

OBSERVAÇÕES SIMULTÂNEAS DAS EMISSÕES OI 5577 Å, O₂A (0-1), NaD 5893 Å, OH (9-4) E DAS TEMPERATURAS ROTACIONAIS TO₂ E TOH NA ALTA ATMOSFERA

P.R. FAGUNDES, H. TAKAHASHI, Y. SAHAI & N.R. TEIXEIRA

Medidas simultâneas de OI 5577 Å, NaD, O₂A (0-1) e OH (9-4) de luminescência atmosférica noturna na região da mesopausa têm sido feitas em Cachoeira Paulista (22,7 °S, 45,0 °W) desde 1983. Todas estas emissões envolvem o oxigênio atômico e têm origem numa faixa de 15-20 km, centrada na altura de 90 km. As medidas de O₂ e OH são usadas para estudar as temperaturas rotacionais TO₂ e TOH, respectivamente. As variações temporais das intensidades e das temperaturas rotacionais constituem uma importante técnica para estudar a fotoquímica e a dinâmica da mesosfera; uma análise de correlação cruzada entre as intensidades e as temperaturas rotacionais nos permite avaliar a resposta dos constituintes minoritários (O, Na e OH) quando a mesosfera é perturbada. Os dados analisados correspondem ao período de janeiro/87 a janeiro/88, e pode-se verificar que as temperaturas rotacionais respondem mais rápido que as emissões à passagem de uma perturbação.

SIMULTANEOUS OBSERVATIONS OF OI 5577 Å, O₂A (0-1), NaD 5893 Å, AND OH (9-4) NIGHTGLOW EMISSIONS AND ROTATIONAL TEMPERATURES TO₂ AND TOH IN THE UPPER ATMOSPHERE – Simultaneous measurements of the OI 5577 Å, NaD, O₂A (0-1), and OH (9-4) nightglow emissions from the mesopause region have been carried out at Cachoeira Paulista (22.7 °S, 45.0 °W) since 1983. Both the O₂ (0-1) and OH (9-4) measurements are used to study rotational temperature, that is, TO₂ and TOH, respectively. All these emissions involve atomic oxygen and originate from a narrow height region of about 15-20 km width centered at 90 km of altitude. Therefore observations of intensity and rotational temperature variations provide an important remote sensing technique to study the mesospheric photochemistry and dynamics. A cross-correlation analysis between intensity variations of different emission and rotational temperatures has been carried out and salient features from this analysis are presented and discussed in this paper.

INTRODUÇÃO

A luminescência atmosférica que ocorre nas regiões da mesopausa e baixa termosfera, entre 80 e 120 km, é causada por processos fotoquímicos que envolvem oxigênio atômico, hidrogênio e ozônio na região. Foram identificados mais de 30 diferentes emissões no espectro da luminescência noturna; entre elas, as principais são do oxigênio atômico OI 5577 Å, OI 6300 Å, OI 7774 Å, oxigênio molecular O₂A (0-1) em 8645 Å, sódio NaD 5893 Å e as bandas da hidroxila OH (v'-v"). Observações da variação das intensidades destas emissões permitem estudar os comportamentos físicos e químicos da alta atmosfera, além dos efeitos dinâmicos, tais como a propagação de ondas naquela região.

Durante as últimas duas décadas, vários trabalhos

foram dedicados ao estudo das ondas de gravidade e marés na alta atmosfera, utilizando-se da técnica de observação da variação da intensidade da luminescência noturna ("Airglow") por fotômetros, espectrômetros, imagiadores (Krassovsky & Shagaev, 1974; Myrabo et al., 1987; Taylor et al., 1987). As medidas simultâneas de várias emissões, por exemplo, OI 5577 Å, O₂A (0-1), NaD e OH (9-4), permitem estudar a correlação entre elas, ou mesmo, estudar a propagação de perturbações mesosféricas (ondas de gravidade e marés) (Misawa & Takeuchi, 1977, 1982; Takahashi et al., 1979, 1985; Molina et al., 1985; Rodrigo et al., 1985); também, as medidas das temperaturas rotacionais TO₂ e TOH têm sido utilizadas para o mesmo propósito (Noxon, 1978; Takahashi et al., 1986; Amosov et al., 1986).

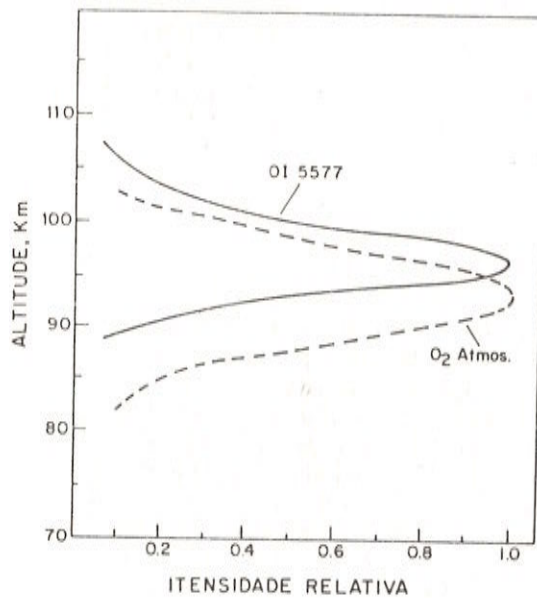
Os perfis das emissões acima citadas podem ser

Instituto de Pesquisas Espaciais - INPE, Caixa Postal 515, 12201 São José dos Campos, SP, Brasil.

vistos na Fig. 1. Estes perfis são obtidos utilizando fotômetros a bordo de foguetes; note na Fig. 1 que cerca de 70% do volume de emissão está concentrado em torno do pico, com uma largura, aproximadamente, de 10 km.

Com o objetivo de estudar os aspectos dinâmicos da mesosfera, foram realizadas medidas simultâneas das emissões OI 5577, NaD, O₂A (0-1) e OH (9-4), e as temperaturas rotacionais da banda O₂A (0-1) (TO₂) e da banda OH (9-4) (TOH), utilizando um fotômetro de filtro inclinável.

Neste trabalho serão apresentadas as medidas



normalizadas da variação noturna das emissões e das temperaturas rotacionais das 39 noites observadas em Cachoeira Paulista (22,7 °S, 45,0 °W), durante o período compreendido entre janeiro/1987 e janeiro/1988. Também, será apresentado o estudo de correlação cruzada entre as emissões e entre as temperaturas rotacionais, o que possibilitará determinar a defasagem temporal entre as várias emissões e entre as temperaturas rotacionais, permitindo, desta forma, uma avaliação de como as emissões e as temperaturas rotacionais respondem a passagem de uma perturbação atmosférica na região.

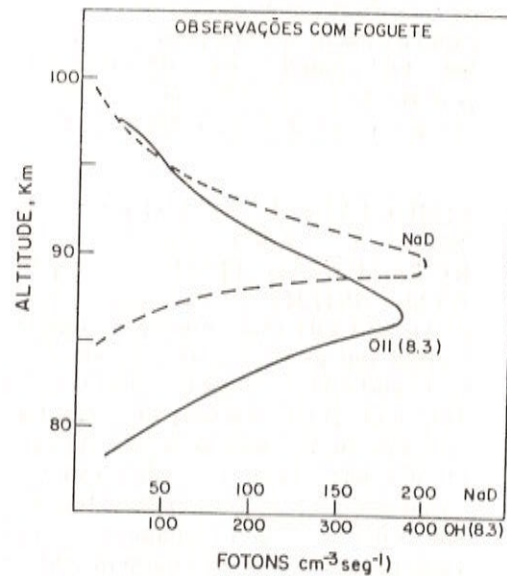


Fig. 1

Figura 1. Perfis verticais das emissões observadas OI 5577 Å (Thomas et al., 1979), O₂A (0-0), (Witt et al., 1979), NaD (Stegman & Witt, 1977) e OH (8-3) (Witt et al., 1979).

Figure 1. Observed vertical profiles of OI 5577 Å (Thomas et al., 1979), O₂A (0-0) (Witt et al., 1979), NaD (Stegman & Witt, 1977) and OH (8-3) (Witt et al., 1979) emissions.

INSTRUMENTAÇÃO

O fotômetro utilizado para medir as intensidades e as temperaturas rotacionais é do tipo filtro inclinável, cuja técnica permite efetuar a varredura do comprimento de onda.

Uma descrição esquemática do funcionamento do fotômetro pode ser vista na Fig. 2. Na unidade do fotômetro temos o alojamento dos filtros de interferência, onde cinco filtros são fixados em um prato giratório; quando um dos filtros entra em posição, no eixo óptico, um motor de passo inclina o filtro selecionando um determinado comprimento de onda, de tal forma que um ciclo completo dos cinco filtros leva cerca de dois minutos. As principais características da fotomultiplicadora e dos filtros de interferência podem ser vistas na Tab. 1.

VARIAÇÃO NOTURNA DAS EMISSÕES E DAS TEMPERATURAS ROTACIONAIS

As intensidades das emissões possuem variações noturnas que são controladas pelos processos químicos e pela dinâmica da mesosfera. Foram analisadas, das 39 noites de dados, as variações noturnas das emissões OI 5577, O₂A (0-1), NaD e OH (9-4) e das temperaturas rotacionais TOH e TO₂. Na Fig. 3 temos um exemplo típico de uma noite, que mostra poucas variações nas intensidades de OI 5577 e O₂A (0-1), e um declínio monotônico da intensidade de OH (9-4), o que indica um domínio no processo químico em relação aos efeitos dinâmicos; já na Fig. 4 temos um exemplo, onde a dinâmica da mesosfera está influenciando na variação noturna das emissões e das temperaturas rotacionais. Observe, também na Fig. 4, que existe

uma defasagem temporal entre as diversas emissões e entre as temperaturas rotacionais. Um estudo de correlação cruzada, que será apresentado adiante, vai nos precisar de quanto é esta defasagem.

MÉDIA NORMALIZADA

Para saber qual é o comportamento médio da variação noturna das intensidades das emissões e das temperaturas rotacionais durante o período de janeiro/1987 a janeiro/1988, foram feitas médias normalizadas das intensidades e das temperaturas rotacionais, que são mostradas na Fig. 5.

Na Fig. 5, podemos notar que as emissões de OI 5577 e O₂A (0-1) possuem um mínimo por volta da meia noite. Já a intensidade do OH (9-4) e NaD possuem um mínimo por volta de 01h00, após o mínimo de OI 5577, e um ligeiro acréscimo a partir deste horário. A amplitude de variação das temperaturas rotacionais é bem menor do que a amplitude de variação das intensidades. No entanto, podemos verificar que, também por volta da meia noite, apresenta um mínimo.

O estudo de correlação destas médias normalizadas das emissões, Fig. 5, mostra que há uma boa correlação entre as intensidades do NaD e OH (9-4) ($r = 0,89$) e entre OI 5577 e O₂A (0-1) ($r = 0,91$). Resultados semelhantes de boa correlação entre estas emissões (NaD-OH e OI 5577 O₂A) também foram verificados por outros trabalhos (Weill, 1967; Rao & Kul-

Tabela 1. Principais características do fotômetro e dos filtros de interferência.

Table 1. Characteristics of photometer and interference filters.

FOTÔMETRO			
Abertura	5 cm de diâmetro		
Visão	2 graus de abertura		
PMT	GaAS fotocátodo (Hamamatsu, R 943-02)		
FILTROS			
filtro	pico Å	largura de banda ΔÅ	sensibilidade CS/R SEG
OI 5577	5577	13,99	31,06
O ₂ A	8659	13,28	21,74
NaD	5893	15,30	64,76
OH	7749	14,09	23,11

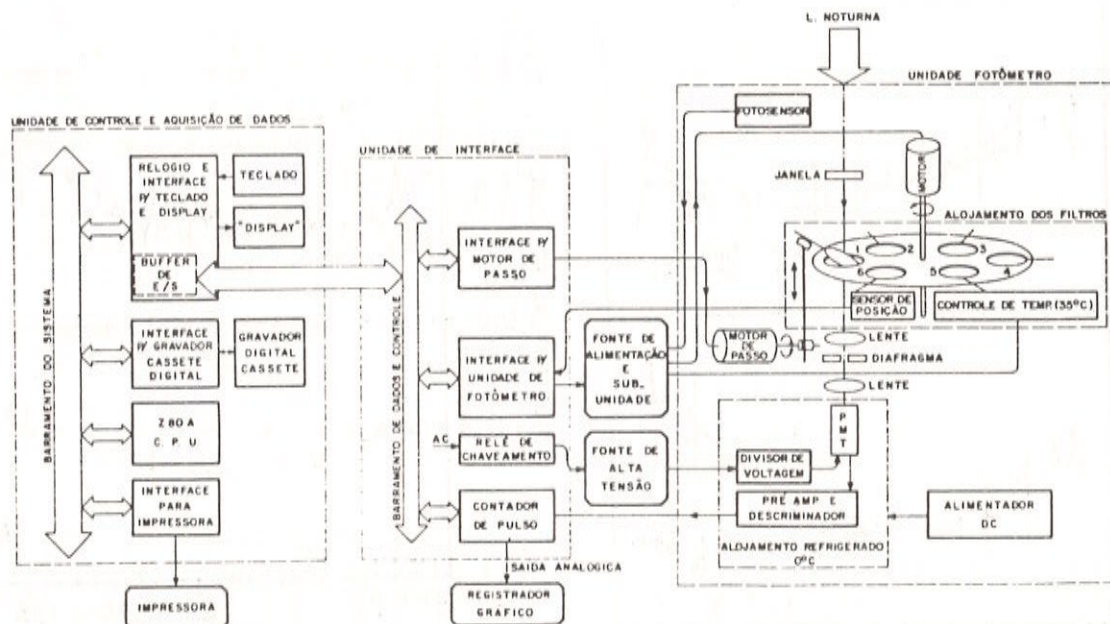


Figura 2. Esquema de funcionamento do fotômetro multicanal.

Figure 2. Block diagram of multichannel tilting filter photometer.

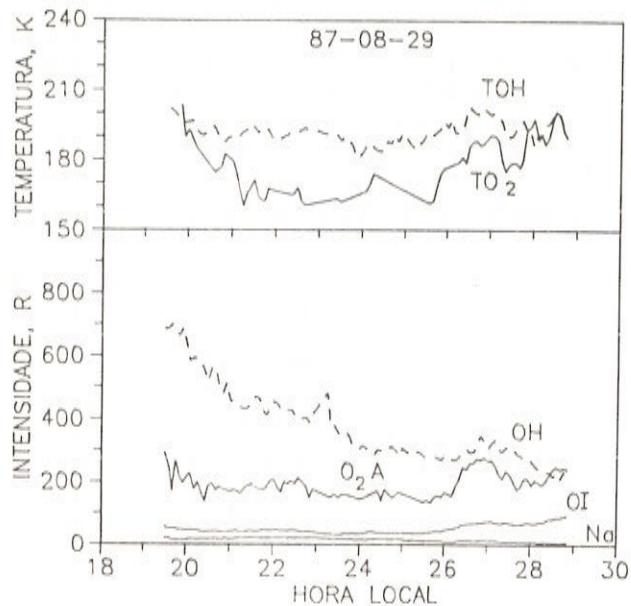


Figura 3. Variação noturna das temperaturas rotacionais TO_2 e TOH e das emissões OI 5577, O_2A (0-1), NaD e OH (9-4) na noite de 87/08/29.

Figure 3. Nocturnal variations of the rotational temperatures TO_2 , TOH and the intensities of OI 5577, O_2A (0-1), NaD and OH (9-4), August 29, 1987.

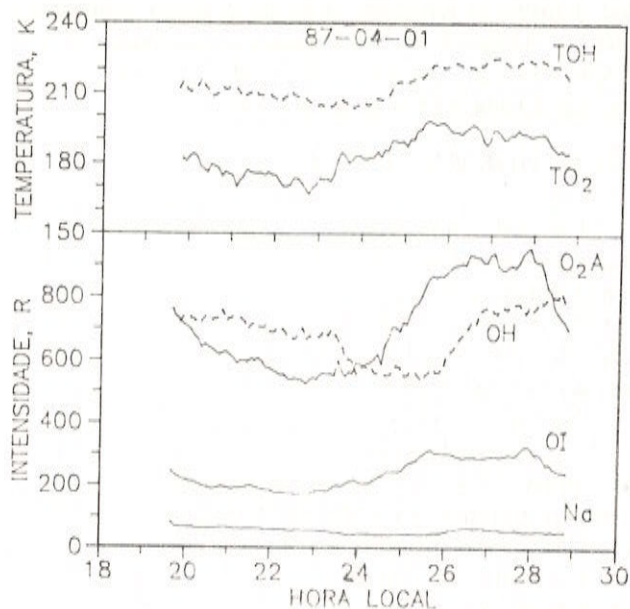


Figura 4. Variação noturna das temperaturas rotacionais TO_2 e TOH e das emissões OI 5577, O_2A (0-1), NaD e OH (9-4) na noite de 87/04/01.

Figure 4. Nocturnal variations of the rotational temperatures TO_2 , TOH and the intensities of OI 5577, O_2A (0-1), NaD and OH (9-4), April 01, 1987.

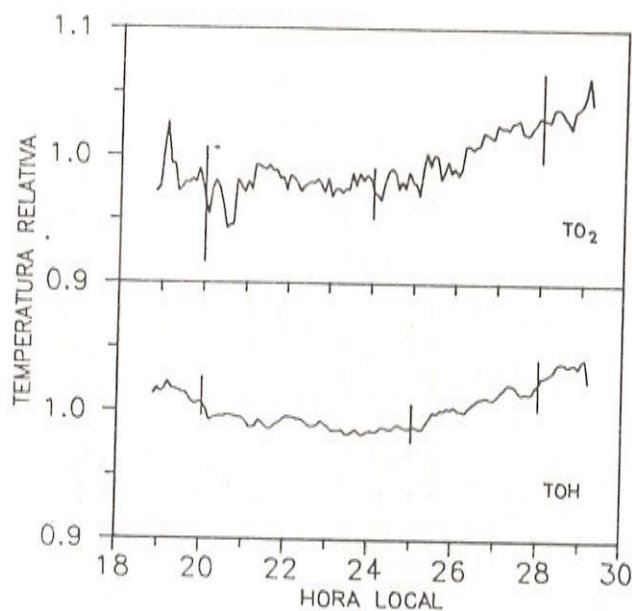
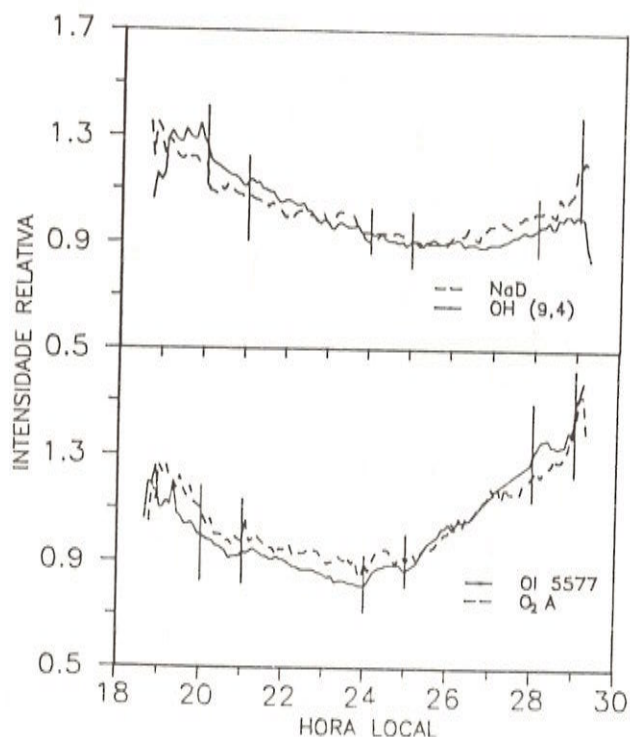


Figura 5. Média normalizada das emissões (OI 5577, O_2A (0-1), NaD, OH (9-4) e das temperaturas rotacionais TO_2 e TOH , utilizando 39 noites; as barras verticais mostram o desvio padrão.

Figure 5. Normalized mean nocturnal variations of the OI 5577, O_2A (0-1), NaD, OH (9-4) emission intensities and of the rotational temperatures TO_2 and TOH , using 39 nights: the vertical bars show the standard deviations.

karni, 1971; Misawa & Takeuchi, 1977, 1982; Takahashi et al., 1979, 1986; Rodrigo et al., 1985).

ESTUDO DE CORRELAÇÃO CRUZADA

Em várias noites foi observado que a variação noturna de uma emissão é adiantada (ou atrasada) em relação à outra emissão; esta tendência fica bem clara quando as intensidades mostram variações ondulatórias. Por exemplo, na Fig. 4, as variações do O₂A (0-1) estão adiantadas em torno de duas horas em relação ao OH (9-4).

Para estudar a relação entre as variações noturnas das emissões e as temperaturas rotacionais, foi feito um estudo de correlação cruzada para cada noite, com uma defasagem que varia de -3 a 3 hs e passo de cinco minutos, usando a fórmula

$$r(\delta) = \frac{n \sum x_i(\delta) y_i - \sum x_i(\delta) \sum y_i}{[n \sum x_i^2(\delta) - (\sum x_i(\delta))^2]^{1/2} [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]^{1/2}}$$

onde x_i e y_i representam intensidades de emissões ou temperaturas rotacionais num dado instante t , que é de 5 em 5 minutos, n é o número de pontos correlacionados e δ é a defasagem.

Na Fig. 6 são mostrados alguns resultados dos cálculos da correlação cruzada para três noites escolhidas, quando foram observadas as variações ondulatórias das intensidades e das temperaturas rotacionais. Notamos que a intensidade do O₂A (0-1) está adiantada em relação ao OH (9-4), e que o OI 5577 está adiantado em relação às outras emissões. Estas defasagens temporais entre as emissões e as temperaturas rotacionais indicam que existe uma propagação ondulatória de fase, de cima para baixo, provocando perturbações nas camadas emissoras localizadas em alturas diferentes (Tab. 2).

Tabela 2. Altitude dos picos das camadas emissoras observadas por foguete.

Table 2. Peak height of the emission layer observed by rocket.

emissão	latitude longitude	pico km	referência
OI 5577	57N, 7,4W	97	Thomas et al., 1979
O ₂ A	57N, 7,4W	95	Greer et al., 1986
NaD	68N, 21E	89	Stegman & Witt, 1977
OH(8-3)	68N, 21E	87	Witt et al., 1979

As defasagens temporais entre TO₂ e TOH tendem a ser menores que as defasagens temporais entre as intensidades OH e O₂A (0-1), 5577 e NaD, 5577 e OH (9-4), exceto na noite de 87/06/01, onde a defasagem entre TO₂ e TOH é praticamente igual às defasagens das intensidades, mas, nesta noite, podemos notar que a perturbação possui um período grande em relação aos outros dias (Fig. 6), de tal forma que a resposta das intensidades e das temperaturas à passagem da perturbação é praticamente a mesma. No entanto, nos outros dias, podemos verificar que as temperaturas respondem mais rápido quando a perturbação possui um período menor.

Estas diferenças nos indicam que as respostas das temperaturas rotacionais são mais rápidas à passagem

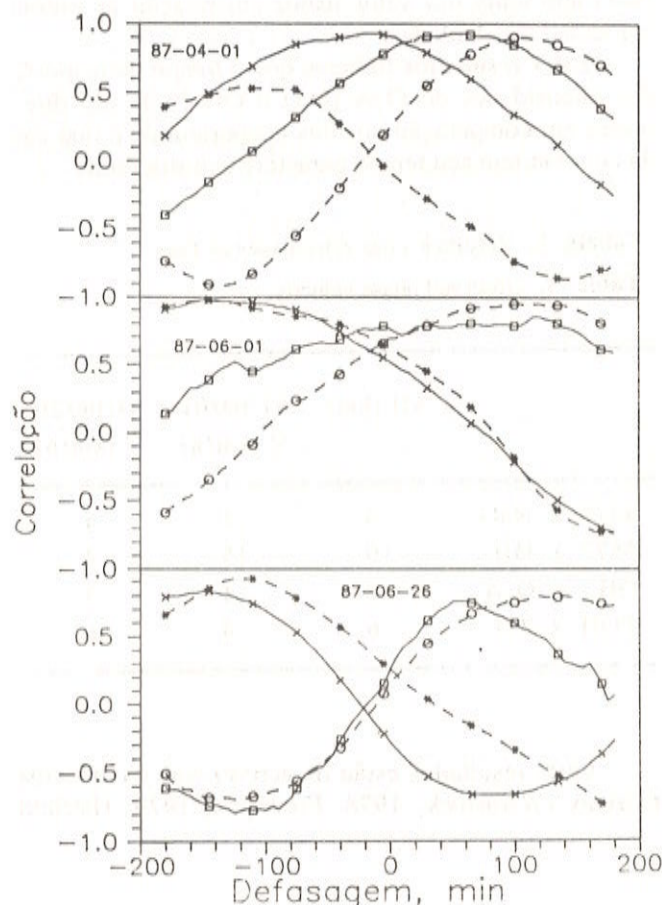


Figura 6. Correlação cruzada entre 5577 x NaD (*), 5577 x OH (9-4) (x), OH (9-4) x O₂A (0-1) (o), TO₂ x TOH (□), nas noites de 87/04/01, 87/06/01 e 87/06/26.

Figure 6. Cross correlations: 5577 x NaD (*); 5577 x OH (9-4) (x); OH (9-4) x O₂A (0-1) (o); TO₂ x TOH (□) for the nights April 01, 1987 and June 01, June 26, 1987.

de uma perturbação pela mesosfera. No entanto, quando o período da perturbação é menor que 8 hs, tanto a intensidade como as temperaturas são afetadas praticamente da mesma forma.

Baseado na hipótese de que estas variações ondulatórias observadas nas intensidades e temperaturas foram causadas pela passagem de ondas atmosféricas naquela região, é possível calcular a velocidade desta propagação usando estas defasagens.

Na Tab. 3 temos o cálculo das velocidades destas perturbações, com base nos perfis das emissões citadas neste trabalho. Vemos que a velocidade calculada através das temperaturas rotacionais TO_2 e TOH é aproximadamente duas vezes maior do que as calculadas a partir das intensidades O_2A (0-1) e OH (9-4). Notamos, também, que a velocidade calculada na noite de 87/04/01 a partir das intensidades OI 5577 e OH (9-4) apresenta um valor maior em relação às outras velocidades calculadas.

Estes resultados indicam que o tempo de resposta das intensidades do O_2A (0-1) e OH (9-4) são diferentes em comparação aos das temperaturas, e que cada emissão tem seu tempo característico diferente.

Tabela 3. Resultados das velocidades de fase.

Table 3. Observed phase velocity.

	ΔH (km)	87/04/01 V (km/h)	87/06/26 V (km/h)
5577 x NaD	8	5	4
5577 x OH	10	15	4
OH x O_2A	6	4	3
TOH x TO_2	6	9	6

Estes resultados estão de acordo com os modelos teóricos (Weinstock, 1978; Frederick, 1979; Hatfield

& Tuan, 1981; Walterscheid et al., 1987) os quais indicam que a concentração dos constituintes minoritários não está em fase com a concentração dos constituintes majoritários, quando a mesosfera é perturbada por uma onda de gravidade.

CONCLUSÃO

Para estudar as variações noturnas das intensidades das emissões OI 5577, NaD, OH (9-4) e O_2A (0-1) e as temperaturas rotacionais TOH e TO_2 , foi utilizado um fotômetro multicanal de filtro inclinável. Os dados obtidos durante um ano de observações, janeiro/87 a janeiro/88, mostram que existem noites que têm variação ondulatória das emissões. Um estudo de correlação cruzada revela que:

1. Existe defasagem temporal entre as intensidades das emissões de O_2A (0-1) e OH (9-4) com a emissão de O_2A adiantada em torno de 100 minutos.
2. Existe defasagem temporal entre as temperaturas rotacionais TOH e TO_2 , com TO_2 adiantada em torno de 60 minutos.
3. Quando o período da perturbação é grande ($T > 8$ h) as defasagens entre as intensidades e as temperaturas são praticamente as mesmas.
4. A emissão de OI 5577 está sempre adiantada em relação às outras emissões.

Estes resultados sugerem que o tempo de resposta característico de cada emissão à passagem de perturbações atmosféricas, é diferente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FINEP-53/CT pelo financiamento deste projeto e ao CNPq pela viabilização através do seu programa de pós-graduação "mestrado".

REFERÊNCIAS

- AMMOSOV, P.P., GAVRIL'YEVA, G.A. & IGNAT'YEV - 1986 - Eight-hour variations of the rotational temperature and intensity of OH (8,4). *Geomag. and Aer.*, 26: 793-796.
- FREDERICK, J.E. - 1979 - Influence of gravity wave activity on lower thermospheric photochemistry and composition. *Planet. Space Sci.*, 27: 1469-1477.
- GREER, R.G.H., MURTAGH, D.P., MCDADE, I.C., DICKISON, P.H.G., THOMAS, L., JENKINS, D.B., STEGMAN, J., LLEWELLYN, E.J., WITT, G., MACKINNON, D.J. & WILLIAMS, E.R. - 1986 - Eton 1: A data base pertinent of study of energy transfer in oxygen nightglow. *Planet. Space Sci.*, 34: 771-788.
- HATFIELD, R. & TUAN, T.F. - 1981 - On the effects of atmospheric gravity waves on profiles of H, O_3 and OH emission. *J. Geophys. Res.*, 86: 2429-2437.
- KRASOVSKY, V.I. & SHAGAEV, M.V. - 1974 - Inhomogeneities and wavelike variations of the rotational temperature of atmospheric hydroxyl. *Planet. Space Sci.*, 22: 304-306.
- MISAWA, K. & TAKEUCHI, I. - 1977 - Ground observations of the O_2 (0-1) atmospheric band at 8645 Å and the [OI] 5577-Å line. *J. Geophys. Res.*, 82: 2410-2412.
- MISAWA, K. & TAKEUCHI, I. - 1982 - Nightglow

- intensity variations in the O₂ (6-2) band, the NaD lines, the OH (6,2) band, the yellow-green continuum at 5750 Å and the oxygen green line. *Ann. Geophys.*, 6: 781-788.
- MOLINA, A., LOPEZ PUERTAS, M., LOPEZ MORENO, J.J. & RODRIGO, R. - 1985 - Gravity waves from five simultaneous emissions: OH (6,2), NaD, O₂(¹Σ), OI 557.7 nm and visible continuum. *Can. J. Phys.*, 63: 592-599.
- MYRABO, H.K., DEEHR, C.S., VIREECK, R. & HENRIKSEN, K. - 1987 - Polar mesopause gravity wave activity in the sodium and hydroxyl night airglow. *J. Geophys. Res.*, 92: 2527-2534.
- NOXON, J.F. - 1978 - Effect of internal gravity waves upon night airglow temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, 5: 25-27.
- RAO, V.R. & KULKARNI, P.V. - 1971 - Interrelation of the different night airglow emissions (5577 Å and OH bands) in the lower ionosphere. *Indian J. Pure Appl. Phys.*, 9: 644-648.
- RODRIGO, R., LOPEZ MORENO, J.J., LOPEZ PUERTAS, M. & MOLINA, A. - 1985 - Analysis of OI 557.7 nm, NaD, OH (6,2) and O₂ (¹Σ_g⁺) (0,1) nightglow emissions from ground-based observations. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 47: 1099-1110.
- STEGMAN, J. & WITT, G. - 1977 - Sodium nightglow during post-Auroral conditions. *COSPAR*, 287.
- TAKAHASHI, H., SAHAI, Y. & BATISTA, P.P. - 1986 - Airglow O₂ (¹Σ) atmospheric band at 8645 Å and rotational temperature observed 23°S. *Planet. Space Sci.*, 34: 301-306.
- TAKAHASHI, H., BATISTA, P.P., SAHAI, Y. & CLEMESHA, B.R. - 1985 - Atmospheric wave propagations in the mesopause region observed by the OH (8,3) band, NaD, O₂A (8645 Å) band and OI 5577 Å nightglow emissions. *Planet. Space Sci.*, 33: 381-384.
- TAKAHASHI, H., BATISTA, P.P., CLEMESHA, B.R., SIMONICH, D.M. & SAHAI, Y. - 1979 - Correlations between OH, NaD, and OI 5577 Å emissions in the airglow. *Planet. Space Sci.*, 27: 801-807.
- TAYLOR, M.J., HAPGOOD, M.A. & ROTHWELL, P. - 1987 - Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions. *Planet. Space Sci.*, 35: 413-426.
- THOMAS, L., GREER, R.G.H. & DICKISON, P.H.G. - 1979 - The excitation of the 557.7 nm line and Herzberg bands in the nightglow. *Planet. Space Sci.*, 27: 925-931.
- WALTERSCHEID, R.L., SCHUBERT, G. & STRAUS, J.M. - 1987 - A dynamical-chemical model of wave-driven fluctuations in the OH nightglow. *J. Geophys. Res.*, 92: 1241-1254.
- WEILL, G.M. - 1967 - Airglow observations near the equator in Aurora and airglow. McCormac, B.M. (ed.), New York, Reinhold Publ., 407-418.
- WEINSTOCK, J. - 1978 - Theory of the interaction of gravity waves with O₂(¹Σ) airglow. *J. Geophys. Res.*, 83: 5175-5185.
- WITT, G., STEGMAN, J., SOLHEIM, B.H. & LLEWELLYN, E.J. - 1979 - A measurement of the O₂ (b¹ Σ_g⁺ - X³ Σ_g⁻) atmospheric band and the OI (¹S) green line in the nightglow. *Planet. Space Sci.*, 27: 341-350.

Versão recebida em: 28/08/89
 Versão revista e aceita em: 08/08/90
 Editor Associado: V.W.J.H. Kirchhoff