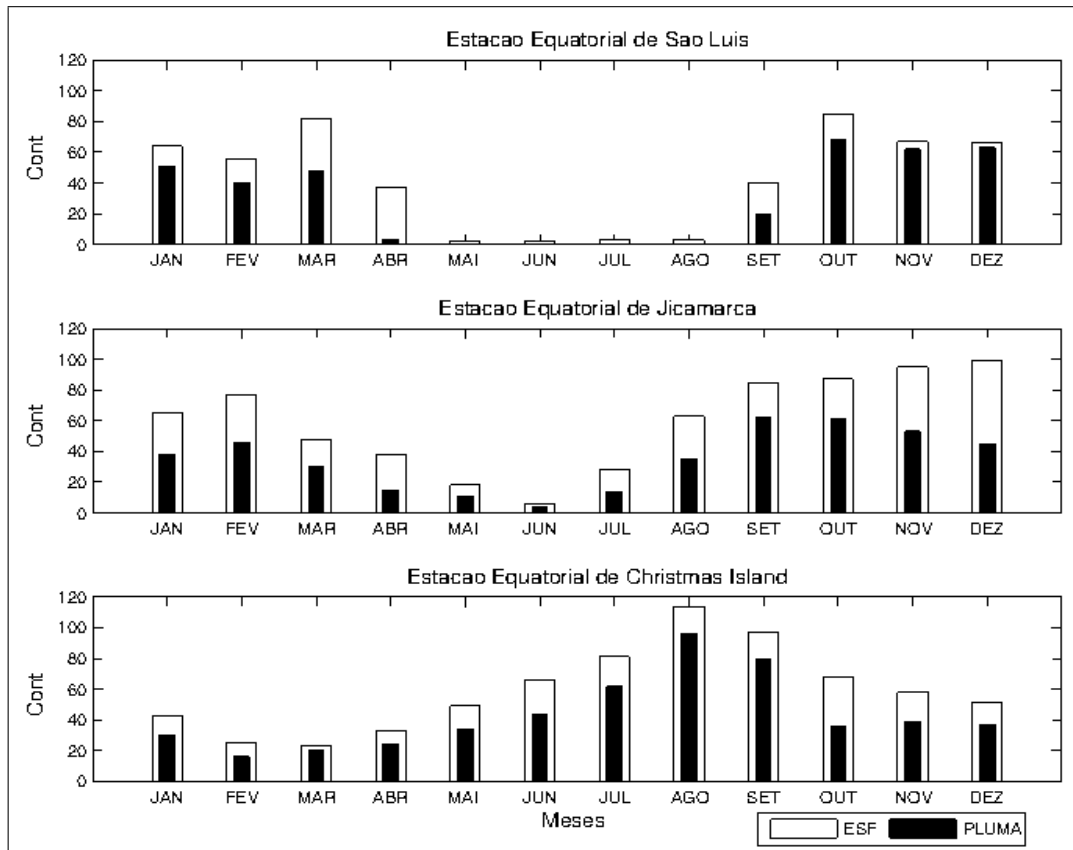


Figura 5.3 - Ocorrência sazonal das irregularidades spread F combinando os períodos em estudo (independente do fluxo solar).

Sobre a região Brasileira os picos de ocorrência do spread F são no equinócio e solstício de nov-fev (verão austral). Podemos observar que o pico de ocorrência sobre a região Peruana está confinado aos equinócios com baixa ocorrência durante o solstício de mai-ago (inverno austral). De publicações anteriores sobre a ocorrência do spread F sazonal foram obtidas conclusões em concordância com nossos resultados por BASU et al. (1980) para Jicamarca, por DE PAULA et al. (2011) e SOBRAL et al. (2002) para São Luís. A diferença sazonal em máxima ocorrência sobre São Luís e Christmas Island/Jicamarca é devido ao efeito do grande ângulo de declinação magnética em São Luís (20°) como explicado por DE PAULA et al. (2011). O pico da velocidade vertical na região F depende diretamente da variação da condutividade das regiões E magneticamente conjugadas. O período do pôr-do-Sol em cada

uma das regiões E conjugadas tem uma variação sazonal particular, ocasionado pela declinação magnética. Então se uma das regiões E conjugadas permanece iluminada pelo Sol durante o período do pôr-do-Sol um curto-circuito parcial através das regiões E e F será mantido. TSUNODA (1985), FARLEY et al. (1986), ABDU et al. (1982), BATISTA et al. (1986) descreveram que a dependência sazonal da deriva vertical no horário do pôr-do-Sol e a ocorrência do spread F numa dada longitude são controladas pelo ângulo de declinação magnética, e a alta ocorrência é esperada durante os meses quando o terminadouro passa pelas camadas E conjugadas entram no escuro ao mesmo tempo, com o conseqüente decréscimo da condutividade integrada Pedersen. Isto confirma que o alinhamento deverá ser condição necessária, embora insuficiente, para o crescimento das irregularidades (TSUNODA et al., 1982). A variação sazonal do vento termosférico também afeta a ocorrência do ESF.

Na estação de São Luís nós observamos que o bottom-type sem estruturas tipo plumas ocorrem principalmente em março/abril e setembro, períodos estes que correspondem aos meses do equinócio. As plumas com ou sem bottom-type estão presentes principalmente de outubro a março, no final do equinócio e a estação do solstício nov-fev. Observando a estação do ROJ, bottom-type sem plumas estão presentes principalmente nos meses de novembro a fevereiro, e plumas estão presentes de setembro a fevereiro correspondendo ao equinócio e início do solstício de verão do hemisfério sul.

Na Tabela 5.2 apresentam-se a sazonalidade do spread F seleccionada por assinatura no radar (como Observações, Bottom-type e Plumias).

	EQUINOX	NOV-FEB	MAY-AUG	SIGNATURE
SLZ	259	265	65	Observations
	105	37	10	Bottom-type
	139	216	0	Plume
ROJ	362	438	390	Observations
	90	154	51	Bottom-type
	168	182	64	Plume
CXI	527	473	644	Observations
	61	55	74	Bottom-type
	160	122	236	Plume

Tabela 5.2 - Número de eventos spread F separados por tipo de assinatura, e sobre as estações de São Luís, Jicamarca e Christmas Island.

5.5.2 Parâmetros do spread F em função do fluxo solar durante diferentes sazonalidades.

Para cada estação ionosférica a média e o desvio padrão dos parâmetros de radar utilizando-se agrupamentos de fluxo solar selecionados, foram calculados e graficados. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 mostram estes parâmetros de radar para Christmas Island para as 3 estações (equinócio, solstício de nov-fev e mai-ago respectivamente). As Figuras 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10 descrevem os parâmetros de pluma do radar e suas equações de ajuste linear (na cor preta para os parâmetros mostrados na parte inferior e na cor azul para os parâmetros mostrados na parte superior) como função do fluxo solar para equinócio e solstício de nov-fev para São Luís e Jicamarca, respectivamente. Também é apresentado na parte inferior das figuras os histogramas representando o número de dados disponíveis por cada "agrupamento" de cada parâmetro usado em seu respectivo painel superior.

Nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10 podemos observar a correlação linear dos parâmetros de radar com o fluxo solar. Observa-se que para cada estação equatorial a altura inicial do bottom-type (H_i), da pluma (H_p) e da altura de pico (H_{pk}) das plumas apresentaram um incremento enquanto o fluxo solar também foi incrementando. Os tempo inicial do bottom-type (T_i) e da pluma (T_p) decresceram enquanto o fluxo solar aumentou.

Observando as linhas de tendência linear pode-se apontar que, para a estação de Christmas Island, os parâmetros de tempo apresentam um forte decréscimo enquanto o fluxo solar aumenta, mas os parâmetros de altitude têm uma tendência de aumento com o fluxo solar. Para a estação de São Luís, os parâmetros de altura têm um forte incremento com o fluxo solar maior no solstício de nov-fev do que no equinócio. O tempo inicial (T_i) do bottom-type tem um pequeno decréscimo na sua linha de tendência enquanto o fluxo solar decresce durante equinócio e o solstício de nov-fev para a estação de São Luís. Para Jicamarca, os parâmetros de altitude têm um aumento forte com o fluxo solar maior no equinócio do que no solstício de nov-fev. O tempo inicial (T_i) do bottom-type tem um pequeno decréscimo na sua linha de tendência enquanto o fluxo solar decresce, isto durante equinócio e solstício de nov-fev para São Luís e Jicamarca. Os resultados aqui obtidos para Jicamarca foram previamente apresentados por [CHAPAGAIN et al. \(2011\)](#). Entretanto, para Christmas Island e São Luís, estas características não eram conhecidas em função da sua sazonalidade e o presente estudo nos fornece estes resultados pela primeira

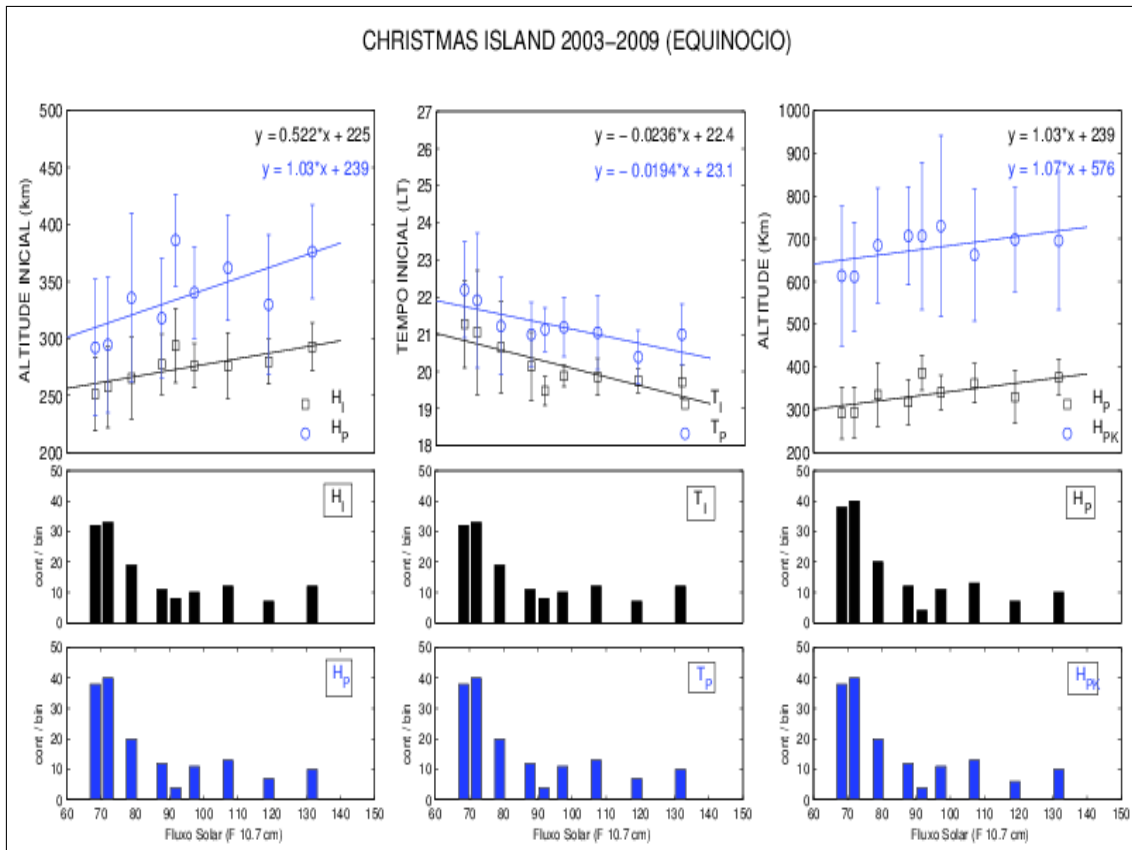


Figura 5.4 - Parâmetros de radar VHF para a estação de Christmas Island como função do fluxo solar para equinócio.

vez.

Mesmo com uma representação estatística pobre para o solstício de nov-fev para a estação de CXI fomos capazes de representar a mesma tendência geral dos parâmetros de radar segundo os gráficos prévios, entretanto devido a escassez de dados o desvio padrão neste período é maior. É importante esclarecer aqui que o período coberto (para CXI) é principalmente mínimo solar então o eixo "X" vai até 150 sfu ao invés de 300 sfu como nas figuras das estações de SLZ e ROJ.

As barras verticais do desvio padrão revelam que as observações de radar, em particular, da ocorrência e morfologia do ESF é altamente variável quando estudado dia com dia (WOODMAN e LA HOZ (1976), TSUNODA et al. (1982)). A alta variabilidade da ocorrência do spread F em altitude e tempo estão sendo investigados por diferentes autores e recentemente publicados por VALLADARES et al. (2004), MILLER et al. (2010), KHERANI et al. (2012), SEEMALA e VALLADARES (2011), DE PAULA et al. (2011), CUEVA et al. (2012). Eles estabeleceram que a alta va-

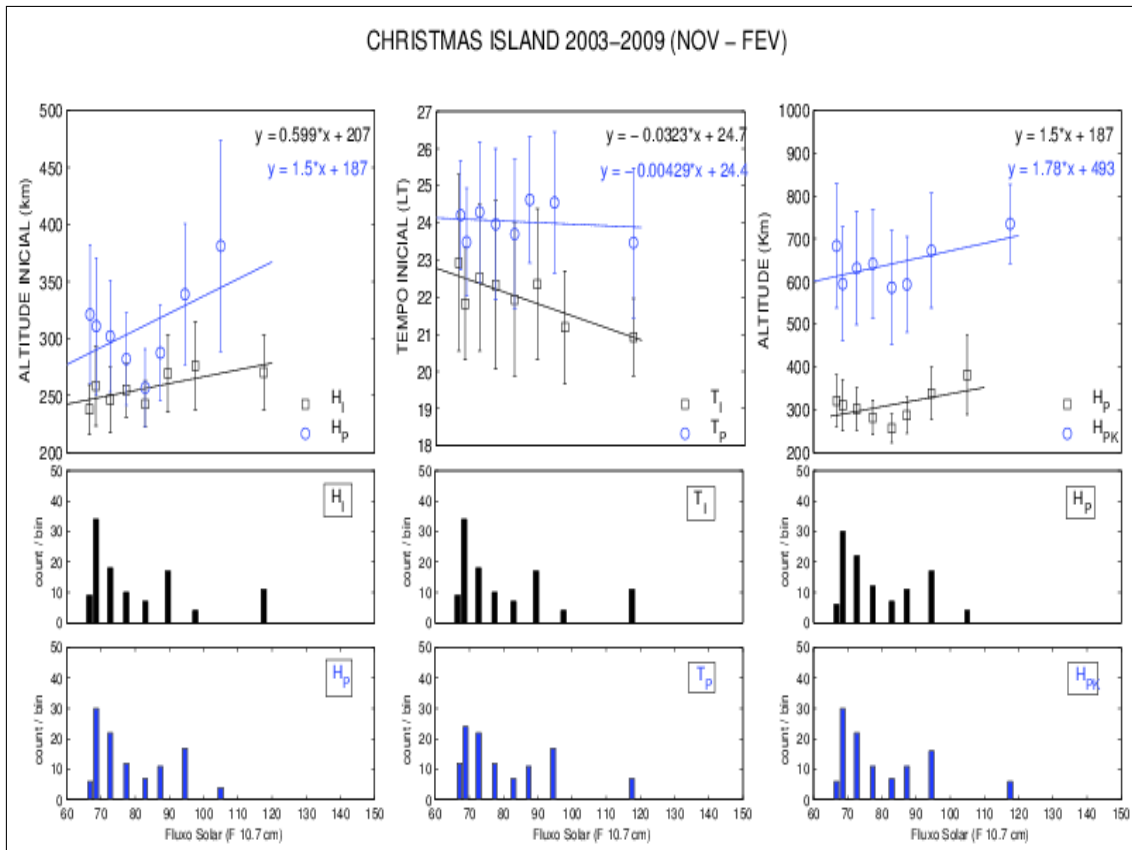


Figura 5.5 - Parâmetros de radar VHF para a estação de Christmas Island como função do fluxo solar para solstício de verão para o hemisfério norte.

riabilidade dia com dia da ocorrência do ESF e seu comportamento longitudinal dependem das condições do início como altura inicial, tempo inicial e velocidade da deriva vertical do pré-reversal, semeadores tipo onda e sua dependência com o fluxo solar.

É importante indicar que para as estações de São Luís e Jicamarca, aproximadamente em 180 sfu para o equinócio e 200 sfu para o solstício de nov-fev é observado uma aparente saturação nos parâmetros de altitude (H_i e H_{pk}). Mesmo resultado foi previamente indicado por [CHAPAGAIN et al. \(2009\)](#) usando parâmetros de plumas de Jicamarca, mas não foi dada uma razão clara para este comportamento. Maior esforço precisa ser feito utilizando dados de mais um ciclo solar para aprimorar estas observações.

5.5.3 Efeito longitudinal nos parâmetros de radar

É bem estabelecido que diferentes regiões com longitudes diferentes têm diferente padrão anual e sazonal da ocorrência de ESF e da sua intensidade. Durante anos

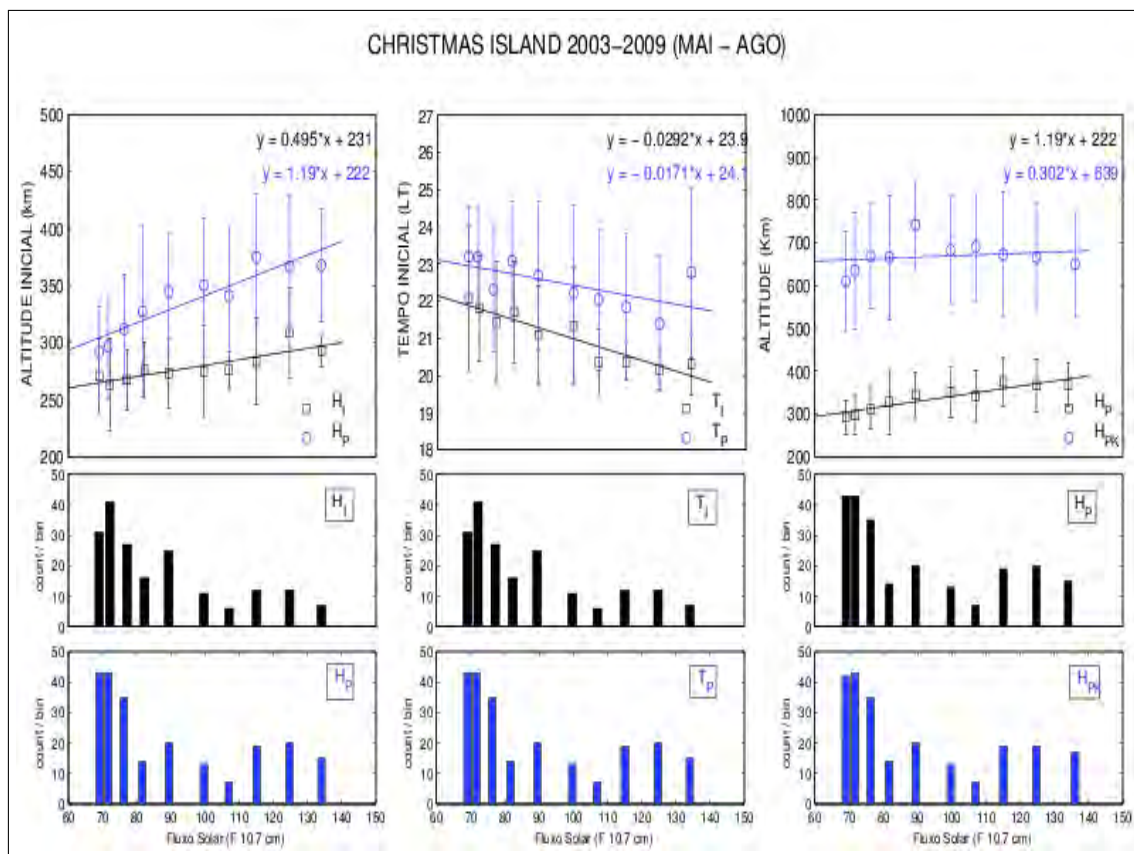


Figura 5.6 - Parâmetros de radar VHF para a estação de Christmas Island como função do fluxo solar para solstício de inverno para o hemisfério norte.

de alta atividade de fluxo solar existe uma alta ocorrência das irregularidades e intensidade. Entretanto o padrão de ocorrência longitudinalmente permanece aproximadamente o mesmo ainda quando o fluxo solar muda de máximo para mínimo solar (AARONS (1993)).

Figuras 5.11 e 5.12 mostram a comparação dos valores médios sazonais de cada um dos parâmetros do radar VHF para as estações em estudo, para o equinócio e solstício nov-fev. Não há informação suficiente para o solstício de inverno (mai-ago). Os valores usados são os mesmos das Figuras 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10 mas sem as barras de desvio padrão.

O presente trabalho confirma os resultados obtidos por HYSELL e BURCHAM (2002), que indicam que durante atividade de alto fluxo solar a magnitude do pico pré-reversão é maior, causando um rápido movimento da camada F a altas altitudes e consequentemente a ocorrência das irregularidades serão também maiores no período de máximo solar comparado com o período de mínimo solar. Isto é observado durante

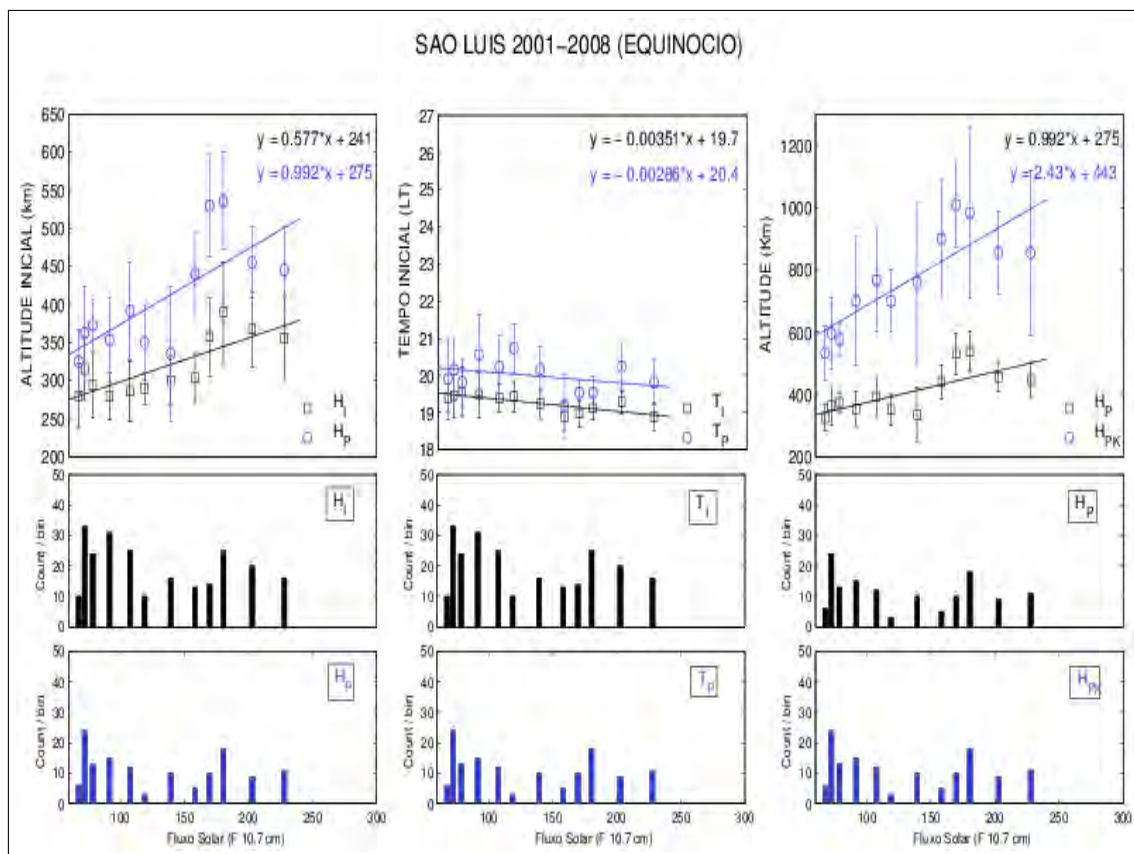


Figura 5.7 - Parâmetros de radar VHF para a estação de São Luís como função do fluxo solar para equinócio.

período de alto fluxo solar quando o início das plumas e altura do pico das mesmas alcançam maiores altitudes do que durante as condições de mínimo fluxo solar. Foi observado que quando H_i alcança $300 \text{ km} \pm 10 \text{ km}$ de altitude os parâmetros H_p e H_{pk} apresentam mais facilidade de alcançar alturas mais altas acima de 400 km e 800 km , respectivamente, o que acontece usualmente para fluxo solar maior de 150 sfu em qualquer estação do ano nestas três estações ionosféricas.

Uma causa definida para a diferença sazonal na ocorrência máxima sobre São Luís e CXI/ROJ é o efeito do grande ângulo de declinação sobre São Luís. Este aspecto é discutido na seção 5.5.1. Para analisar a diferença longitudinal das características da ocorrência entre estas três estações, nós desenvolvemos um modelo empírico baseado nas relações empíricas previamente encontradas. As relações empíricas em cada estação ionosférica por estação do ano/parâmetro de radar nos permitiram desenvolver um modelo empírico que é importante para o estudo de mecanismos de geração de irregularidades, para previsão do clima espacial, e melhoramento de modelos de alerta de cintilação. Este modelo empírico é apresentado na Tabela 5.3. Nesta tabela

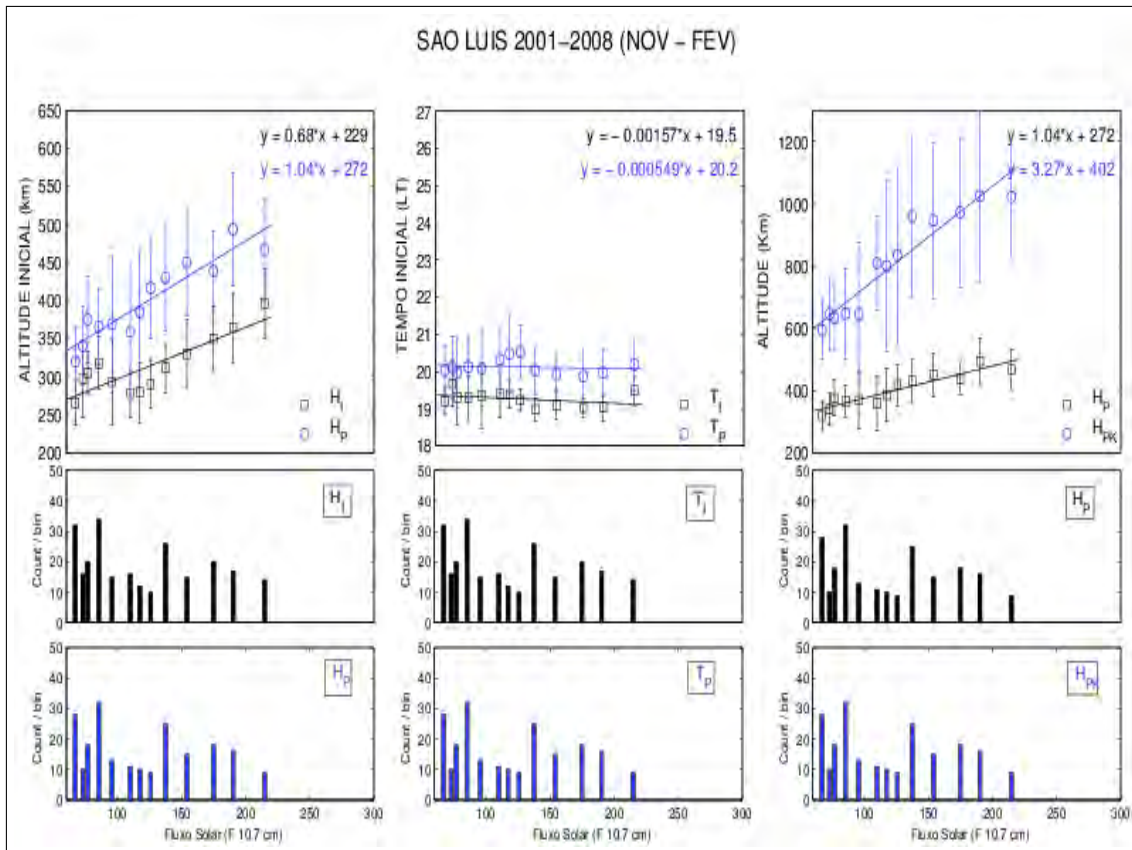


Figura 5.8 - Parâmetros de radar VHF para a estação de São Luís como função do fluxo solar para solstício de verão.

os parâmetros são representados por suas respectivas equações, que reproduzem seu comportamento em função do fluxo solar, onde a variável “y” representa o parâmetro de altitude ou tempo, e a variável “x” representa o índice de fluxo solar.

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram a comparação do comportamento sazonal usando o modelo empírico dos parâmetros de radar (veja Tabela 5.3) para o solstício de nov-fev e equinócio para SLZ e ROJ, e equinócio, solstícios de nov-fev e mai-ago para CXI. Estas figuras apresentam os parâmetros de tempo e altitude em função do fluxo solar. Cada estação é nomeada como SLZ, ROJ e CXI1 e CXI2. CXI1 está relacionado ao solstício de nov-fev e CXI2 ao solstício de mai-ago quando presentes no solstício.

A inclinação das linhas são similares nos parâmetros de altitude caracterizado pelo incremento do gradiente de baixo para alto fluxo solar, o qual é praticamente o mesmo para as três estações (mesmo sazonalmente), mas se diferenciando só no solstício de nov-fev para o parâmetro de altitude do pico da pluma. Os parâmetros de

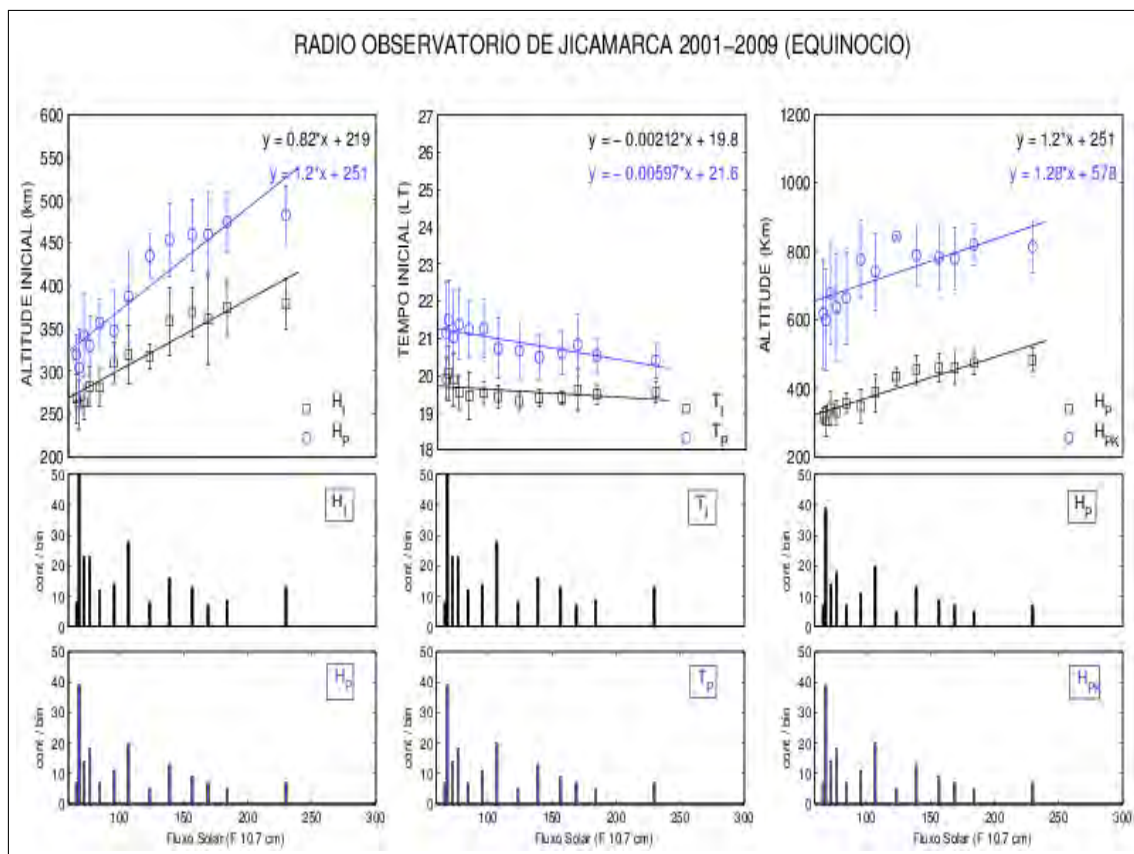


Figura 5.9 - Parâmetros de radar VHF para a estação de Jicamarca como função do fluxo solar para equinócio.

tempo para as estações de SLZ e ROJ são principalmente horizontais o que significa que não houve uma dependência temporal com o fluxo solar, mas nos parâmetros de tempo para CXI mostra-se uma alta dependência com fluxo solar com exceção do solstício de mai-ago (CXI2) para o tempo inicial da pluma, o qual aparenta ser horizontal.

Durante os solstícios os parâmetros T_i e T_p da estação CXI aparecem mais tarde que as estações SLZ e ROJ, e no solstício de mai-ago ocorrem mais tarde que no solstício de nov-fev. No parâmetro T_p para o solstício mai-ago não encontrou-se uma apreciável variação com o tempo.

A variação temporal dos parâmetros T_i e T_p com sazonalidade e dependência com fluxo solar foi também estudado e uma característica interessante foi observado no tempo de ocorrência das irregularidades (sendo estruturas do tipo bottom-type ou plumas) ao longo dos anos de solar máximo a solar mínimo.

A variação temporal dos parâmetros T_i (veja-se Figura 5.16) e T_p (veja-se Figura

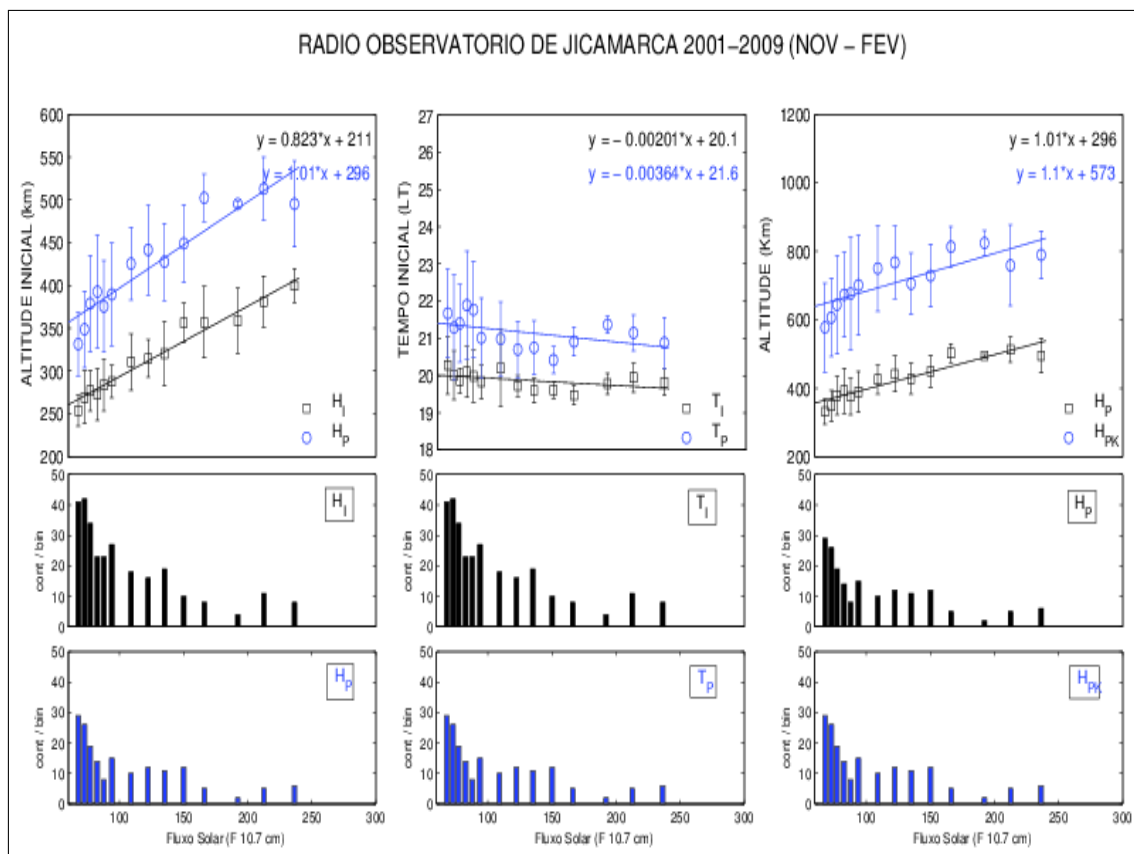


Figura 5.10 - Parâmetros de radar VHF para a estação de Jicamarca como função do fluxo solar para solstício de verão.

5.17) com dependência sazonal e fluxo solar é apresentada em um gráfico tipo pizza-fatiada-concêntrica para cada estação equatorial. O período de fluxo solar de 2001 a 2009 é apresentado em números sobre as fatias da pizza, e o tempo de ocorrência do spread F para cada parâmetro é mostrado em círculos concêntricos variando de 19 LT a 02 LT. Cada círculo concêntrico representa a média de cada hora, enquanto que o último círculo (mais externo) representa a média entre 24 LT e 02 LT, porque não há muitos eventos spread F no período. A área branca na figura significa que há uma falta de dados nesse período. A barra de cores horizontal representa a porcentagem de ocorrência do SF com valor máximo de 0,8 para a Figura 5.16 e 0,6 para a Figura 5.17. Uma característica interessante de ser observado nestes gráficos é o tempo de ocorrência das irregularidades (sendo bottom-type ou plumas) ao longo dos anos de fluxo solar, indo de máximo (2001) para mínimo solar (2009).

Com base nas Figuras 5.16 e 5.17 podemos salientar que as irregularidades aqui estudadas ocorrem principalmente confinadas aos horários pré-meia noite durante o máximo solar, e uma ocorrência mais tardia durante o mínimo solar. Mas existem

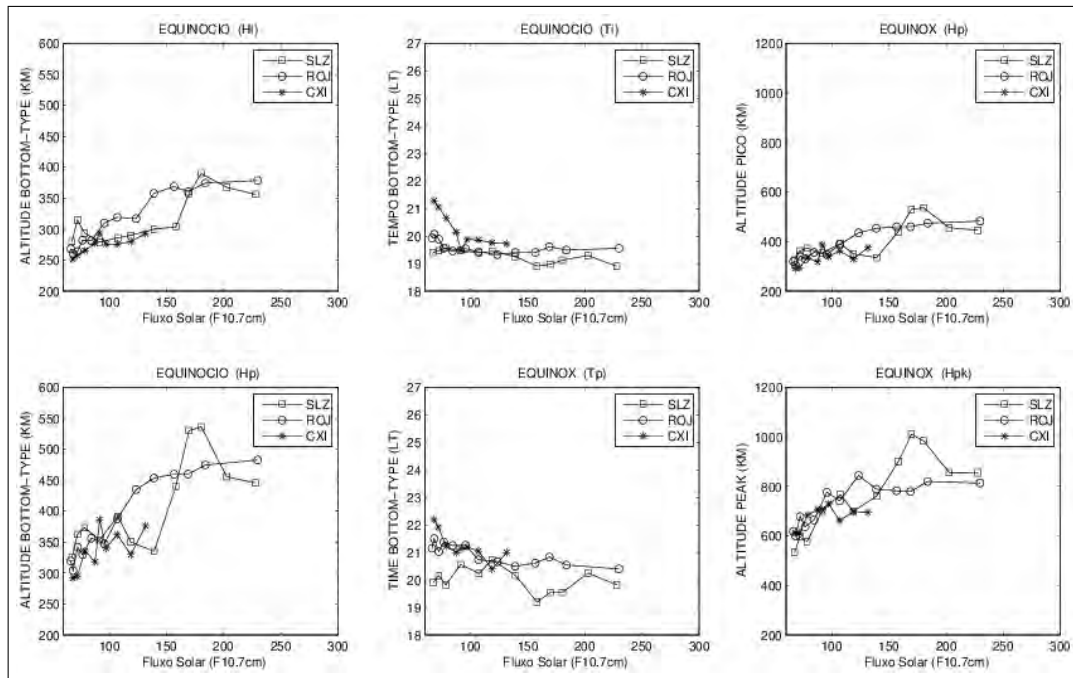


Figura 5.11 - Comparação longitudinal para equinócio dos parâmetros de radar VHF. O quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5, 5.6, e 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10.

mais eventos espalhados em tempo durante mínimo solar do que no máximo solar. Usando esta característica podemos concluir que o pequeno ângulo de inclinação observado nos parâmetros de tempo (veja-se Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10) é provavelmente devido a esta distribuição temporal durante o mínimo solar.

A Figura 5.15 nos mostra a ocorrência dos parâmetros de tempo (Ti em vermelho e Tp em azul) como função da estação do ano e longitude, e independente do fluxo solar. É claramente observado que o ESF nas estações de ROJ e SLZ está centrado no equinócio e nos meses do solstício de nov-fev com muitos poucos eventos nos meses do solstício de mai-ago. Já a ocorrência do ESF em CXI é principalmente nos meses de equinócio e solstício de mai-ago com muitos poucos eventos spread F nos meses do solstício de nov-fev. Esta figura ajuda-nos a observar a ocorrência dos parâmetros de radar (bottom-type e início da pluma), enquanto em CXI isto não é tão evidente. Além do mais, os ecos são espalhados em tempo a partir do pôr-do-Sol no período noturno mais em CXI que em ROJ com uma menor distribuição em tempo, posteriormente temos SLZ com uma ocorrência temporal mais confinada de ecos entre duas horas (19,5 UT a 20,5 UT).

Os dados sugerem que a estação CXI não mostra que a atividade do spread F decresce

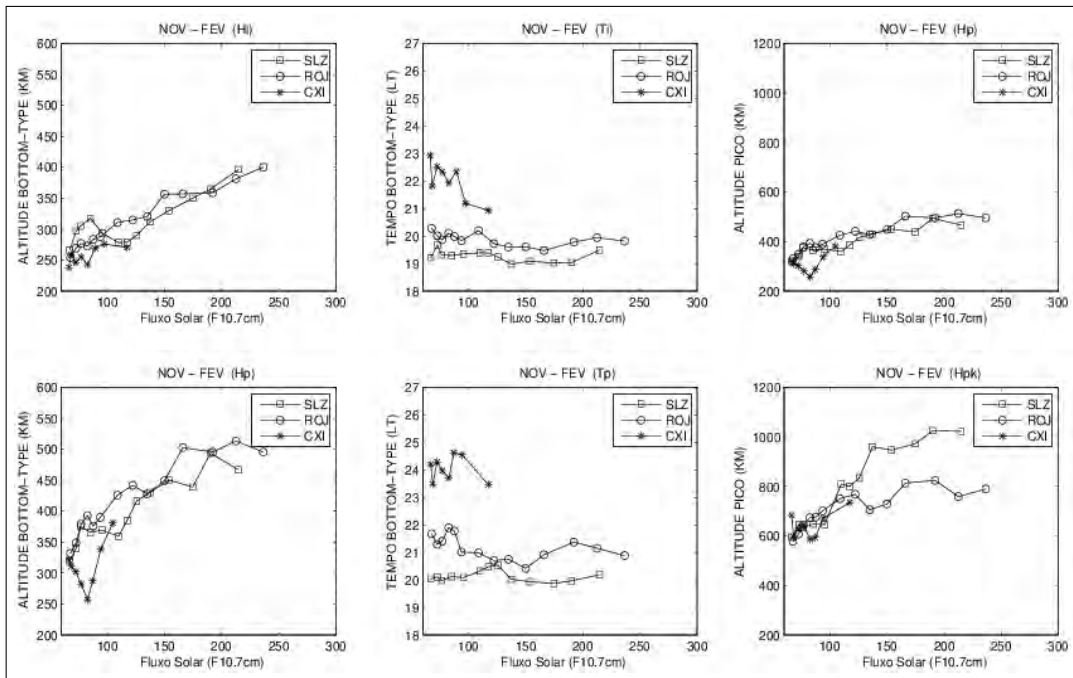


Figura 5.12 - Comparação longitudinal para o solstício nov-fev dos parâmetros de radar VHF. O quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10.

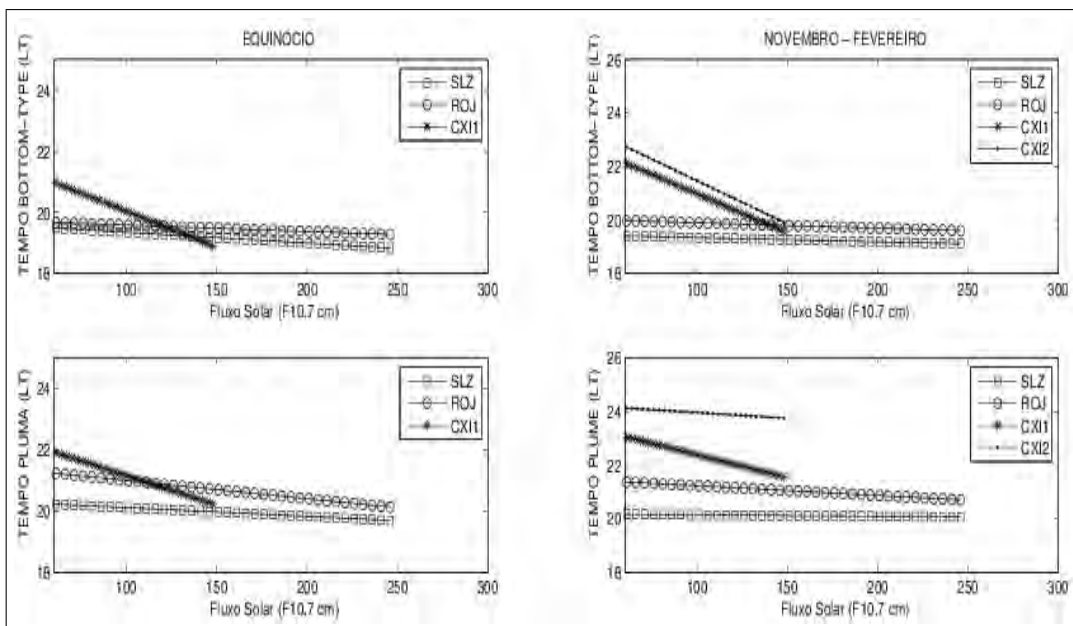


Figura 5.13 - Comparação sazonal/longitudinal dos parâmetros de tempo do radar. Os símbolos quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10. A linha CXI2 representa a estação de CXI correspondente a mai-ago.

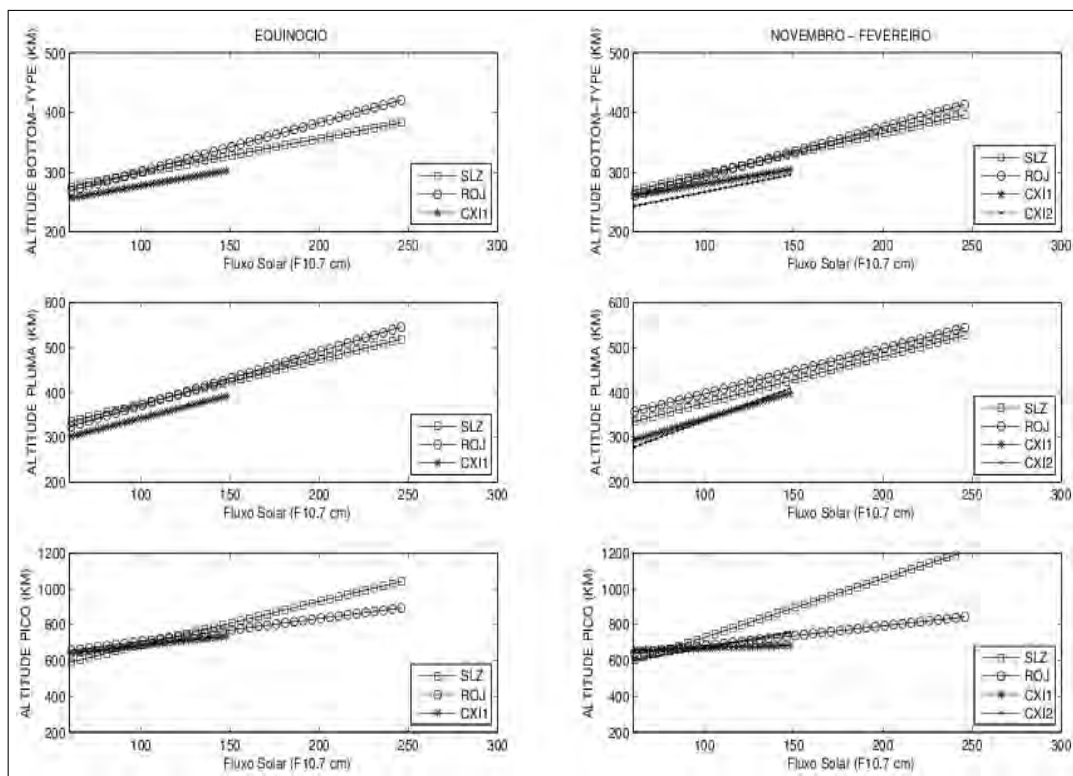


Figura 5.14 - Comparação sazonal/longitudinal dos parâmetros de altitude do radar. Os símbolos quadrado, círculo e estrela representam o valor médio de cada parâmetro analisado nas Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10. A linha CXI2 representa a estação de CXI correspondente a mai-ago.

no período de 2003 a 2009, o qual foi também observado por MILLER et al. (2010), contrariamente à ocorrência de spread F no continente SA. Para CXI este incremento na porcentagem de ocorrência acontece tarde em tempo local e aumentando de mai-ago, nov-fev e equinócio respectivamente, no período de mínimo solar de 2009.

5.6 Conclusões

Este trabalho apresenta várias conclusões interessantes referentes à climatologia dos parâmetros de radar VHF durante o curso do último ciclo solar, em três estações separadas longitudinalmente. Os parâmetros de tempo e altitude foram analisados em função da sua dependência com o fluxo solar, e estudou-se em função da sazonalidade e longitude.

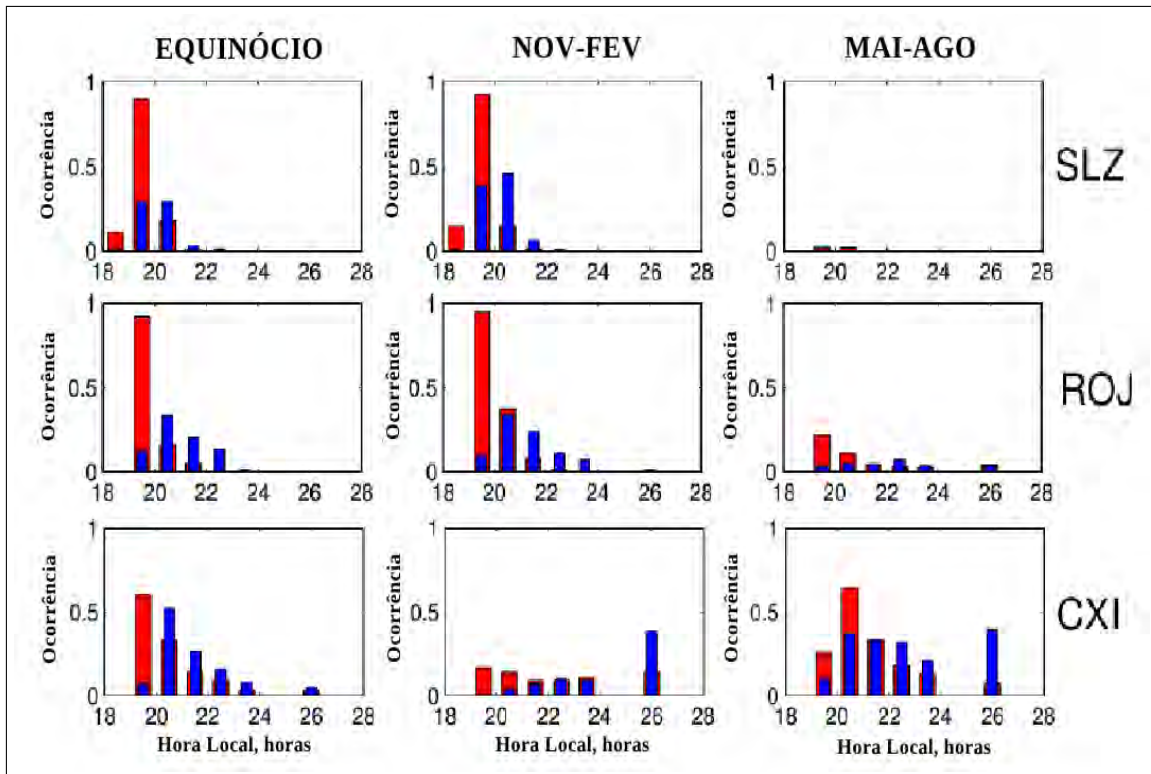


Figura 5.15 - Ocorrência dos parâmetros T_i (em vermelho) e T_p (em azul) como função da hora local, mostrando variação sazonal, e irrespectivo do fluxo solar.

Uma correlação linear dos parâmetros de radar nas três estações, quando graficados versus o fluxo solar, é encontrada. Para os três locais, e para todas as estações do ano os parâmetros H_i , H_p e H_{pk} mostram um incremento quando o fluxo solar aumenta. Os parâmetros T_i e T_p decrescem enquanto o fluxo solar decresce.

Foi observado que para valores maiores que 180 unidades do fluxo solar para equinócio e 200 unidades para o solstício de nov-fev existe uma saturação aparente nas alturas de início e pico das plumas. Isto provavelmente ocorre devido ao fato de que o plasma contido na pluma (baixa densidade) viajando rapidamente e alcançando bem altas altitudes (região sem colisões) encontra um grande gradiente negativo de densidade de plasma local, cuja consequência seria de desacelerar seu crescimento vertical e se recombinar com o meio local. Além do mais, foi observado que quando H_i alcança um limiar ao redor de 300 km o parâmetro H_p pode alcançar alturas maiores de 400 km, e altura pico da pluma H_{pk} podem ser maior que 800 km. Estas conclusões não são regras para todas as condições.

O ajuste linear e principalmente a sua correspondente inclinação em cada estação ionosférica, para cada estação do ano e para cada parâmetro, são apresentados neste

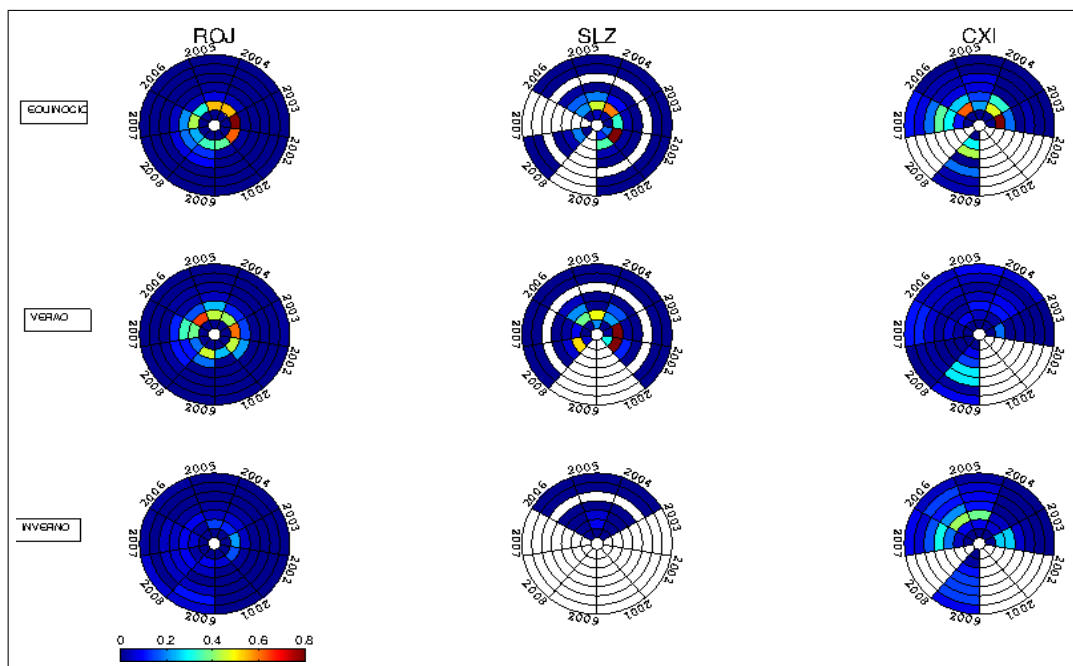


Figura 5.16 - Variação temporal do parâmetro T_i em apresentação tipo “fatias de pizza”, com o tempo representado por círculos concêntricos variando das 1900 LT a 0200 LT, onde o último círculo concêntrico representa das 2400 LT a 0200 LT.

trabalho. O desenvolvimento do modelo empírico dos parâmetros do radar resultou da combinação da análise estatística destas três estações equatoriais. Estas contribuições sobre a evolução em tempo e altitude das bolhas de plasma (controladas pelas condições do ambiente ionosférico) em função da longitude e sazonalidade podem ser úteis para se compreender a evolução e estruturação do ESF e também para planejamento de órbitas de satélite (como o C/NOFS).

Foi encontrado que uma inclinação similar nos parâmetros de altura, caracterizado pelo aumento do gradiente de altura, de baixo a alto fluxo solar é quase o mesmo para as três estações (mesmo sazonalmente), mas difere no solstício de nov-fev (para o parâmetro de altura pico). Os parâmetros de tempo para SLZ e ROJ são principalmente horizontais o que significa que não tem muita dependência com o fluxo solar, mas em CXI os parâmetros de tempo mostram uma alta dependência com o fluxo solar, com exceção do solstício de mai-ago (CXI2) para o tempo inicial da pluma que aparenta estar horizontal. Para os parâmetros de tempo T_i e T_p do CXI foi encontrado que eles aparecem mais cedo no equinócio e mais tarde no solstício de nov-fev, assim apresentando um grande efeito longitudinal.

Os ecos de radar são distribuídos em tempo desde o pôr-do-Sol até cerca de 2 horas

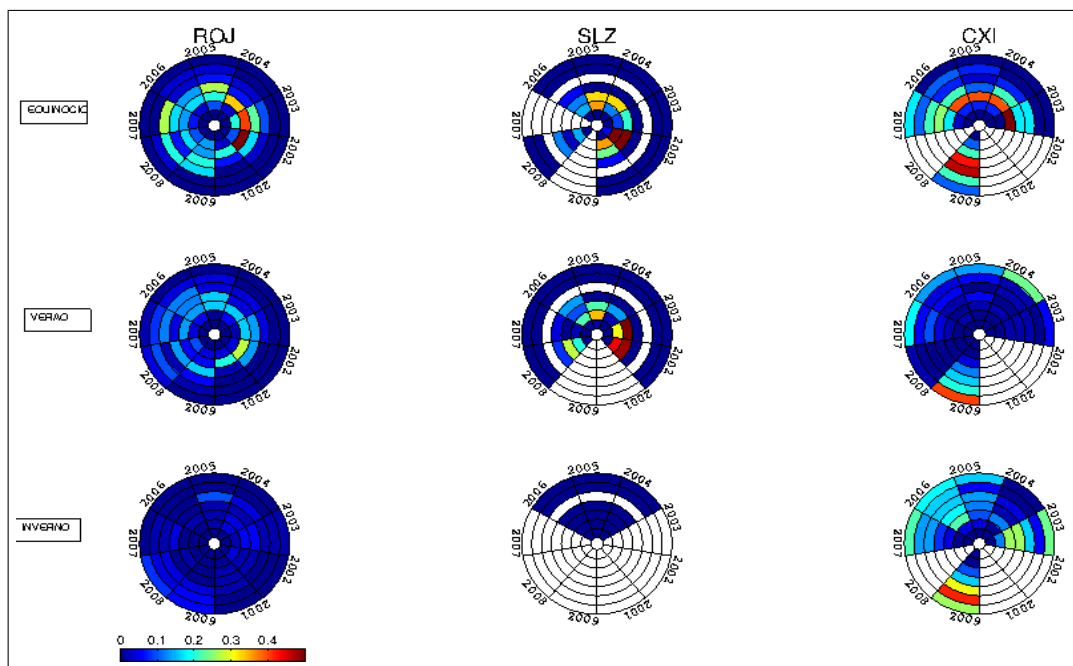


Figura 5.17 - Variação temporal do parâmetro T_p em apresentação tipo “fatias de pizza”, com o tempo representado por círculos concêntricos variando das 1900 LT a 0200 LT, onde o último círculo concêntrico representa das 2400 LT a 0200 LT.

(local) da manhã principalmente em CXI mais que em ROJ com menos distribuição em tempo, posteriormente temos SLZ com a ocorrência dos ecos confinados em duas horas (19,5 UT a 20,5 UT). Existem mais eventos com ampla distribuição temporal durante o período de mínimo solar do que no máximo solar. Embora os dados de CXI não se estendam ao alto fluxo solar há uma evidência que não existe uma grande variação na sua distribuição de 2003 a 2009, o que está de acordo com MILLER et al. (2010). De fato, contrário ao comportamento apresentado pelas estações em SA a ocorrência do spread F em CXI parece aumentar no mínimo solar. Este aumento gradual na porcentagem de ocorrência parece estar se retardando de equinócio, solstício mai-jun e solstício nov-fev no período de mínimo solar de 2009.

	Parâmetro de Altitude	Parâmetro de Tempo
SÃO LUÍS		
EQUINÓCIO	Hi $y = 0.577(\pm 0.14)x + 241(\pm 19.79)$ $R2 = 0.64$	Ti $y = -0.00351(\pm 0.0008)x + 19.7(\pm 0.12)$ $R2 = 0.64$
	Hp $y = 0.992(\pm 0.29)x + 275(\pm 42.07)$ $R2 = 0.54$	Tp $y = -0.00286(\pm 0.0024)x + 20.4(\pm 0.35)$ $R2 = 0.20$
	Hpk $y = 2.43(\pm 0.51)x + 443(\pm 73.30)$ $R2 = 0.69$	
NOV-FEV	Hi $y = 0.68(\pm 0.13)x + 229(\pm 16.73)$ $R2 = 0.73$	Ti $y = -0.00157(\pm 0.0011)x + 19.5(\pm 0.16)$ $R2 = 0.20$
	Hp $y = 1.04(\pm 0.12)x + 272(\pm 15.98)$ $R2 = 0.87$	Tp $y = -0.000549(\pm 0.0012)x + 20.2(\pm 0.17)$ $R2 = 0.10$
	Hpk $y = 3.27(\pm 0.32)x + 402(\pm 42.32)$ $R2 = 0.91$	
JICAMARCA		
EQUINÓCIO	Hi $y = 0.82(\pm 0.09)x + 219(\pm 11.56)$ $R2 = 0.90$	Ti $y = -0.00212(\pm 0.001)x + 19.8(\pm 0.15)$ $R2 = 0.23$
	Hp $y = 1.2(\pm 0.14)x + 251(\pm 17.88)$ $R2 = 0.87$	Tp $y = -0.00597(\pm 0.001)x + 21.6(\pm 0.16)$ $R2 = 0.70$
	Hpk $y = 1.28(\pm 0.30)x + 578(\pm 39.00)$ $R2 = 0.63$	
NOV-FEV	Hi $y = 0.823(\pm 0.05)x + 211(\pm 6.60)$ $R2 = 0.96$	Ti $y = -0.00201(\pm 0.001)x + 20.1(\pm 0.15)$ $R2 = 0.23$
	Hp $y = 1.01(\pm 0.11)x + 296(\pm 15.43)$ $R2 = 0.87$	Tp $y = -0.00364(\pm 0.0019)x + 21.6(\pm 0.28)$ $R2 = 0.22$
	Hpk $y = 1.1(\pm 0.23)x + 573(\pm 31.59)$ $R2 = 0.67$	
CHRISTMAS ISLAND		
EQUINÓCIO	Hi $y = 0.522(\pm 0.16)x + 225(\pm 15.71)$ $R2 = 0.60$	Ti $y = -0.0236(\pm 0.007)x + 22.4(\pm 0.68)$ $R2 = 0.62$
	Hp $y = 1.03(\pm 0.44)x + 239(\pm 42.78)$ $R2 = 0.44$	Tp $y = -0.0194(\pm 0.006)x + 23.1(\pm 0.58)$ $R2 = 0.60$
	Hpk $y = 1.07(\pm 0.62)x + 576(\pm 59.86)$ $R2 = 0.30$	
NOV-FEV	Hi $y = 0.599(\pm 0.23)x + 207(\pm 19.70)$ $R2 = 0.53$	Ti $y = -0.0323(\pm 0.009)x + 24.7(\pm 0.79)$ $R2 = 0.67$
	Hp $y = 1.5(\pm 1.001)x + 187(\pm 82.85)$ $R2 = 0.30$	Tp $y = -0.00429(\pm 0.011)x + 24.4(\pm 0.94)$ $R2 = 0.10$
	Hpk $y = 1.78(\pm 1.05)x + 493(\pm 89.09)$ $R2 = 0.30$	
MAI-AGO	Hi $y = 0.495(\pm 0.11)x + 231(\pm 10.98)$ $R2 = 0.70$	Ti $y = -0.0292(\pm 0.004)x + 23.9(\pm 0.39)$ $R2 = 0.8$
	Hp $y = 1.19(\pm 0.18)x + 222(\pm 17.84)$ $R2 = 0.85$	Tp $y = -0.0171(\pm 0.007)x + 24.1(\pm 0.72)$ $R2 = 0.40$
	Hpk $y = 0.302(\pm 0.52)x + 639(\pm 51.421)$ $R2 = 0.10$	

Tabela 5.3 - Modelo empírico do radar VHF baseado nas relações dos parâmetros de tempo e altitude para as estações SLZ, ROJ e CXI, obtidos a partir das Figuras 5.4, 5.5 e 5.6, 5.7, 5.8, e 5.9, 5.10.

6 VARIAÇÃO LONGITUDINAL DA OCORRÊNCIA DO SPREAD F NA AMÉRICA DO SUL.

6.1 Introdução

As condições da altura da camada F ionosférica no horário do pôr-do-Sol são conhecidas por influenciar a geração de irregularidades de spread F (FARLEY et al., 1970; FEJER, 1997; FEJER et al., 1999; ABDU, 2005; MUELLA et al., 2008). O deslocamento vertical da camada F devido à ação do pico pré-reversão (PRE) no campo elétrico zonal pode estabelecer a pré-condição para o desenvolvimento de instabilidades de plasma que geraria o ESF. O PRE é um dos fatores mais importantes que controlam a geração das bolhas de plasma, mas não o único como explicado por FEJER et al. (1999), ABDU et al. (2009), TAKAHASHI et al. (2010), TSUNODA (2008), TSUNODA (2010a), TSUNODA (2010b). Uma perturbação inicial é requisito necessário para o início da instabilidade Rayleigh Taylor (GRT) (HAERENDEL et al., 1992) do desenvolvimento das bolhas de plasma equatoriais. Vários autores têm sugerido que as ondas de gravidade atmosféricas geradas nas altitudes troposféricas e propagando-se para cima, ao atingirem altitudes ionosféricas poderiam ser uma fonte potencial desta perturbação inicial (KELLEY et al., 1981; HYSELL et al., 1990; KHERANI et al., 2009; ABDU et al., 2009; TAKAHASHI et al., 2010).

TAKAHASHI et al. (2010) observaram uma estrutura senoidal e oscilações verticais na emissão de aeroluminescência OI 630 nm na altura da base da camada F, em associação com estruturas do bottom-type que poderiam indicar GW (do inglês "Gravity Waves") como mecanismo inicial para geração de bolhas de plasma. KESKINEN e al. (2009) concluíram que ondas de gravidade propagando-se zonalmente, na presença de ventos de marés zonais, são necessárias para a geração de bolhas de plasma. As estruturas LSWS (do inglês "Large Scale Wave Structure") são também mencionadas como candidatas do mecanismo de perturbação inicial por TSUNODA (2008), TSUNODA (2010a), TSUNODA (2010b), TSUNODA et al. (2010), assim como por THAMPI e al. (2009) que observaram modulações no TEC simultaneamente com estruturas oscilatórias na base da região F, observadas nos mapas RTI do radar VHF de Kototabang. NARAYANAN e al. (2012) sugeriram ainda que, na ausência de um PRE significativo, a presença de LSWS e SSWS (do inglês "Small-Scale Wave Structure") seriam importantes para a geração de bolhas de plasma equatorial (EPB - Equatorial Plasma Bubbles). Além do mais, TSUNODA et al. (2011) mostraram que a taxa de crescimento do LSWS pode ser substancial durante o PRE, assim como

um iniciador para o processo de instabilidade. Uma característica comum é que ambas (GW e LSWS) são estruturas de tipo onda atuando como potenciais iniciadores do crescimento da instabilidade, levando à geração das bolhas de plasma.

O padrão de comportamento do plasma ionosférico equatorial em diferentes longitudes é bem entendido devido a diferentes estudos feitos em algumas estações equatoriais. CHEN et al. (2006) estudaram a ionosfera equatorial usando dados de digissonda e receptores GPS sobre o setor oeste da América do Sul, enquanto ABDU et al. (1983) estudaram o setor leste com ionossondas. ABDU et al. (1981), ABDU et al. (1992), BATISTA et al. (1996) compararam as condições do spread F com ionossondas entre os setores leste e oeste da América do Sul. O principal aporte destes trabalhos é que as diferenças no ângulo de declinação do campo magnético causa significantes diferenças na duração do pôr-do-Sol da região E conjugada entre setores de longitudes diferentes, de modo que o ângulo de declinação magnética controlaria o padrão longitudinal e sazonal do desenvolvimento de bolhas de plasma equatorial no período noturno. Recentemente SEEMALA e VALLADARES (2011) usaram dados da rede de GPS LISN (Low-Latitude Ionospheric Sensor Network) e de mais outras três redes na região da América do Sul, e o Algoritmo de Detecção Automática de Bolhas (ABDA - “Automatic Bubble Detection Algorithm”), que será explicado na seção 6.2.1, para investigar a ocorrência de ESF em diferentes longitudes e sua variabilidade dia com dia. A explanação para o comportamento sazonal (climatologia) do spread F concorda com a hipótese de TSUNODA (2010a) baseada no requisito do alinhamento do terminadouro solar e o campo magnético (STBA - Solar Terminator B Alignment) e o alinhamento de onda de gravidade com o campo magnético (GWBA - Gravity Wave B Alignment). Este autor sugere que a variabilidade dia a dia na ocorrência do spread F é atribuída à variação dia a dia na proximidade da Zona de Convergência Inter-Tropical (ITCZ) ao equador magnético, sendo que a teoria ainda requer maiores estudos.

Neste capítulo, dados de vários instrumentos, incluindo um grande número de receptores GPS, foram analisados com o auxílio do algoritmo ABDA, no período de Setembro de 2009 a Janeiro de 2010, os quais fornecem uma oportunidade única de comparar o comportamento local e regional das condições da ionosfera equatorial do período noturno sobre a América do Sul.

A discussão sobre as perturbações iniciadoras é um dos mais novos objetivos da comunidade científica, sem deixar de lado o PRE como o maior precursor de spread F no horário após o pôr-do-Sol. A propagação de LSWS e GW na termosfera equatorial

tem um papel importante como geradora da perturbação inicial na baixa ionosfera, que é requisito para o crescimento da instabilidade GRT e, conseqüentemente, para a formação do spread F. Mas, quão efetivos são estes mecanismos comparados com o PRE ou quão efetivos são eles juntos? Uma tentativa de responder estas questões é a motivação da presente pesquisa.

O PRE é considerado uma condição necessária para o desenvolvimento de bolhas de plasma mas não suficiente, por causar o movimento para cima do plasma no horário do pôr-do-Sol local, até um ambiente ionoférico mais instável para o início do mecanismo GRT. De acordo com BASU et al. (1996), velocidades de derivas vertical após o pôr-do-Sol na faixa de 10-20 m/s são necessárias para a ocorrência do spread F durante o equinócio, durante condições de mínimo solar. Quando as velocidades de deriva são grandes o suficiente, os mecanismos iniciadores necessários para a geração do spread F sempre parecem estar presentes. Os resultados apresentados por FEJER et al. (1999) realçam a importância das velocidades de deriva vertical na geração do spread F, assim como a importância da evolução da camada instável que pode ser fortemente afetada pelas velocidades de deriva depois da reversão. Eles também ressaltam que grandes derivas para baixo depois do pôr-do-Sol decrescem rapidamente a altura da camada F, conseqüentemente reduzindo a taxa de crescimento de instabilidades durante os equinócios e o solstício de Junho.

Ao se moverem para cima, as depleções de plasma se mapeiam simultaneamente ao longo das linhas de campo magnético para baixas latitudes magnéticas, originando as bolhas. A detecção de depleções de plasma usando a técnica ABDA nos permite observar as depleções do TEC sobre o equador e simultaneamente sobre as cristas norte e sul da Anomalia da Ionização Equatorial (AIE).

6.2 Base de Dados

Os dados de TEC dos receptores GPS LISN, a altura real e deriva vertical inferidas dos dados das digissondas de Brasil e Perú durante o período noturno em condições de mínimo de atividade solar de Setembro de 2009 a Janeiro de 2010 (média de 76 unidades no índice F10.7cm), foram usados para estudar as variações longitudinal, sazonal e dia a dia do spread F equatorial. Deve-se esclarecer que os tempos locais (LT) de Jicamarca e São Luís são 5 horas e 3 horas mais cedo que o Tempo Universal (UT), respectivamente. Só dados para tempo calmo com média Kp menor ou igual a 3 unidades para 6 horas precedentes ao pôr-do-Sol foram usadas na análise.

Mapas RTI (Range-Time-Intensity) gerados pelos radares coerente de 30 MHz de São Luís (DE PAULA; HYSELL, 2004) e de 50 MHz de Jicamarca foram também usados na análise. Radares VHF são sensíveis a irregularidades com escala de metros. As estruturas bottom-type e as plumas observadas nos gráficos RTI foram interpretadas como manifestações de processos de instabilidades Rayleigh-Taylor e da existência de bolhas de plasma, respectivamente.

Dados de quatro redes de GPS com aproximadamente 127 receptores, mostrados na Figura 6.1, foram usados para estudar o ambiente do plasma ionosférico. Estas são LISN (VALLADARES; CHAU, 2012), Ohio State University - Central and Southern Andes GPS Project (OSU-CAP), Geocentric Reference System for the Americas (SIRGAS) [BRUNINI et al., 2010] and International GNSS Service (IGS) [DOW et al., 2009]. Os receptores GPS abrangem a maior parte da América do Sul, que cobre uma grande dimensão geográfica, de 35°O a 80°O de longitude e 45°S a 13°N de latitude (latitude magnéticas de 35°S a 20°N).

As derivas de plasma vertical foram calculadas a cada 15 minutos utilizando $d(hF)/dt$ a partir de dados de altura real das digissondas nas frequências específicas de 3, 4, 5, e 6 MHz. As derivas verticais calculadas a partir das alturas reais são representações confiáveis da deriva do plasma quando a camada F eleva-se acima de 300 km durante o PRE segundo explicações de Bittencourt and Abdu (1981) e Abdu et al. (2009b) para o período de máximo solar. A resolução da altura virtual ($h'F$) é determinada pelas larguras das bandas dos pulsos e varia de 5 km a 10 km para as faixas de altitudes de 500 km a 1000 km que são mais frequentemente usadas nos ionogramas.

	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
DIGISSONDA	29 (17)	31 (31)	30 (30)	30 (30)	27 (26)
GPS	30	31	30	31	31

Tabela 6.1 - Número de dias disponíveis em cada mês para as digissondas e receptores GPS. Os números entre parênteses referem-se a dados de Jicamarca, e os sem parênteses referem-se a São Luís, quando referido à digissonda.

O número de dias disponíveis de dados analisados para cada mês é apresentado na Tabela 6.1. O número entre parênteses é referido a Jicamarca, e fora do parênteses é referido a São Luís. Os dados GPS foram obtidos de todas as estações ionosféricas remotas disponíveis no continente (ver os mapas da Figura 4.3). Estes dados das digissondas e dos receptores GPS são processados para produzir as assinaturas de

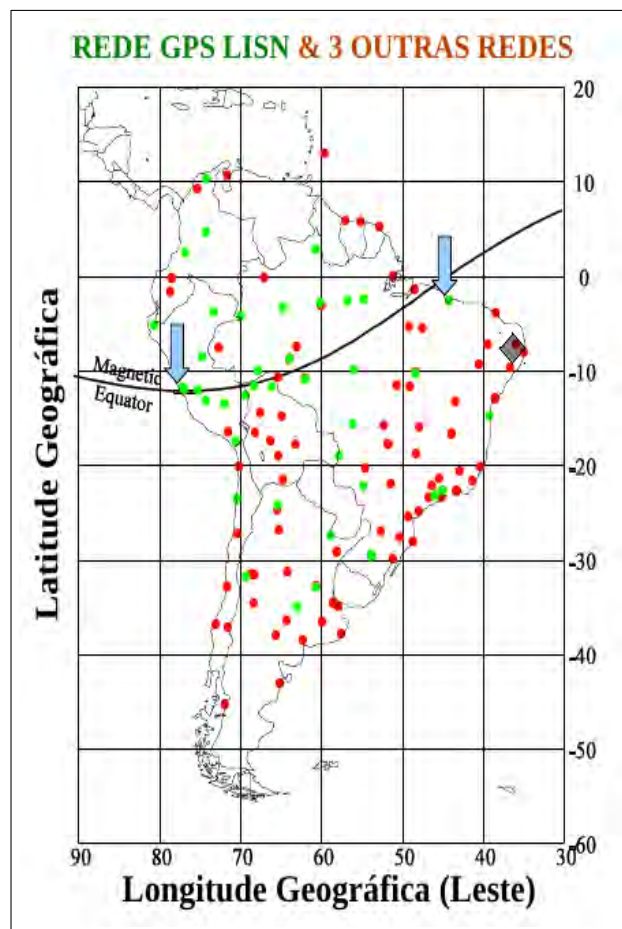


Figura 6.1 - Rede GPS LISN (em verde) e 3 outras redes Osu-Cap, SIRGAS e IGS (em vermelho). As setas indicam a localização das digissondas de Jicamarca e São Luís, e um diamante indica a posição do imageador de São João do Cariri.

SÃO LUÍS					
	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
PRE	14 (15)	28 (3)	22 (8)	21 (9)	20 (7)
TECd	6 (24)	23 (8)	28 (2)	21 (10)	27 (4)
JICAMARCA					
	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
PRE	10 (7)	16 (15)	18 (12)	16 (14)	11 (15)
TECd	16 (14)	19 (12)	9 (21)	2 (29)	10 (21)

Tabela 6.2 - Conjunto de dados de PRE e depleções TEC (TECd) para as estações de São Luís e Jicamarca para Setembro de 2009 a Janeiro de 2010. Os números entre parênteses indicam o total de dias em que não foram observados TECd ou PRE, respectivamente.

PRE e TECd (depleções TEC), respectivamente. A Tabela 6.2 provê a disponibilidade de PRE e TECd para cada mês e para cada estação equatorial. Na Tabela os

números entre parênteses indicam dias em que não foram observadas assinaturas de PRE ou TECd sobre a estação de São Luís ou Jicamarca. A técnica de detecção de TECd será descrita na próxima seção.

A emissão airglow OI 630 nm correspondente à noite do 11 de Outubro de 2009, foi medida pelo imageador all-sky localizado em São João do Cariri (35,7°W, 7,4°S). O imageador usado no presente trabalho consiste de uma lente chamada de fisheye, telecêntrica e sistema de lentes de imageamento, filtros óticos (630 nm) e um aparelho de imagem CCD. A câmera de resfriamento tem 1024x1024 pixels com elementos de 24 microns, a qual permite a obtenção de imagem de emissões em OI 630 nm com um tempo de integração de cerca de 90 segundos.

6.2.1 Método utilizado para obter a depleção do TEC - ABDA

O primeiro passo da análise dos dados consiste no cálculo do TEC vertical equivalente para cada um dos aproximadamente 127 receptores GPS usando o código de análise que foi desenvolvido no Boston College (VALLADARES et al., 2001). No próximo passo, as depleções TEC causadas pelas bolhas de plasma são identificadas de forma automática examinando os valores TEC das passagens dos satélites GPS sobre o continente (SEEMALA; VALLADARES, 2011). O algoritmo aqui usado é rotulado de ABDA. A detecção de depleções no TEC é uma forma indireta de encontrar bolhas com escala de dezenas a centenas de quilômetros. Esta técnica é bem documentada por WEBER et al. (1996), DASHORA e PANDEY (2005), VALLADARES et al. (2004) e, recentemente, por SEEMALA e VALLADARES (2011). Este procedimento detecta depleções TEC (TECd) com intervalos de tempo entre 10 e 120 minutos quando a amplitude da depleção cai abaixo de 1 TECU (10^{16} *ele/m²*). A detecção de bolhas é confirmada se o ângulo de elevação observado está acima de 30° e o valor do TEC se recupera a valores similares ao início do TEC (quando foi detectada a depleção). A técnica ABDA para detecção de depleções é aplicado a todos os satélites no campo de visão de uma estação remota, e para todas as estações remotas GPS espalhadas no continente.

Um exemplo da aplicação da técnica ABDA está apresentado na Figura 6.2, na qual se analisa o valor do TEC calculado a partir do sinal de satélite PRN 14 no dia 13 de fevereiro de 2008 sobre a estação de Alta Floresta. No painel superior, observa-se a correspondência dos valores de TEC com o índice S4. Quando o TEC apresenta uma queda maior a 1 TECU o índice S4 mostra um aumento no índice de cintilação. O programa ABDA faz a detecção da depleção no TEC observado entre traços coloridos indicando o início, duração e término da depleção. No painel

inferior, mostram-se os valores de TEC extraídos depois da subtração de uma curva polinomial de ajuste, de modo que poderão ser extraídas as pequenas variações do TEC quando feita a detecção da depleção.

A América do Sul foi dividida em três grandes setores longitudinais que são oeste (65° - 85° W), central (55° W - 65° W) e leste (30° W a 55° W). Neste estudo qualquer destes setores é considerado com bolhas se houver mais de cinco observações detectadas dentro de um certo intervalo de tempo. O horário das detecções é feito em tempo universal da seguinte forma, de 22-24; 00-02; 02-04; e 04-09 UT, sendo que o último intervalo de tempo é tomado de 04 a 09 UT devido à escassez de bolhas depois das 04 UT.

O aparecimento das irregularidades de plasma sobre a América do Sul segue um padrão de ocorrência com picos nos equinócios (no leste e oeste do continente), um pico de ocorrência no solstício de verão (no leste), e uma grande ausência de irregularidades sobre todo o continente nos meses do solstício de inverno (como exemplo vejam a Figura 5.3). O mesmo procedimento foi reproduzido por SEEMALA e VALLADARES (2011) usando o algoritmo ABDA com dados de TEC para o ano de mínimo solar e os resultados correspondentes encontram-se nas Figuras 6.3 e 6.4. Como explicado anteriormente, a declinação do campo magnético da Terra varia substancialmente ao longo do equador magnético na América do Sul. Conseqüentemente o grau de alinhamento entre o terminadouro solar e o meridiano magnético apresenta uma diferença sazonal marcante entre as costas leste e oeste do continente. O painel esquerdo da Figura 6.3 mostra o número máximo de depleções por ponto de uma grade uniforme de 1° concentradas entre 70° O e 63° O, com depleções TEC maiores que 70. A região leste do continente mostra uma baixa ocorrência de depleções TEC, com menos de 25 detecções por ponto numa grade de 1° por 1° . É importante salientar que este máximo de detecções foi encontrada sobre a crista sul da região da anomalia.

O painel direito da Figura 6.3 mostra o número de detecções concentradas entre 55° O a 35° O, com mais de 80 depleções de TEC detectadas, e igualmente localizadas na crista sul da região da anomalia. Nesta imagem o número de detecções na região oeste do continente são bastante reduzidas. Um detalhe a ser considerado nos dois painéis é que houve maior número de detecções no leste (em dezembro) que no oeste (em março) do continente para o ano de mínimo solar, 2008. Mais detalhes destas figuras podem ser encontradas em SEEMALA e VALLADARES (2011).

A distribuição longitudinal das depleções observadas para todas as latitudes e para

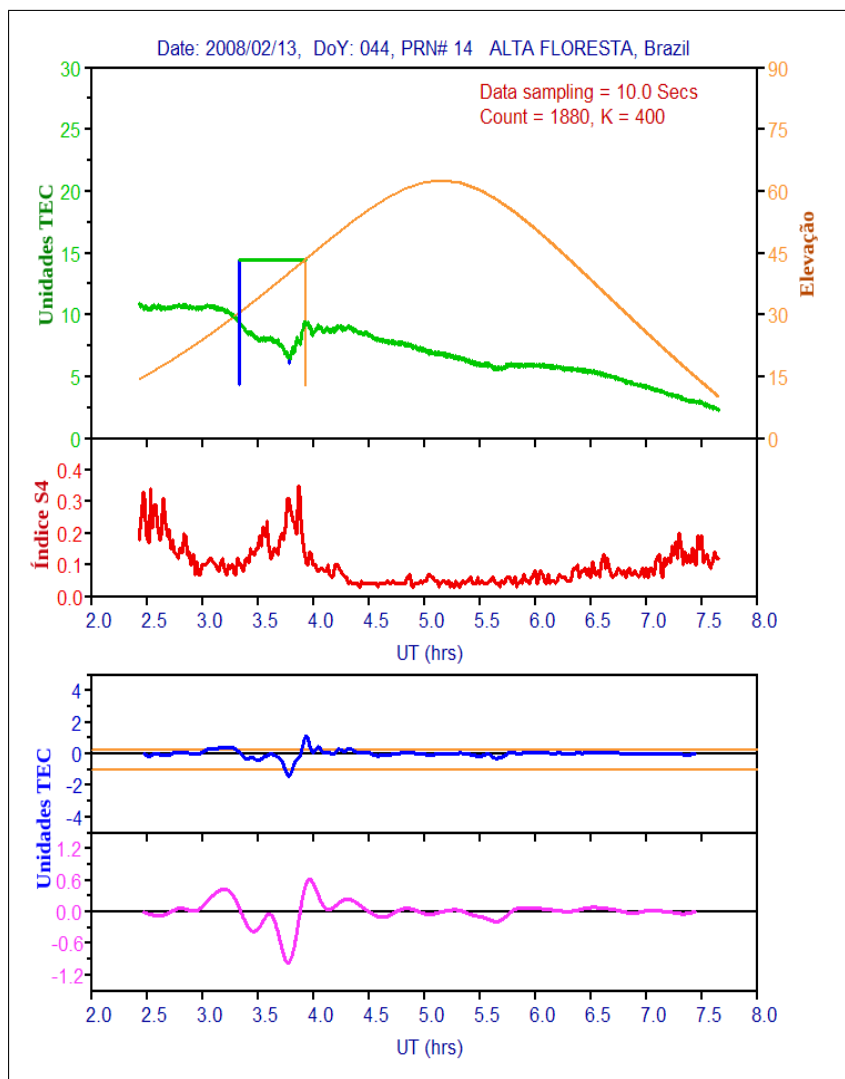


Figura 6.2 - Exemplo do método ABDA para detecção de bolhas de plasma usando valores de TEC. Detecção feita sobre os dados de TEC calculados a partir do satélite PRN 14, sobre a estação de Alta Floresta, no Brasil. O painel inferior (lilás) mostra o zoom dos valores do TEC apresentados no painel acima em azul.

cada dia do ano 2008 encontra-se na Figura 6.4. Esta figura mostra claramente a máxima ocorrência de depleções no continente localizadas nos períodos dos equinócios e solstício de dezembro como explicado pela hipótese do alinhamento do campo magnético e o terminadouro (SBTA) de TSUNODA (1985). Durante os meses de maio a agosto o número de detecções de depleções é praticamente nulo, exceto para um pequeno grupo de dias na região oeste do continente.

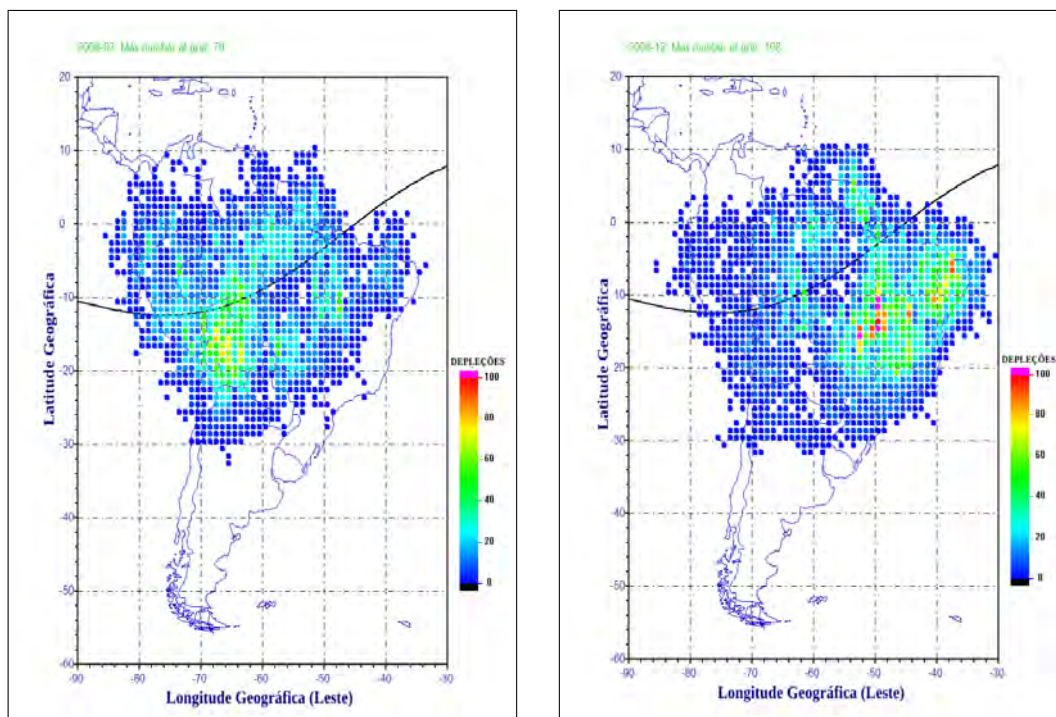


Figura 6.3 - Detecção de depleções TEC na América do Sul. No painel esquerdo as detecções foram feitas para março de 2008, e no painel da direita para dezembro de 2008. Cortesia de G. Seemala e C. Valladares (2012) em comunicação pessoal.

6.3 Análise de Dados

O principal objetivo deste trabalho é analisar quantitativamente o papel do PRE como um mecanismo pré-condicionador que através do processo de instabilidade Rayleigh-Taylor leva ao desenvolvimento de bolhas de plasma sobre a América do Sul. Para alcançar este objetivo as detecções de depleções de TEC usando o algoritmo ABDA, simultaneamente com a deriva de plasma vertical e gráficos RTI de radar VHF, serão analisados.

As Figuras 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8 apresentam as velocidades de deriva vertical e altura real para as estações de São Luís e Jicamarca. Foi aplicada uma média para os meses de Setembro-Outubro de 2009, Novembro-Dezembro de 2009 e Janeiro de 2010. A linha em destaque vermelho (azul) representa os resultados obtidos dos dados relativos à faixa de frequências de 3-5 MHz (4-6 MHz), e a curva fina adjacente acima (abaixo) da curva da média representa o percentil 25 (75). As barras cinzas verticais representam o horário do pôr-do-Sol local. As figuras apresentam um padrão típico ao redor do período do pôr-do-Sol, sendo facilmente observado o pico pré-reversão.

De acordo com BATISTA et al. (1986), a altitude limiar da altura virtual $h'F$ para a

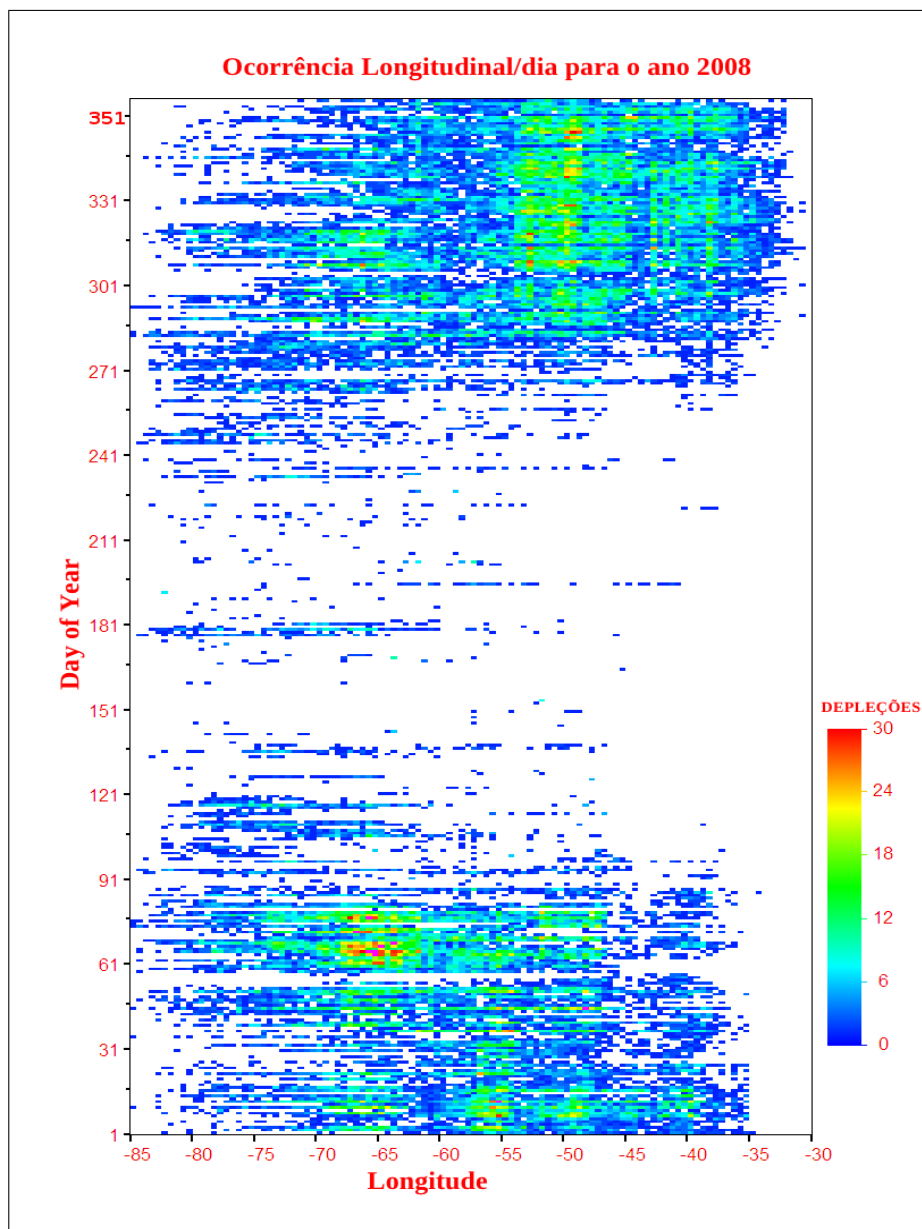


Figura 6.4 - Detecção do número de bolhas de plasma no continente Sul Americano por dia e longitude para o ano 2008. Cortesia de G. Seemala e C. Valladares (2012) em comunicação pessoal.

geração de spread F após o horário do pôr-do-Sol durante o período de máximo solar é de 300 km, o que dá confiança ao uso das medidas de ionossonda para inferir a deriva vertical nesse horário. Entretanto, nosso trabalho é para o período de mínimo solar, e foi considerado ambas a altura real em 250 km e a velocidade de deriva vertical de 10 m/s como condições limiars para um evento de PRE, porque nossos dados pertencem ao mínimo solar (Bittencourt 2012, comunicação pessoal). Estas condições limiars são consideradas para a frequência de 6 MHz. Adicionalmente os

gráficos RTI do radar VHF de ambas estações foram usados para determinar se as irregularidades de plasma estiveram presentes no evento em estudo.

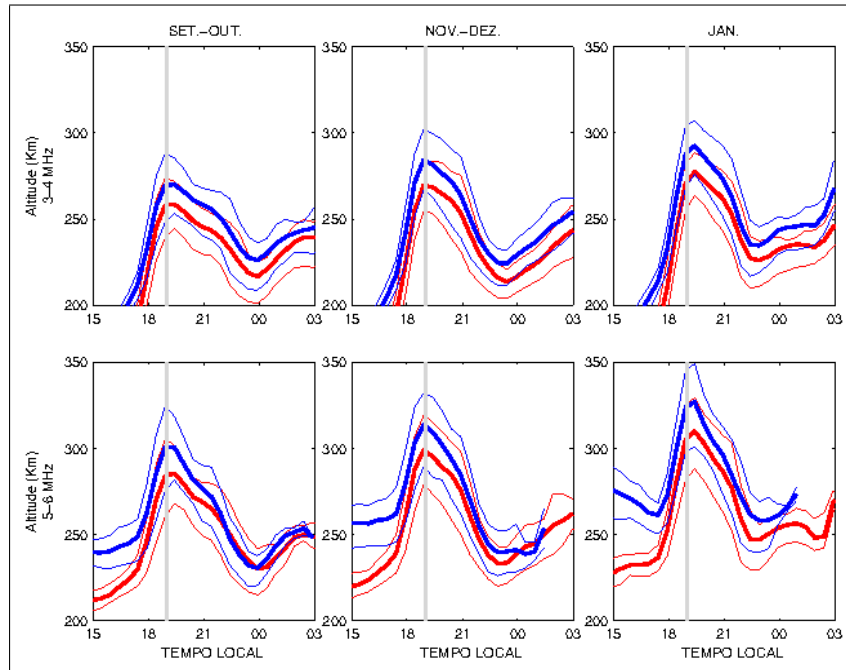


Figura 6.5 - Altura real da Digissonda de São Luís para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.

Como observado nos painéis inferiores da Figura 6.5, a média da altura real na frequência de 6 MHz (linha azul) ao redor das 19 LT sofreu um incremento de setembro-outubro a novembro-dezembro e janeiro, que foi também observado por MUELLA et al. (2009) para solar máximo, de 300 km a 330 km. Ao redor da meia noite local a altura real alcançou seus valores mínimos e um aumento é observado no intervalo de 00-03 LT. O 25-75 percentis mostram que a variabilidade dia com dia da altura real é grande depois do horário do pôr-do-Sol até a meia noite local. O pico da média da velocidade de deriva vertical (painéis inferiores na Figura 6.7) aumenta de 12 m/s a 18 m/s ao redor do pôr-do-Sol local de setembro a janeiro. Os percentis 25% e 75% mostram uma faixa de 20 m/s a 25 m/s depois do horário do pico pré-reversão, caracterizando uma grande variabilidade da velocidade de deriva nesse intervalo de tempo.

A Figura 6.6 mostra a altura real e a Figura 6.8 a velocidade de deriva vertical (painéis inferiores) para a digissonda de Jicamarca. Durante Setembro-Outubro um pico na altura real aparece bem definido com média de altitude ao redor de 300

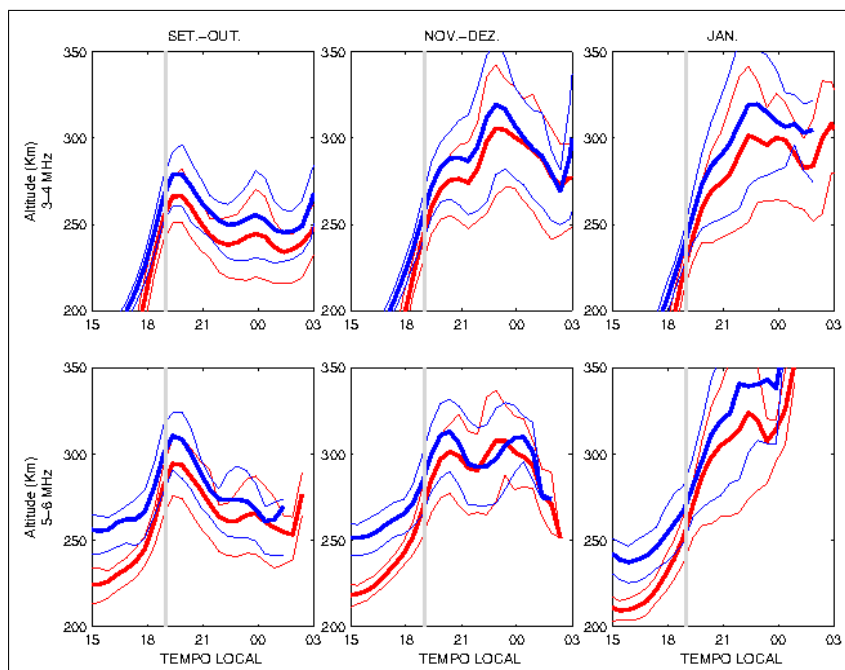


Figura 6.6 - Altura real da Digisonda de Jicamarca para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.

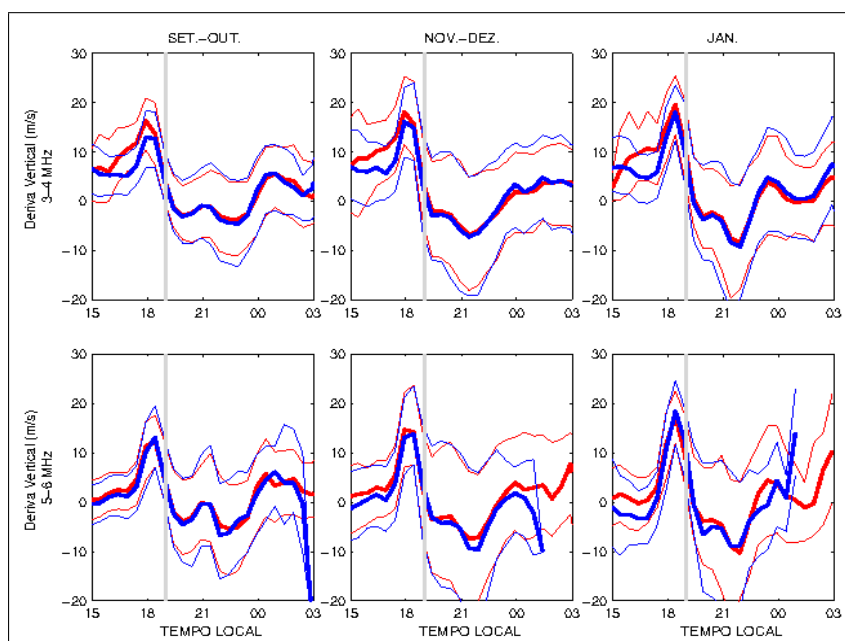


Figura 6.7 - Velocidade de deriva vertical da Digisonda de São Luís para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.

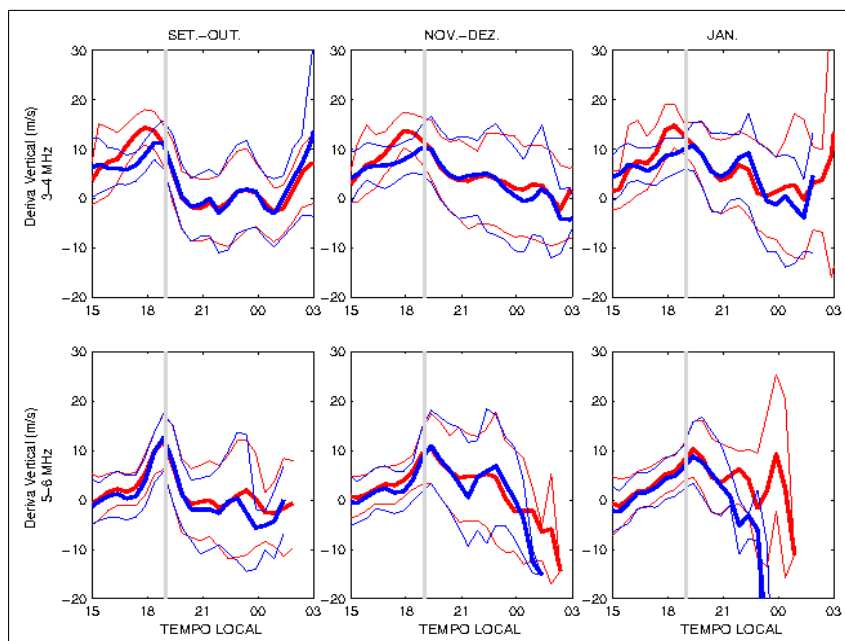


Figura 6.8 - Velocidade de deriva vertical da Digissonda de Jicamarca para as frequências de 3-4 MHz (painéis superiores) e 5-6 MHz (painéis inferiores), e separados por sazonalidade (set-out, nov-dez e jan). A linha vertical cinza representa o pôr-do-Sol local.

km (ao redor de 20 LT) e pico de velocidade vertical de 10 m/s ao redor das 19 LT. Durante o período de Novembro-Dezembro a altura real apresenta um pico ao redor das 20 LT, seguido de uma pequena depressão e posteriormente de outro pico ao redor da meia noite local. Um aumento contínuo até 22 LT durante janeiro é observado. Similarmente a São Luís, em Jicamarca também se observa uma grande variabilidade nos quartis depois do horário do pico pré-reversão e até meia noite local para ambos parâmetros de altura real e deriva vertical.

6.3.1 Estudo da Variabilidade Longitudinal

O algoritmo ABDA detecta depleções TEC na ionosfera, e os parâmetros da digissonda nos fornecem informação sobre as condições do ambiente ionosférico, e ambos estão relacionados à geração e evolução das bolhas de plasma. Observações de irregularidades nos dados de radar VHF nos provêm valiosa informação que confirmaria se a presença do PRE foi favorável à geração de bolhas de plasma na região F. As irregularidades de plasma acompanhadas de desenvolvimento de plumas detectadas pelo algoritmo ABDA, esperado após PRE bem desenvolvidos foram observadas so-

bretudo em setembro - outubro em Jicamarca e novembro - janeiro em São Luís. Entretanto, este padrão não é observado em alguns eventos, mesmo quando a velocidade vertical do plasma, ao redor do pôr-do-Sol, alcança velocidades acima de 20 m/s. De acordo com FEJER et al. (1999), as plumas podem ser inibidas mesmo quando a base da camada F alcança grandes valores de altitude se a deriva vertical depois do pôr-do-Sol cai abaixo de valores negativos em menos de 30 minutos. A seguir eventos de variabilidade longitudinal de spread F correspondentes aos dias 18 e 20 de novembro 2011, e 26 de dezembro 2011 serão apresentados.

No caso dos gráficos de mapas TEC é importante esclarecer que a data foi subordinada ao Tempo Universal, de modo que o dia 26 de dezembro foi escrito como 27 de dezembro.

Nesta seção, foi aplicada a correção da deriva vertical devida ao processo de recombinação usando a metodologia explicada por NOGUEIRA et al. (2011) e suas referências. Abaixo do limiar de altitude a velocidade vertical aparente começa se diferenciar significativamente da velocidade de deriva ExB real, devido à importância dos processos de recombinação de baixas altitudes. Então, a deriva vertical aparente representaria a soma da deriva vertical real e a contribuição devido aos processos de recombinação.

6.3.1.1 Caso 1: 10 de Novembro 2009 (DoY 314)

Com a finalidade de investigar se o PRE é a condição mais importante para a geração de bolhas de plasma, os painéis (a) e (b) da Figura 6.9 mostram os parâmetros de digissonda das estações de Jicamarca (ROJ) e São Luís (SLZ), respectivamente. O painel (a) superior apresenta as alturas reais para as frequências 3, 4, 5 e 6 MHz, e suas correspondentes velocidades de deriva vertical (painel inferior). Os mesmos parâmetros para a estação de São Luís são apresentados no painel (b). No painel (c), o mapa de extensões das depleções de TEC gerados com o algoritmo ABDA é apresentado para o dia 10 de novembro de 2009. O código de cores dos traços mostrado sobre a América do Sul representam as depleções detectadas pelo algoritmo em coordenadas geográficas e tempo universal para cada satélite e na altura do IPP (Ionospheric Pierce Point). O código de cores dos traços indica o intervalo de tempo universal em que elas foram detectadas, mostrado no topo do painel.

Nos dados de altura real sobre Jicamarca não se observa um pronunciado PRE, e a deriva vertical permanece abaixo de 10 m/s no horário do pôr-do-Sol. Entretanto, o gráfico de mapa ABDA detectou grande ocorrência de depleções TEC no oeste

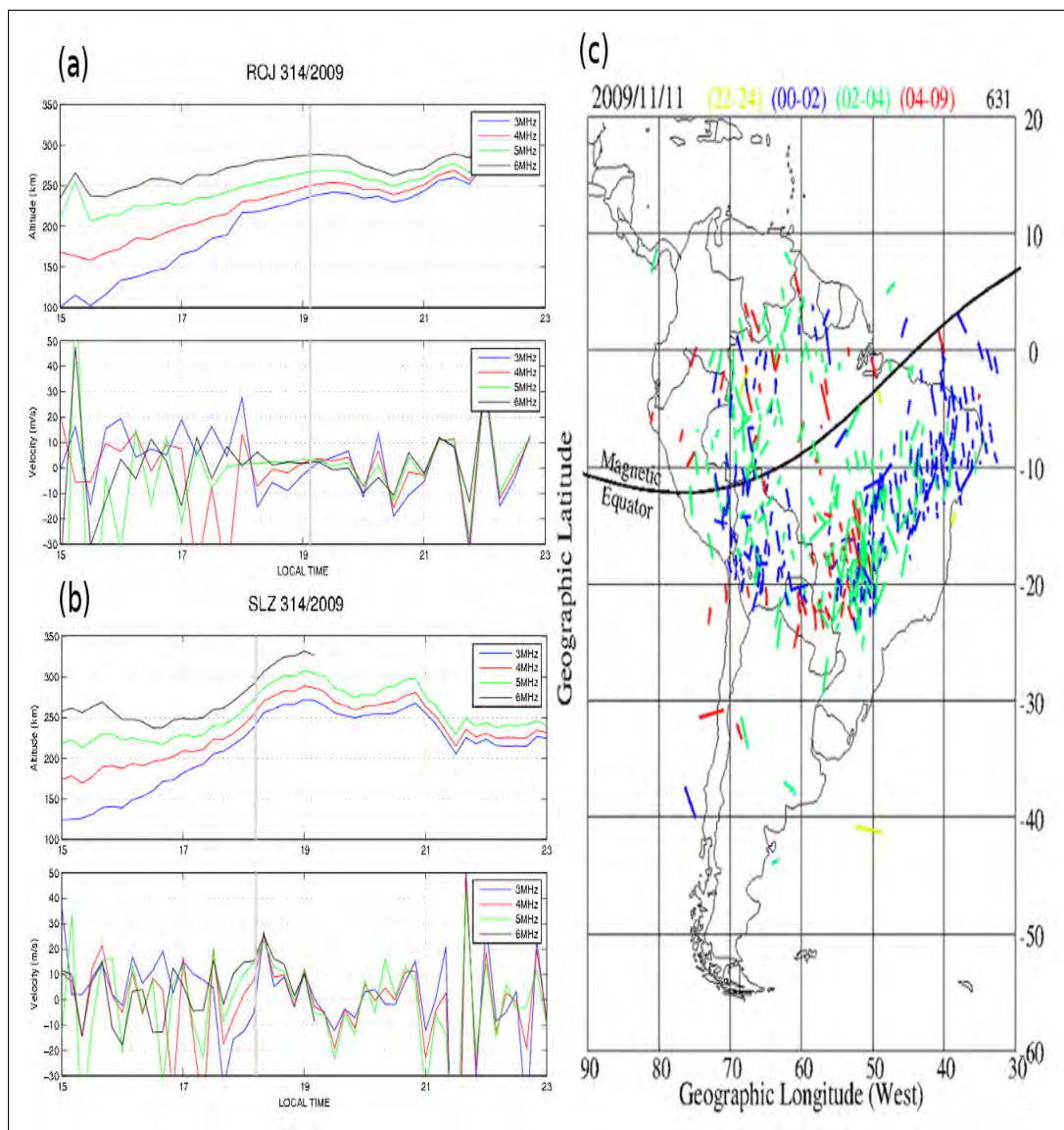


Figura 6.9 - Evento 10/11/2009. À esquerda: no topo, os parâmetros de Jicamarca (altura e velocidade vertical) e na base, os parâmetros de São Luís (altura e velocidade vertical). À direita: mapa de depleções TEC sobre o continente, onde as cores diferentes são representativas de intervalos diferentes de horário universal.

do continente. Na parte norte desta região, foram detectadas poucas depleções TEC durante este dia, possivelmente devido à escassez de receptores nessa área. Não houve dados de plumas de radar nesse dia sobre Jicamarca devido à não operação do radar.

Este evento sobre a região oeste da América do Sul nos traz uma evidência de que o PRE, por ele mesmo, não trouxe as condições necessárias para o desenvolvimento de bolhas. Como proposto por ABDU et al. (2009), TSUNODA (2008), TSUNODA

(2010b) neste caso os mecanismos iniciadores da perturbação inicial que dispare a instabilidade RT poderiam ser GW ou LSWS.

Sobre a estação de São Luís, o PRE foi bastante pronunciado. A velocidade de deriva vertical alcançou o valor de 28 m/s no horário do pôr-do-Sol, e a altura real correspondente às frequências de 3 e 4 MHz atingiu mais de 300 km. Como esperado, houve detecções de depleções de TEC sobre a região brasileira, o que indica que o PRE foi a condição mais provável para a geração de irregularidades de centenas de quilômetros. Não houve dados de RTI do radar VHF de São Luís para este dia. Este evento apresenta o PRE como mecanismo essencial para a geração de bolhas de plasma presentes na região leste da América do Sul.

6.3.1.2 Caso 2: 08 de Novembro 2009 (DoY 312)

A Figura 6.10 mostra um evento com PRE nas duas estações equatoriais de Jicamarca e São Luís com velocidades verticais máximas ao redor de 18 m/s e 20 m/s, respectivamente. A digissonda de Jicamarca mostra dados de PRE próximo do pôr-do-Sol local. Uma estrutura bottom-type é observada no gráfico RTI do radar de Jicamarca (panel (d)) até cerca de 21 LT (em Jicamarca $LT=UT-5$). O tamanho de escala das irregularidades observadas com o radar de Jicamarca é de 3 metros, e as irregularidades detectadas no ABDA são relacionadas ao tamanho de escala de centenas de quilômetros. No painel (c), o mapa TECd não mostra detecções sobre a região oeste do continente. Isto é inesperado desde que o PRE foi bastante pronunciado, o qual provavelmente significa que outro mecanismo, não claro aqui, inibiu as irregularidades de centenas de quilômetros. Os poucos traços de TECd ao sul de Perú são relacionados ao período de 04-09 UT. É importante esclarecer que os dados GPS foram disponíveis em todos os receptores no lado oeste da região, mas não houve TECd detectadas neste evento.

Em São Luís o PRE foi grande durante o período de pré-reversão como observado nos dados da digissonda. No mapa TECd observa-se muitos traços sobre a região leste do continente e sobre a região de São Luís. Neste evento, na região brasileira, aparentemente o PRE foi o mecanismo que proveu as condições para a geração de bolhas de plasma na região equatorial de baixas latitudes do setor leste do continente.

6.3.1.3 Caso 3: 26 de Dezembro 2009 (DoY 360)

Quando não é observado o fenômeno de PRE, não se espera a formação de bolhas já que a camada F não foi erguida à região de instabilidades (frequências de colisões

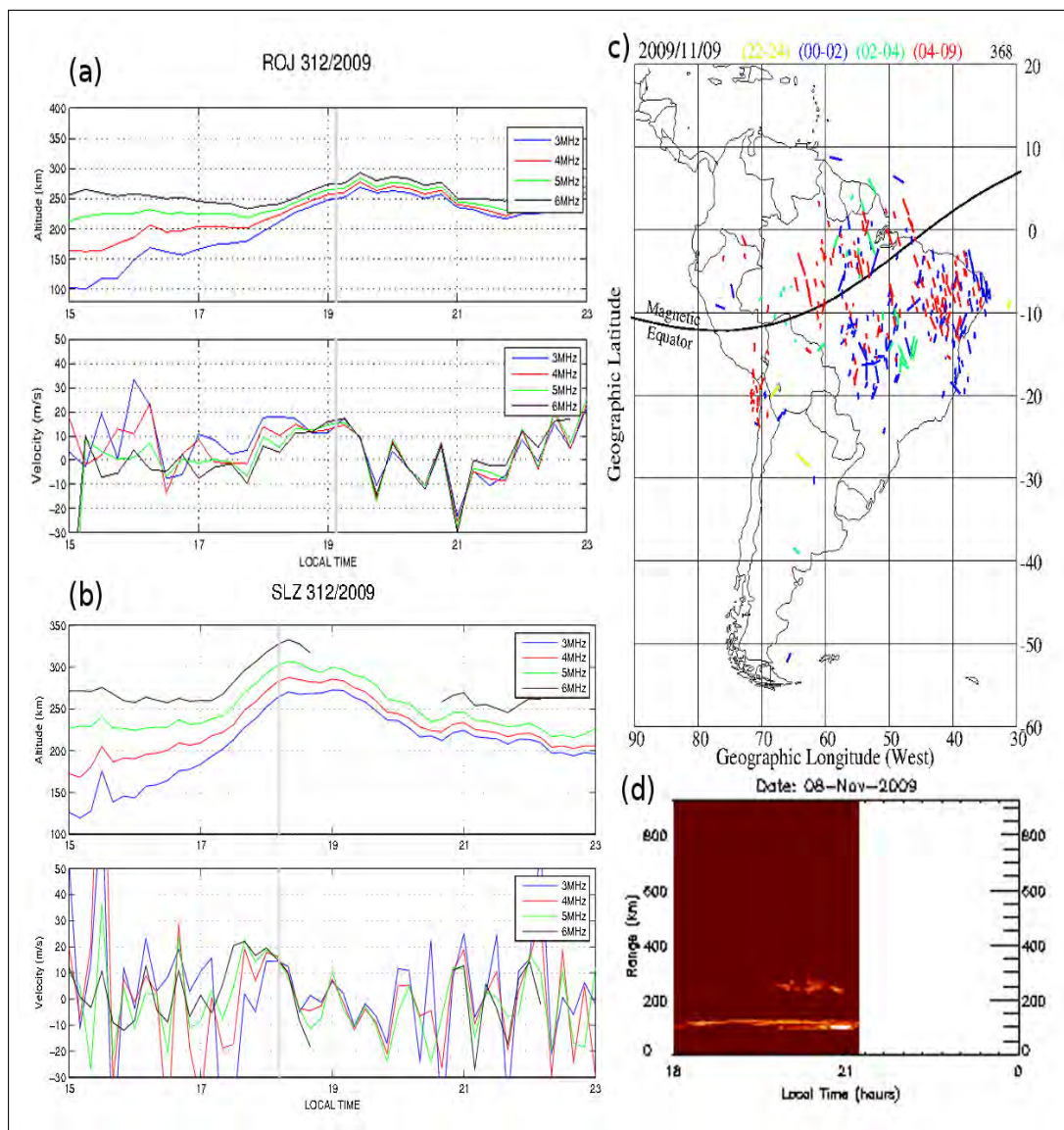


Figura 6.10 - Evento 08/11/2009. À esquerda: no topo, os parâmetros de Jicamarca (altura e velocidade vertical) e na base, os parâmetros de São Luís (altura e velocidade vertical). À direita: no topo, mapa de depleções TEC sobre o continente, onde as cores diferentes são representativos de intervalos diferentes de horário universal, e na base, estrutura bottom-type observada no radar de Jicamarca (não tem dados para o radar de São Luís).

reduzidas). Esta condição é representada na Figura 6.11 para o evento do dia 26 de Dezembro, 2009, no setor Peruano, se observa, nos dados da digissonda de Jicamarca, que não houve um levantamento da altura real ao redor do período pré-reversão. Conseqüentemente, observando o mapa TECd não há detecções de bolhas antes das 04 UT (2300 LT), que é consistente com a altura real da digissonda. Nesta noite há uma aumento monotônico da altura real que se estende até aproximadamente 300 km

em torno da meia noite local. A velocidade de deriva vertical do PRE foi de cerca de 20 m/s às 21 LT e não produziu depleções no TEC, provavelmente devido ao rápido decréscimo da velocidade de deriva vertical depois do pico pré-reversão. No gráfico do mapa RTI de Jicamarca, observado no painel (d), não houve desenvolvimento de plumas. Observa-se apenas um evento bottom-type terminando ao redor das 2250 LT, seguido de uma estrutura não bem desenvolvida que desaparece ao redor da meia noite.

Como explicado por [HYSELL e BURCHAM \(1998\)](#), existem camadas bottom-type que emergem e continuam a residir num pequeno intervalo de altura com deriva para oeste na base da região F, sem jamais evoluírem para plumas. Instrumentos insensíveis à presença de bottom-type, como os receptores de GPS, e sensíveis a bolhas de plasma podem não reportar quaisquer irregularidades de plasma.

Por outro lado, o solstício de dezembro no Brasil é identificado como um período de alta atividade de ondas gravitacionais assim como de presença das condições devidas ao PRE resultante da hipótese STBA de Tsunoda. Usando simulação numérica, [DE PAULA et al. \(2011\)](#) sugeriram que durante o mês de dezembro o desenvolvimento de bolhas de plasma foi devido a uma grande atividade de ondas gravitacionais e à presença de grandes PRE. Este fato é confirmado neste evento, assim como naquele da Figura 6.9. A curva correspondente à frequência de 6 MHz mostra que a altura real depois do pôr-do-Sol sobre São Luís cresceu de 250 km a 310 km antes das 1900 LT. A velocidade com pico ao redor de 20 m/s no horário do pôr-do-Sol, continua aumentando até 30 m/s às 1900 LT. Este caso é uma clara evidência da existência de um grande PRE simultaneamente com um grande número de depleções de TEC no lado leste do continente confinado ao setor longitudinal de 35°O a 50°O ao redor do equador magnético. O radar de São Luís não operou neste dia.

6.3.2 Estatística do PRE e de depleções de TEC

A variação mensal das depleções de TEC para o período de setembro de 2009 a janeiro de 2010 sobre as estações de São Luís e Jicamarca é apresentada na Figura 6.12, com barras pretas e brancas indicando a ocorrência e não ocorrência de TECds, respectivamente.

Desta Figura 6.12, é claramente evidente que grande ocorrência de bolhas é detectada pelo ABDA no período setembro-outubro (novembro-dezembro e janeiro) sobre a região oeste (leste) do continente. O painel (a) desta Figura indica que a porcentagem de ocorrência de TECds na região oeste durante o equinócio é ligeiramente maior que

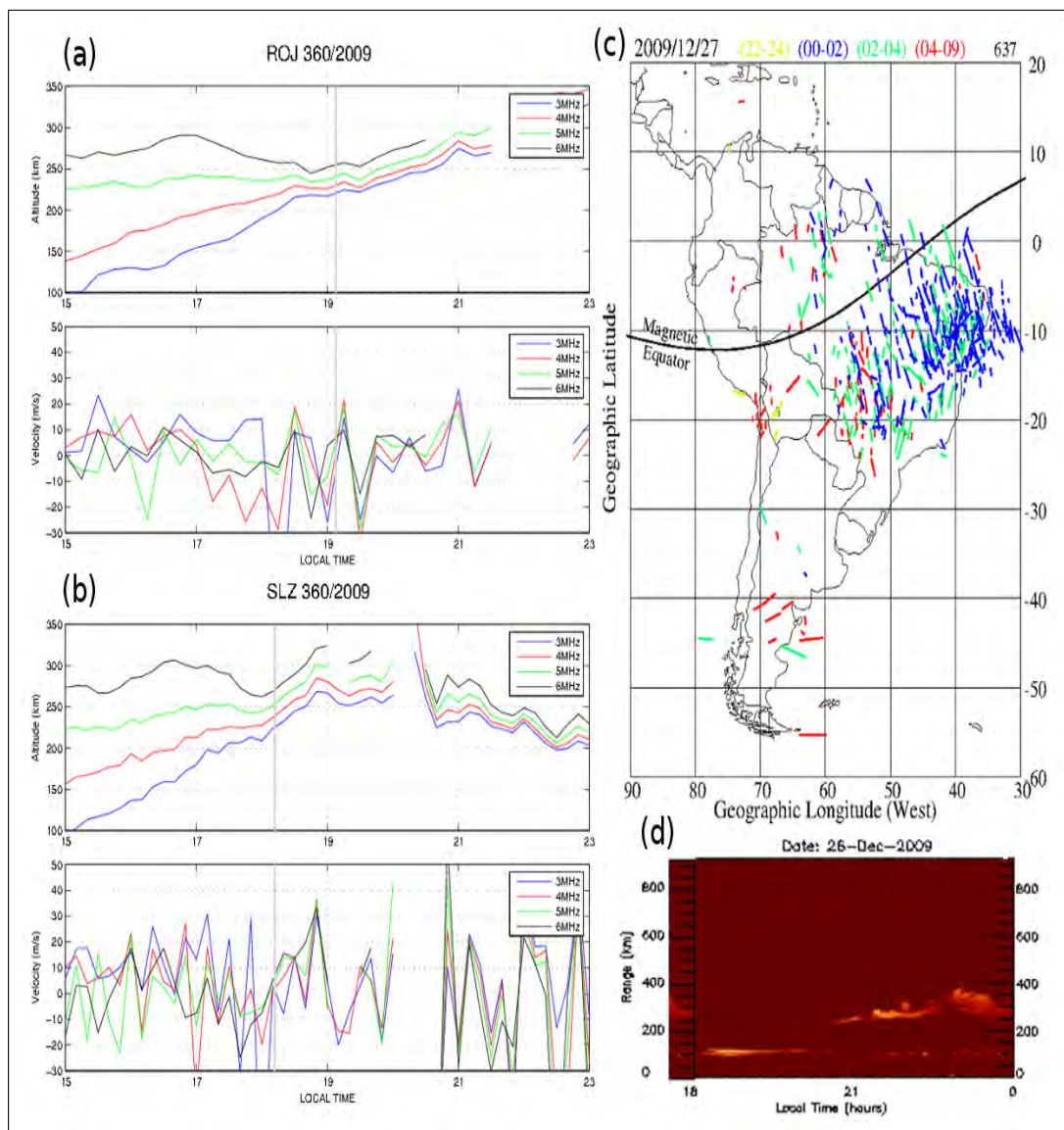


Figura 6.11 - Evento 26/12/2009. À esquerda: no topo, os parâmetros de Jicamarca (altura e velocidade vertical) e na base, os parâmetros de São Luís (altura e velocidade vertical). À direita: no topo, mapa de depleções TEC sobre o continente, onde as cores diferentes são representativas de intervalos diferentes de horário universal, e na base, estrutura bottom-type observada no radar de Jicamarca (não tem dados para o radar de São Luís).

50 %, pequena durante dezembro com cerca de 5%, e recupera-se em janeiro, com cerca de 30 % de ocorrência. Por outro lado, na região leste da América do Sul (painel (b)) só setembro apresenta baixa porcentagem de ocorrência de TECds. De outubro a janeiro há mais de 69 % de ocorrências. Isto significa que a ocorrência de spread F sobre a região leste foi maior que na região oeste de outubro a janeiro durante este período de mínimo solar. A não ocorrência de TECds em setembro

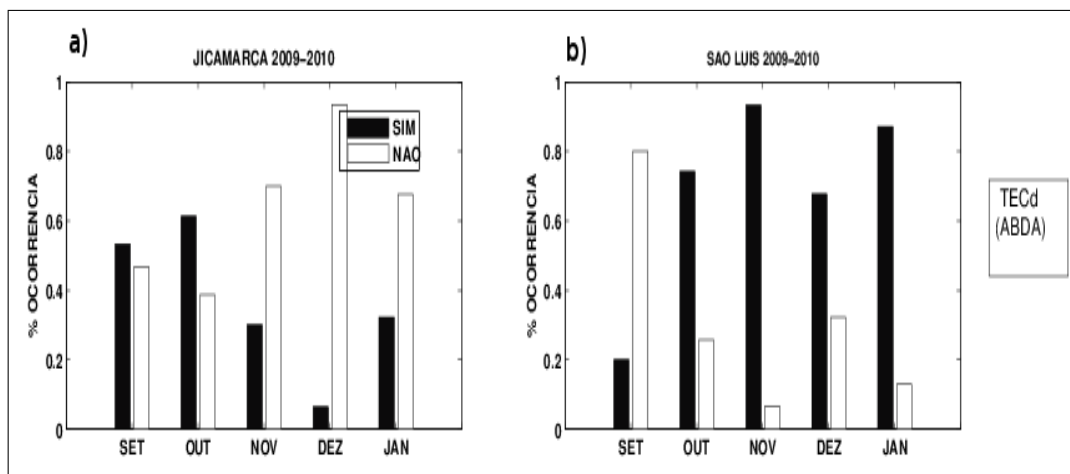


Figura 6.12 - Ocorrência das depleções TEC detectadas com o ABDA de Setembro a Dezembro 2009 e Janeiro 2010. As barras pretas/brancas representam que as bolhas foram detectadas ou não (SIM/NÃO) com o algoritmo ABDA.

(barras verticais brancas) é de 89 %, mas para outubro a janeiro é menor que 30 %.

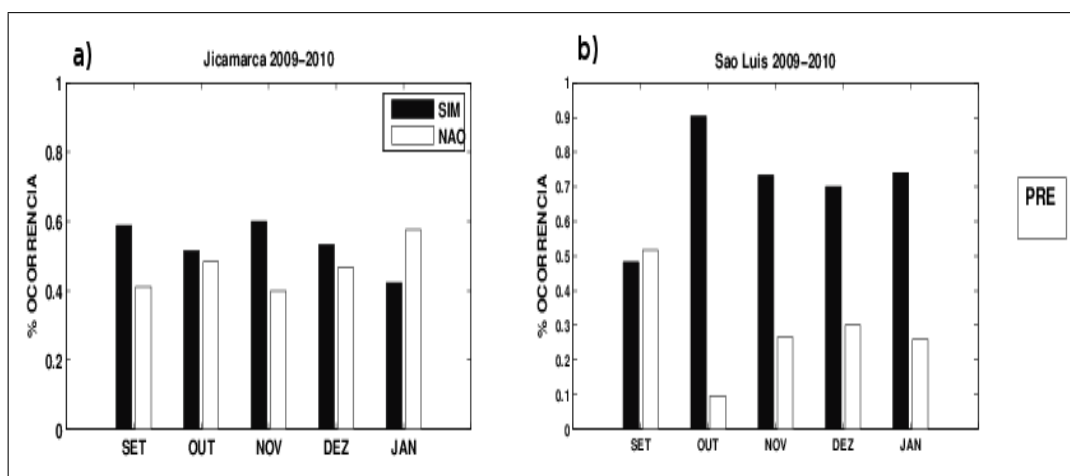


Figura 6.13 - Ocorrência do PRE de Setembro a Dezembro 2009 e Janeiro 2010. A estatística foi tomada dos dados de Digissonda. As barras pretas/brancas representam observações ou não (SIM/NÃO) de PRE para cada mês.

A Figura 6.13 mostra percentagem de ocorrência do PRE em formato similar ao da Figura 6.12. O PRE ocorre frequentemente sobre Jicamarca (ao redor de 50 % do tempo) durante o período de baixa atividade solar aqui estudado, mostrando uma ocorrência ligeiramente decrescente de novembro a janeiro, apresentada no painel (a). No painel (b) o comportamento do PRE sobre São Luís mostra um aumento na ocorrência do PRE de equinócio a solstício de verão, sendo que a ocorrência aumenta

de 50 % em setembro a 70 % em novembro-janeiro com um pico de ocorrência de 91 % em outubro. Similar às observações de depleções de TEC na Figura 6.12, houve também uma alta ocorrência observada no PRE maior na região leste que na região oeste.

Estes resultados estão de acordo com BASU et al. (1980) para a região peruana, e DE PAULA et al. (2011), SOBRAL et al. (2002) para a região brasileira. Novamente o esperado segundo a teoria STBA (TSUNODA, 1985) é reproduzido.

6.3.3 Análise Quantitativa da efetividade do PRE como mecanismo gerador do spread F

Quando comparamos as ocorrências dia a dia de PRE com TECd (ABDA) uma alta correlação é esperada entre eles para confirmar a eficiência do PRE como mecanismo precursor da formação de bolhas de plasma. Isto seria correto se o PRE fosse o único mecanismo atuando na formação de bolhas de plasma equatorial. Entretanto, sabe-se que existem outros fatores atuando como iniciadores/precusores tais como GW ou LSWS. Por outro lado, existem fatores que podem inibir o início do spread F, tais como vento meridional transequatorial, segundo citado por MARUYAMA e MATUURA (1984).

Com o intuito de analisar quantitativamente a eficiência do PRE como mecanismo precursor de spread F, sua ocorrência precisa ser determinada no contexto da ocorrência de TECd. A Figura 6.14 apresenta a ocorrência de depleções de TEC em função do PRE de setembro 2009 a janeiro 2010 para ambas estações. As barras verticais pretas (brancas) estão associadas a observações de PRE SIM(NÃO) para cada mês e a barra azul grossa representa a porcentagem de ocorrência do PRE (não ocorrência de PRE) quando depleções de TEC estão presentes. De agora em diante usaremos o acrônimo P-TEC, quando um evento apresenta em conjunto as observações do PRE e TECd (barra azul sobreposta à barra preta), e NP-TEC quando um evento que não apresenta observações de PRE e TECd (barra azul sobreposta à barra branca).

O período de alta ocorrência de spread F sobre a região oeste é predominante durante os equinócios. Isto é bem observado nos resultados das análises das estatísticas de TECd e PRE apresentadas anteriormente (vejam-se os painéis (a) das Figuras 6.12 e 6.13). Entretanto, quando foi feita a comparação dia a dia, não houve a mesma tendência (veja a Figura 6.14). No painel (a) da Figura 6.14, as ocorrências de eventos P-TEC e NP-TEC sobre Jicamarca são apresentadas. Em setembro a ocorrência

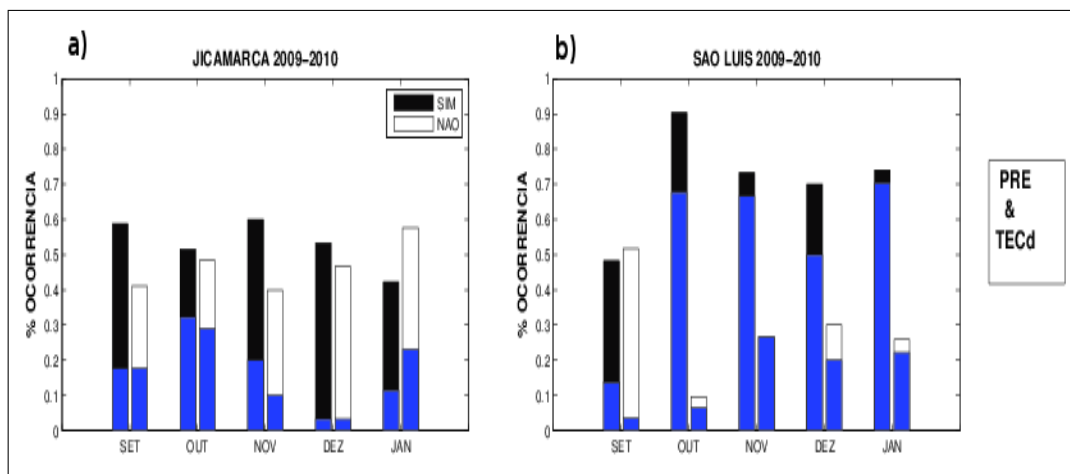


Figura 6.14 - Percentagem de ocorrência do PRE contra as depleções TEC (ABDA) de Setembro a Dezembro 2009 e Janeiro 2010. As barras preta/branca representam SIM/NÃO observações PRE para cada mês, e as barras de cor azul representam a percentagem de ocorrência de depleções TEC quando PRE é observado (sobre as barras pretas) ou não observadas (sobre as barras brancas).

de eventos com P-TEC é bastante baixa em comparação com a de eventos que apresentam PRE independentemente do TECd. A porcentagem de P-TEC é aproximadamente igual a 30% do total de eventos com PRE para o mês de setembro. Estas porcentagem da ocorrências são de 75 %, 32 % e 7 % de outubro a janeiro 2009 respectivamente, e 27 % em janeiro 2010. Ocorrência de eventos P-TEC de outubro a dezembro está de acordo com o comportamento do equinócio, enquanto os meses de novembro e dezembro também seguem a tendência de ocorrência de spread F do solstício de dezembro na região oeste.

No setor peruano, a porcentagem de NP-TEC é de 43 %, 75 %, 23 % e 8 % de setembro a dezembro respectivamente, e 40 % em janeiro 2010, em relação à porcentagem total de eventos sem PRE para o mês correspondente. A alta porcentagem de NP-TEC em setembro e outubro significa que possivelmente outro mecanismo favorecedor/gerador de spread F está atuando ao invés do precursor PRE. Em novembro e dezembro alguns eventos com P-TEC ou NP-TEC são observados, e um incremento da ocorrência é observado em janeiro com 27 % para P-TEC e 40 % para NP-TEC.

No painel (b) da Figura 6.14 os eventos de P-TEC são mais evidentes sobre São Luís. As porcentagens de ocorrências de P-TEC são 29 %, 75 %, 91 % e 71 % de setembro a dezembro de 2009, e 95 % em janeiro de 2010, em relação à porcentagem total

de eventos com PRE para o mês correspondente. As porcentagens de ocorrências de NP-TEC são 7 %, 65 %, 100 % e 69 % de setembro a dezembro 2009, e 84 % em janeiro 2010, em relação à porcentagem total de eventos sem PRE para o mês correspondente. A alta ocorrência de spread F sobre a região leste é durante o solstício de dezembro, o que é bem representado nesta figura (veja as barras P-TEC). De outubro a janeiro quase todos os eventos apresentaram P-TEC (mais de 70 %), com uma tendência crescente de outubro a janeiro. Além do mais, a porcentagem de ocorrência de NP-TEC apresentou também uma tendência linear crescente de setembro a janeiro e 100 % de ocorrência NP-TEC em novembro.

Os eventos NP-TEC sugerem que outro mecanismo precursor/iniciador de bolhas de plasma poderiam estar atuando como mencionado antes. Seguindo este raciocínio é importante identificar alguma evidência de mecanismos relacionados a este tipo de eventos (NP-TEC). Esta é a matéria da próxima seção.

Antes de continuarmos é preciso mostrar que o mesmo resultado da Figura 6.14 (2009-2010) também foi observado para o ano 2008 comparando as estações de Jicamarca e Fortaleza. Embora a estação de Fortaleza encontre-se atualmente um pouco afastada do equador magnético o resultado é bastante ilustrativo, conforme pode-se observar na Figura 6.15. Na figura mostra-se a variação mensal da ocorrência do PRE e TECd sobre as estações de Jicamarca e Fortaleza, com barras pretas e brancas indicando a existência ou não (SIM/NÃO) de observações do PRE e do TECd, respectivamente. O mesmo comportamento da variação longitudinal da ocorrência do PRE e do TECd encontradas nas Figuras 6.12 e 6.13 está novamente reproduzida nas barras verticais. Claramente observamos uma alta ocorrência de bolhas de plasma em setembro-outubro (novembro-dezembro) sobre a região oeste (leste) do continente. Da mesma forma em outubro observamos uma grande presença de bolhas em ambas localizações longitudinais com maior probabilidade ao leste.

O número em porcentagem sobre o topo de cada barra vertical do PRE significa que essa porcentagem da barra preta ou branca tiveram observações de TECd. Em setembro, sobre Jicamarca, dos dias com PRE temos 40% deles com observações de TECds e 46% dos dias sem PRE também apresentaram observações de TECds. Em Dezembro, sobre Jicamarca, 100% de casos PRE apresentaram observações TECd, e nenhum dia sem PRE teve observações TECds o que nos leva a concluir que o PRE (para este mês e estação, e ano de mínimo solar) é bastante efetivo como gerador de spread F. Entretanto, em novembro sobre Fortaleza, 100% dos dias com PRE e sem PRE tiveram observações TECd detectadas. Em outubro 100% dos casos com PRE

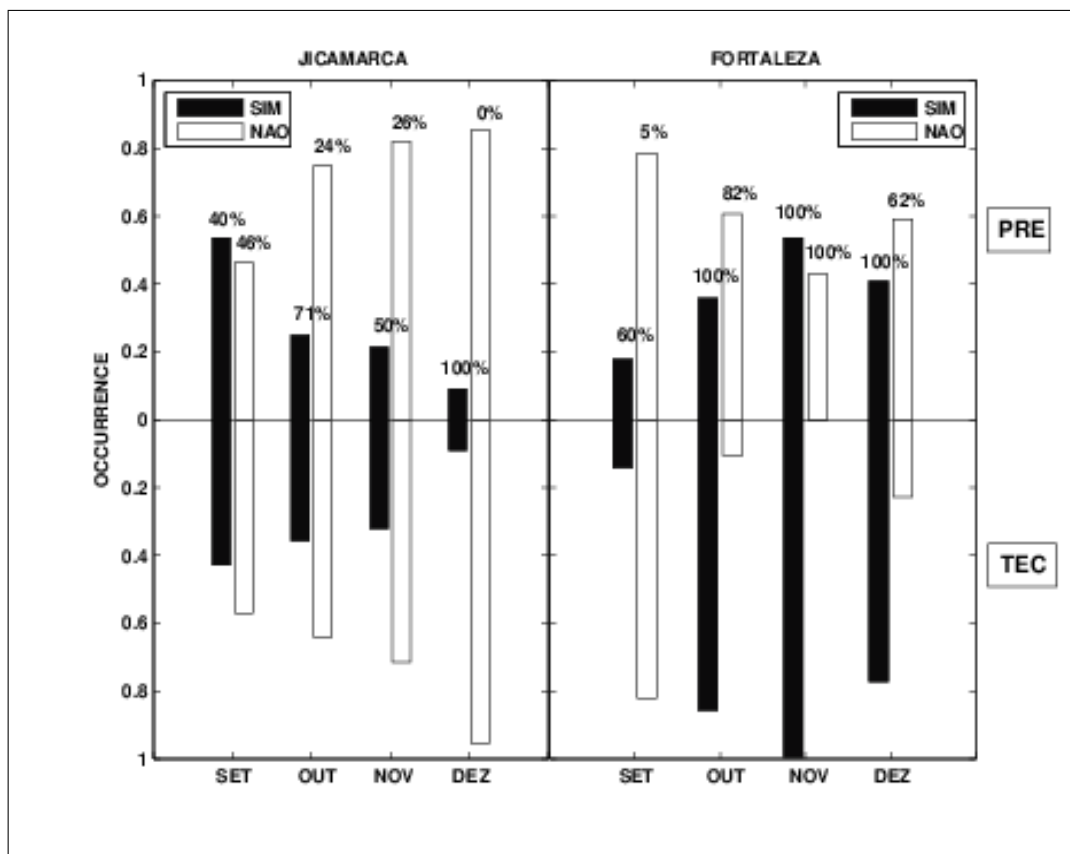


Figura 6.15 - Resultado similar ao da Figura 6.14 mas para Jicamarca e Fortaleza, de Setembro a Dezembro de 2008. Os valores em percentagem sobre as barras substituem as barras azuis no gráfico 6.14.

tiveram TECd e 82% dos eventos sem PRE teve TECds observados. Isto significa que o PRE é um bom mecanismo favorecedor da formação do ESF, mas que há outro mecanismo associado com a ocorrência de bolhas, que poderia ser o GW ou LSWS, segundo o até aqui observado.

6.3.4 Evidência de iniciadores tipo onda

Aqui daremos sustento às conclusões da última seção com duas evidências de iniciadores de tipo onda, uma para evento P-TEC e outra para um evento NP-TEC. Apresentamos duas maneiras de observar os mecanismos iniciadores tipo onda usando duas técnicas diferenciadas. O estudo do evento NP-TEC será feito retirando as perturbações dos dados TEC para um pequeno grupo de dados de satélites sobre a estação equatorial, e o estudo do evento P-TEC será feito usando mapas de TECd e GW/TIDs (VALLADARES e CHAU (2012)) sobre o continente sulamericano, com base em dados de todos os receptores GPS disponíveis para esta pesquisa. Esta-

tísticas adicionais feitas com esta técnica estão sendo preparadas para um futuro trabalho.

Dos dados selecionamos o dia 323, 19 de Novembro 2009, com características NP-TEC (leste do continente), já que para a geração de irregularidades uma perturbação no bottomside da camada F é necessária. A Figura 6.16 mostra uma estrutura de tipo onda no mapa RTI antes do início da pluma (ESF). Os painéis (a) apresentam a variação do VTEC (TEC vertical) em unidades TEC (TECU), em azul, para dois satélites sobre cada estação (Imperatriz-IMPZ, Belém-BELE, São Luís-SALU e Fortaleza-CEEU) como função do Tempo Universal para o mesmo dia em questão. Na mesma figura o filtro passa-banda que inclui unicamente períodos de 20 min a 40 min foi aplicado aos valores de TEC sendo os resultados apresentados em linhas vermelhas. Os pontos sub-ionosféricos (IPP) foram fixados na altura de 350 km e as observações foram confinadas ao intervalo de tempo de 21.5 UT a 24 UT para todas as estações. O painel (b) mostra duas passagens de satélites sobre o campo de visão para quatro estações no nordeste da região brasileira, e o código de cores representam valores de VTEC. O painel (c) mostra a pluma desenvolvida no gráfico RTI para o mesmo dia na estação de São Luís. Observa-se a estrutura bottom-type de 22 UT a 23.5 UT seguida pelo desenvolvimento da pluma às 23.5 UT durando mais duas horas. Os satélites escolhidos no estudo para cada estação são PRN 4 e 5 para IMPZ, PRN 2 e 15 para BELE, PRN 4 e 2 para SALU e PRN 4 e 15 para CEEU. O aumento pronunciado do TEC seguindo a região de depleção ao redor das 23.5 UT está relacionado com o início do ESF, mas não é observado nos sinais do satélite PRN 2 recebido em SALU e PRN 15 recebido em CEEU.

A seleção do filtro de 20 a 40 minutos deve-se à nossa tentativa de observar assinaturas de ondas de gravidade que são geradas na troposfera e propagam-se para a base da região F. Assinaturas de ondas de gravidade com períodos similares foram previamente encontradas por [ABDU et al. \(2009\)](#) e [FRITTS et al. \(2008\)](#) sobre a região brasileira.

A observação mais marcante nestas imagens é a presença de uma estrutura periódica nos dados VTEC, detrended e filtrados, antes do início do desenvolvimento da pluma. O possível precursor neste evento ocorre ao redor de 1.5 horas antes do início do ESF nos satélites PRN 4, 2, 4 e 4 em IMPZ, BELE, SALU e CEEU, respectivamente, e ao redor de uma hora antes para PRN 15, 15, 2 e 15 em IMPZ, BELE, SALU e CEEU, respectivamente. Além disso, oscilações com um período de 30 min em cada estrutura tipo onda foi observado. É importante mencionar que GW com pequenos

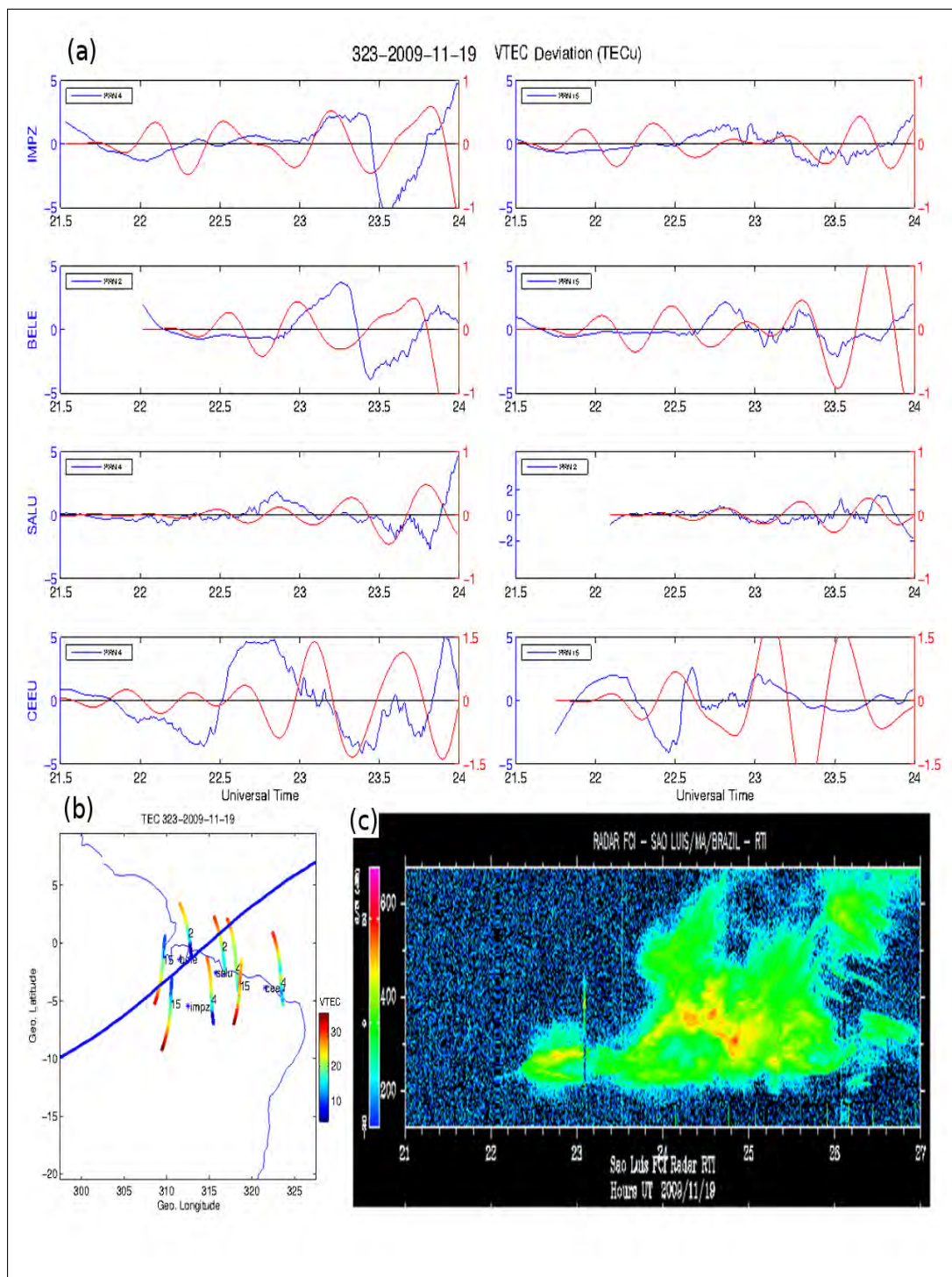


Figura 6.16 - Estruturas tipo onda durante um evento bottom-type no dia 323, 19 de Novembro de 2009. Painéis (a) apresentam o sinal TEC (em azul) e as perturbações no TEC depois de aplicado o filtro passa-banda (vermelho), o painel (b) mostra as trajetórias dos satélites sobre as estações usadas. O painel (c) mostra o mapa RTI para este evento, sobre a estação de São Luís.

períodos foram encontradas previamente sobre a região brasileira por [ABDU et al. \(2009\)](#), [FRITTS et al. \(2008\)](#).

Também selecionamos um evento P-TEC (oeste do continente) no dia 284, 11 de Outubro 2009. Durante este evento o PRE esteve presente ao redor do pôr-do-Sol local (como observa-se na Figura 6.17, no painel (e)) mas não foi observado spread F pela digissonda. Na Figura 6.17 mostra-se evidências de Ondas de Gravidade nos dados TEC-GPS e em dados do imageador airglow na frequência OI 630 nm. O painel (a) mostra depleções TEC no lado leste do continente. Depleções TEC são observadas entre 00 UT a 04 UT (veja o código de cores dos traços no topo do gráfico). No painel (b) é apresentado as perturbações detectadas no TEC na América do Sul, e podemos observar as perturbações na região oeste e também no nordeste do Brasil. Estas perturbações, centradas ao longo do caminho de passagem do satélite (linha preta fina), contêm amplitudes tão altas quanto 0.4 TECU e são apresentadas em vermelho. Este painel (b) apresenta assinaturas de GW/TIDs na faixa de 23 a 24 UT no dia 11 de Outubro, 2009, o qual é uma evidência de semeadores do ESF que se desenvolve posteriormente e é observado no mapa de depleções TEC.

Cabe salientar que nem todos os eventos TIDs dão origem a bolhas de plasma. Perturbações TEC observadas no painel (b) no leste de SA viajaram em direção leste/norte de 21 UT a 24 UT (veja-se a sequência temporal na Figura 6.18). [HUANG e KELLEY \(1996\)](#) estabeleceram que as TIDs precisam propagar-se para leste, o qual não é o caso das perturbações TEC observadas na região oeste da imagem. As perturbações TEC na região leste para este dia viajaram para norte e não apresentaram componente leste, enquanto que as perturbações no leste se propagaram em direção leste/norte.

Os painéis (c) e (d) da Figura 6.17 mostram a emissão no OI 630 nm às 23:45 UT no dia 11 de Outubro 2009, medida em São João do Cariri (localizado em 7,4°S, 36,5°W, dip latitude 19°S). O painel (c) mostra a imagem em coordenadas geográficas com 1536 por 1536 km de área. Uma caixa branca no topo da imagem mostra a estrutura periódica dentro da bolha de plasma. Aqui as regiões de depleção são apresentadas por estriações escuras parcialmente alongadas com direção norte-sul. Esta caixa é a imagem aumentada e é mostrada no painel (d). As setas no painel (d) indicam o espaçamento das bolhas de plasma de aproximadamente 80 km. Desde que as bolhas estão confinadas ao norte do observatório do Cariri, estas estriações mostram que a estrutura está ainda na fase de desenvolvimento. A partir da deriva para leste da

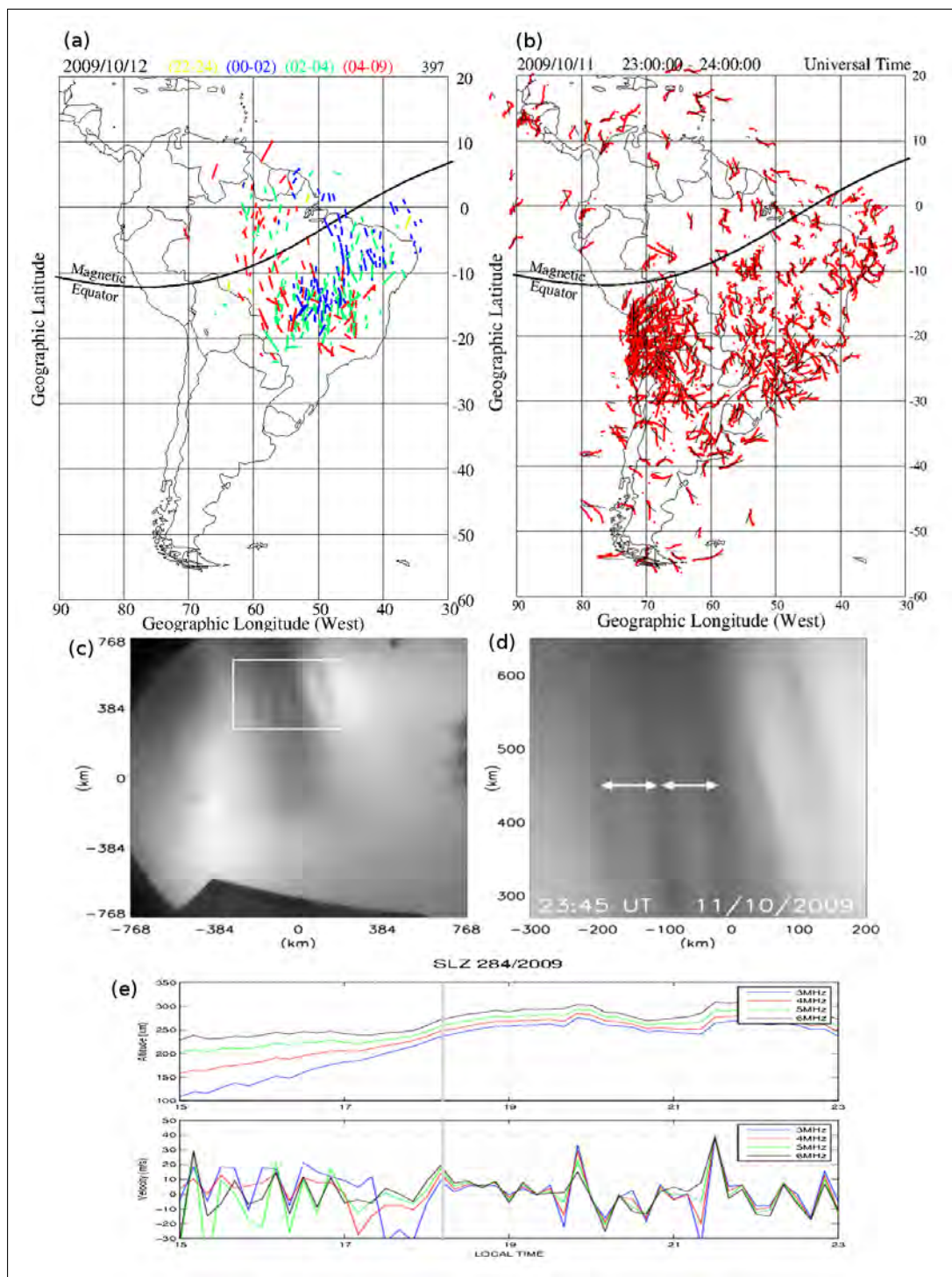


Figura 6.17 - Evidência de ondas de gravidade sobre a região leste de América do Sul. No painel (a) é o mapa de TECs sobre a América do Sul, no painel (b) mostram-se as perturbações no TEC. Painéis (c) e (d) mostram a emissão airglow sobre a estação de São João do Cariri, e o painel (d) mostra os parâmetros da digissonda na estação de São Luís.

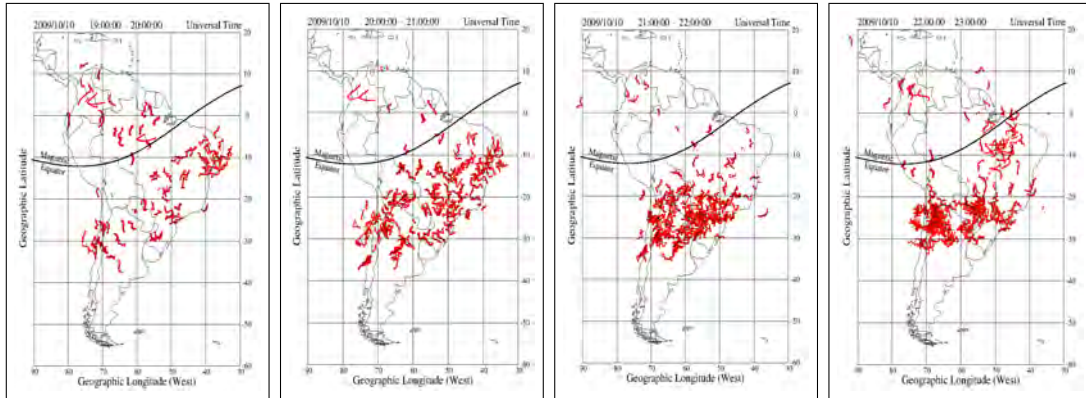


Figura 6.18 - Sequência temporal de TIDs na região brasileira viajando em direção leste-norte.

bolha foi estimado que esta deriva tinha velocidade de 160 m/s.

O painel (e) mostra os parâmetros de altitude e velocidade vertical da digissonda de São Luís, calculado a partir das frequências de 3-4-5-6 MHz. No pôr-do-Sol local a deriva vertical é de cerca de 20 m/s, posteriormente esta torna-se instável e decai rapidamente para -20 m/s às 20 UT. Depois desta hora a velocidade vertical torna-se positiva (21 UT), então alcança velocidades de até 40 m/s as 21.30 LT. Neste evento ambos mecanismos geradores de instabilidades, PRE e GW, estão presentes e provavelmente estão contribuindo para o desenvolvimento do spread F.

6.4 Discussões e Conclusões

Eventos TECds foram principalmente encontrados em dias quando o PRE esteve presente, o qual favoreceu a geração de bolhas durante o período do equinócio de outubro em Jicamarca e durante o equinócio de outubro e solstício de verão em São Luís. A Figura 6.14 mostra que TECds parecem ocorrer independente do PRE. A variação longitudinal do PRE e do TECd foram apresentados nas Figuras 6.12 e 6.13, e seus resultados estão em concordância com o comportamento geral da ocorrência de irregularidades na costa oeste e leste de SA. Durante o período aqui estudado, ocorreu um grande número de eventos com P-TEC presentes em outubro em Jicamarca e outubro-janeiro em São Luís. Também ocorreram alguns eventos com a presença de NP-TEC o que principalmente aconteceu durante setembro-outubro e janeiro em Jicamarca e de outubro a janeiro em São Luís. Devido ao fato que durante condições de mínimo solar, a camada F está relativamente em baixa altitude,

as perturbações tipo onda verticalmente propagantes, que podem alcançar a parte baixa da região F, contribuem à instabilidade RT e seus processos de cascata. Estas perturbações podem ser originadas por ondas de gravidade (GW) ou LSWS, e servindo como mecanismo semeador/precursor do spread F equatorial.

Este trabalho mostrou que o método ABDA quando suportado/complementado com outras técnicas observacionais, tais como sondadores (digissonda), imageador ótico ou radar VHF, é uma boa técnica para a detecção das assinaturas de bolhas de plasma, principalmente quando existe uma cobertura latitudinal e longitudinal continental (como no caso da América do Sul) e provê um melhor conhecimento dos processos locais e regionais.

Eventos com características NP-TEC nos levam a perseguir a idéia de GW ou LSWS como mecanismos semeadores/precursosores do SF, como observado na Figura 6.9. Este trabalho nos traz duas evidências de spread F semeado por estruturas tipo onda no dia 323, 2009 (Figura 6.16) como um evento NP-TEC. A estrutura semeadora tipo onda teve um período de 30 minutos, que é típico de ondas de gravidade em cada um dos valores VTEC “detrended” dos satélites PRN, e foram precedidas do início da pluma por 1,5 horas/1 hora. Tal tempo desde o aparecimento da estrutura tipo onda até o desenvolvimento da pluma nos permite melhorar modelos de previsão de irregularidades ionosféricas.

Um evento P-TEC foi também apresentado (Figura 6.17, mostrando que depois do pôr-do-Sol houve uma grande decréscimo na velocidade de deriva vertical (de até -20 m/s) o qual provavelmente inibiu a ocorrência do SF após o pôr-do-Sol. De cerca de 2300 UT até 0000 UT houve evidência de GW como precursor para a formação de TECd que foram detectados de meia noite até mais tarde. A presença do precursor GW foi confirmada nos dados do imageador all-sky OI 630 nm como uma estrutura de depleção periódica de 23:45 UT, o qual posteriormente desenvolveu-se em bolhas de plasma.

7 MODELO DE IRREGULARIDADES PARA PREDIÇÃO DE CINTILAÇÃO.

7.1 Introdução

As ondas de rádio ao atravessarem a atmosfera terrestre são afetadas por fenômenos de reflexão, refração, difração, absorção, despolarização e espalhamento. Este sinal de rádio é afetado pelas mudanças do perfil vertical da temperatura e do vapor de água na troposfera e densidade de ionização na ionosfera. Como fatores que influenciam a propagação de sinais de rádio na ionosfera temos a camada E esporádica, espalhamento F equatorial, estruturas alongadas (bolhas de plasma) na camada ionosférica, explosões solares que causam tempestades geomagnéticas, e outros eventos solares. A turbulência do plasma associada a bolhas de plasma equatorial é geralmente a mais intensa encontrada no globo e sua ocorrência está associada à sazonalidade, longitude e latitude, atividade magnética, e ao ciclo solar, exibindo um grande grau de variabilidade dia a dia.

As ondas de rádio que provêm dos satélites GNSS ao atravessarem as regiões ionizadas da atmosfera, experimentam mudanças de fase e amplitude de tal ordem que suas predições e análises tornam-se muito mais complexas que as realizadas na região livre de ionização. A propagação de rádio ionosférica tem uma forte conexão com a área de clima espacial. Uma perturbação súbita na ionosfera, como aumento de ionização e conseqüente aumento das frequências de colisões entre partículas, aumenta a absorção dos sinais de rádio que a estiverem atravessando. Durante fortes eventos solares, como explosões solares ou ejeções de massa coronal (CME), pode ocorrer uma absorção do sinal de rádio que se propaga na ionosfera, e os efeitos são observados como uma diminuição na precisão e acurácia do sistema GPS.

Os processos de instabilidade de plasma que ocorrem na ionosfera equatorial no horário após o pôr-do-Sol podem gerar depleções de larga escala na densidade eletrônica do meio ionosférico, o que chamamos de bolhas de plasma equatorial, que são acompanhados de intensas variações aleatórias na densidade eletrônica abrangendo um amplo espectro de escalas. Quando o sinal de rádio atravessa este meio com irregularidades do plasma (depleções), experimenta espalhamento e flutuações aleatórias na sua fase e amplitude o que denominamos de cintilação no sinal.

A teoria de cintilação relaciona as estatísticas do sinal observado com as estatísticas das flutuações da densidade eletrônica ionosférica (por exemplo YEH e LIU (1982), BHATTACHARYYA et al. (1992), YEH e WERNIK (1993), BASU e BASU (1993)). O problema geral de propagação de onda em um meio aleatório é difícil de ser tratado numericamente. Entretanto, este problema pode ser simplificado se o comprimento de onda é muito menor que o tamanho de escala característico das irregularidades. Neste novo ambiente, a onda sofreria espalhamento predominantemente na direção do receptor e a propagação da onda seria descrita pela equação parabólica (TATARSKI, 1971; WERNIK et al., 1980).

Neste capítulo introduzimos um Modelo de Irregularidades para a Predição de Cintilação o qual é descrito nos artigos COSTA e BASU (2002), COSTA et al. (2011), e focamos o trabalho na sua aplicação para os períodos de máximo e mínimo solar sobre a estação de São Luís e na interpretação detalhada dos seus resultados.

7.2 Algoritmo de espalhamento de ondas de rádio - “Método da Tela de Fase Múltipla (Multiple Phase Screen) (MPS)”

A seguir, apresentamos a teoria do espalhamento ionosférico de ondas de rádio transmitidas do satélite GPS a um receptor GPS em solo.

A aproximação tela de fase (phase-screen) (YEH e LIU (1982), BHATTACHARYYA et al. (1992), YEH e WERNIK (1993), BASU e BASU (1993)) supõe que o meio é equivalente a uma tela difratora com flutuações da fase (do sinal) aleatórias que são proporcionais às irregularidades no conteúdo eletrônico total (TEC), que é a medida direta da densidade eletrônica por uma extensão da camada de irregularidade estimada ao longo do percurso do raio entre o emissor orbital e o receptor em solo. É também razoável supor que as irregularidades estão congeladas no ambiente ionosférico e derivam através das linhas de campo na direção magnética leste-oeste, particularmente para aquelas linhas de campo apresentadas depois de algumas poucas horas após o pôr-do-Sol local, quando os processos de geração e evolução não lineares dentro das bolhas crescentes não estão mais presentes. Esta aproximação foi usada para calcular momentos diferentes da amplitude e da fase do sinal recebido, por muitos autores (YEH e LIU (1982)), e referências ali citadas). Estes estudos analíticos foram realizados em ambos os regimes de tela fina (pequena flutuação RMS de fase) e tela espessa (grande flutuação RMS de fase), supondo uma estatística apropriada para as flutuações de fase da frente de onda emergente.

Inicialmente a onda sofre perturbações de fase aleatórias devidas às variações na velocidade de fase dentro do meio. Estas variações na fase da frente de onda que se propaga introduz pequenas mudanças aleatórias na direção de propagação da onda. Posteriormente, elementos da frente de onda da onda plana agora propagam-se em direções diferentes com relação às dos outros elementos. Enquanto a onda se propaga, difração ou espalhamento angular causam interferências construtivas e destrutivas, que introduzem flutuações na amplitude assim como na fase do sinal. Estas flutuações de fase e amplitude, variando com o tempo, representam uma modulação da portadora muito complexa. Este sinal transmitido pode ser representado em suas componentes de Fourier, e a propagação de cada componente espectral pode ser analisada. A velocidade de fase em um meio ionizado depende da frequência da onda e cada componente espectral experimental, de alguma forma, diferentes perturbações de fase. Consequentemente, as componentes exibem diferentes cintilações na fase e amplitude depois de propagadas até o receptor.

Uma alternativa para estes estudos é a representação da ionosfera irregular por múltiplas camadas para caracterizar numericamente o sinal recebido no solo. O método de “multiple phase screens” (MPS) é uma técnica numérica eficiente para simular a propagação de ondas de rádio através de um meio aleatório, gerando flutuações na fase e na amplitude do sinal para acumulá-los dentro do meio (KNEPP (1983), GRIMAUULT (1998), BÉNIGUEL (2002), COSTA e BASU (2002)). Este método também pode ser usado quando o espalhamento é relativamente forte, sendo seus dados de entrada medidos in-situ ou modelos supondo formas apropriadas de suas densidades espectrais de potência. Usa-se, repetidamente o campo conhecido numa certa camada para determinar o campo na próxima camada (KNEPP (1983), RINO e OWEN (1984)).

A Figura 7.1 ilustra a geometria do problema aqui apresentado. A linha de visão (LOS - Line of Sight), entre o satélite e o receptor GPS em solo, cruza o plasma ionosférico, o qual é uma estrutura altamente aleatória e anisotrópica. Inicialmente a onda plana sofre uma perturbação aleatória na fase causada pelas variações do índice de refração dentro do meio. Entre os métodos numéricos disponíveis, a técnica “multiple phase screen” (MPS) aparece como uma das perfeitamente desenvolvidas para a solução do problema de propagação através de uma camada de plasma de densidade aleatória (YEH e LIU (1982), KNEPP (1983)).

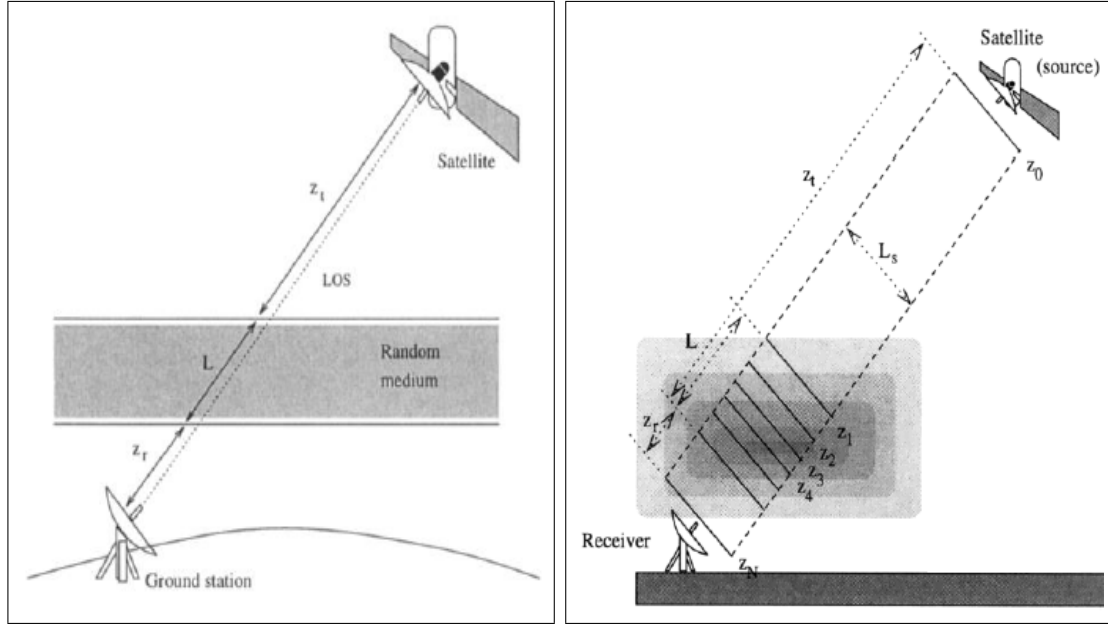


Figura 7.1 - O painel esquerdo mostra a geometria do sinal atravessando a ionosfera até o receptor em solo (GPS). A ilustração da direita mostra a técnica de MPS aqui aplicada. Imagens adaptadas de GRIMAULT (1998).

7.3 Teoria do Modelo

Os algoritmos usados nos modelos de irregularidades e de propagação para a predição de cintilação serão apresentados a seguir.

As flutuações da densidade eletrônica aleatória δN em cada volume da camada de irregularidade serão caracterizadas pelo seguinte modelo de densidade espectral de potência tri-dimensional (COSTA et al., 2011; WALKER et al., 1987), conforme descrito a seguir pela equação 7.1.

$$S_N^{3D}(\vec{k}) = S_N^{3D}(k_x, k_y, k_z) = S_o \langle \Delta N^2 \rangle \exp\left[-a^2 \frac{k_y^2/k_o^2}{1 + k_\perp^2/k_o^2}\right] S_\perp(k_\perp) \quad (7.1)$$

Na equação 7.1, (k_x, k_y, k_z) são as componentes do vetor de onda nas direções oeste-leste magnética, do campo magnético, e da propagação, respectivamente, $\langle \Delta N^2 \rangle$ é o valor médio quadrático da flutuação eletrônica, $k_o = 2\pi/L_o$, L_o é o tamanho de escala externa, $k_\perp = k_x^2 + k_z^2$, e a é a constante anisotrópica adimensional. A seguinte expressão será considerada para a função $S_\perp(k_\perp)$.

$$S_{\perp}(k_{\perp}) = \begin{cases} (1 + k_{\perp}^2/k_o^2)^{-\frac{p+1}{2}} & \text{para } k_{\perp}^2 < k_b^2 \\ (1 + k_b^2/k_o^2)^{-\frac{p}{2}}(1 + k_{\perp}^2/k_o^2)^{-\frac{1}{2}}(k_{\perp}^2/k_b^2)^{-\frac{q}{2}} & \text{para } k_{\perp}^2 \geq k_b^2 \end{cases} \quad (7.2)$$

Nesta equação L_b é o tamanho de escala interna associada ao ponto de quebra espectral, assim como p e q são os índices espectrais para $k_{\perp}^2 < k_b^2$ e $k_{\perp}^2 \geq k_b^2$, respectivamente.

É conhecido que a função de correlação tri-dimensional $\langle \Delta N^2 \rangle \rho_N^{3D}(\vec{r})$ é a inversa da Transformada de Fourier de $S_N^{3D}(\vec{k})$. Combinando esta relação com a normalização usual $\rho_N^{3D}(\vec{0}) = 1$, segue que a constante S_o na expressão 7.1 deverá satisfazer a seguinte condição:

$$\int \int \int_{-\infty}^{+\infty} S_N^{3D}(\vec{k}) dk_x dk_y dk_z = (2\pi)^3 \langle \Delta N^2 \rangle \quad (7.3)$$

e substituindo as expressões 7.1 e 7.2 dentro do integrando da equação 7.3 segue-se:

$$(S_o/a) = \frac{8\pi\sqrt{\pi}}{k_o^3} \left\{ \frac{1}{\left(\frac{p}{2} - 1\right)} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + k_b^2/k_o^2\right)^{\frac{p}{2}-1}} \right] + \frac{1}{\left(\frac{q}{2} - 1\right)} \cdot \frac{\left(k_b^2/k_o^2\right)}{\left(1 + k_b^2/k_o^2\right)^{\frac{p}{2}}} \right\}^{-1} = \frac{8\pi\sqrt{\pi}}{k_o^3 S_1} \quad (7.4)$$

onde

$$S_1 = \left\{ \frac{1}{\left(\frac{p}{2} - 1\right)} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + k_b^2/k_o^2\right)^{\frac{p}{2}-1}} \right] + \frac{1}{\left(\frac{q}{2} - 1\right)} \cdot \frac{\left(k_b^2/k_o^2\right)}{\left(1 + k_b^2/k_o^2\right)^{\frac{p}{2}}} \right\} \quad (7.5)$$

As densidades espectrais de uma e duas dimensões da flutuação eletrônica aleatória δN são obtidas de sucessivas integrações da expressão 7.1, em combinação com a expressão 7.2 e toma a seguinte forma:

$$S_N^{1D} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S_N^{2D}(k_x, k_z) dk_z = \frac{4\pi}{k_o S_1} \langle \Delta N^2 \rangle. \quad (7.6)$$

$$(7.7) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{F(r_1, p)}{\left(1 + k_x^2/k_o^2\right)^{(p-1)/2}} + \frac{\left(k_b/k_o\right)}{\left(1 + k_b^2/k_o^2\right)^{p/2}} \cdot \frac{\frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{q-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{q}{2}\right)} - F(r_2, p)}{\left(1 + k_x^2/k_b^2\right)^{(q-1)/2}} \text{ para } k_x^2 < k_b^2 \\ \frac{\sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{q-1}{2}\right)}{2 \cdot \Gamma\left(\frac{q}{2}\right)} \cdot \frac{\left(k_b/k_o\right)}{\left(1 + k_b^2/k_o^2\right)^{p/2}} \cdot \frac{1}{\left(k_x^2/k_b^2\right)^{(q-1)/2}} \text{ para } k_x^2 \geq k_b^2 \end{array} \right.$$

A equação 7.3 representa o modelo unidimensional da densidade espectral de potência, onde $r_1 = \sqrt{(k_b^2 - k_x^2)/(k_0^2 + k_x^2)}$ e $r_2 = \sqrt{(k_b^2 - k_x^2)/k_x^2}$, e $F(u, v) = \int_0^u \frac{dt}{(1+t^2)^{v/2}}$. Os valores dos parâmetros espectrais L_0 , L_b , p e q do modelo espectral podem ser estimados combinando a expressão 7.3 a resultados de medidas in-situ das flutuações da densidade eletrônica. Estes resultados mostram consistentemente que $L_0 \gg L_b$ e que $p < q$.

Finalmente os valores fixados para os parâmetros espectrais são $L_0 = 12,5km$, $L_b = 0,08km$, $(p - 1) = 1,6$ e $(q - 1) = 3,6$, selecionados para os cálculos de cintilação para flutuações de densidade eletrônica intensas $\delta N/N$ (acima de 5%) obtidas com base em dados “in situ” da “Plasma Langmuir Probe” (PLP) a bordo do satélite C/NOFS.

A completa caracterização da densidade espectral de potência das irregularidades, necessária para o cálculo da cintilação, depende também da estimativa do valor médio quadrático da flutuação da densidade eletrônica $\langle \Delta N^2 \rangle$. Dados PLP do C/NOFS in situ poderão também ser usados para estimar os valores para $\langle \Delta N^2 \rangle$ na altitude do satélite, mas não para prover informações sobre a variabilidade com altitude. Portanto, a razão s/n entre a potência de espalhamento recebida de um dado volume de largura δh centrada na altitude vertical r e potência de ruído do céu pode ser estimada com ajuda da equação do radar para espalhamento monostático (WOODMAN e BASU (1978), WALKER et al. (1987), ISHIMARU (1997)). Então a relação entre s/n e $\langle \Delta N^2 \rangle$ pode ser apresentada após manipulações numéricas (COSTA et al., 2011) da seguinte forma:

$$(s/n) \approx \frac{r_e^2}{32\pi^3 k_B} \left(\frac{G^2 \overline{g^2} \theta_{3\perp} \delta h_r \lambda_r^3 P_t}{T_{sky} B_N L_{tot}} \right) \left(\frac{\lambda_r^q}{2^q S_1 L_o^{p-2} L_b^{q-p}} \right) \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{r^2} \approx \frac{r_e^2}{32\pi^3 k_B} C_r C_m \frac{\langle \Delta N^2 \rangle}{r^2} \quad (7.8)$$

Na expressão acima, $r_e = 2,817 \times 10^{-15}m$ é o raio clássico do elétron, $k_B = 1,38 \times 10^{-23}J/K$ é a constante Boltzmann, G é o ganho da antena, $\overline{g^2}$ é o valor médio quadrático do diagrama de radiação (distribuição espacial do fluxo de potência normalizado ao máximo valor unitário), $\theta_{3\perp}$ é a largura do feixe de meia potência no plano leste-oeste geomagnético, δh_r é a largura do pulso do radar (km), λ_r é o comprimento de onda do radar, P_t é a potência transmitida, L_{tot} representa as per-

das agregadas de sistema e propagação, T_{sky} é a temperatura de ruído do céu, e B_N é a largura da banda efetiva do ruído do receptor.

Esta teoria descreve um modelo flexível para a densidade espectral de potência das irregularidades ionosféricas equatoriais. Os valores dos seus parâmetros podem ser estimados a partir dos dados in-situ do satélite C/NOFS, sendo as medidas da razão sinal-ruído s/n pelo radar de espalhamento coerente usadas para estimar os valores para $\langle \Delta N^2 \rangle$ dentro de cada volume correspondente.

Após manipulações a equação 7.8 fica:

$$\langle \Delta N^2 \rangle \approx \left(\frac{2\pi}{r_e}\right)^2 \left[\frac{k_B T_{sky} B_N L_{tot}}{G^2 g^2 \theta_{3\perp} \delta h_r (\lambda_r/2)^3 P_t} \right] \left[\frac{\pi S_1 L_o^{p-2} L_b^{q-p}}{(\lambda_r/2)^q} \right] r^2 (s/n) \quad (7.9)$$

Portanto o valor médio quadrático da flutuação eletrônica $\langle \Delta N^2 \rangle$ é diretamente proporcional à razão sinal-ruído s/n . Também depende do primeiro (o qual agrupa os parâmetros de radar, perdas, e a temperatura ruído do céu) e segundo (que depende dos parâmetros que caracterizam o formato do modelo adotado para a densidade espectral de potência das irregularidades) pares de colchetes da equação 7.9. É de notar que estes termos não são independentes uns dos outros, já que as mudanças na frequência de operação afetam simultaneamente o desempenho do radar e as propriedades de espalhamento do meio, assim como a temperatura do ruído do céu.

Usando esta nova equação uma estimativa para $\langle \Delta N^2 \rangle$ seria obtida da medida do valor correspondente ao s/n para cada volume dependente da altura amostrado pelo radar, geralmente apresentado na forma de mapas “range-time-intensity” (RTI). Em nosso trabalho utilizamos dados RTI do radar VHF de espalhamento coerente de São Luís.

A partir da equação 7.9 calcula-se a flutuação RMS da densidade eletrônica relacionando-a com s/n , mostrado a seguir:

$$\boxed{\sqrt{\langle \Delta N^2 \rangle} \approx \frac{2\pi}{r_e} \sqrt{\frac{k_B T_{sky} B_N L_{tot}}{G^2 g^2 \theta_{3\perp} \delta h_r (\lambda_r/2)^3 P_t}} \sqrt{\frac{\pi S_1 L_o^{p-2} L_b^{q-p}}{(\lambda_r/2)^q}} r \sqrt{(s/n)} \approx Cte_{Radar} \cdot r \cdot \sqrt{(s/n)}} \quad (7.10)$$

A seguir vamos descrever como uma onda plana se propaga através da ionosfera (camada irregular tridimensional). Esta propagação pode ser representada pela equação

de onda:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + k^2 \eta^2 U = 0 \quad (7.11)$$

onde k é o número de onda no espaço livre e η é o índice de refração no meio. O eixo y está alinhado com a direção da linha do campo magnético horizontal e o eixo z aponta para cima. A origem coincide com o receptor, localizado no solo. O campo $U(x, y, z)$ pode ser representado pelo produto de uma amplitude complexa $u(x, y, z)$ e o termo da fase:

$$U(x, y, z) = u(x, y, z) e^{ik(d_x x + d_y y + d_z z)} \quad (7.12)$$

onde (d_x, d_y, d_z) é o vetor unitário alinhado com a direção da inclinação da propagação. Substituindo o lado direito da equação 7.12 por U dentro da equação 7.11, e supondo que o tamanho de escala da flutuação vertical da amplitude complexa u é muito grande comparada com $|2kd_z|^{-1}$, obtém-se:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + 2ik(d_x \frac{\partial u}{\partial x} + d_y \frac{\partial u}{\partial y} + d_z \frac{\partial u}{\partial z}) + k^2(\eta^2 - 1)u = 0 \quad (7.13)$$

Podemos então ver que a propagação inclinada da onda plana é agora representada por uma equação parabólica. As aproximações realizadas acima indicam que os efeitos de retroespalhamento foram desprezados. Com a aplicação do algoritmo split-step de Fourier (KUTTLER e DOCKERY (1991)), a solução numérica da equação 7.13 pode ser encontrada. Este algoritmo supõe que $u(x, y, z)$ será especificado no topo da camada, que será sub-dividida em múltiplas placas horizontais com uma espessura comum δz .

O algoritmo de Fourier split-step para nosso caso toma a forma:

$$u(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{u}(p, q, z) e^{i(px+qy)} dpdq \quad (7.14)$$

A seguir substituímos 7.14 na equação 7.13, e calculamos a transformada inversa de Fourier deste resultado. Depois de algumas simplificações como explicado no Apêndice B de COSTA et al. (2011) (ver equações B7 a B13) chegaremos à expressão

que descreve a propagação do topo à base da camada de irregularidades, sendo esta representada por repetidas aplicações da equação:

$$u_{m,n}(z - \delta z) = \exp\left[-i \frac{r_e \lambda \delta z}{d_z}\right] \sum_{R=-R_M}^{R_M} \sum_{S=-S_M}^{S_M} C_R^x C_S^y u_{m-R, n-S}(z) \quad (7.15)$$

onde $u_{m,n}(z)$ ($-R_M \leq m \leq R_M, -S_M \leq n \leq S_M$) é o valor da amplitude complexa do campo na posição (m, n) da grade horizontal localizada na altura z . Inicialmente quando a altura da irregularidade está no topo z_{max} todos estes valores são iguais a um. Em cada passo da propagação (para cada altura δz), o vetor aleatório $\delta N_{m,0}(z - \delta z)$ ($-R_M \leq m \leq R_M$) é especificado em conformidade com a transformada inversa de Fourier da raiz quadrada da densidade espectral de potência (ver equação 7.3), supondo os valores fixos dos parâmetros $L_0 = 12,5 km$, $L_b = 0,08 km$, $(p - 1) = 1,6$ e $(q - 1) = 3,6$, mas com $\langle \Delta N^2 \rangle$ estimado através da aplicação da equação 7.8 ao valor da razão s/n medida pelo radar VHF para a altura correspondente. Esta equação 7.15 é aplicada sucessivas vezes e por último, é aplicada mais uma vez com $\delta N_{n,m}(0) = 0$ e $z = \delta z = z_{min} = z_{max} - J\delta z$ como altura da base da camada, para produzir o campo no solo.

Para resumir a metodologia matemática do modelo acima apresentado, vejamos a Figura 7.2, no qual está mostrado passo a passo como funciona o modelo. Inicialmente, uma grade auxiliar de coordenadas geográficas (lat_{mn}, lon_m, alt_n) cujos nós correspondem aos ápices das linhas de campo magnético é obtida, com o auxílio do modelo IGRF 11 (FINLAY et al., 2010). Esta grade é regular em longitude geográfica e altitude, sendo centrada na longitude geográfica do radar. Adicionalmente, os dados RTI são mapeados para esta superfície auxiliar, ocupando posições relativas ao primeiro instante de tempo identificado no arquivo de índices de cintilação S4 medidos pelo receptor GPS.

Em cada instante de tempo da simulação, as posições dos satélites GPS são atualizadas e o novo mapa RTI descrito no parágrafo anterior é deslocado em relação à grade auxiliar de acordo com o perfil de velocidade de deriva zonal magnética pré-estabelecida. Este procedimento mantém a aderência entre a grade auxiliar e o novo mapa RTI. Isto é, o novo mapa RTI "desliza em relação à grade auxiliar, mantendo sempre o contato entre ambos". Ainda no mesmo instante de tempo da simulação, pontos de cada percurso satélite-receptor afastados de $\langle \Delta z \rangle$ são mapeados para a grade auxiliar ao longo das linhas de campo magnético de modo a determinar,

por interpolação bilinear aplicada ao novo mapa RTI, os valores de s/n correspondentes. Portanto, a partir de dados de radar VHF (plumas) obtém-se a razão s/n , que é proporcional à densidade eletrônica $\langle \Delta N^2 \rangle$. Usamos também os parâmetros espectrais (L_0 , L_b , p e q) determinados pelas medidas do satélite C/NOFS para a geração da camada fina de fase aleatória. Esta tarefa repete-se até terminar as camadas finas na densidade da ionosfera (pluma), e finalmente deixa-se o sinal ser propagado até o solo, onde é calculado o índice de cintilação S_4 .

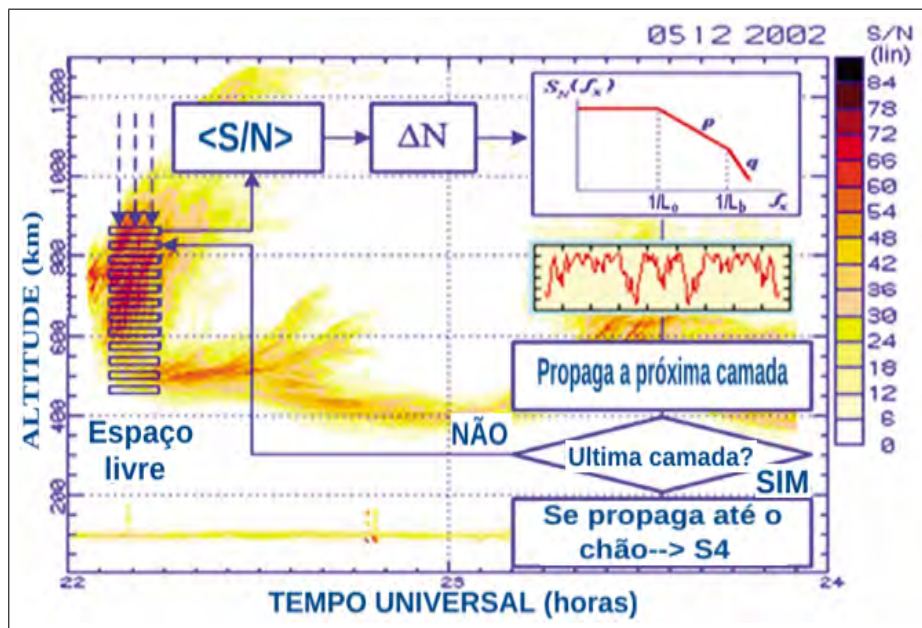


Figura 7.2 - Esquema completo do modelo tri-dimensional, combinando a geração das flutuações da densidade eletrônica e o algoritmo de propagação das ondas de rádio, com os mapas RTI de São Luís para o dia 5 de Dezembro, 2002. Adaptado de COSTA et al. (2011).

Este procedimento necessita de recursos computacionais elevados. Em particular, o tempo de processamento é excessivo. Observou-se que o módulo de $u_{m,n}(z)$ difere muito pouco da unidade na base da camada de irregularidade. Portanto, como forma de diminuir consideravelmente o tempo de processamento, apenas o valor médio quadrático da flutuação da densidade eletrônica ΔN^2 foi acumulado ao longo de cada intervalo de percurso entre um satélite e o receptor compreendido entre o topo e a base da camada de irregularidade. Deve-se observar que este procedimento também considera detalhadamente as variações de ΔN^2 ao longo dos percursos entre os satélites e o receptor. Em seguida, o valor acumulado de ΔN^2 foi utilizado para gerar uma tela de fase aleatória na base da camada. O modelo de propagação foi

aplicado uma vez, como descrito acima, para produzir o campo no solo.

A cintilação no sinal de rádio representa as flutuações aleatórias nos seus principais parâmetros (fase e amplitude) resultantes da propagação através das irregularidades existentes na densidade eletrônica ionosférica. A medida do grau de cintilação na intensidade do sinal é dada pela quantidade $S4$ (YEH e LIU (1982), BEACH (1998)) descrito como o desvio padrão da intensidade do sinal, normalizada pelo seu valor médio.

$$S4^2 = \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \quad (7.16)$$

7.4 Base de dados

Os dados aqui utilizados foram obtidos na estação ionosférica equatorial de São Luís no Brasil. Estes dados são valores da razão sinal - ruído s/n e dados do índice de cintilação medidos, respectivamente, pelo radar VHF de espalhamento coerente e pelo receptor GPS localizados na mesma estação. Também fizemos uso de dados de densidade do satélite C/NOFS para passagem sobre a América do Sul, do dia 02 de Dezembro de 2008. Os dias de dados do radar VHF estão apresentados na Tabela 7.1.

Máximo Solar	Mínimo Solar
16 Nov. 2001	09 Oct. 2008
06 Oct. 2002	03 Dec. 2008
05 Dec. 2002	27 Oct. 2010

Tabela 7.1 - Dias no período de máximo e mínimo solar. Dados RTI do radar VHF da estação ionosférica equatorial de São Luís, Brasil.

A variação da velocidade zonal da ionosfera no horário após o pôr-do-Sol (para nosso estudo) foi de 150 m/s entre 19 a 23 UT, a 80 m/s entre 23 a 29 UT, segundo ARRUDA et al. (2006).

Os valores dos parâmetros técnicos do radar VHF de São Luís usados para o cálculo do valor médio quadrático da flutuação da densidade eletrônica $\langle \Delta N^2 \rangle$ podem ser encontrados na Tabela 7.2. Note-se que S_1 é calculado e o ruído é dominado pela temperatura do céu na frequência do radar (29,795 MHz).

Parâmetros	Valores
$L_o[km]$	12,500
$L_b[km]$	0,080
p	2,600
q	4,600
$S1$	3,210
$Freq[MHz]$	29,795
$Pt[kW]$	4,000
Eff	0,500
$dh[km]$	2,500
$BW3dB[deg]$	10,000
$Gain[dBi]$	26,000
$NFig[dB]$	5,000
$Tsys[K]$	917,061
$Tsky[K]$	10000,000
$BW[kHz]$	120,000

Tabela 7.2 - Parâmetros do radar VHF de São Luís, e dados de parâmetros espectrais obtidos a partir de dados do satélite C/NOFS.

7.5 Resultados e Discussões

Os resultados apresentados vêm da análise conjunta do índice S4 medido pelo receptor de GPS no solo e do índice S_4 calculado usando os modelos de irregularidades e de propagação para a predição de cintilação, assim como da comparação com as estruturas observadas pelo radar VHF de São Luís.

O elemento do modelo que irá variar para se poder ajustar os resultados calculados aos medidos é a $CteRadar0$ do radar, que é representado na equação 7.3 pelo produto do fator $(2\pi/r_e)$ pela primeira das duas raízes.

Começou-se o estudo usando a constante de radar igual a 2.8×10^{11} e uma máscara de 10° (ângulo de elevação) para os dias 16 de novembro 2001, 06 de outubro 2002, 05 de dezembro 2002 para o período de máximo solar, e 09 de outubro 2008, 03 dezembro 2008 e 27 de outubro 2010 para o período de mínimo solar como apresentado nas Figuras 7.3 e 7.4, respectivamente.

Deve-se observar nestas figuras que o tempo de ocorrência da pluma do radar corresponde ao tempo de amostragem do índice de cintilação. As Figuras 7.3 e 7.4 estão divididas em três painéis horizontais que correspondem a um dia de estudo, com quatro sub-divisões correspondendo à análise dos dados. As sub-divisões apresentam, da esquerda para a direita, o gráfico RTI do radar VHF de São Luís, o

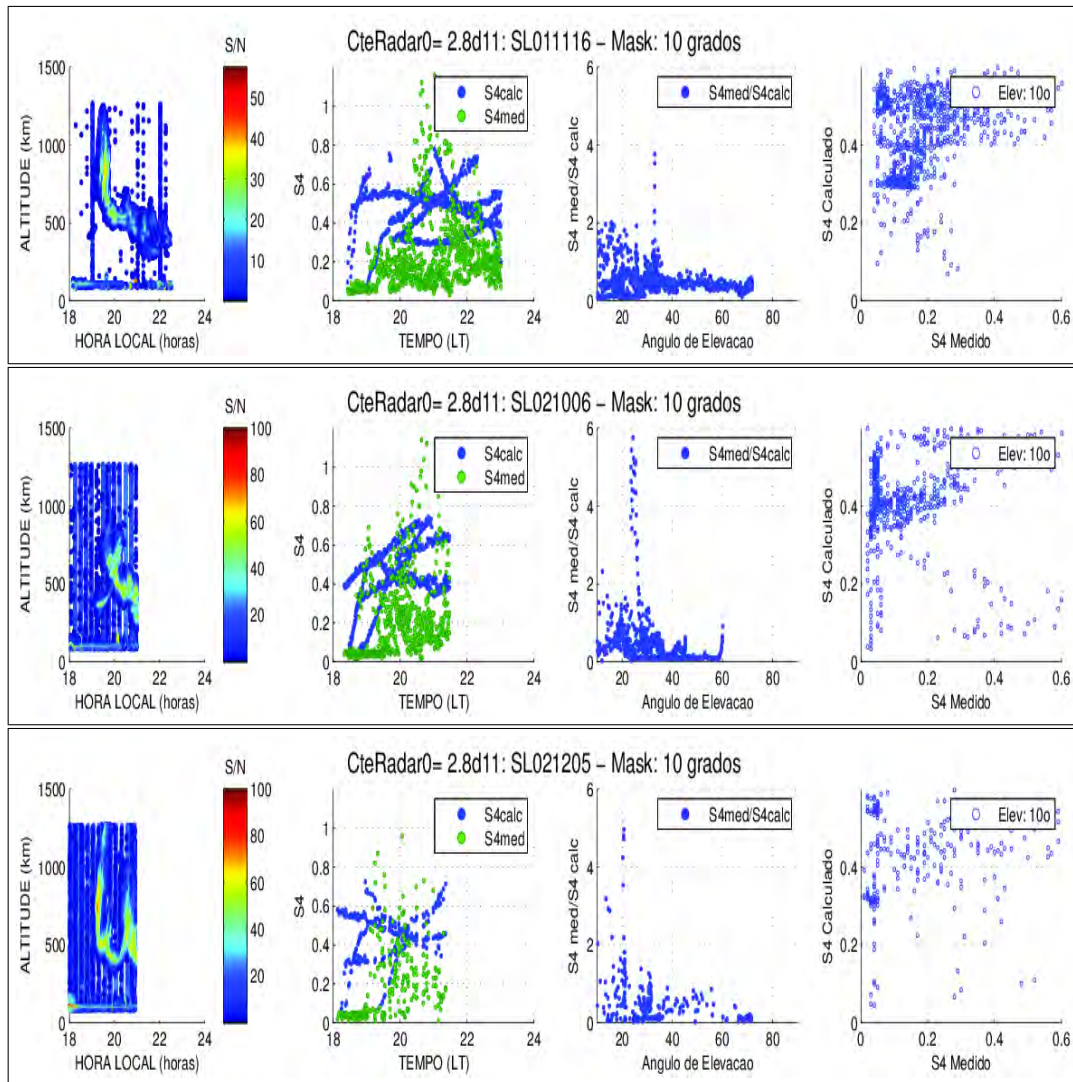


Figura 7.3 - Variação do S4 medido e S4 calculado em função do tempo e ângulo de elevação, quando a constante do radar é 2.8×10^{11} , para os dias do período de máximo (2001, 2002) solar. Veja-se dados do radar de São Luís no painel esquerdo para cada dia.

índice S4 medido pelo receptor GPS (em verde) e calculado pelo modelo (em azul) em função do tempo local, a razão $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação, e o S4 calculado versus S4 medido.

Observa-se que no terceiro painel destas figuras de $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação, que para este valor de constante de radar, esta razão fica consistentemente abaixo da unidade o que não é esperado. Quando esta razão for uma unidade (razão $S4_{med}/S4_{calc}$), enquanto o ângulo de elevação varia, então poderemos dizer que a constante de radar é bastante adequada para o período em estudo. Observa-se que, para os dias correspondentes ao período de mínimo solar, os valores

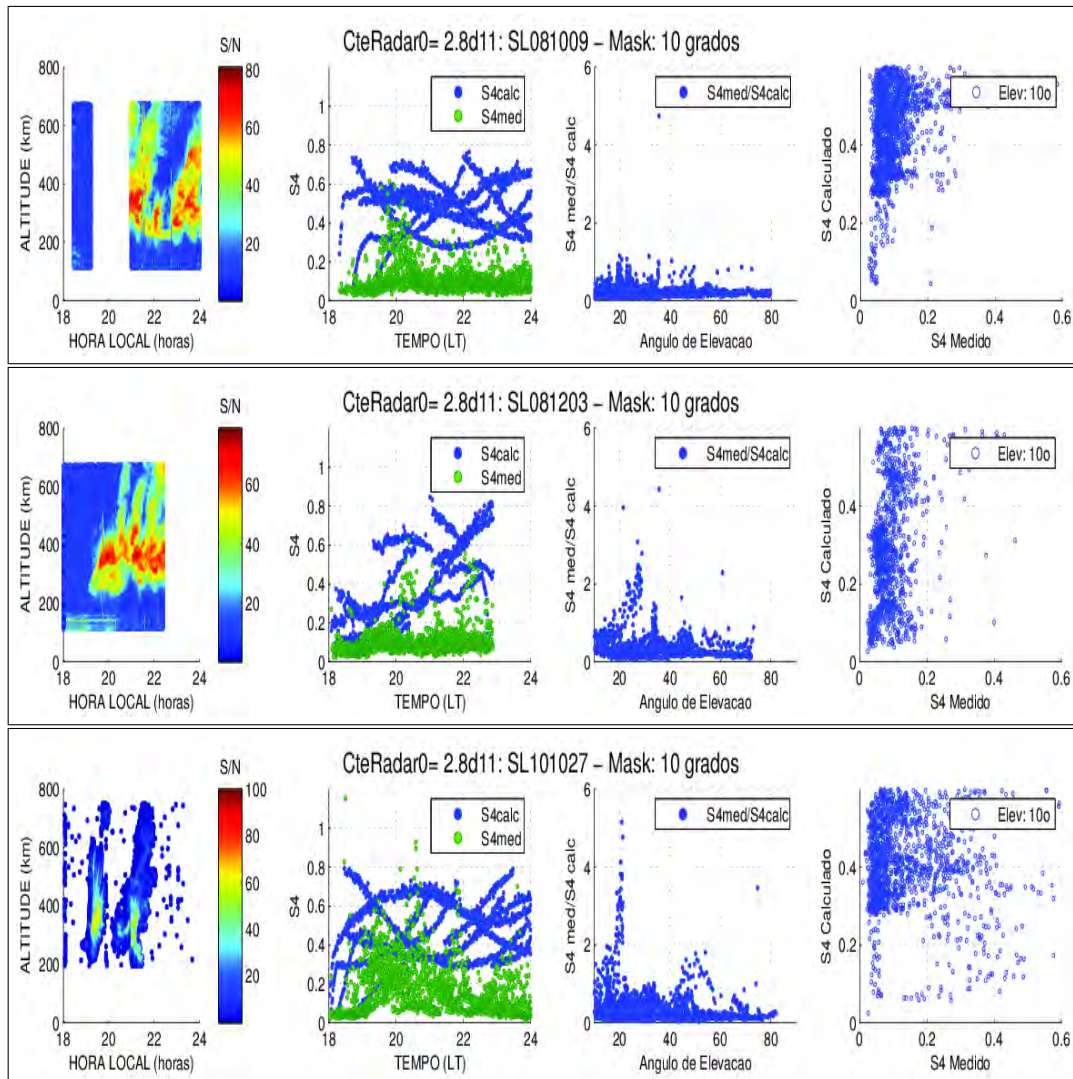


Figura 7.4 - Variação do S4 medido e S4 calculado em função do tempo e ângulo de elevação, quando a constante do radar é 2.8×10^{11} , para os dias do período de mínimo (2008, 2010) solar. Veja-se dados do radar de São Luís no painel esquerdo para cada dia.

do S4 calculado pelo modelo são muito altos em comparação ao S4 medido pelo receptor GPS, e conseqüentemente a razão $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação fica bem abaixo da unidade. Assim mesmo, o quarto painel (da direita) mostra que o índice S4 calculado em função do S4 medido para o período de máximo solar (Figura 7.3) mostra que o modelo superestimou (para 10° de elevação) o índice S4 quando o S4 medido está abaixo de 0.3 unidades. Enquanto que para o período de mínimo solar (Figura 7.4), embora o modelo também superestime o índice S4 para valores abaixo de 0.3, estes valores encontram-se confinados abaixo de 0.3 predominantemente, isto mostra a diferença da intensidade da cintilação entre

solar máximo e solar mínimo.

Foram realizadas análises para sete valores diferentes de constante de radar, para poder encontrar uma correspondência da cteradar e sua variação em função do período de atividade solar (máximo e mínimo solar). É bom ter em mente que a cteradar vem do produto de duas raízes quadradas da equação 7.10, e a primeira raiz considera os parâmetros do radar que não deveriam variar de um dia para outro (pelo menos não para o radar de São Luís), enquanto que a segunda raiz é calculada a partir dos parâmetros do espectro de potência, ou seja, diretamente das irregularidades no plasma observados com o satélite C/NOFS. Consequentemente, fomos variando a constante de radar (cteradar0) para cada dia, e foi observado sua razão $s4med/S4calc$ em função do ângulo de elevação. Foram considerados os seguintes valores de 1.0×10^{11} , 1.4×10^{11} , 2.0×10^{11} , 2.8×10^{11} , 3.2×10^{11} , 4.6×10^{11} e $6.4 \times 10^{11} [1/km^3]$ para a constante de radar.

Foram fixados as constantes de radar (sete constantes) e variamos o dia (3 dias no máximo e 3 dias no mínimo solar), e os resultados apresentam-se nas Figuras 7.5 e 7.6. Estas figuras estão compostas de painel superior e painel inferior, onde cada painel consta de sete parâmetros de radar em forma crescente e os pontos coloridos correspondem a cada dia de estudo. Os dados nas cores vermelho, azul e verde representam os dias 16 de novembro 2001, 06 de outubro 2002, e 05 de dezembro 2002 para máximo solar, e 09 outubro 2008, 03 dezembro 2008 e 27 outubro 2010 para mínimo solar, respectivamente. O painel superior apresenta o índice S4 calculado (modelo) em função do S4 medido (receptor GPS), enquanto que o painel inferior apresenta resultados para a razão $S4med/S4calc$ em função do ângulo de elevação.

Tanto para máximo como para mínimo solar observamos que enquanto o valor da constante de radar aumenta o S4 calculado passa a superestimar o índice S4 quando comparado com o S4 medido (receptor GPS). O caso mais dramático é quando a constante de radar é $6.4 \times 10^{11} [1/km^3]$, quando para valores abaixo de 0.5 unidades (do S4 medido) o S4 calculado pelo modelo possui valores, em sua maioria, muito acima de 0.6 como se houvesse observado irregularidades de plasma bastante desenvolvidas que na realidade o receptor GPS não observou. Então a imagem mais importante de ser observado nas Figuras 7.5 e 7.6 é o painel inferior. O melhor valor a ser assumido pela constante de radar será quando a razão $S4med/S4calc$ permanecer em torno da unidade para ângulos de elevação até uns 60° a 70° , como explicado no último parágrafo. No caso do máximo solar observa-se que o melhor valor da constante do radar será 1.0×10^{11} para os dias 16 de novembro 2001, e 06 de outubro 2002. No

caso do mínimo solar pode-se indicar que unicamente o dia 27 de outubro 2010 teria uma melhor representação com este mesmo parâmetro de radar.

Nas Figuras 7.7 e 7.8 mostramos praticamente os mesmos gráficos que as duas últimas figuras, mas com a variantes que agora irão variar os valores das sete constantes, acima mencionadas, para cada dia. O painel da esquerda mostra o índice S4 calculado (modelo) em função do S4 medidos (receptor GPS). O painel direito mostra a razão do $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação, tanto para máximo como para mínimo solar. O código de cores representa um valor da constante de radar, sendo que de baixo para cima esta constante vai crescendo, então a cor azul corresponde a 1.0×10^{11} e a cor preta corresponde a 6.4×10^{11} , e assim sucessivamente.

Para máximo solar (Figura 7.7) observa-se que a constante de radar 1.0×10^{11} nos representa melhor o resultado do modelo quando comparado com o S4 medido. Observem o painel da direita, e que a melhor representatividade é para o dia 16 de novembro 2001, pontos vermelhos na Figura 7.7. Os outros dois dias apresentam um aumento da razão $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação quando esse é 40° e 50° , respectivamente. Para o período de mínimo solar (7.8) observa-se que nos dois primeiros dias praticamente não foi medido S4 acima de 0.3, enquanto que no dia 27 de outubro 2010 encontramos valores medidos até 0.6. No painel da direita observamos uns picos (para este mesmo dia) em 35° , 50° e 68° . Isto possivelmente devido a uma subestimação do S4 modelado.

Finalmente, está mostrado que a constante de radar ficou mais adequada no valor $1.4 \times 10^{11} [1/km^3]$. A seguir será feita a análise dia a dia (entre máximo e mínimo solar) e quando necessário serão mostrados os satélites PRN em mais detalhe. Na Tabela 7.9 apresentamos a análise feita para o dia 16 de novembro 2001, onde no painel da esquerda apresentam-se gráficos polares elevação-azimute mostrando a posição e a identificação (PRN) de cada satélite GPS sobre a visão do receptor. Cada um destes gráficos polares está separado de hora em hora, começando em 18-19 hora local e vai até 23-00 hora local. Veja-se a linha de campo magnético (linha preta cruzando a figura polar) que passa sobre São Luís, e as linhas vermelhas paralelas representam o caminho a ser feito pela pluma de radar a qual mapeia-se ao longo das linhas de campo magnético. As irregularidades ionosféricas são geradas no equador magnético após o horário do pôr-do-Sol com grande desenvolvimento vertical (veja as plumas) e após alcançarem as linhas de campo magnéticas mais altas elas mapeiam-se e possuem um movimento de deriva oeste-leste. Em presença

de uma tempestade magnética estas irregularidades podem ter deriva zonal para oeste antes de inverter para leste, que não foi observado neste estudo, pois os dias analisados são relativamente calmos.

Nesta tabela observa-se também no painel superior central, a pluma de radar desenvolvida a partir das 19 LT até umas 22 LT e no gráfico no lado direito estão os valores S4 medidos e calculados, e cada número (em preto) sobre as curvas significa o número PRN do satélite correspondente àquela curva. No painel inferior, que está dividido numa matriz 3×2 mostram-se em detalhe os dados de dois satélites (PRN 11 e 20) em função do tempo (LT) e ângulo de elevação. A escolha destes satélites foi feita porque no gráfico polar 19-20 LT vemos que estes satélites começam a sofrer cintilação bem na hora do aparecimento da pluma de radar, enquanto os outros satélites estão mais afastados e em outras elevações sem observar o evento. A razão $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação para os satélites PRN 11 (à esquerda) e 20 (à direita) mostram que esta razão oscila ao redor da unidade enquanto o ângulo de elevação aumenta, o que significa que o modelo reproduziu muito bem o S4 medido pelo receptor GPS para este evento. Mesmo os valores dos índices S4 inferiores a 0.4 o gráfico de $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação apresentam um bom resultado. No painel inferior da Tabela 7.9 analisamos o dia 06 outubro 2002. A pluma de radar começa ao redor das 20 LT e a partir do gráfico polar foram escolhidos os satélites PRN 2 e 22 que irão acompanhá-la. A razão $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação encontra-se oscilando entre 0 e 2 unidades, em alguns momentos o S4 calculado é maior que o S4 medido e outras vezes o oposto acontece. Mas os satélites desaparecem rápido da máscara aplicada (30°) e a pluma medida do radar teve uma duração muito curta (só até as 21 LT).

Na Tabela 7.10 analisaremos os dias 05 de dezembro 2002 (gráficos do painel superior) e dia 27 de outubro 2010 (gráficos do painel inferior). No evento do dia 05 de dezembro 2002 foram os satélites PRN 13 e 20 que acompanharam a estrutura observada no radar mas os valores modelados não foram os adequados. No evento do dia 27 de outubro 2010, foram os três satélites PRN 17, 4 e 2 que passaram dentro da estrutura observada no radar. O satélite 17 apresenta grande cintilação (alcança 0.6 unidades) mas o S4 modelado não conseguiu acompanhar a cintilação observada, e o S4 medido ficou bem acima do calculado. No caso do satélite PRN 4 o S4 calculado (modelo), embora não apresentasse as oscilações experimentadas pelo S4 medido, acompanha bem os valores do S4 medido, conseqüentemente a razão $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação fica oscilando próximo da unidade.

Na Tabela 7.11 apresentam-se os eventos 09 outubro 2008 (figuras do painel superior) e 03 de dezembro 2008 (figuras do painel inferior) para baixa atividade solar, mas nesta metodologia adotada para observar exatamente os satélites que passam dentro da estrutura observada pelo radar, não teve ocorrência de satélites passando dentro das bolhas de plasma. Mas observa-se que os valores S4 calculados ficam superestimados após as 22 horas local (depois da formação da pluma), e durante a pluma elas estão bem acima dos S4 medidos.

As divergências aqui encontradas devem ser ajustadas em função de um estudo mais detalhado das componentes da equação 7.10. Segundo RODRIGUES et al. (2008) o radar VHF de São Luís sofreu alterações entre 2001 a 2010 com o aumento do número de receptores e antenas, conseqüentemente houve uma variação dos parâmetros da primeira componente da equação 7.10 (termos dentro da primeira raiz), e cujo ajuste não foi possível de se fazer para este trabalho. Outra possibilidade são os parâmetros da segunda raiz da equação 7.10 que referem-se aos parâmetros espectrais correspondentes a cada irregularidade, mas que neste trabalho, devido à falta de passagens do C/NOFS sobre São Luís, foram considerados constantes para todos os casos e foram determinados apenas a partir dos parâmetros espectrais da pluma de radar observada no dia 02 de dezembro 2008. Maiores esforços devem ser feitos para que estes parâmetros sejam adequados para cada dia em análise.

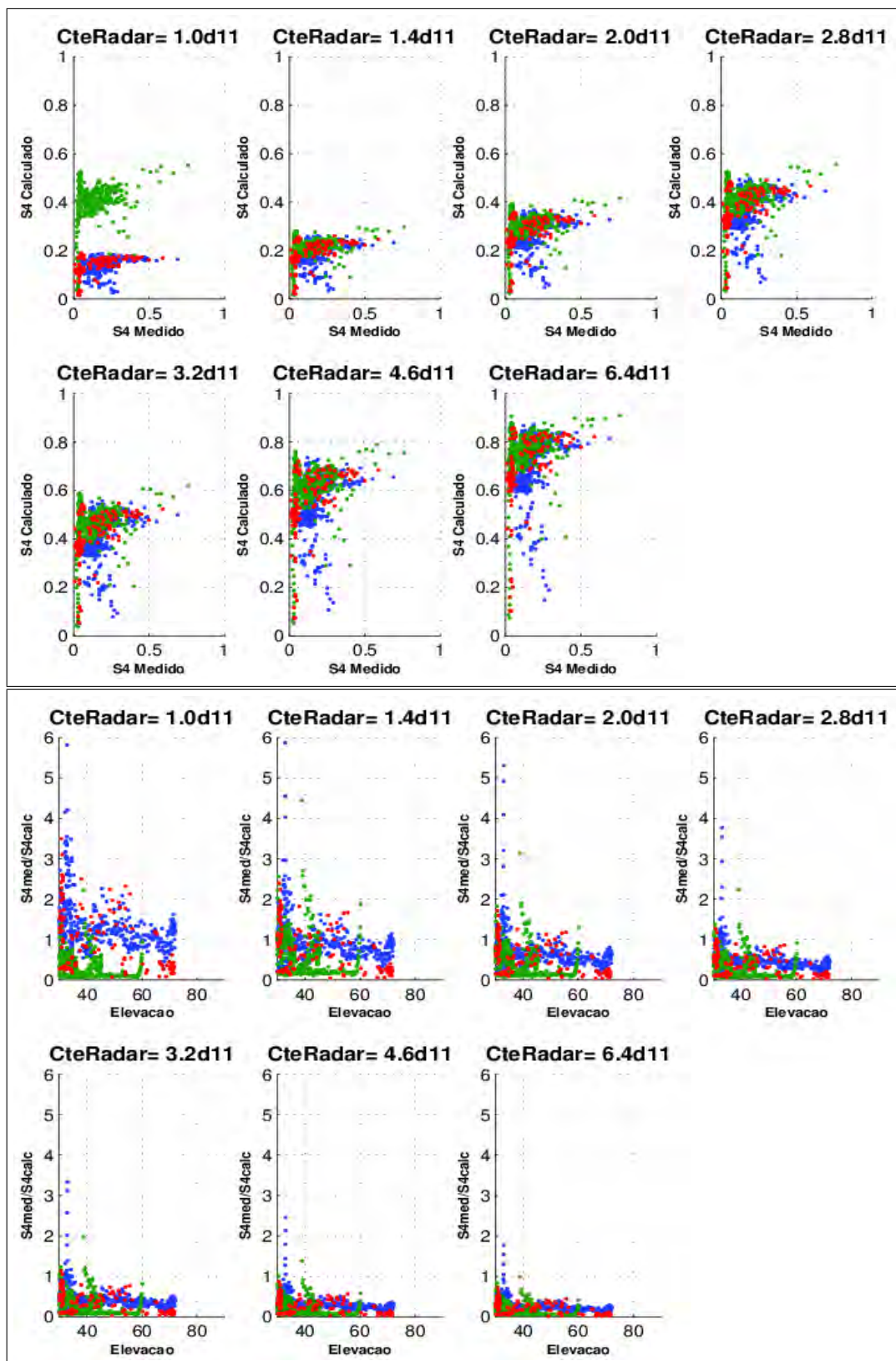


Figura 7.5 - Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel superior) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel inferior), para o período de Solar Máximo. As cores vermelho, azul e verde representam os dias 16 de novembro 2001, 06 de outubro 2002, e 05 de dezembro 2002, respectivamente.

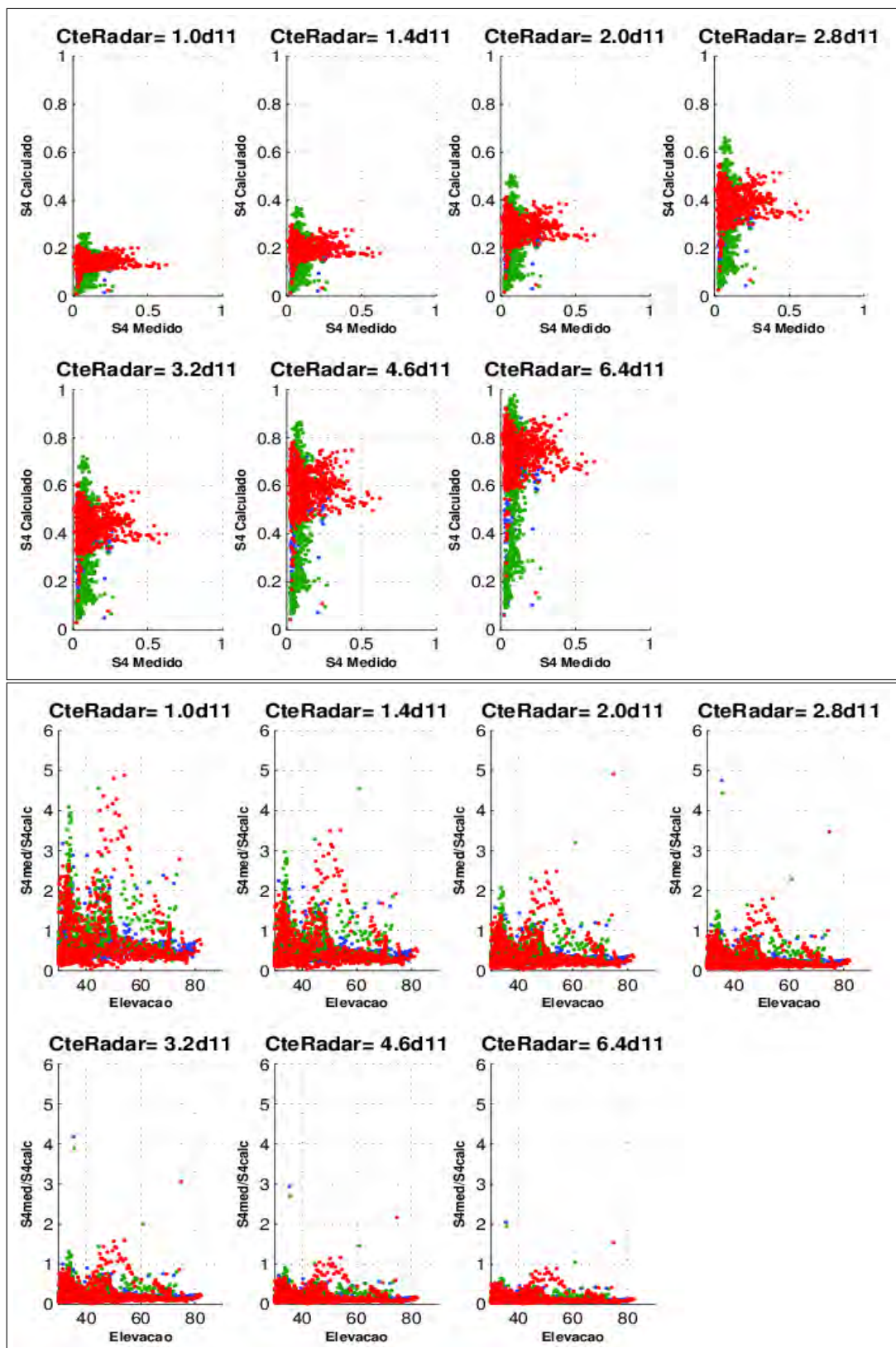


Figura 7.6 - Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel superior) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel inferior), para o período de Solar Mínimo. As cores vermelho, azul e verde representam os dias 09 outubro 2008, 03 dezembro 2008 e 27 outubro 2010, respectivamente.

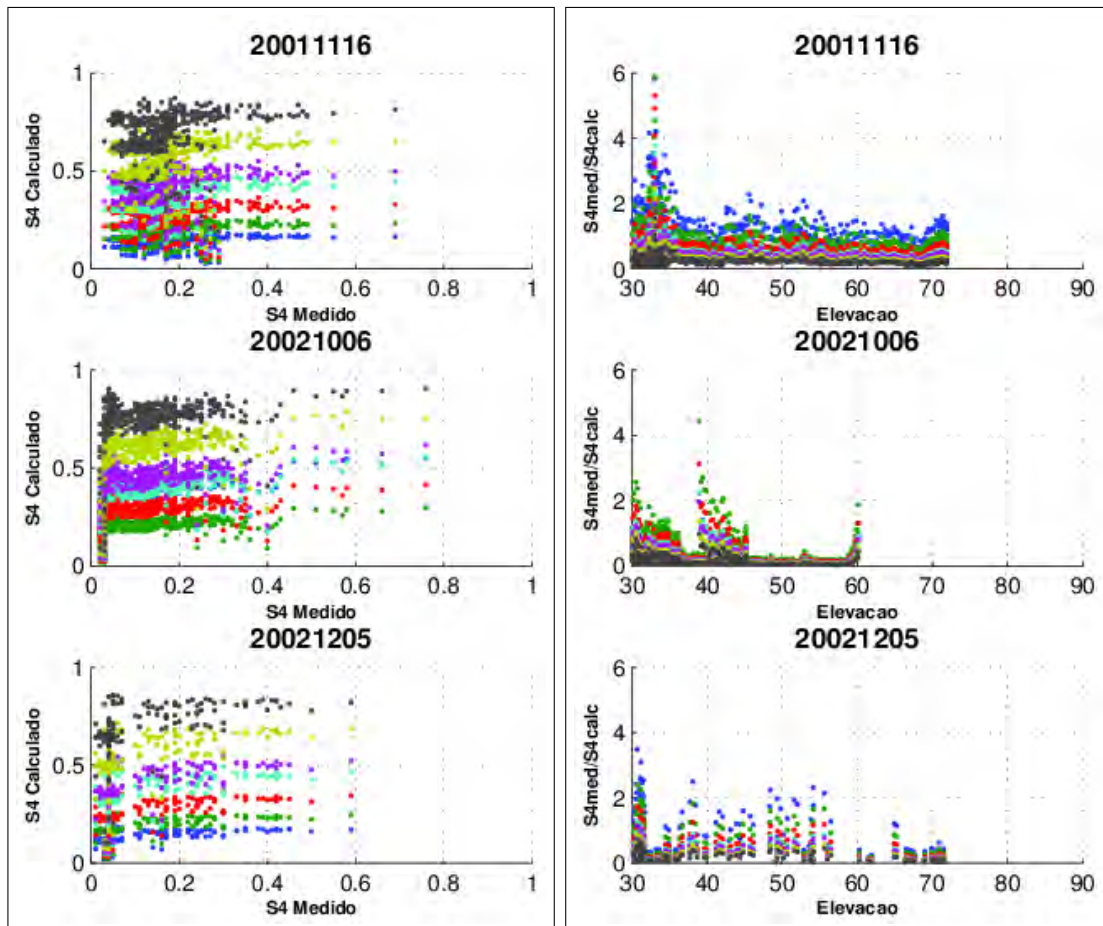


Figura 7.7 - Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel da esquerda) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel da direita), para o período de Solar Máximo. O código de cores representa, de baixo pra cima, o valor da constante de radar de menor para maior valor.

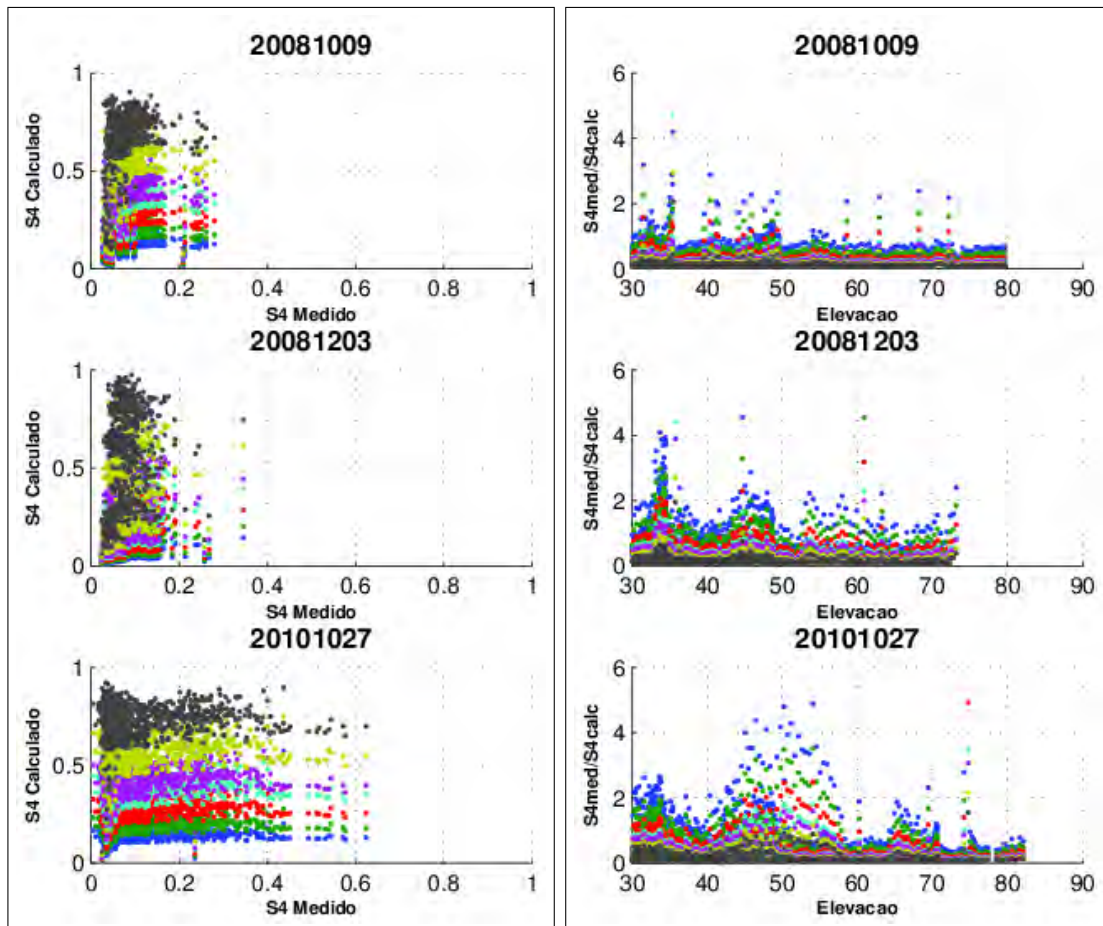


Figura 7.8 - Apresentam-se gráficos de S4 calculado em função do S4 medido (painel da esquerda) e $S4_{med}/S4_{calc}$ em função do ângulo de elevação (painel da direita), para o período de Solar Mínimo. O código de cores representa, de baixo pra cima, o valor da constante de radar de menor para maior valor.

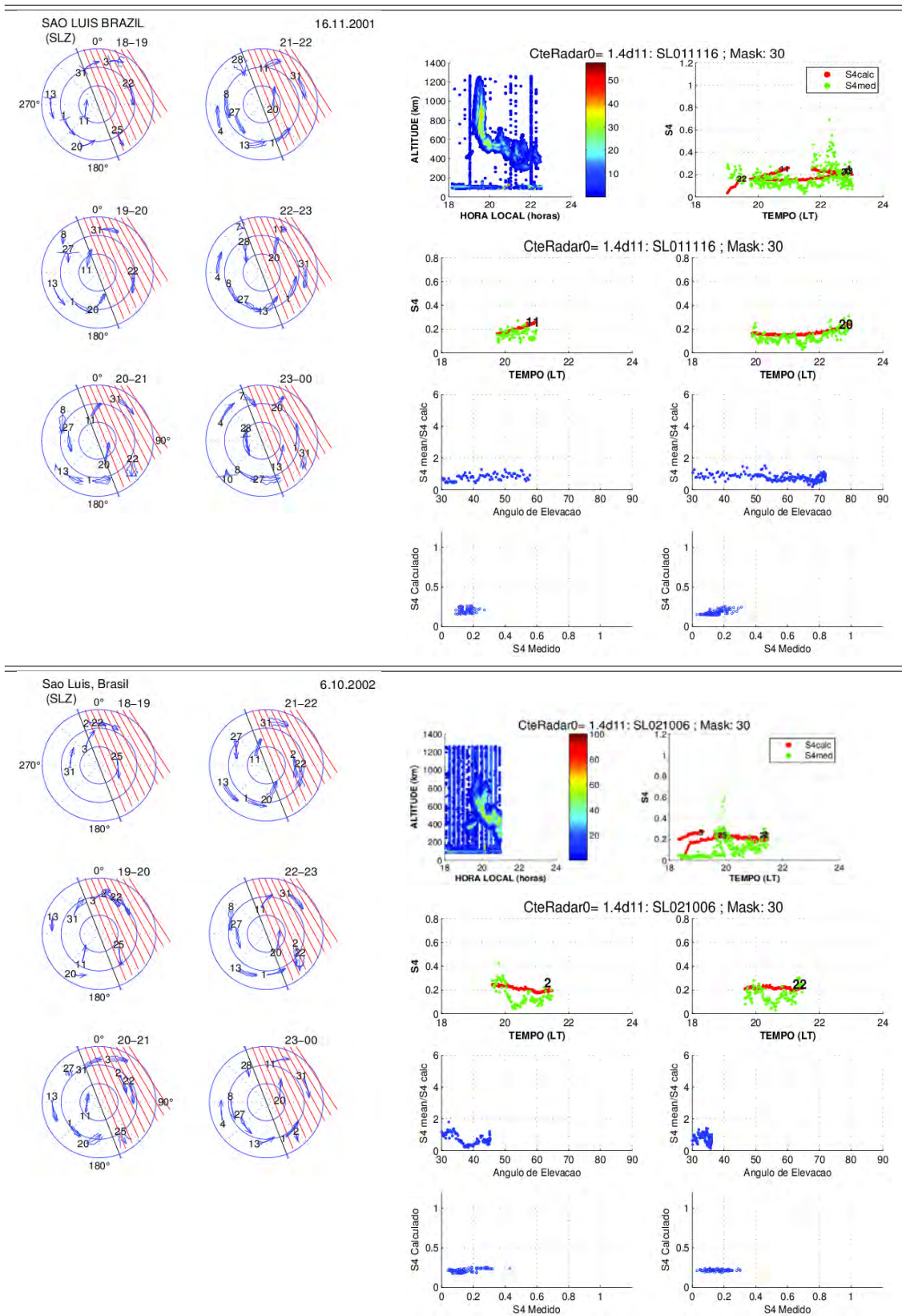


Figura 7.9 - Análise para os dias 16/11/2001 (painel superior) e 06/10/2002 (painel inferior). À esquerda observam-se os gráficos polares-horários com as posições/identificações de cada satélite. À direita superior, o radar VHF de São Luís e dados S4 medidos/calculados em função do tempo. Nos gráficos da direita inferior, os satélites que seguiram a irregularidade observada no radar.

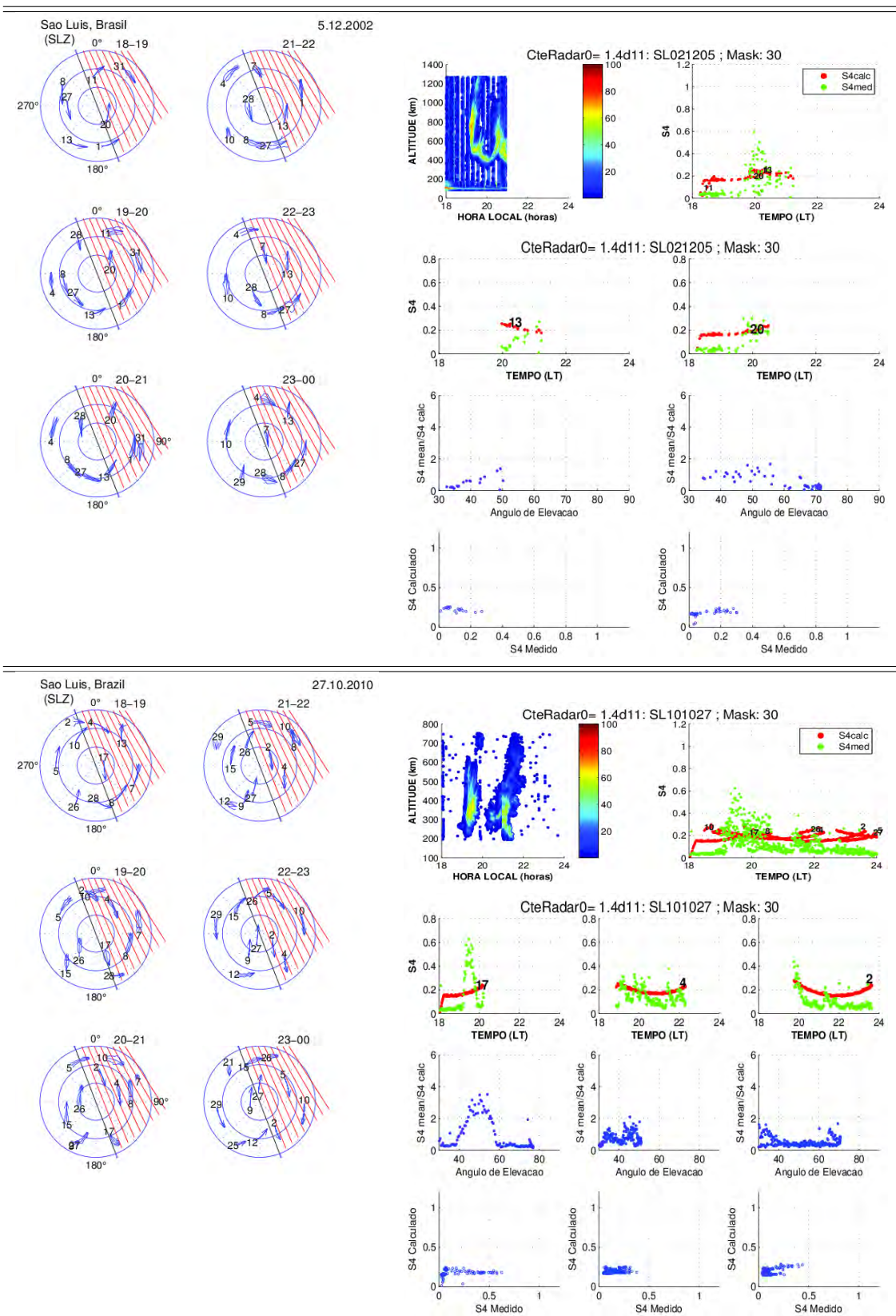


Figura 7.10 - Análise para os dias 05 de dezembro 2002 (painel superior) e 27 outubro 2010 (painel inferior). Análise similar à figura anterior.

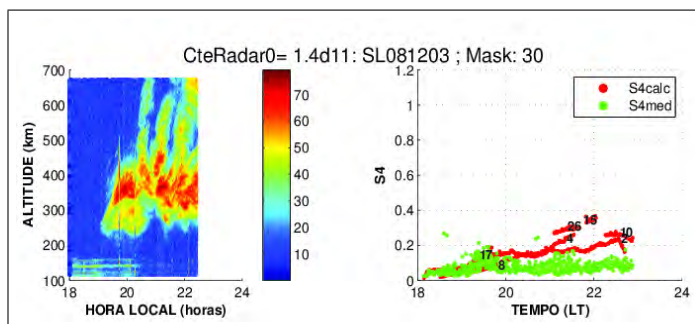
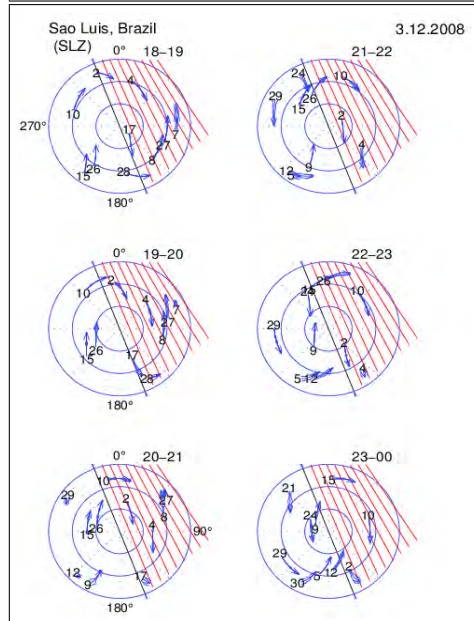
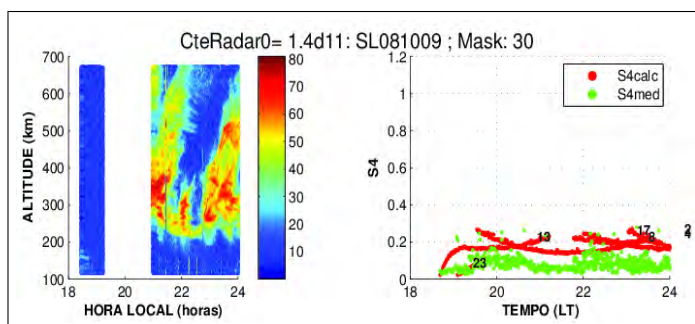
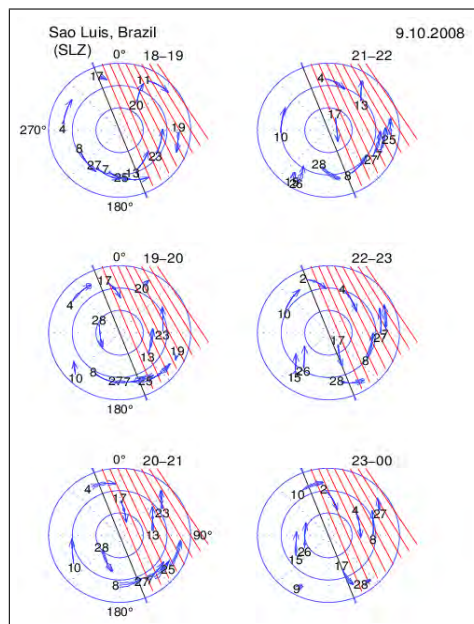


Figura 7.11 - Análise para os dias 09 de outubro 2008 (painel superior) e 03 dezembro 2008 (painel inferior). À esquerda observam-se os gráficos polares com as posições e identificações para cada satélite GPS, de hora em hora. À direita, o gráfico RTI do radar VHF de São Luís juntamente com dados S4 medidos e calculados em função do tempo local.

8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusões

Os objetivos propostos no começo deste trabalho foram cumpridos, e as conclusões dos resultados alcançados estão resumidos a seguir:

8.1.1 Parâmetros de radar

Foi encontrada a correlação linear dos parâmetros de radar nas três estações, em função do fluxo solar, para as três estações equatoriais (SLZ, ROJ, CXI) e todas as estações do ano (equinócio, solstício nov-fev e mai-ago). Os parâmetros H_i , H_p e H_{pk} mostraram um incremento quando o fluxo solar aumenta. Os parâmetros T_i e T_p decrescem quando o fluxo solar cresce.

Foi observado que, para valores maiores que 180 unidades do fluxo solar para equinócio e 200 unidades para o solstício de nov-fev, existe uma saturação aparente nas alturas de início e pico das plumas. Isto provavelmente ocorre porque o plasma contido na pluma (baixa densidade), se deslocando rapidamente e alcançando altitudes (região sem colisões) bem altas, encontra um grande gradiente negativo de densidade de plasma ambiente local. Em consequência seu crescimento vertical se desaceleraria e se recombinaria com o meio local. Além do mais, foi observado que, quando H_i alcança um limiar em torno de 300 km, o parâmetro H_p pode alcançar alturas maiores que 400 km, e a altura de pico da pluma H_{pk} pode ser maior que 800 km. Estas conclusões não são regras para todas as condições.

Estas contribuições sobre a evolução em tempo e altitude das bolhas de plasma (controladas pelas condições do ambiente ionosférico) em função da longitude e sazonalidade podem ser úteis para se compreender a evolução e estruturação do ESF e também para o planejamento de órbitas de satélite (como o C/NOFS).

A ocorrência dos ecos de radar são distribuídos temporalmente desde o pôr-do-Sol até o período noturno (após meia noite) principalmente em CXI. Já em ROJ, esta distribuição temporal é menor. A ocorrência dos ecos em SLZ está confinada a intervalo de apenas duas horas (19.5 LT a 20.5 LT). Existem mais eventos com ampla distribuição temporal durante o período de mínimo solar comparado com o

período de máximo solar.

8.1.2 Ocorrência Longitudinal do Spread F

Eventos TECds foram principalmente encontrados em dias quando o PRE esteve presente, o que favoreceu a geração de bolhas durante o período do equinócio de outubro em Jicamarca e durante o equinócio de outubro e solstício de verão em São Luís. Eventos analisados mostram que TECds aparentam ocorrer independentemente do PRE. Resultados da variação longitudinal do PRE e do TECd estão em concordância com o comportamento geral da ocorrência de irregularidades nas costas oeste e leste de América do Sul. Durante o período aqui estudado, foi observada a ocorrência de eventos com a presença de NP-TEC o que aconteceu, principalmente, durante setembro-outubro e janeiro em Jicamarca e de outubro a janeiro em São Luís. Como, durante condições de mínimo solar, a camada F está relativamente em baixa altitude, as perturbações tipo onda verticalmente propagantes, que podem alcançar a parte baixa da região F, e contribuem à instabilidade RT e seus processos de cascata. Estas perturbações podem ser originadas por ondas de gravidade (GW) ou LSWS, servindo como mecanismo gerador/precursor do spread F equatorial.

Eventos com características NP-TEC nos levam a perseguir a idéia de GW ou LSWS como mecanismos geradores/precusores do SF. Este trabalho nos traz duas evidências de spread F semeado por estruturas tipo onda no dia 323, 2009 como um evento NP-TEC. A estrutura geradora tipo onda teve um período de 30 minutos, que é típico de ondas de gravidade em cada um dos valores corrigidos de VTEC dos PRNs (satélites), e precederam o início da pluma por 1.5 hora/1 hora. Tal intervalo de tempo desde o aparecimento da estrutura tipo onda até o desenvolvimento da pluma nos permite melhorar modelos de previsão de irregularidades ionosféricas.

Um evento P-TEC foi também apresentado, mostrando que, depois do pôr-do-Sol, houve uma grande decréscimo na velocidade de deriva vertical (de até 20 m/s), o qual provavelmente inibiu a ocorrência do SF. A presença do precursor GW foi confirmada nos dados do imageador all-sky OI 630 nm como uma estrutura de depleção periódica às 20:45 LT, que posteriormente desenvolveu-se em bolhas de plasma.

8.1.3 Modelo de Irregularidades

O modelo aqui estudado foi atualizado desde sua versão em Costa et al. (2011), com o mapeamento ao equador magnético das estruturas observadas no radar VHF de São Luís. O valor da constante de radar foi variada em função do ajuste da constante de radar fixa dada pela instrumentação própria do radar (que não é facilmente variável), sendo obtido o melhor valor para os dias aqui estudados como $CteRdar0 = 1.4 \times 10^{11} [1/km^3]$, tanto para máximo como para mínimo solar.

Uma grande diferença entre máximo e mínimo solar é encontrada principalmente na intensidade da cintilação, segundo o aqui observado, e foi desenvolvida uma metodologia para analisar a cintilação nos percursos de cada satélite que atravessam as irregularidades, sendo assim mais simples analisar o índice S4 calculado pelo modelo em função do S4 medido pelo receptor, considerando o horário e ângulo de elevação.

8.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Segundo foi observado no capítulo 5, o número de anos usados para analisar os parâmetros de radar foram bastante reduzidos no caso de Christmas Island, o qual deve ser aumentado para melhorar a estatística aqui apresentada. Do mesmo modo os dados para Jicamarca e São Luís devem abranger mais um período de máximo solar (atualmente em progresso) para provar a existência da tendência de saturação em função do fluxo solar. Maiores esforços serão feitos para o desenvolvimento do modelo de tempo e altura dos parâmetros de radar para que seja útil como entrada em modelos de previsão de spread F. Estes esforços deverão ser focados na implementação de mais parâmetros, como o tempo do pico da primeira pluma, número de plumas secundárias, tempo e altura alcançada por essas plumas secundárias, tudo isto em função da sazonalidade, fluxo solar, e declinação magnética.

No capítulo 6, observamos a variação longitudinal do spread F durante o período de setembro a dezembro de 2009, e janeiro de 2010, e no final desse capítulo foram apresentados resultados do mesmo trabalho para o ano 2008 (no mesmo período). Seria interessante acrescentar mais meses ao estudo, como janeiro a março por serem períodos de alta atividade de spread F na América do Sul, assim como utilizar mais anos de observação. Desta forma seria possível fazer o estudo longitudinal e latitudinal com os parâmetros aqui apresentados. Nesse capítulo foram apresentados dois casos com detecção do mecanismo de geração tipo onda de spread F, sendo importante ampliar este estudo e fazer a detecção para todo o período de estudo. Posteriormente, seria necessário acrescentar estes resultados às estatísticas do PRE

e ABDA.

Com respeito ao capítulo 7, precisa-se analisar um período maior de dados do radar VHF da estação de São Luís. Uma forma de obter os parâmetros espectrais adequados para cada dia é usar dados de densidade do plasma (PLP do C/NOFS ou outro satélite) de alta resolução. Durante o trabalho aqui desenvolvido viu-se a necessidade de estender a pesquisa usando dados de Jicamarca, já que um GPS da rede LISN está disponível naquele local desde o ano 2008.

Segundo RODRIGUES et al. (2008), o radar VHF de São Luís sofreu alterações entre 2001 a 2010 com o aumento do número de antenas receptoras. Conseqüentemente, houve uma variação dos parâmetros da primeira componente da equação 7.10 (termos dentro da primeira raiz), cujo ajuste não foi possível de se fazer para este trabalho. Assim mesmo, esta componente depende muito do erro associado à temperatura do céu. Não foi feito um estudo detalhado até o momento deste erro associado à temperatura do céu para o radar de São Luís. Outra possibilidade são os parâmetros da segunda raiz da equação 7.10, que referem-se aos parâmetros espectrais correspondentes a cada amostra de irregularidade. Neste trabalho, devido à falta de passagens do C/NOFS, foram usados para todos os casos os parâmetros espectrais das irregularidades observadas no dia 02 de dezembro 2008. Maiores esforços devem ser feitos para que estes parâmetros sejam adequados para cada dia analisado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AARONS, J. The longitudinal morphology of equatorial f-layer irregularities relevant to their occurrence. **Space Science Reviews**, v. 63, p. 209–243, sep 1993. 63
- ABDU, M. A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread f. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 63, p. 869–884, 2001. 2, 49
- _____. Equatorial ionosphere-thermosphere system: Electrodynamics and irregularities. **Adv. Space Res.**, v. 35, p. 771–787, 2005. 49, 75
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; KANTOR, J.; SOBRAL, J. H. A. Gravity wave induced ionization in the night f region at low latitude. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 44, p. 759–767, 1982. 59
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; MURALIKRISHNA, P.; SOBRAL, J. H. A. Long term trends in sporadic e layers and electric fields over fortaleza, brazil. **Geophysical Research Letters**, v. 23, p. 757–760, 1996. 19
- ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. A new aspect of magnetic declination control of equatorial spread f and f region dynamo. **J. Geophys. Res.**, v. 97, n. A10, p. 897–904, 1992. 29, 76
- ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A.; BATISTA, I. S. Magnetic declination control of the equatorial f region dynamo electric field development and spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 86, n. A13, p. 443–446, 1981. 29, 76
- ABDU, M. A.; DE MEDEIROS, R. T.; BITTENCOURT, J. A.; BATISTA, I. S. Vertical ionization drift velocities and range type spread f in the evening equatorial ionosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 88, n. A1, p. 399402, 1983. 49, 76
- ABDU, M. A.; DENARDINI, C. M.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I. S.; MURALIKRISHNA, P.; IYER, K. N.; VELIZ, O.; DE PAULA, E. R. Equatorial electrojet 3-m irregularity dynamics during magnetic disturbances over brazil: Results from the new vhf radar at são luís. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 65, p. 1293–1308, 2003. 19
- ABDU, M. A.; KHERANI, E.; BATISTA, I.; DE PAULA, E.; FRITTS, D.; SOBRAL, J. Gravity wave initiation of equatorial spread f/plasma bubble

- irregularities based on observational data from spreadfex campaign. **Ann. Geophys.**, v. 27, p. 2607–2622, 2009. [75](#), [89](#), [90](#), [99](#), [101](#)
- ABDU, M. A.; SOBRAL, J. H. A.; BATISTA, I. S.; RIOS, V.; MEDINA, C. Equatorial spread f occurrence statistics in the american longitudes: Diurnal, seasonal and solar cycle variations. **Adv. Space Res.**, v. 22, n. 6, p. 851–854, 1998. [18](#)
- ANDERSON, D. N. Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis. **GPS Solutions**, v. 7, p. 200–202, 2003. [19](#)
- ANDERSON, D. N.; REINISCH, B.; VALLADARES, C.; CHAU, J.; VELIZ, O. Forecasting the occurrence of ionospheric scintillation activity in the equatorial ionosphere on a day-to-day basis. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 1567–1572, Nov 2004. [19](#)
- ANDERSON, D. N.; RICHMOND, A. D.; BALSEY, B. B.; Roble, R. G.; BIONDI, M. A. In-situ generated gravity waves as a possible seeding mechanism for equatorial spread-f. **Geophysical Research Letters**, v. 9, p. 789–792, 1982. [32](#), [33](#)
- ARRUDA, C.; SOBRAL, J.; ABDU, M.; CASTILHO, V. M.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A.; BURITI, R. Theoretical and experimental zonal drift velocities of the ionospheric plasma bubbles over the brazilian region. **Advances in Space Research**, v. 38, p. 2610–2614, 2006. [115](#)
- BALAN, N.; BAILEY, G. J.; ABDU, M. A.; OMAVA, K. I.; RICHARDS, P. G.; McDOUGLASS, J.; BATISTA, I. S. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the f-3 layer. **J. Geophys. Res.**, v. 102, n. A2, p. 20472056, 1997. [11](#)
- BALSLEY, B. B.; HAERENDEL, G.; GREENWALD, R. A. Equatorial spread-f: Recent observations and a new interpretation. **J. Geophys. Res.**, v. 77, p. 5625–5628, 1972. [18](#)
- BASU, B. Characteristics of electromagnetic rayleigh-taylor modes in nighttime equatorial plasma. **J. Geophys. Res.**, v. 110, 2005. [32](#), [33](#)
- BASU, S.; BASU, S. Ionospheric structures and scintillation spectra. **The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA, USA.**, p. 139–153, 1993. [106](#)

BASU, S.; BASU, S.; AARONS, J.; McCLURE, J.; M.D., C. On the coexistence of kilometer-and meter-scale irregularities in the nighttime equatorial f region. **J. Geophys. Res.**, v. 83, p. 4219–4226, 1978. 2

BASU, S.; BASU, S.; MULLEN, J. P.; BUSHBY, A. Long-term 1.5 ghz amplitude scintillation measurements at the magnetic equator. **Geophys. Res. Lett.**, v. 7, p. 259–262, 1980. 58, 95

BASU, S.; DAS GUPTA, A. Latitude variation of electron content in equatorial region under magnetically quiet and active conditions. **J. Geophys. Res.**, v. 73, p. 5599–+, sep 1968. 10

BASU, S.; GROVES, K. M.; QUINN, J. M.; DOHERTY, P. A comparison of tec fluctuation and scintillation at ascension island. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 61, p. 1219–1226, 1999. 19

BASU, S.; KELLEY, M. C. A review of recent observations of equatorial scintillations and their relationship to current theories of f region irregularity generation. **Radio Science**, v. 14, p. 471–485, 1979. 25, 28

BATISTA, I. S.; ABDU, M. A.; BITTENCOURT, J. A. Equatorial f region vertical plasma drifts: Seasonal and longitudinal asymmetries in the american. **J. Geophys. Res.**, v. 91, n. A11, p. 12,055–12,064, 1986. 59, 83

BATISTA, I. S.; de MEDEIROS, R. T.; ABDU, M. A.; DE SOUZA, J. R.; BAILEY, G. J.; DE PAULA, E. R. Equatorial ionospheric vertical plasma drift model over the brazilian region. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. A5, p. 10,887–10,892, 1996. 26, 76

BATISTA, I. S.; SOUZA, J. R.; ABDU, M. A.; DE PAULA, E. Total electron content at low latitudes and its comparison with the iri90. **Advances in Space Research**, v. 14, n. 12, p. 87–90, 1994. 19

BEACH, T. L. **Global Positioning System studies of equatorial scintillations**. Tese (Doutorado) — CORNELL UNIVERSITY, October 1998. 115

BHATTACHARYYA, A.; YEH, K.; FRANKE, S. Deducing turbulence parameters from transionospheric scintillation measurements. **Space. Sci. Rev.**, v. 61, p. 335–386, 1992. 106

BÉNIGUEL, Y. Global ionospheric propagation model (gim): a propagation model for scintillations of transmitted signals. **Radio Science**, v. 37, n. 3, 2002. 107

CHAKRABARTY, D.; SEKAR, R.; NARAYAN, R.; PANT, T. K.; NIRANJAN, K. Thermospheric gravity wave modes over low and equatorial latitudes during daytime. **Journal of Geophysical Research (Space Physics)**, v. 109, p. 12309, 2004. 33

CHAPAGAIN, N.; FEJER, B.; CHAU, J. Climatology of postsunset equatorial spread f over jicamarca. **J. Geophys. Res. (Space Physics)**, v. 114, n. A13, p. 7307–+, jul 2009. 55, 62

CHAPAGAIN, N.; TAYLOR, M.; ECCLES, J. Airglow observations and modeling of f region depletion zonal velocities over christmas island. **J. Geophys. Res.**, v. 116, n. A02301, 2011. 60

CHEN, F. **Introduction to plasma physics**. [S.l.]: New York: Plenum Press, 1974, 1974. 28

CHEN, W. S.; LEE, C. C.; LIU, J. Y.; CHU, F. D.; REINISCH, B. W. Digisonde spread f and gps phase fluctuations in the equatorial ionosphere during solar maximum. **J. Geophys. Res.**, v. 111, n. A12305, 2006. 8, 76

CHU, F. D.; LIU, J. Y.; TAKAHASHI, H.; SOBRAL, J. H. A.; TAYLOR, M. J.; MEDEIROS, A. F. The climatology of ionospheric plasma bubbles and irregularities over brazil. **Annales Geophysicae**, v. 23, n. 2, p. 379–384, 2005. ISSN 0992-7689. 26

CLEMESHA, B.; BATISTA, P. Gravity waves and wind-shear in the mlt at 23s. **Advances in Space Research**, v. 41, n. 9, p. 1472–1477, 2008. 32

COSTA, E.; BASU, S. A radio wave scattering algorithm and irregularity model for scintillation prediction. **Radio Science**, v. 37, n. 3, p. 1046, 2002. x, xii, 106, 107

COSTA, E.; DE PAULA, E.; REZENDE, L.; GROVES, K.; RODDY, P.; DAO, E.; KELLEY, M. Equatorial scintillation calculations based on coherent scatter radar and c/nofs data. **Radio Science**, v. 46, n. RS2011, 2011. x, xii, xvii, 106, 108, 110, 112, 114

CUEVA, R.; VALLADARES, C.; DE PAULA, E.; etal. Seasonal, longitudinal and day-to-day variations of equatorial spread f occurrence from recent observations over south america. **J. Atm. Solar-Terr. Physics**, Submitted, 2012. 61

DASHORA, N.; PANDEY, R. Observations in equatorial anomaly region of total electron content enhancements and depletions. **Annales Geophysicae**, v. 23, p. 2449–2456, 2005. 80

DE PAULA, E.; HYSELL, D. The são luís 30 mhz coherent scatter ionospheric radar: System description and initial results. **Radio Science**, v. 39, p. 1014–+, feb 2004. 2, 21, 41, 78

DE PAULA, E. R.; IYER, K. N.; HYSELL, D. L.; RODRIGUES, F. S.; KHERANI, E. A.; JARDIM, A. C.; REZENDE, L. F. C.; DUTRA, S. G.; TRIVEDI, N. B. Multi-technique investigations of storm-time ionospheric irregularities over the são luís equatorial station in brazil. **Annales Geophysicae**, v. 22, n. 10, p. 3513–3522, 2004. 41

DE PAULA, E. R.; KHERANI, A.; CUEVA, R.; CAMARGO, L. Observations of pre-midnight 5-m irregularities in the equatorial f region over são luís. brazil: solar-flux dependence and seasonal variations. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 73, n. 11-12, 2011. 2, 41, 55, 58, 61, 92, 95

DUNGEY, J. W. Convective diffusion in the equatorial f region. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 9, p. 304–310, 1956. 25

FARLEY, D. T.; BALSEY, B. B.; WOODMAN, R. F.; McCLURE, J. P. Equatorial spread f: Implications of vhf radar observations. **J. Geophys. Res.**, v. 75, n. 34, p. 7199–7216, 1970. 1, 2, 21, 22, 25, 29, 49, 75

FARLEY, D. T.; BONELLI, E.; FEJER, B. G.; LARSEN, M. F. The prereversal enhancement of the zonal electric field in the equatorial ionosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 91, p. 13723–13728, dec 1986. 2, 16, 17, 49, 59

FEJER, B.; SCHERLISS, L.; DE PAULA, E. Effects of the vertical plasma drift velocity on the generation and evolution of equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 104, p. 19859–19870, sep 1999. 49, 51, 53, 55, 75, 77, 88

FEJER, B. G. The electrodynamics of the low latitude ionosphere: Recent results and future challenges. **J. Atmos. Sol. Terr. Phys.**, v. 59, p. 1456–1482, 1997. 75

FEJER, B. G.; FARLEY, D.; GONZALES, C.; WOODMAN, R.; CALDERON, C. F region east-west drifts at jicamarca. **Geophys. Res. Lett.**, v. 86, n. A1, p. 215–218, 1981. xiii, 15, 16

FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; WOODMAN, R. F.; CALDERON, C. Dependence of equatorial f region vertical drifts on season and solar cycle. **J. Geophys. Res.**, v. 84, n. A10, p. 5792–5796, 1979. xiii, 15, 16

FEJER, B. G.; KELLEY, M. Ionospheric irregularities. **Reviews of Geophysics and Space Physics.**, v. 18, n. 02, p. 401–454, 1980. 18, 25

FINLAY, C.; MAUS, S.; BEGGAN, C. D.; BONDAR, T. N.; CHAMBODUT, A.; CHERNOVA, T. A.; CHULLIAT, A.; GOLOVKOV, V. P.; HAMILTON, B.; HAMOUDI, M.; HOLME, R.; HULOT, G.; KUANG, W.; LANGLAIS, B.; Lesur, V.; Lowes, F. J.; Luhr H. Macmillan, S.; Manda, M.; McLean, S.; Manoj, C.; Menvielle, M.; Michaelis, I.; Olsen, N.; Rauberg, J.; Rother, M.; Sabaka, J.; Tangborn, A.; Toffner-Clausen, L.; Thebault, E.; Thomson, A. W. P.; I., W.; Wei, Z.; Zvereva, T. I. International geomagnetic reference field: the eleventh generation. international association of geomagnetism and aeronomy, working group v-mod. **Geophys. J. Int.**, v. 183, p. 1216–1230, 2010. 113

FORBES, J. Equatorial electrojet. **Reviews of geophysics and space physics**, v. 19, n. 3, p. 469–504, 1981. 10, 14

FRITTS, D.; VADAS, S.; RIGGIN, D.; ABDU, M.; BATISTA, I.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A.; KAMALABADI, F.; LIU, H.-L.; FEJER, B.; TAYLOR, M. Gravity wave and tidal influences on equatorial spread f based on observations during the spread f experiment (spreadfex). **Ann. Geophys.**, v. 26, p. 3235–3252, 2008. 99, 101

GENTILE, L. C.; BURKE, W. J.; RICH, F. J. A global climatology for equatorial plasma bubbles in the topside ionosphere. **Annales Geophysicae**, v. 24, n. 1, p. 163–172, 2006. ISSN 0992-7689. 18, 26

GRIMAUULT, C. A multiple phase screen technique for electromagnetic wave propagation through random ionospheric irregularities. **Radio Science**, v. 33, n. 3, p. 595–605, 1998. xvii, 107, 108

HAERENDEL, G. Theory of equatorial spread-f. **Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik**, 1974. 18

HAERENDEL, G.; ECCLES, J.; Çakir, S. Theory for modeling the equatorial evening ionosphere and the origin of the shear in the horizontal plasma flow. **J. Geophys. Res.**, v. 97, n. A2, p. 1209–1223, 1992. 30, 49, 75

HANSON, W. B.; Moffett, R. J. Ionization transport effects in the equatorial f region. **J. Geophys. Res.**, v. 71, p. 5559–+, dec 1966. 10

HARGREAVES, J. **The Solar-Terrestrial Environment: An Introduction to Geospace - the Science of the Terrestrial Upper Atmosphere, Ionosphere, and Magnetosphere**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 8

- HEELIS, R. Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere: a tutorial. **Journal Atmos. and Solar Terr. Physics.**, v. 66, n. 825-838, 2004. 14
- HEELIS, R. A.; Kendall, P. C.; Moffett, R. J.; Windle, D. W.; RISHBETH, H. Electrical coupling of the e- and f-regions and its effect on f-region drifts and winds. **Planetary and Space Science**, v. 22, n. 5, p. 743-756, May 1974. 11, 13, 23
- HUANG, C.; KELLEY, M. C. Nonlinear evolution of equatorial spread f 1. on the role of plasma instabilities and spatial resonance associated with gravity wave seeding. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. A1, p. 283-292, 1996. 32, 33, 53, 101
- HUANG, C.-S.; KELLEY, M.; HYSELL, D. Nonlinear rayleigh-taylor instabilities, atmospheric gravity waves and equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 98, n. A9, p. 15631-15642, 1993. 32, 33
- HUANG, X.; REINISCH, B. Vertical total electron content from ionograms in real time. **Radio Science**, v. 36, n. 2, p. 335-342, 2001. 37
- HYSELL, D. L. A review and synthesis of plasma irregularities in equatorial spread f. **J. Atmos. and Terr. Phys.**, v. 62, n. 12, p. 1037-1056, 2000. 2, 50
- HYSELL, D. L.; BURCHAM, J. D. Julia radar studies of equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 103, n. 29, p. 155-167, 1998. 2, 18, 49, 50, 92
- _____. Long term studies of equatorial spread f using the julia radar at jicamarca. **J. Atmos. and Terr. Phys.**, v. 64, p. 1531-1543, aug 2002. 50, 55, 63
- HYSELL, D. L.; FARLEY, D. T. Implications of the small aspect angles of equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. A3, p. 5165-5176, 1996. 50
- HYSELL, D. L.; KELLEY, M. C.; SWARTZ, W. E.; WOODMAN, R. F. Seeding and layering of equatorial spread f by gravity waves. **J. Geophys. Res.**, v. 95, p. 17253-17260, 1990. 32, 33, 75
- HYSELL, D. L.; KELLEY, M. C.; SWARTZ, W. E.; FARLEY, D. Vhf radar and rocket observations of equatorial spread f on kwajalein. **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. A8, p. 15065-15085, 1994. 23
- ISHIMARU, A. Wave propagation and scattering in random media. **IEEE Press-Oxford Univ. Press Classic Reissue, NY.**, 1997. 110
- JAYACHANDRA, B.; BALAN, N.; RAO, P.; SASTRI, J.; BAILEY, G. Hf doppler and ionosonde observations on the onset conditions of equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 98, n. A8, p. 13741-13750, 1993. 22, 49

KELLEY, M.; AL et. The condor equatorial spread f campaign: Overview and result of the large-scale measurements. **J. Geophys. Res.**, v. 91, n. A5, 1986. 51

KELLEY, M. C. **The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics**. [S.l.]: Academic Press, San Diego, CA, 1989. xiii, 2, 14, 15, 18, 26, 27, 28, 31

_____. In situ ionospheric observations of severe weather-related gravity waves and associated small-scale plasma structure. **Journal of Geophysical Research A: Space Physics**, v. 102, n. A1, p. 329–335, 1997. 33

KELLEY, M. C.; FEJER, B. G.; GONZALES, C. A. An explanation for anomalous ionospheric electric fields associated with a northward turning of the interplanetary magnetic field. **Geophys. Res. Lett.**, v. 6, p. 301–304, 1979. 8

KELLEY, M. C.; LARSEN, M. F.; LA HOZ, C.; McCLURE, J. P. Gravity wave initiation of equatorial spread f: A case study. **J. Geophys. Res.**, v. 86, n. A11, p. 9087–9100, 1981. 22, 32, 33, 75

KELLEY, M. C.; McCLUREM, J. P. Equatorial spread-f: recent results and outstanding problems. **J Atmos.Terr. Phys.**, v. 43, p. 427–435, 1981. 28

KESKINEN; AL. et. Three-dimensional nonlinear evolution of equatorial ionospheric bubbles with gravity waves seeding and tidal wind effects. **Geophys. Res. Lett.**, v. 36, n. L12102, 2009. 75

KHERANI, E.; ABDU, M.; DE PAULA, E.; FRITTS, D.; SOBRAL, J.; DE MENESES JR., F. The impact of gravity waves rising from convection in the lower atmosphere on the generation and nonlinear evolution of equatorial bubble. **Annales Geophysicae**, v. 27, p. 1657–1668, 2009. 75

KHERANI, E.; DE PAULA, E.; CUEVA, R.; CAMARGO, L. Observations of nighttime equatorial-upper-e-valley region irregular structures from são luís radar and their occurrence statistics: A manifestation of vertical coupling between e and f regions,. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 64-70, n. 75-76, 2012. 61

KNEPP, D. Multiple phase-screen calculation of the temporal behaviour of stochastic waves. **Proc. IEEE**, v. 71, n. 722-737, 1983. 107

KRISHNAMURTHY, B. V. Behavior of topside and bottomside spread f at equatorial latitudes. **Journal of Geophysical Research**, v. 71, p. 4527–4533, 1966. 21

- KUDEKI, E.; AKGIRAYA, A.; MILLA, M.; CHAU, J.; HYSELL, D. Equatorial spread-f initiation: Post-sunset vortex, thermospheric winds, gravity waves. **J. Atmos. Solar-Terr. Phys.**, v. 69, n. 2416-2427, 2007. 49
- KUDEKI, E.; BHATTACHARYYA. Postsunset vortex in equatorial f-region plasma drifts and implications for bottomside spread-f. **J. Geophys. Res.**, v. 28, n. 163-170, 1999. 23
- KUDEKI, E.; BHATTACHARYYA, S. Postsunset vortex in equatorial f-region plasma drifts and implications for bottomside spread-f. **J. Geophys. Res.**, v. 104, n. A12, 1999. ISSN 0148-0227. 41
- KUDEKI, E.; FEJER, B.; FARLEY, D.; IERKIC, H. Interferometer studies of equatorial f-region irregularities and drifts. **Geophys. Res. Lett.**, v. 8, n. LM779, p. 377–380, 1983. ISSN 0094-8277. 13
- KUDEKI, E.; FEJER, B. G.; FARLEY, D. T.; IERKIC, H. M. Interferometers studies of equatorial f-region irregularities and drifts. **Geophys. Res. Lett.**, v. 8, n. 377, 1981. 23
- KUTTLER, J.; DOCKERY, G. Theoretical description of the parabolic approximation/fourier split-step method of representing electromagnetic propagation in the troposphere. **Radio Science**, v. 26, p. 381–393, 1991. 112
- MAKELA, J.; LEDVINA, B.; KELLEY, M.; KINTNER, P. Analysis of the seasonal variations of equatorial plasma bubble occurrence observed from haleakala, hawaii. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 3109–3121, sep 2004. 57
- MAKELA, J. J.; KELLEY, M. C.; TSUNODA, R. T. Observations of midlatitude ionospheric instabilities generating meter-scale waves at the magnetic equator. **J. Geophys. Res. (Space Physics)**, v. 114, n. A13, p. 1307–+, jan 2009. 42
- MARUYAMA, T.; MATUURA, N. Longitudinal variability of annual changes in activity of equatorial spread f and plasma bubbles. **J. Geophys. Res.**, v. 89, n. A12, p. 10,903–10,912, 1984. 29, 95
- MEDEIROS, A. F. **Observações de onda de gravidade através do imageamento da aeroluminiscência**. Tese (Doutorado) — INPE, 2001. 32
- MEDEIROS, A. F.; BURITI, R. A.; MACHADO, E. A.; TAKAHASHI, H.; BATISTA, P. P.; GOBBI, D.; TAYLOR, M. J. Comparison of gravity wave activity observed by airglow imaging at two different latitudes in brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 66, p. 647–454, 2004. 32

- MENDILLO, M.; BAUMGARDNER, J.; PI, X.; SULTAN, P. J.; TSUNODA, R. Onset conditions for equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 97, n. A9, p. 13,865–13,876, 1992. 53
- MENDILLO, M.; MERIWETHER, J.; BIONDI, M. Testing the thermospheric neutral wind suppression mechanism for day-to-day variability of equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 106, n. A3, p. 3655–3663, 2001. 30
- MILLER, E.; MAKELA, J.; GROVES, K.; KELLEY, M.; TSUNODA, R. Coordinated study of coherent radar backscatter and optical airglow depletions in the central pacific. **J. Geophys. Res.**, v. 115, p. A06307, 2010. 42, 61, 70, 73
- MILLER, E.; MAKELA, J.; KELLEY, M. Seeding of equatorial plasma depletions by polarization electric fields from middle latitudes: Experimental evidence. **J. Geophys. Res.**, v. 36, 2009. 42
- MUELLA, M.; DE PAULA, E.; KANTOR, I.; BATISTA, I.; SOBRAL, J.; ABDU, M.; KINTNER, P.; GROVES, K.; SMORIGO, P. Gps l-band scintillations and ionospheric irregularity zonal drifts inferred at equatorial and low-latitude regions. **J. Atmos. and Solar Terr. Physics**, v. 70, p. 1261–1272, 2008. 18, 75
- MUELLA, M.; DE PAULA, E.; KANTOR, I.; REZENDE, L.; SMORIGO, P. Occurrence and zonal drift of small-scale ionospheric irregularities over an equatorial station during solar maximum - magnetic quiet and disturbed conditions. **Advances in Space Research**, v. 43, p. 1957–1973, 2009. 85
- MUELLA, M. T. A. H. **Morfologia e dinâmica das irregularidades ionosféricas de pequena escala e imageamento ionosférico por GPS**. Tese (Doutorado) — INPE, São José dos Campos, 2008. 25, 29
- NARAYANAN, V. L.; AL. et. On the importance of wave-like structures in the occurrence of equatorial plasma bubbles: A case study. **J. Geophys. Res.**, v. 117, n. A01306, 2012. 75
- NOGUEIRA, P.; ABDU, M.; BATISTA, I.; DE SIQUEIRA, P. Equatorial ionization anomaly and thermospheric meridional winds during two major storms over brazilian low latitudes. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 73, p. 1535–1543, 2011. 88
- OSSAKOW, S. Spread-F theories: a review. **J. Atmos. and Terr. Phys.**, v. 43, n. 5-6, p. 437–452, 1981. 18, 25, 28, 30, 49, 51

OSSAKOW, S. L.; ZALESK, S. T.; McDONALD, B. E.; CHATURVEDI, P. K. Nonlinear equatorial spread f: Dependence on altitude of the f peak and bottomside background electron density gradient scale length. **J. Geophys. Res.**, v. 84, n. A1, p. 17–29., 1979. 28, 29

OTT, E. Theory of rayleigh-taylor bubbles in the equatorial ionosphere. **J. Geophys. Res.**, v. 83, n. A5, 1978. 22, 25

PATRA, A. K.; TIWARI, D.; SRIPATHI, S.; RAO, P. B.; SRIDHARAN, R.; DEVASIA, C. V.; VISWANATHAN, K. S.; SUBBARAO, V.; SEKAR, R.; KHERANI, E. A. Simultaneous radar observations of meter-scale f region irregularities at and off the magnetic equator over india. **J. Geophys. Res.**, v. 110, n. A02307, 2005. 21

PIMENTA, A. A.; BITTENCOURT, J. A.; FAGUNDES, P. R.; SAHAI, Y.; BURITI, R. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J. Ionospheric plasma bubble zonal drifts over the tropical region: A study using oi 630 nm emission all-sky images. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 65, n. 10, p. 1117–1126, 2003. 26

RAGHAVARAO, R.; SEKAR, R.; SUHASINI, R. Nonlinear numerical simulation of equatorial spread-f: Effects of winds and electric fields. **Advances in Space Research**, v. 12, n. 6, p. 227 – 230, 1992. ISSN 0273-1177. 51

RAGHAVARAO, R.; SUHASINI, R.; MAYR, H.; HOEGY, W.; WHARTON, L. Equatorial spread-f (esf) and vertical winds. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 61, n. 8, p. 607 – 617, 1999. ISSN 1364-6826. 53

REINISCH, B. W.; ABDU, M.; BATISTA, I.; SALES, G. S.; KHMYROV, G.; BULLETT, T. A.; CHAU, J.; RIOS, V. Multistation digisonde observations of equatorial spread f in south america. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 3145–3153, 2004. xiii, 37

REINISCH, B. W.; HUANG, X. Deducing topside profiles and total electron content from bottomside ionograms. **Adv. Space Res.**, v. 27, p. 23–30, 2001. 37

REINISCH, B. W.; SCALI, J. L.; HAINES, D. M. Ionospheric drift measurements with ionosondes. **Annali di Geofisica**, v. 41, n. 5-6, p. 695–702, 1996. 37

RINO, C.; OWEN, J. Numerical simulation of intensity scintillation using the power law phase screen model. **Radio Science**, v. 19, p. 891–908, 1984. 107

- RISHBETH, H. Polarization fields produced by winds in the equatorial f-region. **Planetary and Space Science**, v. 19, n. 3, p. 357–369, March 1971. 11, 14, 49
- RODRIGUES, F. S.; DE PAULA, E.; ABDU, M.; JARDIM, A.; IYER, K.; KINTNER, P.; HYSELL, D. Equatorial spread f irregularity characteristics over são luís, brazil. **Radio Sci.**, v. 39, 2004. 41, 49
- RODRIGUES, F. S.; HYSELL, D. L.; DE PAULA, E. R. Coherent backscatter radar imaging in brazil: large-scale waves in the bottomside f-region at the onset of equatorial spread f. **Annales Geophysicae**, v. 26, p. 3355–3364, oct 2008. 41, 122, 134
- ROTTGER, J. Wave-like structures of large-scale equatorial spread-f irregularities. **Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics**, v. 35, n. 6, p. 1195–1196, 1973. 32, 33
- _____. Gravity waves seeding ionospheric irregularities. **Nature**, v. 296, p. 111, 1982. 32, 33
- SASTRI, J. H.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; SOBRAL, J. H. A. Onset conditions of equatorial (range) spread f at fortaleza, brazil, during the june solstice. **J. Geophys. Res.**, v. 102, p. 24013–24021, 1997. 19
- SCANNAPIECO, A. J.; OSSAKOW, S. Nonlinear equatorial spread f. **Geophys. Res. Lett.**, v. 3, n. 8, p. 451–454, may 1976. 51
- SCHUNK, R.; NAGY, A. **Ionospheres: Physics, Plasma Physics and Chemistry**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. 6
- SEEMALA, G. K.; VALLADARES, C. E. Statistics of total electron content depletions observed over the south american continent for the year 2008. **Rad. Science**, v. 46, n. RS5019, Oct 2011. ISSN 0048-6604. 61, 76, 80, 81, 82
- SEKAR, R.; SUHASINI, R.; RAGHAVARAO, H. Evolution of plasma bubbles in the equatorial f region with different seeding conditions. **Geophys. Res. Lett.**, v. 22, n. 8, p. 885–888, 1995. 53
- SEKAR, R.; SUHASINI, R.; RAGHAVARAO, R. Effects of vertical winds and electric fields in the nonlinear evolution of equatorial spread f. **J. Geophys. Res.**, v. 99, n. A2, p. 2205–2213, 1994. 29
- SOBRAL, J. H. A.; ABDU, M. A.; TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; DE PAULA, E. R.; ZAMLUTTI, C. J.; DE AQUINO, 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**, v. 64, n. 12-14, p. 1517–1524, 2002. 19, 58, 95

STEPHAN, A.; COLERICO, M.; MENDILLO, M.; REINISCH, B. W.; ANDERSON, D. Suppression of equatorial spread F by sporadic E. **J. Geophys. Res.**, v. 10, n. A2, p. 1021, 2002. 19

SULTAN, P. J. Linear theory and modeling of the Rayleigh-Taylor instability leading to the occurrence of equatorial spread F. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. 26, p. 875–891, 1996. 28, 30

TAKAHASHI, H.; ABDU, M.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.; DE PAULA, E.; KHERANI, E.; MEDEIROS, A. F.; WRASSE, C.; BATISTA, I.; SOBRAL, J. H. A.; GOBBI, D.; ARRUDA, D.; IGO, I.; VADAS, S.; FRITTS, D. Equatorial ionosphere bottom-type spread F observed by OI 630.0 nm airglow imaging. **Geophys. Res. Lett.**, v. 37, n. L03102, 2010. ISSN 0094-8276. 75

TAKAHASHI, H.; TAYLOR, M. J.; PAUTET, P.-D.; MEDEIROS, A. F.; GOBBI, D.; WRASSE, C. M.; FECHINE, J.; ABDU, M. A.; BATISTA, I. S.; DE PAULA, E.; SOBRAL, J. H. A.; ARRUDA, D.; VADAS, S. L.; SABBAS, F. S.; FRITTS, D. C. Simultaneous observation of ionospheric plasma bubbles and mesospheric gravity waves during the spreadFex campaign. **Ann. Geophys.**, v. 27, n. 4, p. 1477–1487, 2009. 32, 33

TANAKA, T. Severe ionospheric disturbances caused by the sudden response of evening subequatorial ionospheres to geomagnetic storms. **J. Geophys. Res.**, v. 86, n. A13, p. 11,335–11,349, 1981. 10

TATARSKI, V. The effect of the turbulent atmosphere on wave propagation. **Natl. Tech. Inform. Serv., Springfield, VA.**, 1971. 106

THAMPI, S.; AL. et. First observations of large-scale wave structure and equatorial spread F using Cern radio beacon on the C/NOrs satellite. **Geophys. Res. Lett.**, v. 36, n. L18111, 2009. 75

TSUNODA, R. Magnetic-field-aligned characteristics of plasma bubbles in the equatorial ionosphere. **J. Atmos. Terr. Phys.**, v. 42, p. 743–752, 1980. 20, 49

_____. On the spatial relationship of 1-m equatorial spread F irregularities and plasma bubbles. **J. Geophys. Res.**, v. 85, p. 185–190, 1980. 20, 49

_____. On the generation and growth of equatorial backscatter plumes 1. wave structure in the bottomside f layer. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 86, p. 3610–3616, 1981. [23](#)

_____. Time evolution and dynamics of equatorial backscatter plumes, 1. growth phase. **J. Geophys. Res.**, v. 86, n. A1, p. 139–149, 1981. [20](#), [21](#), [23](#), [29](#), [51](#)

_____. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated e region pedersen conductivity. **J. Geophys. Res.**, v. 90, n. A1, p. 447–456, 1982. [16](#)

TSUNODA, R.; BARON, M.; OWEN, J.; TOWLE, D. Altair, an incoherent scatter radar for equatorial spread f studies. **Rad. Science**, v. 14, n. 1111, 1979. [49](#)

TSUNODA, R.; LIVINGSTON, R.; McCLURE, J. P.; HANSON, W. Equatorial plasma bubbles: Vertically elongated wedges from the bottomside f layer. **J. Geophys. Res.**, v. 87, n. A11, p. 9171–9180, 1982. [20](#), [21](#), [59](#), [61](#)

TSUNODA, R.; YAMAMOTO, M.; TSUGAWA, T.; HOANG, T. L.; TULASI, S. R.; THAMPI, S.; CHAU, H. D.; NAGATSUMA, T. On seeding, large-scale wave structure, equatorial spread f, and scintillations over vietnam. **Geophys. Res. Lett.**, v. 38, p. L20102, 2011. [75](#)

TSUNODA, R. T. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillations by the longitudinal gradient in integrated e region pedersen conductivity. **J. Geophys. Res.**, v. 90, n. A1, p. 447–456, 1985. [29](#), [59](#), [82](#), [95](#)

_____. On the enigma of day-to-day variability in equatorial spread f. **Geophys. Res. Lett.**, v. 32, p. L08103, 2005. [21](#)

_____. Satellite traces: An ionogram signature for large-scale wave structure and a precursor for equatorial spread f. **Geophys. Res. Lett.**, v. 35, 2008. [2](#), [75](#), [89](#), [90](#)

_____. On seeding equatorial spread f: Circular gravity waves. **Geophys. Res. Lett.**, v. 37, 2010. [2](#), [75](#), [76](#)

_____. On seeding equatorial spread f during solstices. **Geophys. Res. Lett.**, v. 37, 2010. [2](#), [75](#), [89](#), [90](#)

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. **Geophys. Res. Lett.**, v. 37, 2010. [2](#), [75](#)

TSUNODA, R. T.; ECKLUND, W. L. On the post-sunset rise of the equatorial f layer and superposed upwellings and bubbles. **Geophys. Res. Lett.**, v. 34, p. L04101, 2007. 21

VADAS, S. L. Horizontal and vertical propagation and dissipation of gravity waves in the thermosphere from lower atmospheric and thermospheric sources. **J. Geophys. Res.**, v. 112, p. 06305, 2007. 33

VALLADARES, C. E.; BASU, S.; GROVES, K.; Haga, M. P.; HYSSELL, D.; Mazzella, A. J. J.; SHEEHAN, E. Measurement of the latitudinal distributions of total electron content during equatorial spread f events. **J. Geophys. Res.**, v. 106, n. A12, p. 29,133–29,152, 2001. 80

VALLADARES, C. E.; CHAU, J. The low-latitude ionosphere sensor network: Initial results. **Rad. Science**, v. 47, n. RS0L17, p. 7307–+, may 2012. 78, 98

VALLADARES, C. E.; VILLALOBO, J.; SHEEHAN, R.; HAGAN, M. P. Latitudinal extension of low-latitude scintillations measured with a network of gps receivers. **Annales Geophysicae**, v. 22, p. 3155–3175, 2004. 61, 80

WALKER, A.; GREENWALD, R.; BAKER, K. Determination of the fluctuation level of ionospheric irregularities from radio backscatter measurements. **Radio Science**, v. 22, n. 5, p. 689–705, 1987. 108, 110

WEBER, E.; BASU, S.; BULLET, T.; VALLADARES, C.; BISHOP, G.; GROVES, K.; KUENZLER, H.; NING, P.; SHEEHAN, R.; ARAYA, J. Equatorial plasma depletion precursor signatures and onset observed at 11° south of the magnetic equator. **J. Geophys. Res.**, v. 101, n. A12, p. 26,829–26,838, 1996. 80

WEBER, E.; BUCHAU, J.; EATHER, R.; MENDE, S. North-south aligned equatorial airglow depletions. **J. Geophys. Res.**, v. 83, n. A2, 1978. 21, 51

WERNIK, A.; LIU, C.; YEH, K. Model computation of radio wave scintillation caused by equatorial ionospheric bubble. **Radio Science**, v. 15, p. 559–572, 1980. 106

WOODMAN, R. F. Vertical drift velocities and east-west electric fields at the magnetic equator. **J. Geophys. Res.**, v. 75, n. 31, p. 6249–6259, 1970. 10

WOODMAN, R. F.; BASU, S. Comparison between the in situ spectral measurements of f region irregularities and backscatter observations at 3 m wavelength. **Geophys. Res. Lett.**, v. 5, p. 869–872, 1978. 110

WOODMAN, R. F.; HAGFORS, T. Methods for the measurement of vertical ionospheric motions near the magnetic equator by incoherent scattering. **J. Geophys. Res.**, v. 74, n. 5, march 1969. 41

WOODMAN, R. F.; LA HOZ, C. Radar observations of f region equatorial irregularities. **J. Geophys. Res.**, v. 81, p. 5447–5466, nov 1976. 1, 2, 18, 20, 23, 49, 51, 61

WRASSE, C. **Estudos de geração e propagação de ondas de gravidade atmosféricas**. Tese (Doutorado) — INPE, 2004. 32

WU, B.; CHU, V.; CHEN, P.; TING, T. Formosat-3/cosmic science mission update. **GPS Solut.**, v. 9, p. 111–121, 2005. 8

YEH, K.; LIU, C. Radio wave scintillation in the ionosphere. **Proc. IEEE**, v. 70, p. 324–360, 1982. 106, 107, 115

YEH, K.; WERNIK, A. On ionospheric scintillation: Wave propagation in random media (scintillation). **The International Society for Optical Engineering, Bellingham, WA, USA.**, p. 39–49, 1993. 106

YOKOYAMA, T.; HORINOUCI, T.; YAMAMOTO, M.; FUKAO, S. Modulation of the midlatitude ionospheric e region by atmospheric gravity waves through polarization electric field. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 109, 2004. 21

ZALESK, S.; OSSAKOW, S. Nonlinear equatorial spread f: Spatially large bubbles resulting from large horizontal scale initial perturbations. **J. Geophys. Res.**, v. 85, n. A5, p. 2131–2142, 1980. 29

ZALESK, S.; OSSAKOW, S.; CHATURVEDI, P. Nonlinear equatorial spread f: The effect of neutral winds and background pedersen conductivity. **J. Geophys. Res.**, v. 87, n. A1, p. 151–166, 1982. 23, 24, 29, 30, 31

ARTIGOS DESENVOLVIDOS NA TESE

Como resultado do trabalho que deu origem à presente tese foram desenvolvidos artigos correspondentes aos capítulos 5 e 6. Os resultados referentes ao capítulo 7 ainda não foi submetidos a publicação. Espera-se escrever pelo menos um artigo posteriormente à tese.

1. E.R. de Paula, E. Alam Kherani, R.Y.C. Cueva, L.A.P. Camargo (2011), Observations of pre-midnight 5-m irregularities in the equatorial F region over São Luís, Brazil: Solar-flux dependence and seasonal variations, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 73, 1544-1554.

2. E. Alam Kherani, E.R. de Paula, R.Y.C. Cueva, L.A.P. Camargo (2012), Observations of nighttime equatorial-upper-E-valley region irregular structures from São Luís radar and their occurrence statistics: A manifestation of vertical coupling between E and F regions, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volumes 75-76, February 2012, Pages 64-70.

3. Hisao Takahashi, Ricardo Y.C. Cueva, Eurico R. de Paula, and Cesar E. Valladares (2012), Longitudinal Variability of Ionospheric TEC Depletions over South America, CAWSES: Climate and Weather for Sun-Earth System - II, TG4 Newsletter, Volume 7, Jan. 2012.

4. Cueva, R.Y.C.; C. E. Valladares; E.R. de Paula; M. A. Abdu; I. Paulino; I.S. Batista; H. Takahashi (2012), Longitudinal and day-to-day variations of equatorial spread F occurrence from recent observations over South America, Submitted to *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*.

5. Cueva, R.Y.C.; E.R. de Paula and A.E. Kherani (2013), Statistical analysis of VHF radar parameters at three longitudinal sectors, Submitted to *Annales Geophysicae*.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.