



Observações simultâneas da emissão do OI 630 nm da Aeroluminescência Noturna através de Fotômetros nos Observatórios Espaciais de São Martinho da Serra (OES) e Cachoeira Paulista (CP)

Elói A. Grellmann^(1,2), José V. Bageston⁽³⁾, Cristiano M. Wrasse⁽³⁾, Kazuo Makita⁽⁴⁾, Hisao Takahashi⁽³⁾, Nelson J. Schuch⁽²⁾.

- (1) Laboratório de Ciências Espaciais de Santa Maria – LACESM/CT - UFSM, Santa Maria, Brasil,
 (2) Centro Regional Sul de Pesquisas Espaciais – CRSPE/INPE – MCT, Santa Maria, Brasil,
 (3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE/MCT, São José dos Campos, Brasil.
 (4) Faculdade de Engenharia, Universidade Takushoku, Japão.

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11 – 14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

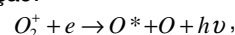
Resumo

Este trabalho visa estudar o comportamento das “Bolhas de Plasma” na Ionosfera observando a emissão da Aeroluminescência do oxigênio OI 630 nm em dois sítios observacionais na mesma Latitude Geomagnética, um em São Martinho da Serra, RS (29°S, 53°W, -33° dip latitude), e o outro em Cachoeira Paulista, SP (22.7°S, 45°W, -34° dip latitude). Foram realizadas as medidas simultâneas das variações temporais da intensidade de emissão OI 630 nm no período de janeiro de 2000 a fevereiro de 2005. Para o presente trabalho foram escolhidas quatro noites quando com ocorrência de “Bolhas de Plasma” nos dois locais. Observou-se nos eventos uma assimetria em relação ao número de “Bolhas” e simetria em relação à intensidade da emissão medida. A análise estatística sobre a ocorrência das “Bolhas” está sendo desenvolvida.

Introdução

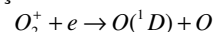
A Aeroluminescência é um fenômeno óptico que ocorre na Atmosfera Terrestre entre 80 a 500 km de altitude, devido aos processos de reação fotoquímica e iônica dos constituintes locais. As emissões, tais como do oxigênio atômico de 557 nm e 630 nm, hidroxila (OH), e oxigênio molecular (O₂), são bem conhecidos e tem sido estudado desde 1950. As medidas das variações temporais e espaciais das emissões fornecem uma técnica conveniente para estudar a dinâmica e a química da alta Atmosfera. A emissão do OI 630 nm, é a mais utilizada no estudo da dinâmica da Região F noturna. A camada emissora tem aproximadamente 50 km de espessura, um pouco abaixo do pico da Região F, onde se concentra a fonte de sua emissão, entre 240 e 300 km de altitude. A intensidade de emissão do OI 630 nm varia quando a densidade de elétrons aumenta ou diminui respectivamente, demonstrando que a redução da intensidade desta emissão, quando comparada a regiões vizinhas, indica a presença de “Bolhas de Plasma”. A linha vermelha (630

nm) do OI é emitida pelo átomo de oxigênio no nível de energia O(¹D), que ao decair O(¹D) → O(³P) + hν(630nm), libera o excesso de energia na forma de radiação eletromagnética. O nível O(¹D) é gerado a partir do processo de recombinação dissociativa do íon molecular O₂⁺ com elétrons da região F Ionosférica, o qual é expresso pela seguinte reação:

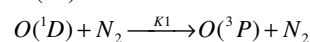


Onde h é a constante de Planck, ν é a frequência correspondente ao comprimento de onda 630 nm e $h\nu$ é a energia que poderá excitar um ou dois dos átomos de oxigênio. O símbolo (*) indica que o átomo está no estado excitado. A relação de rendimento para o O(¹D) produzido como uma função de altura pode ser calculada das taxas de emissão volumétrica. Neste cálculo a produção e perda são esquemas apresentados por Link e Cogger (1988).

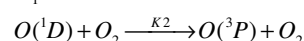
Produção:



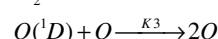
Perda do O(¹D):



$$K_1 = 2.3 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

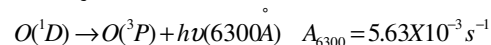


$$K_2 = 3.2 \times 10^{-11} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$



$$K_3 = 8.0 \times 10^{-12} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$$

Radiação:



$$A_{1D} = 7.45 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

Com estes dados podemos ainda calcular a taxa de emissão volumétrica pela seguinte reação:

$$V_{6300} = f(^1D) \alpha_1 [O_2^+] [e] \times \frac{A_{6300}}{A_{1D} + K_1 [N_2] + K_2 [O_2] + K_3 [O]}$$

Formação das Bolhas de Plasma na Ionosfera:

Nas camadas mais altas da Ionosfera as forças coulombianas tendem a dominar o movimento do Plasma Ionosférico por se tratar de um meio ionizado, sofrendo constantes transformações de ordem físico-química. Uma

dessas transformações é o fenômeno em que ocorre um alto grau de rarefação do Plasma Ionosférico alinhado por extensas regiões ao longo do Campo Geomagnético, denominado de “Bolhas de Plasma”. O Plasma deriva para cima a partir da Base da Camada F, nesta região o transporte de Plasma tem direção perpendicular ao Campo Geomagnético é controlado pela deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$. O Campo Elétrico tem origem nos Ventos Neutros de Marés que formam o Dínamo da Região E que faz o Plasma subir e ter direção Oeste durante o dia, e os Ventos Termosféricos responsáveis pela formação do Dínamo da Região F fazem o Plasma descer e ter direção Leste. A deriva vertical $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ apresenta um aumento abrupto na deriva vertical ao pôr do sol que é denominado Pico de Pré-Reversão. Após o pôr do sol ocorre na Região E um processo rápido de recombinação e não há condutividade suficiente para curto-circuitar os Campos Elétricos da Região F. Devido à recombinação e a deriva $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, o gradiente de ionização da parte inferior da Camada F começa a aumentar. Quando a camada está a certa altura ou o gradiente de ionização está suficientemente elevado para superar efeitos de recombinação, haverá o crescimento das flutuações na densidade, devido à instabilidade Rayleigh-Taylor, conforme apresentado na Figura 1.

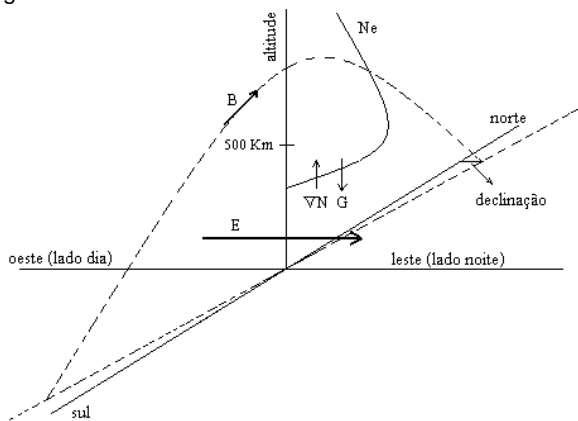


Figura 1 – Exibição do diagrama da configuração clássica para a Instabilidade Rayleigh-Taylor. A Camada F sobe com o aumento do Campo Elétrico e um gradiente de densidade começa a aumentar na Base da Camada F. Fonte: Robert & Andrew, 2000 – Figura 11.29, modificada.

Essas flutuações originam as “Bolhas de Plasma” na Base da Camada F, que se estendem as altitudes de até 1500 km. A extensão Norte-Sul tem dimensões da ordem de 5.000 km ao longo das linhas do Campo Magnético da Terra. A extensão Leste - Oeste de uma região com distúrbios pode atingir comprimentos de aproximadamente 450 km, com uma distância horizontal entre as regiões de Bolhas de Plasma, separadas por dezenas a centenas de Km. Após a Bolha se formar, ela deriva para cima com uma velocidade que geralmente varia de 100 m/s a 500 m/s. Do crepúsculo à noite sob o controle do Campo Elétrico do Dínamo da Região F, o Plasma deriva na direção Leste com uma velocidade igual à dos Ventos Neutros Zonais que geram o Campo Elétrico de polarização na Região F, chegando aproximadamente a uma velocidade máxima de 200 m/s. O presente trabalho

busca compreender a dinâmica físico-química das “Bolhas de Plasma”, como seu deslocamento ao longo da linha do Equador Magnético. Para isso foram escolhidas algumas noites com a presença de Bolhas de Plasma observadas pelos Fotômetros de Cachoeira Paulista e do Observatório Espacial do Sul. Ambos localizam-se aproximadamente na mesma Latitude Geomagnética, porém com distância de aproximadamente 1200 km. Utilizando estes Fotômetros é possível observar a radiação de comprimentos de onda 630 nm provenientes do oxigênio ionizado. Com a detecção da deriva zonal das “Bolhas de Plasma” primeiramente sobre o céu noturno do Observatório Espacial do Sul e após a passagem sobre o céu do Observatório de Cachoeira Paulista, buscou-se alguns parâmetros que indiquem alguma assimetria relacionada ao número de “Bolhas de Plasma”, na intensidade da Aeroluminescência do OI 630 nm e o tempo que a “Bolha” leva para percorrer a distância entre o Observatório Espacial do Sul e o Observatório de Cachoeira Paulista. Para isso foi utilizada a técnica de fotometria que é tradicionalmente empregada no estudo da Aeroluminescência Atmosférica.

Instrumentação e Observações

Os dados do OI 630 nm utilizados neste trabalho são provenientes dos Fotômetros FOTSUL e do MULTI2. O primeiro Fotômetro está sendo operado no Observatório Espacial do Sul (29°S, 53°W, -33° dip latitude), junto ao Laboratório de Ótica e Luminescência Atmosférica - LOLA/OES/CRSPE /INPE - MCT, em São Martinho da Serra. O Fotômetro Zenital - FOTSUL consiste em um sistema de filtros de interferência ótica (um caso especial do interferômetro *Fabry-Perot*) capaz de selecionar comprimentos de onda distintos das transições eletrônicas do oxigênio ionizado nos comprimentos de onda 557 nm e 630 nm. O Fotômetro é composto por dois filtros que se alternam, registrando os dois comprimentos de onda, num período de 2 segundos para cada filtro. O sistema de filtros está acoplado com um tubo fotomultiplicador e um sistema eletrônico de amplificação de sinal. Juntamente com estes dispositivos está acoplado um sistema de armazenamento e coleta de dados. Já o Fotômetro MULTI2 está instalado no Centro Espacial de Cachoeira Paulista (22.7°S, 45°W, -34° dip latitude), e destina-se a medir as emissões da aeroluminescência do oxigênio atômico, linha verde (558 nm) e vermelha (630 nm), do sódio mesosférico, da hidroxila, e do oxigênio molecular. A unidade ótica consiste em um disco contendo cinco filtros de interferência que determinam cada um, uma faixa de comprimento de onda, um obturador opaco, usado para medir o ruído térmico, uma lente e um diafragma que determinam o campo de visão, um tubo fotomultiplicador e os instrumentos eletrônicos que registram os sinais. O período de observação pesquisado foi entre janeiro de 2000 e fevereiro de 2005. Após uma ampla análise nos bancos de dados dos Observatórios, foram selecionados dados que apresentou a ocorrência de “Bolhas de Plasma” tanto em São Martinho da Serra, quanto em Cachoeira Paulista. As observações foram realizadas sem fontes de luz artificiais e em noites sem Lua, durante o período de Lua Nova, pois estas fontes luminosas poderiam ocasionar danos aos

equipamentos e poluir os dados da Aeroluminescência Noturna.

Resultados

A deriva zonal do Plasma Ionosférico é causada por Campos Elétricos Verticais na Região F, que por sua vez, são gerados pela ação de Ventos Neutros Zonais. A Figura 2 apresenta o mapa da América Latina, destacando a localização dos Observatórios de São Martinho da Serra e de Cachoeira Paulista. Nesta figura também estão destacados o Equador Magnético e a Latitude Magnética que passa próximo aos dois sites de observação. Como os Fotômetros estão em Latitudes Geomagnéticas muito próximas e a uma distância de aproximadamente 1200 km, foi possível fazer uma análise comparativa da emissão do OI 630 nm. Foram observados os comportamentos que revelam uma simetria em relação à emissão da Aeroluminescência e uma assimetria em relação à rarefação do Plasma Ionosférico medida pelos Fotômetros.

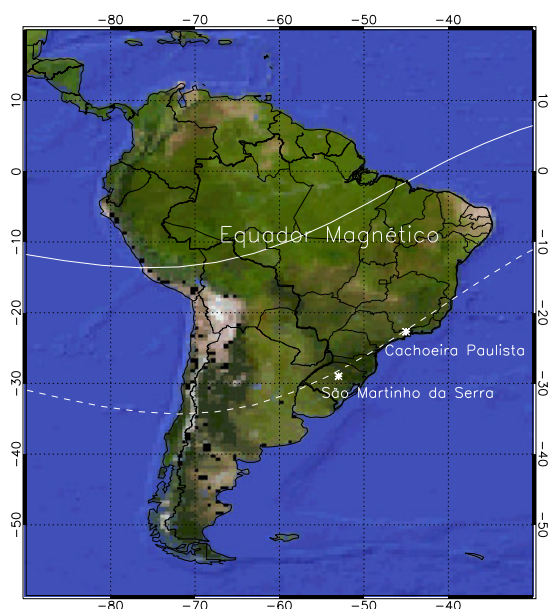


Figura 2 – Localização dos Observatórios de São Martinho da Serra – RS e de Cachoeira Paulista – SP, juntamente com a linha do Equador Magnético e a Latitude Magnética que passa próximo aos observatórios.

A variação de intensidade da emissão OI 630 nm é apresentada na Figura 3 para a noite de 6 de março de 2000. Observa-se uma queda brusca na intensidade de emissão do OI 630 nm nos dois observatórios em torno das 22h00min, indicando a passagem de “Bolhas” sobre o Observatório de Cachoeira Paulista (CP) e São Martinho da Serra (OES). A partir das 24h00min ocorre uma gradativa diminuição da emissão da Aeroluminescência medida devido à diminuição da concentração de íons ou a subida da Camada Ionosférica. Observa-se também que existe uma diferença de variação na taxa de emissão entre os dois locais. No OES, houve várias depleções na intensidade entre 21h30min até 23h30min, enquanto que em CP houve apenas uma depleção acentuada em torno

das 22h:00min, está depleção coincidindo com a observada no OES.

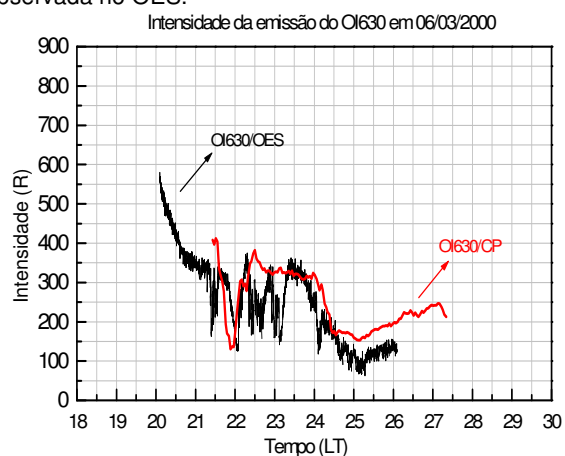


Figura 3 – Intensidade de emissão do OI 630 nm nos Observatórios de São Martinho da Serra (OES) (em preto) e Cachoeira Paulista (CP) (em vermelho). Note que a escala temporal varia das 18 às 30 LT, indicando o período de observação entre 18 e 6 horas da manhã do dia seguinte.

Na Figura 4 observa-se a variação da intensidade de emissão do OI 630 nm para a noite de 5 de março de 2000. Nota-se outro exemplo das depleções na intensidade de emissão do OI 630 nm nos dois locais. No OES entre 22h:30min e 23h:30min observa-se a diminuição mais de 50% na intensidade de emissão. Porém, a intensidade de emissão em CP apresenta apenas uma pequena diminuição da Aeroluminescência local. A intensidade do OI 630 nm no OES apresenta-se mais instável que a emissão observada em CP, devido a passagens de “Bolhas”. A partir das 24h:00min tem-se uma diminuição acentuada da Aeroluminescência, nos dois observatórios, até o amanhecer.

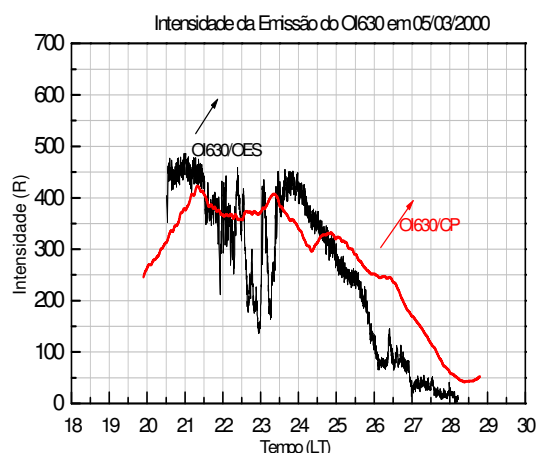


Figura 4 – Intensidade da emissão do OI 630 nm detectada no Observatório Espacial do Sul (OES) e de Cachoeira Paulista (CP).

A Figura 5 apresenta a intensidade de emissão do OI 6300 na noite de 15 de fevereiro de 2002. Nesta noite

percebem-se várias depleções na emissão do OI 630 nm em ambos os observatórios, com um aumento ocorrendo em torno das 21h:00min em CP e às 23h:30min no OES. Após a meia noite ocorre um segundo aumento na intensidade de emissão em CP, ao contrário do que ocorre no OES, que apresenta um decréscimo na emissão.

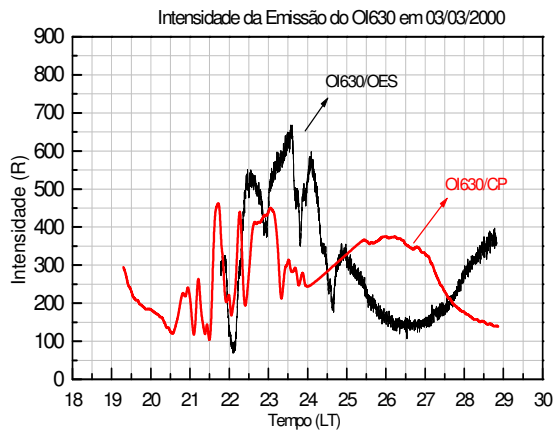


Figura 5 – Intensidade da emissão do OI 630 nm observada no OES e em CP na noite de 03/03/2000.

Os dados apresentados nas figuras anteriores mostraram uma maior variação na intensidade de emissão do OI 630 nm observado no OES do que em CP. Entretanto, a Figura 6 apresenta os dados coletados na noite de 15 de fevereiro de 2002, onde ocorreu uma grande diferença de comportamento na variação noturna do OI 630 nm entre os dois observatórios. As observações feitas do OES apresentam um baixo nível de intensidade e pequena depleção entre 21h:00min e 24h:00min. Por outro lado, os dados observados em CP, apresentam alto nível de intensidade, variando entre 900 e 1200 Rayleighs. Em CP nota-se a ocorrência de várias depleções e uma grande amplitude destas, demonstrando um comportamento distinto da atmosfera nos os dois locais.

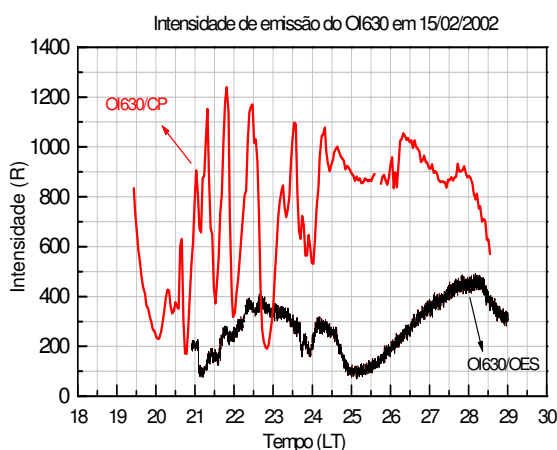


Figura 6 – Intensidade da emissão do OI 630 nm observada no OES e em CP na noite de 15/02/2002.

Discussão e Sumário

Através das observações realizadas nos Observatórios de São Martinho da Serra e Cachoeira Paulista foi possível fazer uma análise do comportamento da emissão do OI 630 nm e destacar a ocorrência das “Bolhas de Plasma”. A presença das “Bolhas de Plasma” pode ser observada através das quedas abruptas na intensidade da Aeroluminescência do OI 630 nm, nos dados adquiridos por fotômetros.

Observou-se que há uma diferença no comportamento das depleções ocorridas nas intensidades de emissão no OES e em CP, apesar dos locais estarem aproximadamente na mesma Latitude Geomagnética e, estarem a uma distância de 1200 km.

As intensidades de emissão do OI 630 nm apresentaram uma mesma tendência para as noites de 05/03/2000 e 06/03/2000 com uma diminuição gradual da intensidade ao longo da noite, devido à subida da Camada Ionosférica ou pela diminuição da concentração de íons. Porém, o número de depleções observadas no OES foi maior, variando entre 4 e 5 contra apenas 1 em CP.

Na noite de 03/03/2000 o comportamento da intensidade de emissão nos dois observatórios foi mais distinto, apresentando o mesmo número de depleções, em torno de 5, mas com certa defasagem entre elas. Após a meia noite observou-se uma diminuição na intensidade de emissão no OES, porém houve um aumento da intensidade de emissão em CP.

Para a noite de 15/02/2002 observou-se pouca variação noturna na emissão do OI 630 nm no OES. O mesmo não foi observado em CP, que apresentou uma intensidade bem maior que no OES e com várias depleções ao longo da noite.

O número de depleções na intensidade de emissão do OI 630 nm mostrou-se diferente, portanto houve mudanças na dinâmica atmosférica, representadas através das “Bolhas de Plasma”. Porém, para que este fato seja mais bem explicado, faz-se necessário o uso de outras técnicas observacionais, tais como imageadores, a fim de contribuir de forma mais significativa na descrição e compreensão deste fenômeno.

Referências

- Robert, W. S.; Andrew, F. N.; Ionospheres, Physics, Plasma Physics, and Chemistry, Cambridge University Press, p. 554, 2000.
- Chamberlain, J. W.; Physics of the Aurora and Airglow, American Geophysical Union, p. 704, 1995.
- Santo, P. M. T. Estudo das derivas zonais das irregularidades de plasma ionosférico na região brasileira. São José dos Campos, p. 117. (INPE-8208-TDI/763). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.
- Wrasse, C. M. Observação da temperatura rotacional da hidroxila através da aeroluminescência na região da mesosfera terrestre. São José dos Campos, p. 125. (INPE-8003-TDI/751). Dissertação (Mestrado em Geofísica

Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000.

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

Takahashi, H., Clemesha, B. R., Batista, P. P., Sahai, Y., Abdu, M. A. and Muralikrishna, P. (1989) Equatorial F-Region OI 6300 Å and OI 5577 Å emission profiles observed by rocket-borne airglow photometers. Planet. Space Sci.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao Grupo de Aeroluminescência (LUME) da Divisão de Aeronomia (DAE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais por disponibilizar os dados do Fotômetro MULTI2 e pela orientação durante a realização deste trabalho.