

COMPORTAMENTO SAZONAL DA OCORRÊNCIA DE BOLHAS DE PLASMA NA REGIÃO TROPICAL DO BRASIL OBSERVADO PELO IMAGEAMENTO DO AIRGLOW NA EMISSÃO DO OI 630,0 nm

Igo Paulino¹, Amauri Fragoso de Medeiros² e Ricardo Arlen Buriti³

Recebido em 24 novembro, 2005 / Aceito em 16 fevereiro, 2007
Received on November 24, 2005 / Accepted on February 16, 2007

ABSTRACT. The study of the ionospheric irregularities or plasma bubbles is very important to understand the dynamics of the ionospheric plasma during nighttime. The space and time variability is a determinant element for space weather research, thus the forecast in short time-scale of the behavior of the plasma bubble is a rather important parameter in space weather/ionospheric applications. In this paper we present the results of two years (from September 2000 to August 2002) of plasma bubbles observations by an all sky digital imager system of OI 630,0 nm placed at São João do Cariri (7° 13'S; 35° 52'W). The frequency of occurrence of the plasma bubble shows a seasonal behavior more frequent during the period of September and March in the two years of observation, while the other months the bubble occurrence has been less frequent. During the equinox months the bubble was observed earlier [~20:30 Local Time (LT)] than during summer months, when the occurrence peak was between 21:30 and 23:30 LT. The summer plasma bubble occurrence was larger than in equinox months. During nighttime, in low latitudes, the dynamics of the ionospheric plasma is controlled by electromagnetic drifts, which in turn depends on the conductivity along the magnetic field lines, including the flux-tube conjugate E regions. The alignment between the magnetic meridian and the Terminator is responsible for the bubble seasonal variation.

Keywords: ionosphere, plasma bubble, airglow.

RESUMO. O estudo das irregularidades ionosféricas ou bolhas de plasma é muito importante para se entender os processos dinâmicos da alta atmosfera. A sua variabilidade é um elemento determinante na previsão do clima espacial, portanto a previsão em curto prazo do comportamento das bolhas é essencial para o planejamento de atividades e de sistemas de aplicações espaciais. Neste trabalho apresentamos resultados de dois anos (setembro de 2000 a agosto de 2002) de observações de bolhas de plasma através de dados do airglow (OI 630,0 nm) coletados por um imageador "all sky" instalado em São João do Cariri (7° 13'S; 35° 52'W). O fenômeno de bolhas de plasma apresentou um comportamento sazonal caracterizado pelo seu surgimento entre os meses de setembro e março dos dois anos observados, sendo que nos outros meses foram poucas vezes que detectamos bolhas. Por outro lado, pode-se ver também que durante os meses de equinócio o pico de ocorrência das bolhas aconteceu mais cedo [~20:30 hora local (LT)] do que nos meses do verão durante o qual o pico de ocorrência ficou por volta das 21:30 às 23:30 LT. Durante o verão a ocorrência de bolhas de plasma foi mais acentuada do que nos meses de equinócios. As condições dinâmicas do plasma ionosférico em baixas latitudes são dominadas pela deriva eletromagnética e dependem da condutividade ao longo das linhas de campo entre as regiões E conjugadas (latitudes conjugadas). Desta forma, o alinhamento entre o meridiano magnético e o terminadouro (linha de transição noite-dia) é o responsável pela variação sazonal das bolhas, bem como pela maior ocorrência deste fenômeno durante os meses do verão.

Palavras-chave: ionosfera, bolhas de plasma, airglow.

¹E-mail: igo@df.ufcg.edu.br

²E-mail: afragoso@df.ufcg.edu.br

³E-mail: rburiti@df.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

As bolhas de plasma constituem regiões onde a densidade do plasma ionosférico é fortemente reduzida em relação à sua vizinhança. O comportamento das bolhas de plasma tem sido estudado através de várias técnicas de observações, principalmente, ópticas e de rádio (Sobral et al., 1980a; Sobral et al., 1980b; Sahai et al., 1999; Sahai et al., 2000; Pimenta et al., 2001; Santana et al., 2001; Takahashi et al., 2001; Pimenta, 2002; Sobral et al., 2002; Pimenta et al., 2003; Chu et al., 2005), além de motivar estudos teóricos e de modelagem (por exemplo: Haerendel, 1973; Haerendel et al., 1992; Kelley & Miller 1997; Heelis, 2004)

A radiação solar é a principal fonte de energia da ionosfera e produz um efeito de dissociação que produz o chamado plasma ionosférico e, sendo assim, a região da ionosfera terrestre apresenta características bem peculiares no seu comportamento e dinâmica. Na região F da ionosfera noturna, a deriva de plasma na região equatorial é devida essencialmente a campos elétricos, pois as linhas de campo magnético são basicamente horizontais e dessa forma, o vento meridional não contribui, por exemplo, no movimento vertical do plasma. Já em baixas latitudes, devido à inclinação das linhas de campo magnético, a deriva vertical é devida tanto ao campo elétrico quanto ao vento meridional (Pimenta, 2002; Pimenta et al., 2003).

A instabilidade Rayleigh-Taylor (RT) é aceita pela comunidade como responsável pela geração de bolhas de plasma. Partindo das equações básicas de conservação e de transporte do plasma para região da ionosfera podemos, fazendo algumas simplificações (ver Pimenta, 2002 e Haerendel et al., 1992), encontrar uma expressão para o crescimento linear da instabilidade RT, ou seja:

$$\gamma_1 = \frac{-\frac{gm^2 m_i}{B^2} \frac{\partial n_0}{\partial q} [\xi^2 \sigma_{p,0} + m^2 \sigma_{p,0}]}{\left[m \frac{\partial \sigma_{H,0}}{\partial q} - \xi \frac{\partial \sigma_{p,0}}{\partial q} \right]^2 + [\xi^2 \sigma_{p,0} + m^2 \sigma_{p,0}]^2} \quad (1)$$

onde g é o módulo da aceleração da gravidade; m e ξ são os números de onda horizontal e vertical, respectivamente; m_i é a massa dos íons; $\sigma_{H,0}$ e $\sigma_{p,0}$ são as condutividades Hall e Pedersen, respectivamente; q é a coordenada perpendicular às linhas de campo e que apontam para cima e n_0 é a concentração numérica de plasma.

O aparecimento das irregularidades ionosféricas deve-se em parte aos efeitos das interações entre as condutividades $\sigma_{H,0}$ e $\sigma_{p,0}$ das regiões E e F. Estas regiões são acopladas através das linhas de campo magnético. Durante o dia existe uma alta condutividade na região E e fecha-se um circuito com a região F através das linhas de campo magnético. No início da noite a conduti-

dade na região E diminui e o circuito é interrompido, a Figura 1 mostra um esquema do circuito formado pelas linhas de campo e as regiões E e F.

Diferenças, ao longo do ano, na hora local da interrupção desses circuitos decorrerá em efeitos distintos nas aparições das bolhas e é o que vai caracterizar a sazonalidade das bolhas de plasma como veremos posteriormente.

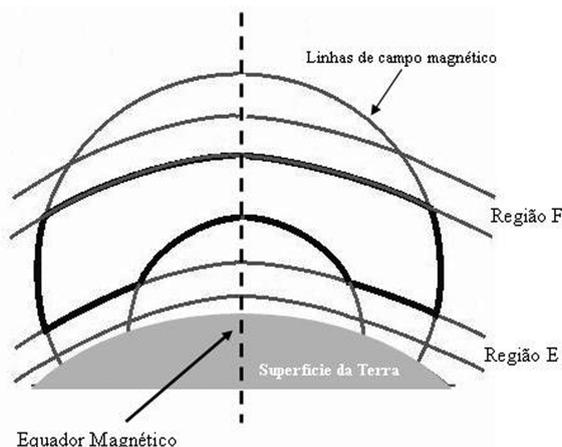


Figura 1 – Esquema do circuito formado entre a região E e a região F da ionosfera através das linhas do campo magnético.

Por outro lado, o termo $\partial n_0 / \partial q$ da Eq. (1) é o termo referente ao pico pré-reversão na deriva vertical do plasma e é responsável, logo após o pôr-do-sol, pela deriva vertical do plasma. Quanto mais alto estiver a camada ou maior for o gradiente de ionização de forma que venha a superar os efeitos de recombinação, haverá um crescimento das flutuações de densidade do plasma na base da região F e estas flutuações começam a ascender.

Neste trabalho apresentamos resultados de dois anos de observações de bolhas de plasma na emissão do OI 6300,0 nm na região equatorial do Brasil. Os resultados aqui apresentados mostram que existe uma preferência sazonal na aparição das bolhas de plasma entre os meses de Setembro a Março e isto concorda com outros estudos realizados em outras localidades (Sahai et al., 1999; Sahai et al., 2000; Pimenta et al., 2001; Pimenta, 2002; Sobral et al., 2002; Pimenta et al., 2003; Chu et al., 2005).

OBSERVAÇÕES

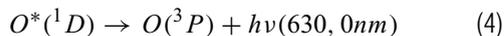
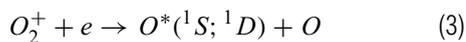
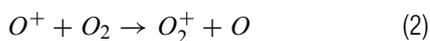
O imageador “all sky” é um instrumento óptico utilizado para fazer medições do airglow em diversos comprimentos de onda. Ele é formado por uma lente tipo olho de peixe que fornece um campo de visão de aproximadamente 180°, uma roda de filtros que seleciona o filtro para emissão desejada, um sistema telecêntrico 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 (Medeiros, 2001).

Desde setembro de 2000 são feitas observações do airglow com um imageador “all sky” no OLAP (Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba) situado em São João do Cariri (7°13'S; 35°52'W).

Essas observações são feitas em média 13 (treze) dias por mês em torno da lua nova, são observadas algumas emissões do airglow que destacamos neste trabalho a emissão do OI 630,0 nm na qual fizemos os nossos estudos das bolhas.

A emissão do OI 630,0 nm em baixas latitudes resulta da dissociação recombinativa dos íons O_2^+ pelas seguintes reações:



onde o símbolo “*” representa que o átomo está no estado excitado, h é a constante de Planck, ν é a frequência de emissão do fóton [cujo comprimento de onda é indicado entre parêntese na Eq. (4)] e e representa o elétron.

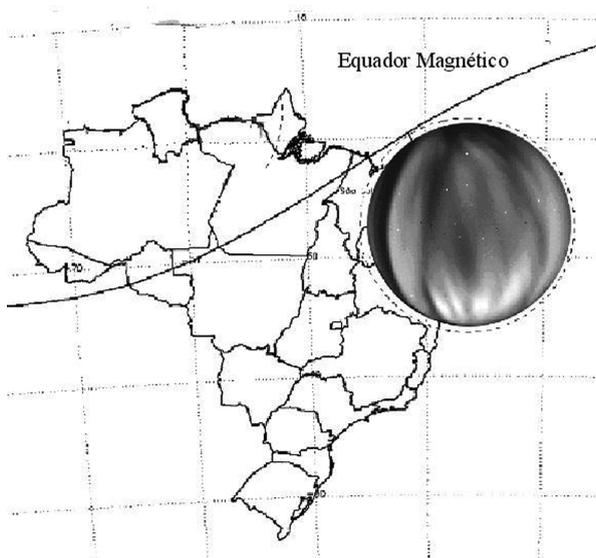


Figura 2 – Projeção da imagem do OI 630,0 nm observada em São João do Cariri na altura do pico de emissão da camada sobre o mapa do Brasil.

A Figura 2 mostra um exemplo da projeção de bolhas de plasma observadas pelo imageador “all sky” na emissão do OI 630,0 nm na noite do dia 01 de fevereiro de 2003 em São João do Cariri.

Foram dois anos de observações das bolhas, ou seja, entre setembro de 2000 e agosto de 2002, cujo período apenas em dois

meses (março e novembro de 2001) não foram registradas imagens. Apresentamos na Tabela 1 um resumo das observações feitas nestes dois anos.

Tabela 1 – Resumo dos dados observados na emissão do OI 630,0 nm entre os meses de Setembro de 2000 a Agosto de 2002 em São João do Cariri.

	Total Observado	Presença de Bolhas
Meses	22	14
Dias	220	110
Horas	1567,5	140,5

A determinação da frequência de ocorrência das bolhas de plasma é baseada na aparição de assinaturas de bolhas bem definidas (independente do tempo de exposição nas imagens) durante o período noturno. Mesmo que as bolhas sejam detectadas após a meia noite elas serão contadas como do dia anterior.

RESULTADOS

A Figura 3 mostra o total de dias observados em cada mês.

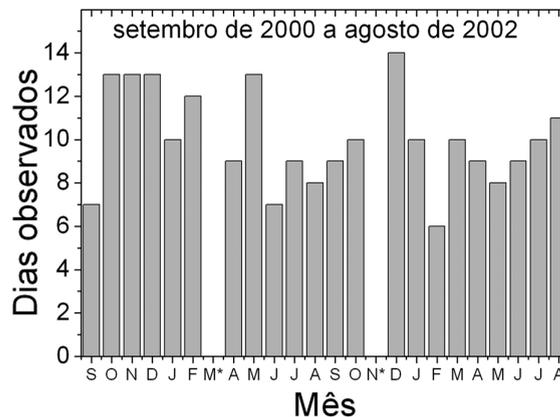


Figura 3 – Total de noites observadas em cada mês durante o período de Setembro de 2000 a Agosto de 2002.

Observando a Figura 3 percebemos que o número de noites observadas é considerável em cada mês e, então, podemos com boa precisão generalizar observações feitas neste período quando comparamos com outros trabalhos semelhantes feitos em outras localizações.

Na Figura 4 apresentamos a porcentagem de ocorrência das bolhas de plasma nos meses observados. Essa porcentagem foi obtida dividindo o número total de dias de cada mês em que foram detectadas as bolhas de plasma pelo total de dias em que tiveram observações no mês.

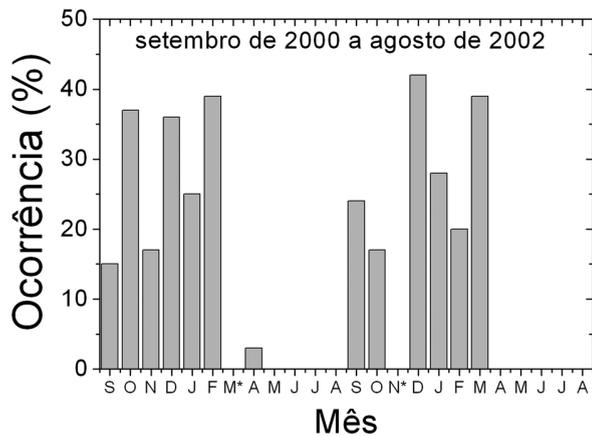


Figura 4 – Porcentagem de ocorrência de bolhas de plasma durante os meses observados.

A Figura 4 mostra que existe uma preferência na aparição das bolhas de plasma entre setembro e março de cada ano, sendo mais acentuado o surgimento nos meses de novembro, dezembro e janeiro de cada ano. Estes resultados concordam com outros trabalhos realizados anteriormente por Pimenta et al. (2001); Sobral et al. (2002); Chu et al. (2005), que mostram uma caracterização do comportamento sazonal das bolhas tanto para períodos de atividade solar alta como para períodos de atividade solar baixa e os resultados do período de aparição são bastante semelhantes com os nossos encontrados na região equatorial.

Podemos ver na Figura 5 o comportamento das bolhas ao longo da noite para os meses de equinócio (setembro, outubro, novembro e março) e para os meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro). É possível ver um aumento da presença das bolhas nos meses de verão com relação aos meses de equinócio que se deve ao fato que nos meses do verão é freqüente a observação de bolhas desde as 20:00 LT até aproximadamente as 04:00 LT do dia seguinte.

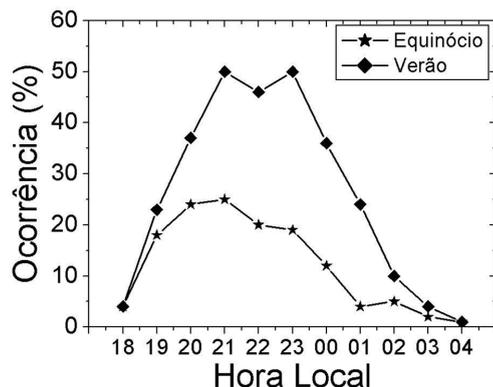


Figura 5 – Distribuição percentual da presença de bolhas de plasma ao longo da noite para o verão e para os equinócios.

Na confecção da Figura 5 fizemos uma contagem da quantidade de noites que apresentavam bolhas de plasma em cada hora da noite e depois calculamos a porcentagem em relação à quantidade total de noites que foram feitas observações.

Nos meses do equinócio o pico de presença das bolhas ficou situado por volta de 20:30 e 21:30 LT. Já para os meses de verão o pico da presença das bolhas fica entre as 21:00 e 23:30 LT. Pimenta et al. (2001) e Pimenta (2002) também encontraram resultados semelhantes aos nossos, só que fazendo a distinção entre o período de atividade solar alta e de atividade solar baixa. Também podemos ver que existe um maior número de noites com bolhas presentes entre as 21:00 e 23:00 LT nos meses do verão.

DISCUSSÕES

A freqüência sazonal de ocorrência das bolhas de plasma pode ser interpretada em função da variação de condutividade ao longo das linhas de campo entre regiões E conjugadas, tratadas nos trabalhos de Tsunoda (1985); Batista et al. (1986). Estes autores mostraram que o comportamento apresentado pelas derivas verticais do plasma (que está intimamente relacionada com a sazonalidade da freqüência de ocorrência das bolhas) deve-se ao fato das diferenças entre o alinhamento das linhas de campo magnético e o terminadouro solar relativo ao meridiano magnético, estes resultados também são usados no trabalho de Pimenta (2002).

Na região do Brasil a declinação magnética é elevada ($\sim 20^\circ$) e a defasagem entre o horário do pôr-do-sol nas duas regiões E conjugadas causará taxas distintas de condutividade. Quando o meridiano magnético e o terminadouro solar estão menos desalinhados o circuito mostrado na Figura 1 é interrompido simultaneamente nas duas extremidades e a deriva do plasma passa a ser vertical e controlado pelos ventos termosféricos da região F que estava ligada às regiões E conjugadas através das linhas de campo magnético. Nesta região de interesse o alinhamento acontece em torno dos meses do verão. Por outro lado, quando o meridiano magnético e o terminadouro solar estão muito desalinhados o circuito é interrompido em apenas uma das extremidades das regiões E conjugadas, sendo que na outra extremidade o circuito permanecerá fechado e servirá para neutralizar os campos de polarização dessa região. Esta maior defasagem acontece justamente em torno dos meses de inverno e, por isso, como mostra a Figura 4 não aparecem bolhas de plasma nestes meses. Na Figura 6 apresentamos um esquema que mostra o aspecto geométrico do alinhamento do terminadouro solar em relação com o meridiano magnético.

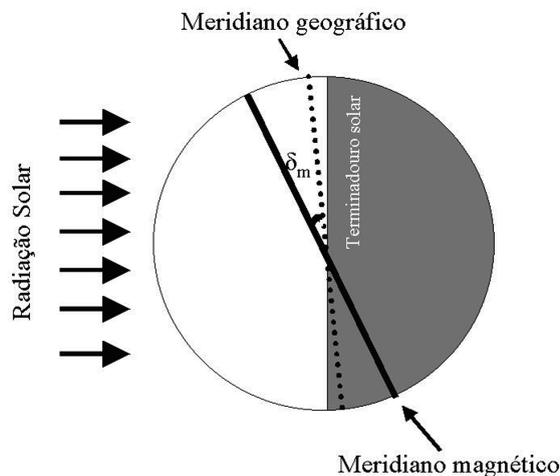


Figura 6 – Esquema mostrando o alinhamento entre o terminadouro solar e o meridiano magnético. A linha tracejada representa o meridiano geográfico, a linha contínua o meridiano magnético, a fronteira entre a região clara e a região escura representa o terminadouro solar e δ_m é a declinação magnética. Adaptação da figura de Pimenta (2002).

O pico de ocorrência das bolhas de plasma mostrado na Figura 5 ocorre por volta das 20:30 LT no meses do equinócio e possui um decaimento suave ao longo da noite. Enquanto que para os meses do verão este pico é deslocado para um intervalo entre as 21:00 e 23:30 LT. Um resultado muito similar foi apresentado por Pimenta, et al. (2001) para a região de Cachoeira Paulista (22.7°S; 45°W), neste trabalho os autores apresentaram resultados para o período de atividade solar alta e atividade solar baixa. Os resultados aqui apresentados foram observados durante o período de atividade solar alta (ciclo #23) e são bem semelhantes aos obtidos em Cachoeira Paulista também para o período de máxima atividade solar.

Como a ocorrência de bolhas de plasma está relacionada com a deriva vertical do plasma que depende do alinhamento entre o terminadouro solar e o meridiano magnético Batista et al. (1986) mostraram que a velocidade vertical do plasma durante os meses de equinócio a velocidade possui uma intensidade mais baixa e mais duradoura do que nos meses de verão e, por isso, é que as bolhas durante os meses verão possuem um pico de ocorrência mais tarde do que as bolhas nas noites de equinócio.

CONCLUSÕES

Esses resultados podem ser vistos como um fortalecimento para construção de uma climatologia de bolhas de plasma sobre a região do Brasil. Quando juntamos nossos resultados com outros trabalhos científicos relacionados com a sazonalidade de bolhas de plasma (citados no texto) fica bem evidente que o período de presença de bolhas de plasma no céu noturno do Brasil está

compreendido entre os meses de setembro a março. Portanto, de maneira geral, a ocorrência das bolhas de plasma depende do alinhamento entre o terminadouro solar e o meridiano magnético que liga duas regiões E conjugadas a região F. Este alinhamento também é determinante para estabelecer o pico de ocorrência das bolhas ao longo das noites.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- BATISTA IS, MEDEIROS RT, ABDU MA, SOUZA JR, BAILEY GJ & DE PAULA ER. 1986. Equatorial ionospheric plasma drift model over Brazilian region. *Journal of Geophysical Research*, 74(14): 3720–3722.
- CHU FD, LIU JY, TAKAHASHI H, SOBRAL JHA, TAYLOR MJ & MEDEIROS AF. 2005. The climatology of ionospheric plasma bubbles and irregularities over Brazil. *Annales Geophysicae*, 23: 379–384.
- HAERENDEL G. 1973. Theory of equatorial spread-f. Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik. Germany.
- HAERENDEL G, ECCLES JV & CAKIR S. 1992. Theory of modeling the equatorial evening ionosphere and origin of the shear in horizontal plasma flow. *Journal of Geophysical Research*, 97(A2): 1209–1223.
- HEELIS RA. 2004. Electrodynamics in the low and middle latitude ionosphere a tutorial. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 66: 825–838.
- KELLEY MC & MILLER CA. 1997. Mid-latitude thermospheric plasma physics and electrodynamic: A review. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59(13): 1643–1654.
- MEDEIROS AF. 2001. Observações de ondas de gravidade através do imageamento da aeroluminescência (tese de doutorado). São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 187 pp
- PIMENTA AA. 2002. Estudos da deriva zonal e Dinâmica das Bolhas de Plasma na região Tropical (tese de doutorado). São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 184 pp.
- PIMENTA AA, FAGUNDES PR, BITTENCOURT JA & SAHAI Y. 2001. Relevant aspects of equatorial plasma bubbles under different solar activity conditions. *Adv. Space Res*, 27(6-7): 1213–1218.
- PIMENTA AA, BITTENCOURT JA, FAGUNDES PR, SAHAI Y, BURITI RA, TAKAHASHI H & TAYLOR MJ. 2003. 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*, 65: 1117–1126.

- SAHAI Y, FAGUNDES PR & BITTENCOURT JA. 1999. Solar cycle effects on large scale equatorial f-region plasma depletions. *Adv. Space Res.*, 24(11): 1477–1480.
- SAHAI Y, FAGUNDES PR & BITTENCOURT JA. 2000. Transequatorial f-region ionospheric plasma bubbles: Solar cycle effects. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62: 1377–1383.
- SANTANA DC, SOBRAL JHA, TAKAHASHI H & TAYLOR MJ. 2001. Optical studies of the ionospheric irregularities over the Brazilian region by nocturnal images of the OI 630 nm emission. *Adv. Space Res.*, 27(6-7): 1207–1212.
- SOBRAL JHA, ABDU MA & BATISTA IS. 1980a. Emission studies on ionosphere dynamics over low latitude in Brazil. *Annales Geophysicae*, 36(2): 199–204.
- SOBRAL JHA, ABDU MA, BATISTA IS & ZAMLUTTI CJ. 1980b. Association between plasma bubble irregularities and emission disturbance over Brazilian low latitudes. *Geophysical Research Letters*, 11(7): 980–982.
- SOBRAL JHA, ABDU MA, TAKAHASHI H, TAYLOR MJ, PAULA ERD, ZAMLUTTI CJ, AQUINO MGD & BORBA GL. 2002. Ionospheric plasma bubble climatology over Brazil based on 22 years (1977–1998) of 630 nm airglow observations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64: 1517–1524.
- TAKAHASHI H, TAYLOR MJ, SOBRAL JHA, MEDEIROS AF, GOBBI D & SANTANA, DC. 2001. Fine structure of the ionospheric plasma bubbles observed by the 016300 and 5577 airglow images. *Adv. Space Res.*, 27(6-7): 1189–1194.
- TSUNODA RT. 1985. Control of the seasonal and longitudinal occurrence of equatorial scintillation by the longitudinal gradient in integrated E-region Pedersen conductivity. *Journal of Geophysical Research*, 90(A1): 447–456.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Igo Paulino. Graduado em Física pela Universidade Federal de Campina Grande – UFCG (Bacharelado em 2006) e pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB (Licenciatura em 2005). Atualmente é estudante de pós-graduação (mestrado) em meteorologia na UFCG. Sua área de pesquisa é a eletrodinâmica da alta atmosfera e fenômenos correlacionados utilizando técnicas ópticas de imageamento do céu.

Amauri Frago de Medeiros. Graduado em Física pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB (1984), fez mestrado em Ensino de Ciências na Universidade de São Paulo – USP (1995). Em 1998 ingressou na área de pesquisa espacial, concluindo seu doutorado em Geofísica Espacial no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2001). Recentemente fez estudos de Pós-Doutorado na Utah State University – EUA (2007). Seu interesse em pesquisa é pelo estudo da dinâmica da região da mesosfera (ondas atmosféricas) e da ionosfera utilizando instrumentos ópticos e de rádio. É professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.

Ricardo Arlen Buriti. Graduado em Física pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB (1984). Fez mestrado em Físico-Química na Universidade de São Paulo – USP (1987). Obteve seu doutorado em Ciências Espaciais no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (1997). Recentemente, fez Pós-Doutorado na University of Western Ontario – Canadá (2006). Suas áreas de interesse em pesquisa são a dinâmica e a temperatura na região da mesosfera. É professor Adjunto do Departamento de Física da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG.