

## MEDIDAS DE OZÔNIO NA TROPOSFERA E ESTRATOSFERA DE NATAL

V.W.J.H. KIRCHHOFF e A.G. MOTTA

*Instituto de Pesquisas Espaciais — INPE  
Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico — CNPq  
12200 — São José dos Campos — SP — Brasil*

Ozone densities have been measured in the troposphere and stratosphere of Natal using ECC sondes launched on balloons, as part of a long term program of cooperation between NASA and INPE. The data analysed so far show tropospheric densities and total ozone contents larger than expected.

### 1. INTRODUÇÃO

O ozônio ( $O_3$ ) é um constituinte minoritário normal da atmosfera terrestre. O interesse em todo o mundo de estudar esta molécula se deve ao fato de que o ozônio tem a capacidade de absorver a radiação ultravioleta solar que, de outro modo, teria efeitos danosos sobre os seres vivos. O conhecimento da densidade do ozônio em função de altura e suas variações no tempo são, portanto, muito importantes para avaliar-se, por exemplo, se a ação poluidora do homem pode causar um desequilíbrio ou mesmo aniquilação da camada de ozônio.

As densidades de ozônio na troposfera e estratosfera são medidas por sondas lançadas em balões que podem atingir até 35 km de altura. Uma das sondas mais usadas atualmente nesta tarefa é a do tipo ECC — Electrochemical Concentration Cell — (Komhyr & Harris, 1971), também usada para as medidas feitas em Natal, a serem descritas. A sonda ECC consiste de uma célula eletrolítica em cuja solução se faz passar o ar atmosférico contendo ozônio. Este tem a capacidade de reagir com a solução provocando a liberação de dois elétrons para cada molécula de ozônio que circula pela solução. O conteúdo total de ozônio, isto é, a integral de densidade com a altura pode ser também determinada indiretamente através do espectrofotômetro Dobson, cujos resultados são muitas vezes usados para normalizar os dados das sondas. Este instrumento é operado do chão, e funciona de modo análogo ao de uma célula de absorção, onde se mede a atenuação da luz em determinado comprimento de onda. Pode-se assim determinar a quantidade de ozônio que havia na célula. No Dobson a célula é a própria atmosfera, fazendo-se medidas em pelo menos dois comprimentos de onda, um em que há atenuação e outro em que não há. Por comparação pode-se obter o conteúdo total do ozônio. Em Natal opera-se um instrumento Dobson em colaboração com a NOAA.

O programa de medidas de ozônio de Natal, mais especificamente, da base de lançamento de foguetes da Barreira do Inferno operada pela Força Aérea Brasileira, teve início com o interesse da NASA em expandir as suas bases normais de monitoramento de ozônio. A localização

geográfica de Natal é de importância estratégica neste particular. Foi firmado, então, um acordo de cooperação entre a NASA e a COBAE-INPE no sentido de obter dados de ozônio usando sondas em balão e foguetes. A NASA ficou encarregada de fornecer as sondas e o INPE de efetuar os lançamentos, e os dados obtidos podem ser usados por cientistas americanos e brasileiros. Os resultados preliminares foram publicados em Kirchhoff et al. (1981).

### 2. RESULTADOS

Os dados obtidos resultaram do lançamento de 56 sondas ECC, em balões, entre novembro de 1978 e outubro de 1981. Os resultados de um lançamento típico são mostrados na Fig. 1, para ozônio e temperatura. O ozônio e sua variação com a altura são medidos em termos de pressão parcial em função da pressão atmosférica e da temperatura em °Celsius. No caso, o balão atingiu o limite superior de 4 mbar. O pico principal do ozônio está em 17 mbar, com uma pressão parcial de 130 nbar, mas também um pico secundário na troposfera pode ser notado em torno de 500 mbar e com uma pressão parcial de 30 nbar. As linhas curvas representam isolinhas de razão de mistura constante. Embora neste trabalho o enfoque seja no ozônio, outros parâmetros atmosféricos são medidos pelas sondas, como temperatura, umidade relativa e ventos. A tropopausa, definida no mínimo de temperatura na Fig. 1, está em 100 mbar a uma temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$ . Todos os dados obtidos são apresentados num gráfico como o da Fig. 1. Deve-se notar que o pico secundário da troposfera não é uma característica que aparece em todas as medidas, mas é bem aparente numa média ou num gráfico de superposição, como o da Fig. 2.

A Fig. 2 mostra uma superposição de todos os pontos dos vários lançamentos efetuados. Deve-se notar que a abcissa agora é a densidade. O pico secundário do ozônio na troposfera está bem visível. A Fig. 3 mostra a superposição dos valores medidos de temperatura que indicam uma variabilidade muito pequena na troposfera de Natal.

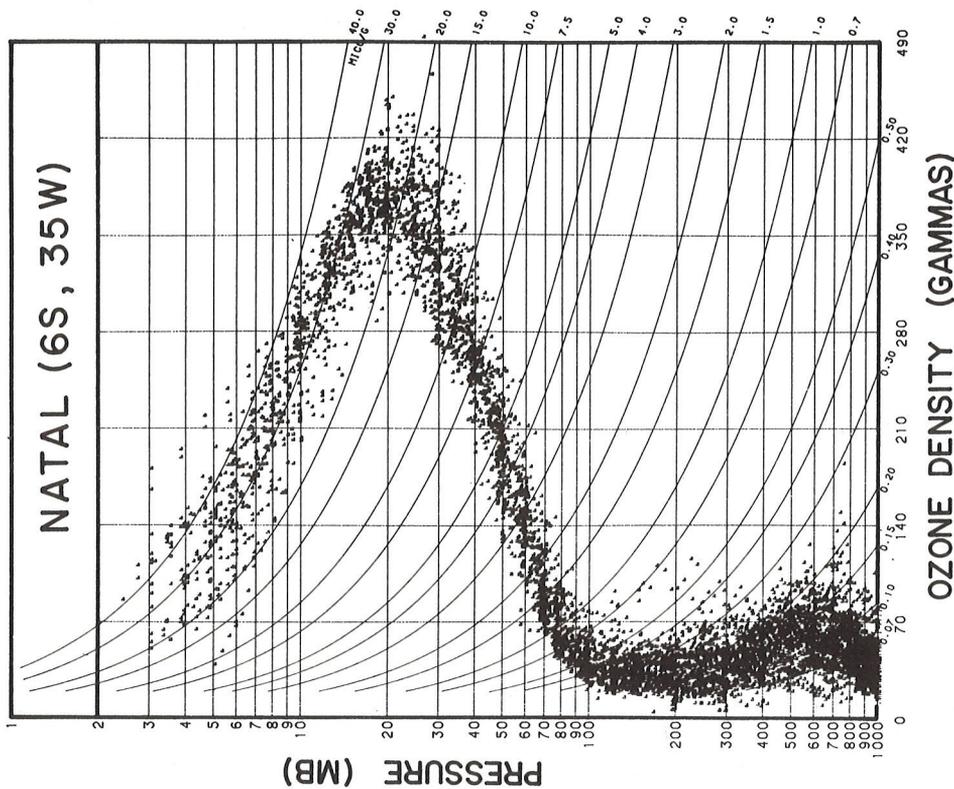


Figura 2 — Superposição dos perfis de O<sub>3</sub> obtidos entre 1978 e 1981 em Natal. A densidade de um gamma equivale a 1 micrograma por metro cúbico.

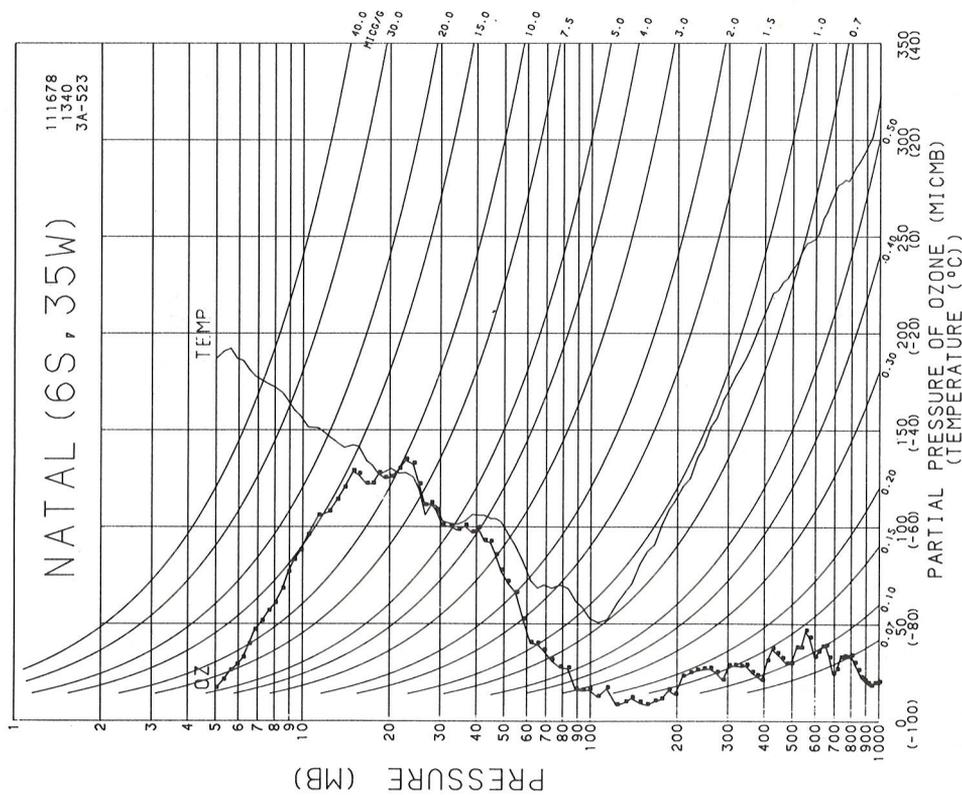


Figura 1 — Exemplo típico de dados obtidos pela sonda ECC. As variações do ozônio (OZ, dado em micro-milibares de pressão parcial) e de temperatura (TEMP, dado em °Celsius) são mostrados em função de pressão atmosférica. Após 100 mbar a temperatura cresce monotonicamente e o ozônio apresenta seu pico principal perto de 20 mb.

O perfil médio do ozônio medido em Natal é mostrado na Fig. 4, bem como a variação anual média do conteúdo total, e comparações. Os eixos agora são altura

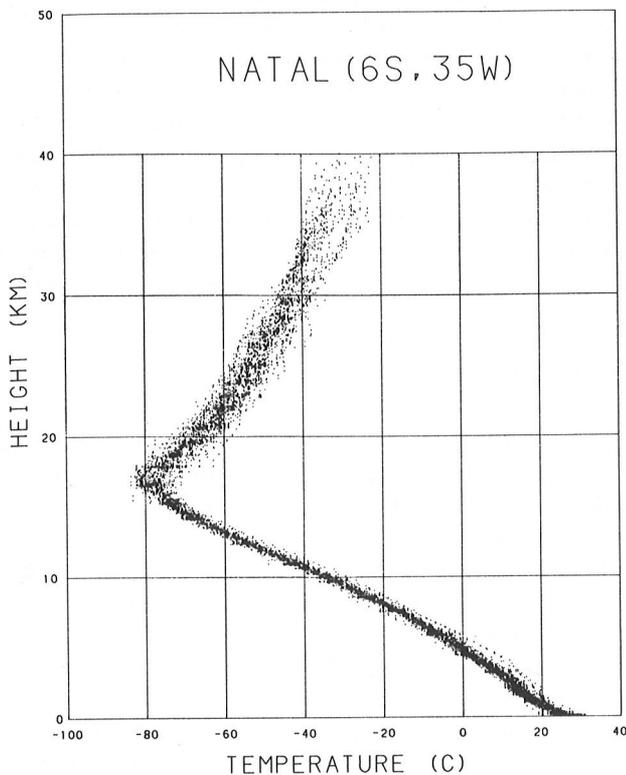


Figura 3 — Superposição dos perfis de temperatura obtidos entre 1978 e 1981 em Natal.

em km e densidade de ozônio em  $10^{12} \text{ cm}^{-3}$ . A curva média, em traço contínuo, mostra claramente a posição dos pontos críticos do perfil. As linhas tracejadas são perfis médios obtidos durante os períodos de mínimo (em torno do dia 120) e de máximo (em torno do dia 260) conteúdo total. As barras horizontais indicam o desvio-padrão. As curvas médias são comparadas com outra média (indicada por segmentos —x—) a qual foi obtida de vários lugares situados entre  $\pm 30^\circ$  de latitude (Hilsenrath & Dunn, 1979). A variação anual para o conteúdo total ou abundância do  $O_3$  mostra uma tendência de acompanhar as variações medidas pelo Dobson, mas há diferenças significativas em termos de valor absoluto.

A Fig. 5 merece destaque pelo pico secundário do ozônio que, no caso de Natal, é bem significativo. As curvas assinaladas (1) e (4) são soluções teóricas estáveis para fluxo nulo e fluxo constante, respectivamente, isto é, são soluções dinâmicas que desprezam efeitos fotoquímicos da troposfera. Uma outra possibilidade, no entanto, seria exatamente uma ação fotoquímica não convencional em que uma produção localizada  $P$  seria contrabalançada por um gradiente no fluxo vertical. Esta é a interpretação que se propõe para explicar os dados de ozônio troposférico de Natal. Pode-se mostrar que, nestas condições, pode-se escrever para o fluxo vertical do ozônio

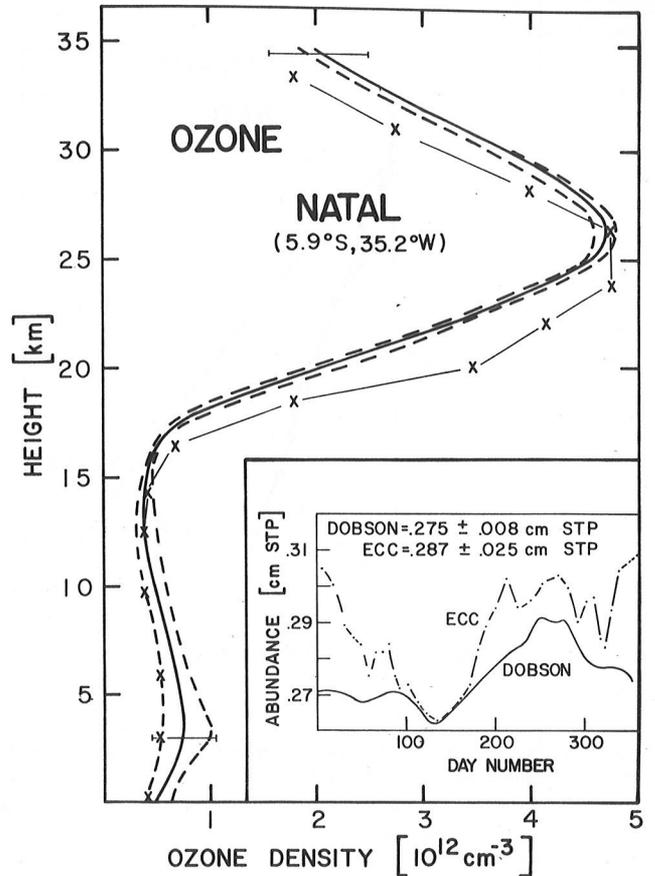


Figura 4 — Perfil médio de ozônio (linha contínua) entre limites de conteúdo total máximo e mínimo (linhas tracejadas) e comparação com a média de outros dados de baixa latitude (traço x), e também a variação anual média do conteúdo total de ozônio, inserida no canto direito inferior, medida pelas sondas ECC e por um fotômetro Dobson.

$$\phi = -Kn(\delta - H) / H\delta,$$

onde  $K$  é o coeficiente de difusão turbulenta, que se supõe constante com a altura,  $n$  é a densidade do ozônio,  $\delta$ , a escala de altura para a densidade do ozônio indicada na Fig. 5 e  $H$  a escala de altura para a densidade atmosférica. O sinal (—) indica que o fluxo se dirige para baixo. Pode-se notar que, quando  $\delta = H$ , o fluxo torna-se nulo e tem-se o caso (1) da figura. No caso  $\delta \rightarrow \infty$  tem-se o caso (4) da figura, com fluxo vertical constante com a altura,  $\phi = -Kn/H$ . Se o regime dominante é o proposto, pode-se escrever também que

$$P = K(\delta - H)n / \delta^2 H$$

e, portanto, a densidade do ozônio é proporcional à sua produção como se dominasse o equilíbrio fotoquímico. Esta constatação justifica a maior variabilidade de  $n$  em torno do pico do ozônio troposférico, como se pode ver na Fig. 2.

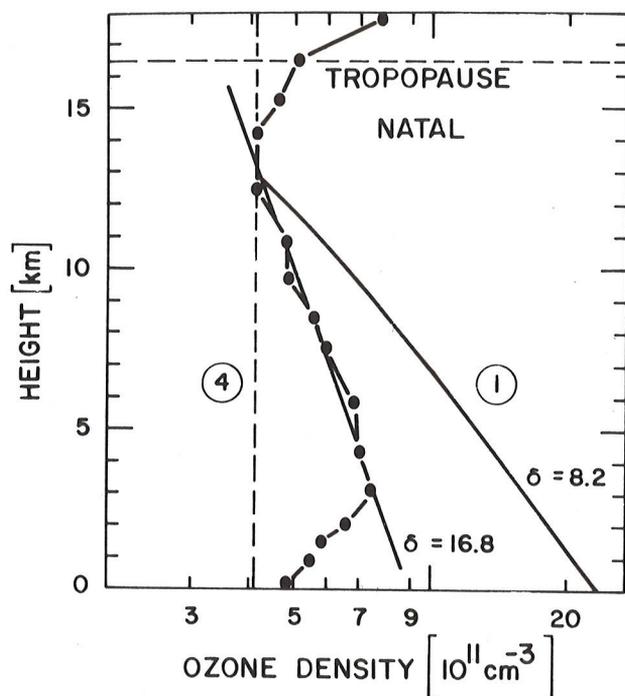


Figura 5 — Perfil médio do ozônio troposférico que evidencia a região do pico secundário. A figura mostra a densidade numérica do ozônio em função de altura.  $\delta$  é a escala de altura correspondente à curva e os casos 1 e 4 são soluções teóricas estáveis para fluxo nulo e fluxo  $-Kn/H$ , respectivamente.

Na Tabela 1 destacam-se vários parâmetros de interesse na troposfera tais como a abundância do ozônio, os máximos e mínimos, a escala de altura, bem como alguns parâmetros calculados como o fluxo, produção máxima, e constantes de tempo:  $\tau_\phi$ , que representa o intervalo de tempo característico para formar o ozônio troposférico através do fluxo proveniente da estratosfera, e  $\tau$ , que representa o intervalo de tempo característico de difusão turbulenta. Deve-se notar, finalmente, que matematicamente pode-se obter também um pico secundário na troposfera através de uma variação de  $K$  com a altura. Esta hipótese, embora não totalmente impossível, parece pouco provável levando-se em conta que a grande maioria dos autores usa  $K$  constante com a altura nos modelos da troposfera.

### 3. CONCLUSÕES

Alguns aspectos dos dados de ozônio medidos na troposfera e estratosfera de Natal, entre os períodos de 1978 e 1981, foram apresentados. Entre os principais resultados pode-se citar:

- 1) A densidade média do ozônio na troposfera é 30% maior do que os resultados obtidos em outras estações de baixa latitude.
- 2) O conteúdo total de ozônio também é maior do que o esperado, sendo da ordem de 15%.
- 3) Um pico de ozônio pode ser observado na troposfera, em várias ocasiões. Nossa interpretação é de que, nesta

Tabela 1 — Parâmetros de interesse na troposfera.

| NOME   | VALOR  | NOTA |
|--|--|------|
| Abundância, $A$                                    | $7.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$   | m    |
| $O_3$ (max)  | $7.4 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$   | m    |
| $O_3$ (min)  | $4.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$   | m    |
| $h$ (min)  | 13.0 km  | m    |
| $h$ (max)  | 3.1 km   | m    |
| $K$  | $1.0 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  | a    |
| $\phi$ (min)                                       | $6.3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ( $H = 6.5 \times 10^5 \text{ cm}$ ) | c    |
| $\phi$ (max)                                       | $8.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ( $H = 8.3 \times 10^5 \text{ cm}$ ) | c    |
| $\Delta\phi = \phi(\text{max}) - \phi(\text{min})$ | $2.6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$                                      | c    |
| $\delta$   | 16.8 km  | m    |
| $\tau_\phi = A/\phi(\text{min})$                   | $1.2 \times 10^7 \text{ s} = 4.6 \text{ meses}$  | c    |
| $\tau = H^2/K$                                     | $6.9 \times 10^6 \text{ s} = 2.7 \text{ meses}$  | c    |
| $P(\text{max})$                                    | $2.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$   | c    |

m — Das medidas de Natal

a — Adotado

c — Calculado

região, existe uma fonte de produção de ozônio contrabalancada por uma divergência do fluxo vertical.

#### AGRADECIMENTOS

Queremos agradecer a colaboração sempre eficiente de todo o pessoal da Barreira do Inferno sob o comando

do Cel. Sidnei Azambuja, e ao pessoal do INPE-NATAL, especialmente ao engenheiro J.R. Alves, responsável pelo lançamento dos balões. Queremos agradecer também a E. Hilsenrath, da NASA, pela constante troca de correspondência sobre assuntos ligados ao ozônio atmosférico e sua medida. Y. Sahai tem sido o responsável pela operação dos Dobson, e I.J. Kantor tem nos apoiado muito em nosso trabalho.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HILSEN RATH, E. & DUNN, P. J. — 1979 — Standard ozone profiles from balloon and rocket data for satellite and theoretical input, paper presented at the Spring AGU meeting, Washington DC.

KIRCHHOFF, V.W.J.H, SAHAI, Y. & MOTTA, A.G. — 1981 — First ozone profiles measured with ECC sondes at Natal (5.9°S, 35.2°W), *Geophys. Res. Lett.*, **8**: 1171-1172.

KOMHYR, W.D. & HARRIS, T.B. — 1971 — Development of an ECC ozonesonde, NOAA Technical report ERL-APCL 18, Boulder, Colorado.

Versão original recebida em Set./83;  
Versão final, em Dez./83.