



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**



# **MEDIDAS SIMULTÂNEAS DE ONDAS ATMOSFÉRICAS NA REGIÃO F E BOLHAS DE PLASMA USANDO TÉCNICAS ÓTICAS E DE RÁDIO**

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)**

**Aluna: Aline Amorim de Almeida (UNIVAP / bolsista INPE)  
Orientador: Alexandre Alvares Pimenta (DAE /CEA /INPE)**

**São José dos Campos  
2010**



*A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.*

Albert Einstein



A meus pais, **Mércio** e **Ednil**,  
pelo amor e pelo apoio  
incondicional nos diversos  
momentos, com carinho e gratidão  
dedico.



## **Agradecimentos**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por tudo e por todas as oportunidades que tem colocado em meu caminho.

Ao Dr. Alexandre Alvares Pimenta, pela orientação e dedicação e por ter acreditado em minha capacidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa, CNPq, pelo suporte financeiro e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE.

As amigas Vânia e Danielle que me ajudam com os programas (IDL, Oringin e afins) e com dicas teóricas do meu trabalho. As colegas Fernanda e Lindalva pelo companheirismo e amizade. E aos colegas do Laser pelo suporte em todas as horas.

A minha família, e em especial minha amada avó Albertina que sempre me apoiou e me fez acreditar, que com fé e luta os sonhos se tornam possíveis.

Aos meus amigos de faculdade que são muito queridos e estão sempre me ajudando e dando apoio pra seguir frente ressaltando o companheirismo de todos.



## RESUMO

Neste trabalho apresentamos medidas simultâneas de estruturas tipo distúrbios ionosféricos propagantes denominados DBS (Dark Band Structures) e bolhas de plasma. As imagens mostram eventualmente frentes de onda atravessando o campo de visão do imageador, propagando-se de sudeste para noroeste, passando pelo zênite por volta das 24h (hora local). O fenômeno “Dark Band Structures” (DBS) trata-se de uma instabilidade de plasma ionosférico, onde o plasma da camada F é empurrado para alturas superiores, causando a redução na intensidade da emissão OI 630nm. Mostramos que existe uma forte tendência de ocorrência dessas estruturas durante período de atividade solar baixa, sendo que esses eventos não estão relacionados com a atividade geomagnética, pois foram observadas durante períodos calmos. Já as bolhas de plasma têm origem na ionosfera equatorial. O fenômeno ocorre sempre no período da noite, têm tendência de se alinhar de norte a sul propagando-se para leste. As bolhas de plasma ocorrem na faixa da ionosfera, acima de 200 km. Estas têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de RF. Para detectá-la podemos usar, por exemplo, ionossonda (rádio) e também o imageador all-sky (ótico).



# SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 .....	15
1-INTRODUÇÃO .....	15
CAPÍTULO 2 .....	17
2-LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA NA REGIÃO F.....	17
2.1-Ionosfera.....	17
2.2-Luminescência Atmosférica.....	18
2.3-OI 630 nm .....	18
CAPÍTULO 3 .....	21
3-INSTRUMENTAÇÃO.....	21
3.1-Ionossonda.....	21
CAPÍTULO 04 .....	25
4- RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	25
4.1- Aspectos Gerais.....	25
4.3- Bolhas de plasma.....	27
CONCLUSÃO.....	29
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	31



## LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1 - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas..... 17
- Fig. 2 - Ionograma obtido em Cachoeira Paulista no dia 03/07/2005 às 02:00:05 LT.. 21
- Fig. 3 - Código de cores de um ionograma. .... 22
- Fig. 4- Gráfico representando a altura de pico da camada ionosférica do dia 07 de junho de 2006 após ter analisado ionograma coletado pela ionossonda instalada em Cachoeira Paulista – SP..... 22
- Fig. 5 - Imageador CCD all-sky sendo: (1) lente do tipo all-sky; (2) rack; (3) sistema telecêntrico de lentes; (4) roda de filtros de interferência ótica; (5) sistema de reconstrução da imagem; (6) câmara CCD; (7) sistema de refrigeração da câmara CCD e (8) microcomputador. .... 23
- Fig. 6 - Imagem da emissão OI 630nm obtida pelo imageador all-sky com câmara CCD obtida em Cachoeira Paulista, Brasil, em 03 de julho de 2005, às 02:06:32 (Hora Local) com seu respectivo campo de visão (considerando a altura da camada de emissão em torno de 275 km). .... 24
- Fig. 7 -Imagens de emissão OI 630 nm obtidas nos dias 02-03 de julho de 2005, das 01:12:51 às 02:37:52, atravessando o campo de visão do imageador..... 26
- Fig. 8 - Gráfico mostrando o número de horas de ocorrência de DBS por ano. .... 26
- Fig. 9 - Bolha de Plasma atravessando o campo de visão do imageador All-Sky na linha de emissão OI 630 nm no dia 27/02/2006 às 00:47:58 hora local..... 27



# **CAPÍTULO 1**

## **1-INTRODUÇÃO**

O estudo das irregularidades ionosféricas é muito importante para se entender os processos dinâmicos da alta atmosfera e ionosfera. No período de setembro a dezembro de 2009 foram analisadas as imagens com eventos de DBS (Dark Band Structures) coletadas entre os anos de 2004 a 2008. Neste trabalho apresentamos medidas simultâneas de estruturas ondulatórias ou distúrbios ionosféricos propagantes denominados DBS (Dark Band Structures) e bolhas de plasma. Destaca-se como principais características (para as DBS) a tendência de se alinharem de nordeste a sudoeste, propagando-se para o noroeste e que não estão relacionados com distúrbios geomagnéticos, pois foram observadas durante períodos calmos. Já as bolhas de plasma têm origem na ionosfera equatorial, mapeiam-se para maiores latitudes e normalmente propagam-se para leste. Com imagens obtidas pelo imageador “All-Sky” localizado em Cachoeira Paulista, apresentamos os resultados obtidos.



## CAPÍTULO 2

### 2-LUMINESCÊNCIA ATMOSFÉRICA NA REGIÃO F

#### 2.1-Ionosfera

Os primeiros estudos diretos da ionosfera foram realizados através de ondas de rádio. A formação da ionosfera é essencialmente governada pela ação da radiação solar sobre os constituintes atmosféricos, através de processos como a foto ionização.

Partículas de alta energia também podem penetrar na atmosfera promovendo a ionização de seus constituintes, embora este processo seja típico de regiões de altas latitudes. De acordo com sua variação com a altura divide-se a ionosfera em diversas regiões, cada uma delas com propriedades características. A figura a seguir mostra as regiões ionosféricas em função da densidade eletrônica.

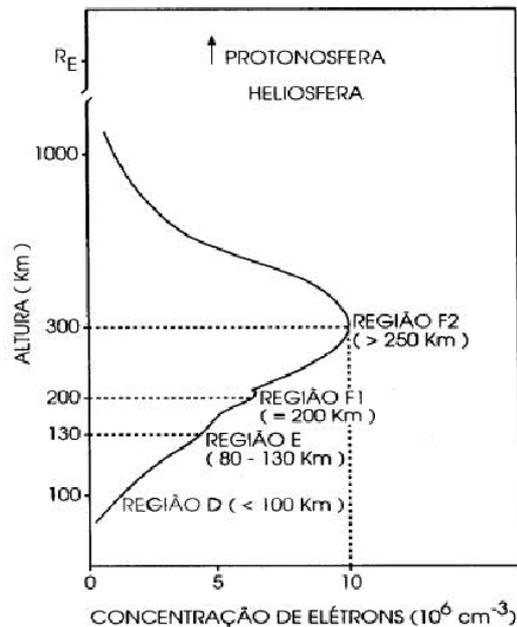


Fig. 1 - Nomenclatura e localização das camadas ionosféricas.

FONTE: Kirchhoff (1991, p.77)

Normalmente a Ionosfera se divide em três regiões:

**Região D:** parte inferior da ionosfera, até 80 km, como a densidade atmosférica é maior nesta região as colisões entre elétrons, íons e partículas neutras são

relativamente freqüentes, causando atenuações nos sinais de rádio que interagem com a ionosfera. Quando há radiação solar a camada D desaparece.

**Região E:** Sua altitude média é entre os 80 e 130 km, é uma região importante, pois é onde se desenvolvem as correntes elétricas ionosféricas. A região E está presente durante o dia e à noite, sua concentração diminui sensivelmente.

**Região F:** engloba regiões F1; F2 e a recém descoberta F3.

A região F1 é formada pela ionização do oxigênio atômico O pelos raios EUV (extremo ultravioleta), o que produz elétrons livres e  $O^+$ . Sua concentração de elétrons depende do ângulo zenital do sol e da atividade solar.

A região F2 também é composta, principalmente, de elétrons livres e  $O^+$ . Sua concentração de elétrons varia com a atividade solar. Durante o dia, apresenta os maiores valores de concentração de elétrons livres. Durante a noite, a concentração sofre uma diminuição, mas a camada não desaparece. E o presente estudo se concentra nessa região.

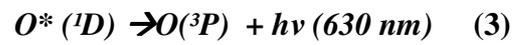
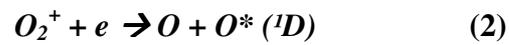
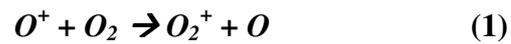
## 2.2-Luminescência Atmosférica

Na atmosfera noturna, íons e elétrons se recombina formando átomos neutros que, sendo excitados, liberam energia na forma de fótons. Esse fenômeno luminoso é conhecido como luminescência atmosférica. Na região F da ionosfera, em torno de ~ 250 km de altura ocorre a emissão do oxigênio atômico em um comprimento de onda de 6300Å gerando uma luz vermelha. A luminescência atmosférica é medida em Rayleigh ( $10^6$  fótons por centímetro quadrado de coluna por segundo) e comprimento de onda (da ordem de ângstrons Å).

As emissões noturnas na região F da ionosfera mais estudadas são: OI 630 nm; OI 577,7 nm e OI 777,4 nm. Neste estudo serão analisadas emissões de OI 630 nm.

## 2.3-OI 630 nm

Na região de baixa latitude, a recombinação dissociativa do  $O_2^+$  com elétrons na região F é um processo dominante para a produção de átomos de oxigênio excitados, os quais ao decaírem para o estado fundamental liberam o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética. O oxigênio atômico se origina na recombinação dissociativa do íon  $O_2^+$  com elétrons livres da região F. As equações a seguir representam as reações químicas que geram a emissão OI 630 nm na região F:



Onde,

$O_2$  = oxigênio molecular

$O_2^+$  = íon do oxigênio molecular;

$O^*$  = átomo de oxigênio excitado;

$e$  = elétron ;

$h\nu$  = energia do fóton;

O pico da emissão OI630 nm ocorre na parte inferior da região F, em torno de 220-300 km.



# CAPÍTULO 3

## 3-INSTRUMENTAÇÃO

### 3.1-Ionossonda

É um dos instrumentos mais representativos para a medida de parâmetros ionosféricos. Trata-se de um equipamento de rádio sondagem com um sistema transmissor-receptor que emite pulsos de energia eletromagnética de frequência variável. O sistema transmissor emite sinais verticais em frequências que variam de 1 a 30 MHz que, em determinadas alturas, ao entrarem em ressonância com o plasma ambiente, são refletidos pela camada ionosférica. Em função do tempo decorrido entre transmissão e recepção do pulso, encontra-se a altura virtual ( $h'$ ). A representação gráfica da variação da altura virtual em função da frequência onde se deu a reflexão é conhecida como ionogramas. Nas ionossondas analógicas o registro é feito em filmes fotográficos, enquanto que nas ionossondas digitais (digissondas) o registro é feito digitalmente, geralmente em intervalos de 15 min. A figura a seguir mostra um exemplo de ionograma do dia 03 de julho de 2005 às 02:00:05 LT.

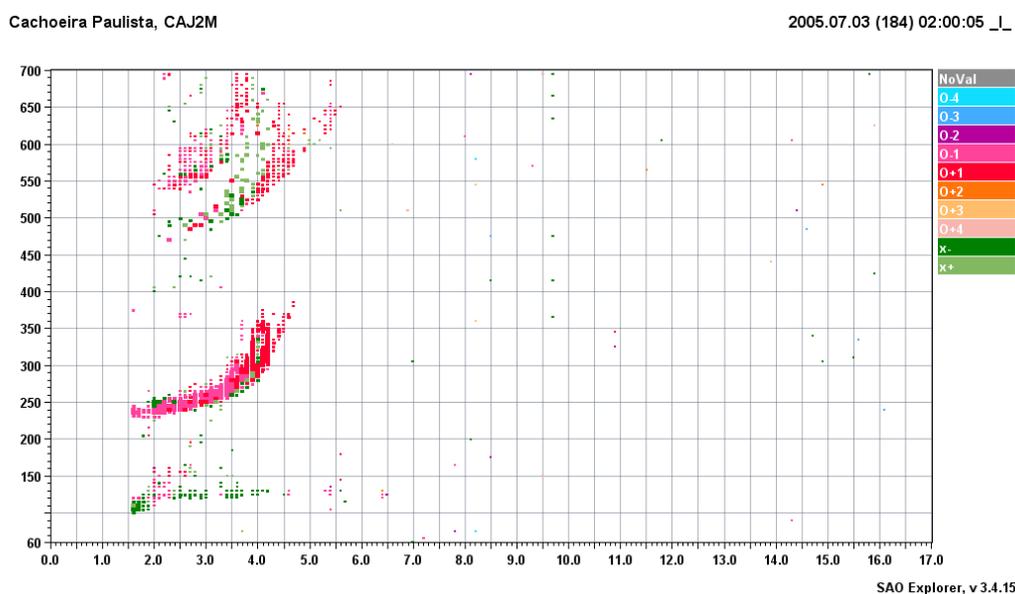


Fig. 2 - Ionograma obtido em Cachoeira Paulista no dia 03/07/2005 às 02:00:05 LT.

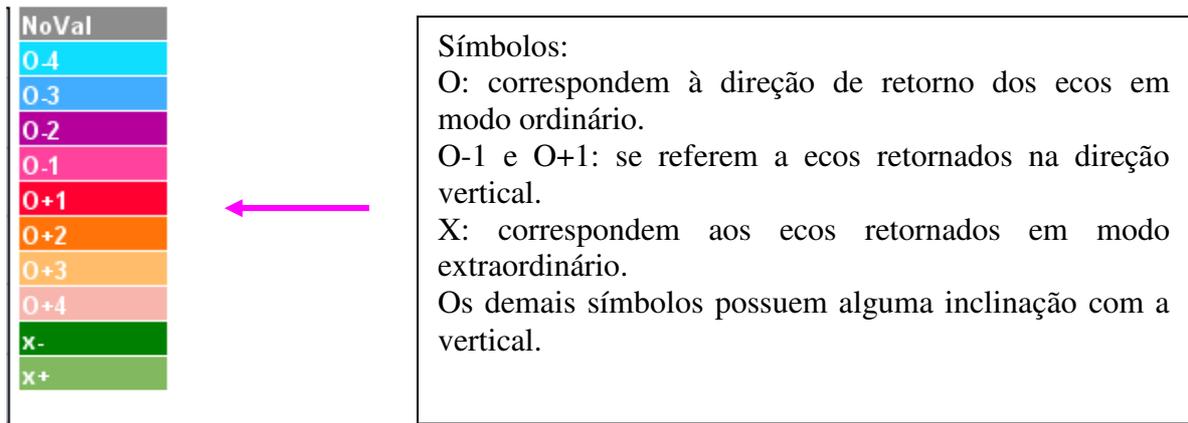


Fig. 3 - Código de cores de um ionograma.

A partir desses ionogramas se podem detectar as irregularidades ionosféricas (Bolhas de Plasma) que começam a surgir a partir dos 250 km de altitude até aproximadamente 1.500 km. Então a ionossonda emite pulsos eletromagnéticos com frequência a partir de 500 kHz até 30 MHz sendo que esses pulsos se propagam para cima sendo refletidos pela densidade de íons que se encontra na alta atmosfera. No tempo de ida e volta desses pulsos é que se elaboram os ionogramas. E essas irregularidades (Bolhas de Plasma) são detectadas devido a espalhamentos de traço na região F.

Através destes ionogramas obtidos, inferimos alguns parâmetros ionosféricos tais como, a altura virtual da base da camada F da ionosfera ( $h'f$ ), altura do pico de concentração eletrônica da ionosfera ( $hmF2$ ) e a densidade de plasma (ou elétrons) na altura do pico da ionosfera  $foF2$ . como mostra a figura a seguir.

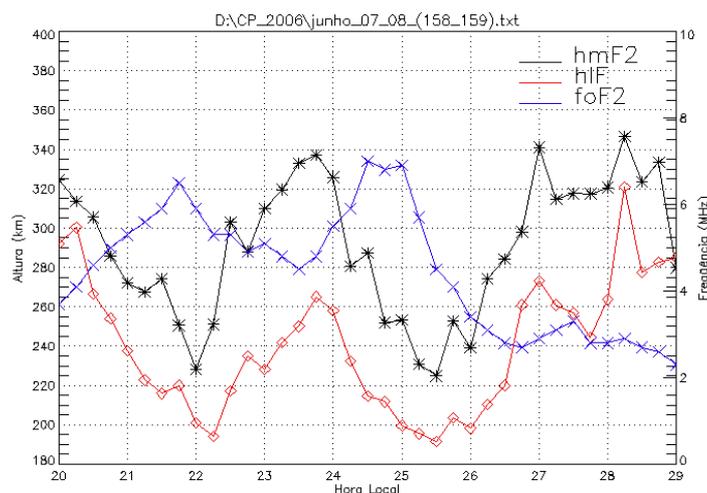


Fig. 4- Gráfico representando a altura de pico da camada ionosférica do dia 07 de junho de 2006 após ter analisado ionograma coletado pela ionossonda instalada em Cachoeira Paulista – SP.

Existem ionossondas instaladas em várias localidades do Brasil: Cachoeira Paulista-SP, em São Luís do Maranhão, em Itaitinga/Fortaleza-CE.

### 3.2-Imageador All-Sky

O imageador "all-sky" é um instrumento óptico utilizado para fazer medições do airglow em diversos comprimentos de onda. Ele é formado por uma lente tipo all-sky que fornece um campo de visão de aproximadamente 180°, uma roda de filtros que seleciona o filtro para emissão desejada, um sistema telecêntrico que direciona a luz monocromática para a câmara CCD (matriz de células fotossensíveis) que reproduz as imagens do céu, além disso, todo o processo de captação das imagens é controlado por um microcomputador.

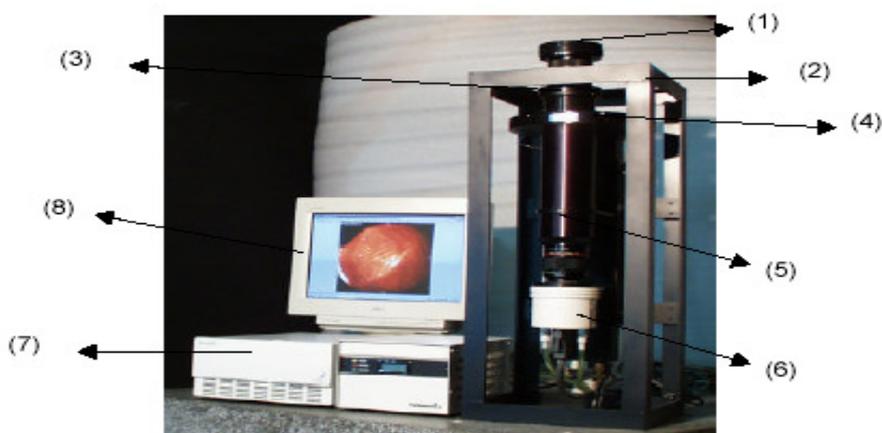


Fig. 5 - Imageador CCD all-sky sendo: (1) lente do tipo all-sky; (2) rack; (3) sistema telecêntrico de lentes; (4) roda de filtros de interferência ótica; (5) sistema de reconstrução da imagem; (6) câmara CCD; (7) sistema de refrigeração da câmara CCD e (8) microcomputador.

FONTE: Santana (2000).

O imageador CCD All-sky necessita de céu claro para operar. Com isso, seu período de observação é de aproximadamente 13 dias por mês, em torno do período de lua nova. Se as condições meteorológicas não forem boas neste período, o imageador não opera. Seu campo de cobertura corresponde ao setor sudeste e parte do setor sul brasileiro e também a uma área equivalente sobre oceano atlântico como mostra a figura a seguir.

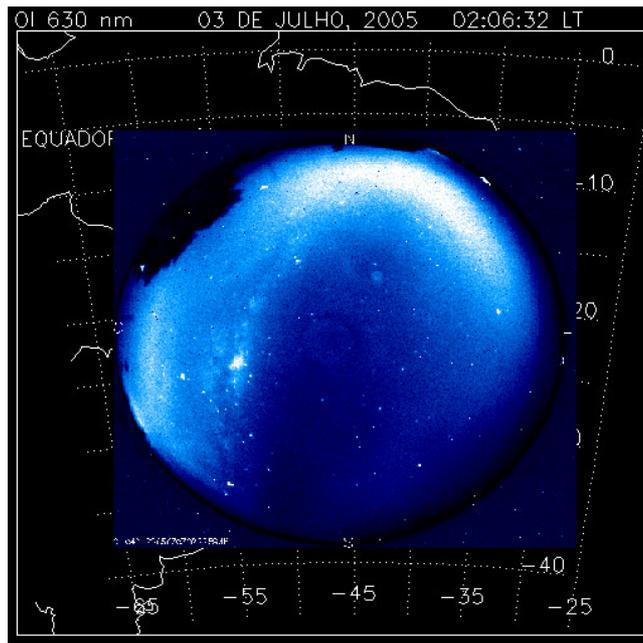


Fig. 6 - Imagem da emissão OI 630nm obtida pelo imageador all-sky com câmara CCD obtida em Cachoeira Paulista, Brasil, em 03 de julho de 2005, às 02:06:32 (Hora Local) com seu respectivo campo de visão (considerando a altura da camada de emissão em torno de 275 km).

## **CAPÍTULO 04**

### **4- RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **4.1- Aspectos Gerais**

As irregularidades de plasma de grande escala da região F equatorial se manifestam como depleções na densidade do plasma devido às instabilidades na base na ionosfera. Tais irregularidades podem interferir na propagação de sinais de radio empregados nas telecomunicações bem como nos sinais empregados em sistemas de navegação e posicionamento, como os GPS. Onde há ocorrência dessas irregularidades é na ionosfera tropical logo depois do pôr-do-sol, quando sob a intensificação de campos elétricos zonais a camada ionosférica se eleva rapidamente na direção vertical dando origem a gradientes abruptos de densidade na base da camada, que através disso originam-se as irregularidades.

#### **4.2- DBS (Dark Band Structures)**

O fenômeno das Dark Band Structures (DBS) trata-se de uma instabilidade de plasma ionosférica, onde o plasma da camada F é empurrado para alturas superiores, causando a redução na intensidade da emissão OI 630nm.

Com imagens obtidas pelo imageador All-Sky, na linha de emissão OI 630nm, observou-se a propagação de bandas escuras, as quais foram denominadas DBS (Dark Band Structures). A figura 07 ilustra o fenômeno observado na noite de 03 de julho de 2005 das 01:12:51 às 02:37:52 hora local, com um imageador All-Sky localizado em Cachoeira Paulista.

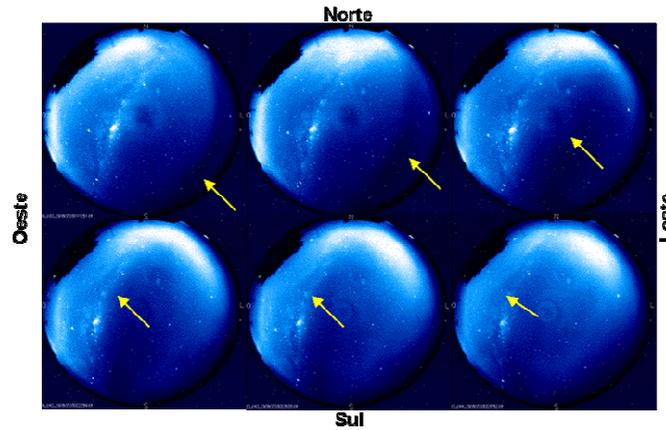


Fig. 7 -Imagens de emissão OI 630 nm obtidas nos dias 02-03 de julho de 2005, das 01:12:51 às 02:37:52, atravessando o campo de visão do imageador.

O Gráfico a seguir ilustra as ocorrências de DBS para cada mês entre os anos de 2004 a 2008 (período solar descendente) analisados:

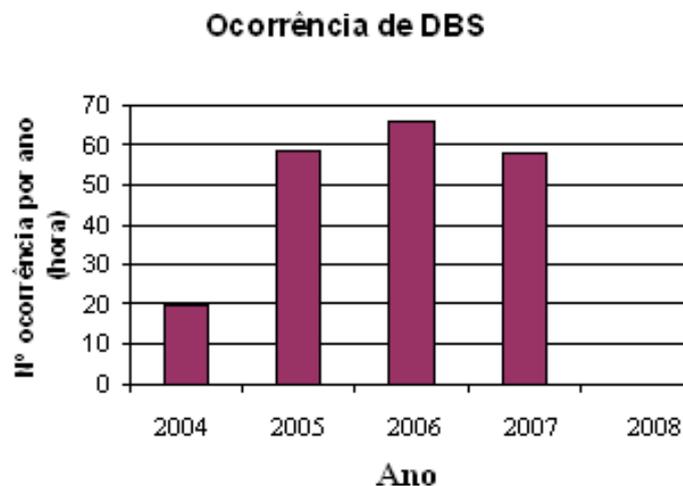


Fig. 8 - Gráfico mostrando o número de horas de ocorrência de DBS por ano.

A mais notável característica das DBS é sua tendência de se alinhar de nordeste a sudoeste, propagando-se para o noroeste. Outra característica importante é que a maior ocorrência do fenômeno se dá em períodos de atividade solar mínima, atividade solar ascendente e descendente, sendo que, em períodos de máxima atividade solar não há registros da ocorrência do fenômeno. Isso implica que a ocorrência das DBS não se deve a condições de distúrbios geomagnéticos.

### 4.3- Bolhas de plasma

As irregularidades ionosféricas de grande escala são normalmente denominadas bolhas de plasma. O fenômeno ocorre sempre no período da noite, têm tendência de se alinhar de norte a sul propagando-se para o leste quando observada pelo imageador. As bolhas de plasma ocorrem na faixa da ionosfera, acima de 350 km de altitude na emissão OI 630 nm. As bolhas podem atingir mais de 2.000 km de altitude. Estas têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de RF. Para o estudo das bolhas de plasma temos, por exemplo, a ionossonda (radio) e também o imageador all-sky (ótico).

Quando existem bolhas de plasma, o sistema transmissor-receptor da ionossonda sai de sincronismo, o que acarreta uma descontinuidade nos ionogramas, onde essa descontinuidade indica a presença de bolhas de plasma. E a outra forma de análises que é por imageamento também é bastante significativa, pois possibilita observar grandes áreas horizontais, pelo imageador ter um campo de visão de 180° na emissão OI630 nm que corresponde a aproximadamente 3500 de diâmetro do campo de visão .

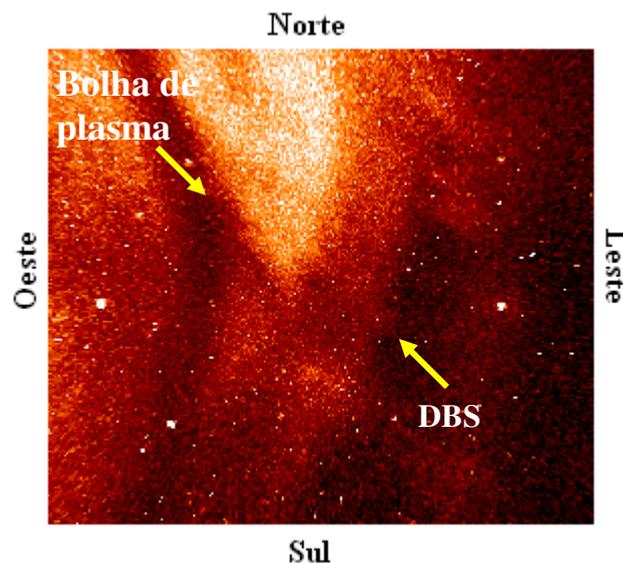


Fig. 9 - Bolha de Plasma atravessando o campo de visão do imageador All-Sky na linha de emissão OI 630 nm no dia 27/02/2006 às 00:47:58 hora local.



## CONCLUSÃO

Foram analisadas imagens obtidas pelo imageador all-sky na emissão OI630 nm e da ionossonda ambos localizado em Cachoeira Paulista. Com base nos resultados, são apresentadas as principais características dessas irregularidades ionosféricas.

As DBS têm tendência de se alinhar do nordeste a sudoeste, propagando-se para o noroeste a uma altitude de aproximadamente 300 km. A ocorrência deste fenômeno se dá preferencialmente em períodos de atividade solar mínima, seguido pelos períodos de atividade solar ascendente e descendente, e não estão relacionados a distúrbios geomagnéticos.

As bolhas de plasma tem tendência de se alinhar de norte a sul propagando-se para o leste e têm a propriedade de interferir na propagação de ondas de RF.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, D.C.M. Caracterização de distúrbios ionosféricos propagantes na região de baixas latitudes no setor brasileiro associados à instabilidade de plasma perkins gerada em médias latitudes. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2010.

AMORIM, D.C.M. Frentes de onda na termosfera observadas com o imageador all-sky na linha de emissão OI630 nm no setor brasileiro de baixas latitudes. Trabalho final de iniciação científica, 2007.

CÂNDIDO, C. M. N. Estudos de irregularidades no plasma da camada ionosférica F equatorial e de baixas latitudes no setor longitudinal brasileiro. 2008. 286p. (INPE-15246-TDI/1333). Tese de Doutorado (Geofísica Espacial).

KIRCHHOFF, V.W.J.H. **Introdução à Geofísica Espacial**. São Paulo: Nova Stella, Editora da Universidade de São Paulo: FAPESP, 1991. 152p.

MUELLA, M.T.A.H. Ventos termosféricos meridionais inferidos por meio de sondagens ionosféricas. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2004.

PIMENTA, A.A. Estudo da deriva zonal e dinâmica das bolhas de plasma na região tropical. 2003. 194p. (INPE-9546-TDI/827). Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2002.

PIMENTA, A.A., Fagundes, P.R, Bittencourt, J.A., Sahai, Y., Gobbi, D., Medeiros, A.F., Taylor, M.J., Takahashi, I. Ionospheric plasma bubble zonal drift: a methodology using OI630 nm all-sky imaging systems. *Adv. Space Res.* Vol. 27, n 6-7, p. 1219-1224, 2001.