

Observações da quantidade total de ozono e da radiação UV nos Açores

Total Ozone and UV Radiation measurements in Azores

Diamantino Henriques⁽¹⁾, Fernanda Carvalho⁽¹⁾, Paulo Fialho⁽²⁾

⁽¹⁾Instituto de Meteorologia - Delegação Regional dos Açores, PT9500-321 Ponta Delgada, Portugal

⁽²⁾ Universidade dos Açores, PT9701-851 Terra Chã, Portugal

SUMMARY

First results of total ozone and ultraviolet radiation measurements carried out with a Brewer Spectrophotometer MKII in Terceira Is. (Azores) are presented. A brief description of the Brewer spectrophotometer and total ozone and sulphur dioxide retrieval method is done. Six months of Brewer and TOMS total ozone data are compared and analysed as well as UV changes during a selected period. These measurements are a part of the Portuguese Meteorological contribution for the development of a Global Station in the scope of the GAW/WMO programme in close cooperation with Azores University. The installation and operation of this instrument are partially funded by ROCA II (FCT) and CIMAAT (INTERREG IIIB - Project CLIMAAT – MAC 2.3/A3) projects. Ground based measurements collected at Terceira Is. Should be useful on long term referencing and assessing of the performance of space-borne instruments over North Atlantic Region.

Introdução

O ozono é um gás presente na atmosfera em quantidades muito pequenas que podem variar entre $\sim 3 \times 10^{-6}\%$ na baixa troposfera até $\sim 10^{-3}\%$ na estratosfera. No entanto, as suas propriedades físicas e químicas desempenham um papel chave quer na física quer na química da Atmosfera e portanto no Clima da Terra. Por exemplo, a própria estrutura vertical da atmosfera é condicionada pela presença do ozono, o qual absorve quantidades de radiação suficientes para aumentar a temperatura do ar entre os 10 km e 50 km de altitude, definindo por sua vez a estratosfera e ao mesmo tempo delimitando o topo da troposfera (tropopausa), sob a qual se desenvolvem a maior parte dos fenómenos meteorológicos a que habitualmente designamos de Tempo (Henriques, 1999). Por outro lado, constitui também um oxidante poderoso, participando em muitas reacções químicas na troposfera e condicionado por isso a abundância de muitos poluentes atmosféricos.

Embora a sua importância tenha sido reconhecida há muito tempo pela comunidade científica (desde o século XIX), foi a cerca de 20 anos que o grande público lhe conferiu uma atenção especial devido a espectacular descoberta do "buraco de ozono" na Antárctida, cujo desenvolvimento é do conhecimento geral. No entanto, a importância do ozono atmosférico abrange outras áreas de interesse além do Clima e que vão desde a saúde pública até a resistência de materiais, passando pela agricultura.

Este interesse recente foi em certa medida acompanhado de um correspondente aumento dos sistemas de observação quer da sua quantidade total quer da sua concentração à superfície e distribuição vertical. No entanto, elevada a complexidade dos instrumentos e métodos de medida, a falta de pessoal qualificado e de locais com condições de fundo atmosférico adequados são limitações que dificultam o estudo do comportamento deste composto à escala global, pelo que a disponibilidade de observações em regiões remotas do globo é um problema que normalmente é ultrapassado recorrendo a campanhas observacionais intensivas mas limitadas no tempo. Neste contexto, os Açores representam uma região com condições geográficas únicas para este tipo de observações, pelo que embora muitas vezes tenha sido escolhido como base para campanhas observacionais, nunca foi até agora levado a cabo um verdadeiro esforço para a instalação de uma plataforma permanente de qualidade por forma a contribuir de forma efectiva para o conhecimento da evolução da composição da atmosfera na região do Atlântico Norte, nomeadamente do ozono.

Antecedentes

As primeiras observações da quantidade total de ozono efectuadas no território nacional, foram efectuadas na Ilha de Santa Maria (Açores) no ano de 1951 (Henriques, 1995), utilizando um espectrofotómetro Dobson com vista a execução de observações de ozono durante a campanha

observacional do Ano Geofísico Internacional (1957/58). No entanto, devido a avarias surgidas antes da campanha, não foi possível concretizar este objectivo. Contudo, este instrumento foi reparado e instalado em Lisboa em 1960, onde ainda hoje se encontra em funcionamento na estação aerológica de Lisboa/Gago Coutinho. Mais tarde, em 1992, foi instalado um espectrofotómetro Brewer no Observatório José Agostinho (Fig.1) em Angra do Heroísmo na ilha Terceira (Açores), o qual teve uma operação bastante irregular até 1994 devido a sucessivas avarias causadas pelas deficientes condições de alimentação eléctrica e extrema humidade característica do clima dos Açores.



Figura 1. Observatório Ten. Cor. José Agostinho (Angra do Heroísmo, 2000)

Situação actual

Após acções de melhoramento das condições de alimentação eléctrica, foi recentemente instalado um novo espectrofotómetro Brewer (Fig.2), dotado de um melhor sistema de isolamento por forma a evitar avarias devido às condições de elevada humidade relativa. Durante os primeiros seis meses de funcionamento (Julho a Dezembro de 2004), não se verificaram avarias significativas devido aos problemas apontados anteriormente, demonstrando assim uma melhoria significativa na eficiência do novo sistema. O sistema de comando e aquisição de dados foi também substancialmente modificado, devido ao desenvolvimento tecnológico entretanto verificado. Os dados são diariamente transmitidos e processados por forma a poderem ser disponibilizados sob a forma gráfica na página web do projecto CLIMAAT, permitindo o controlo remoto e verificação das respectivas condições de funcionamento em diferido.

Descrição do espectrofotómetro Brewer

O espectrofotómetro Brewer foi desenvolvido no AES (Atmospheric Environment Service) do Canadá especialmente para a medição automática do ozono total, efeito Umkehr, SO₂ total e radiação global UV-B (280-320 nm). O método é semelhante ao do clássico espectrofotómetro de Dobson, no entanto, neste caso cada observação é constituída por 5 c.d.o. diferentes (306.3 nm, 310.0 nm, 313.5 nm, 316.8 nm, e 320 nm).



Figura 2. Espectrofotómetro Brewer #102, instalado no terraço do Observatório José Agostinho (2004).

O espectrofotómetro de Brewer (Brewer, 1973), consiste numa versão modificada do espectrometro $f/6$ de Ebert com uma rede de difracção holográfica de 1800 linha / mm operada em 2ª ordem. O esp. Brewer é basicamente constituído por:

- Espectrómetro + óptica exterior + microprocessador
- “Azimuth Tracker” (para orientação azimutal)
- Computador

O espectrofotómetro é controlado por um computador que permite executar observações, testes e cálculos interactivamente ou em modo automático com uma sequência de comandos predefinidos. Por exemplo, durante uma observação com luz directa, o computador comunica com o microprocessador do espectrofotómetro, o qual posiciona o “azimuth tracker” no azimute actual do

sol e seguidamente, posiciona também a objectiva da óptica exterior no angulo zenital actual do sol (Fig. 3), permitindo a entrada apenas da luz directa. Seguidamente, a luz atravessa a óptica exterior passando por um diafragma e um conjunto de filtros que permitem a obtenção de uma imagem focada sobre uma janela em forma de fenda do espectrómetro. O feixe de luz branca que entra através da fenda é reflectida num espelho esférico para a rede de difracção, a qual separa a luz nas suas várias cores. A posição da rede depende da temperatura interna do instrumento e é ajustada por um micrómetro.

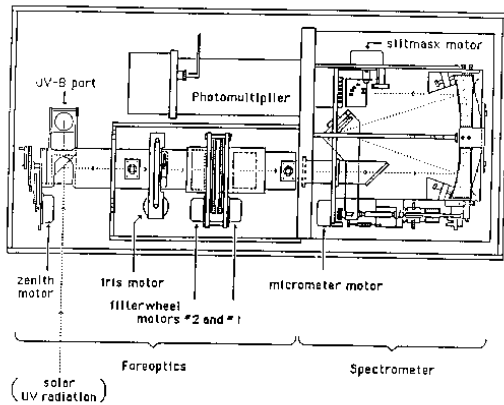


Figura 3. Esquema do espectrómetro Brewer MKII (Sci-Tec, 1994).

As várias componentes da luz procedentes da rede voltam a ser reflectidas pelo mesmo espelho sobre uma máscara com seis janelas, que correspondem aos 5 c.d.o. operacionais referidos e mais um reservado para testes (302.1 nm). A máscara é posicionada de tal forma que apenas um dos 5 c.d.o. passa de cada vez para o fotomultiplicador. A corrente eléctrica obtida é proporcional a intensidade da radiação para um dado c.d.o.. Cada observação é constituída por um certo número de leituras que são imediatamente processadas, resultando num valor médio de ozono total.

As equações utilizadas são também diferentes, no entanto, baseiam-se também em combinações lineares da Lei de Beer aplicadas a cada um dos 5 c.d.o. :

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= 306.3 \text{ nm} \\ \lambda_2 &= 310.0 \text{ nm} \\ \lambda_3 &= 313.5 \text{ nm} \\ \lambda_4 &= 316.8 \text{ nm} \\ \lambda_5 &= 320.0 \text{ nm}\end{aligned}$$

A combinação linear das equações da Lei de Beer fica então reduzida a:

$$F = F_0 - \Delta\beta \frac{P}{P_0} m_{air} - \Delta\delta \cdot m_{aer} - \Delta\alpha_{O_3} X_{O_3} m_{O_3} - \Delta\alpha_{SO_2} X_{SO_2} m_{SO_2} \quad (1)$$

onde:

- X_{O_3} : quantidade total de ozono
- m_{O_3} : percurso óptico relativo para o ozono
- X_{SO_2} : quantidade total de dióxido de enxofre
- m_{SO_2} : percurso óptico relativo para o dióxido de enxofre.
- m_{air} : percurso óptico relativo no ar.
- $F = \log I_2 - 0.5 \log I_3 - 2.2 \log I_4 + 1.7 \log I_5$
- $F_0 = \log I_{0,2} - 0.5 \log I_{0,3} - 2.2 \log I_{0,4} + 1.7 \log I_{0,5}$
- I_i : irradiância directa observada para o c.d.o. i
- $I_{0,i}$: irradiância estimada no topo da atmosfera para o c.d.o. i
- $\Delta\beta = \beta_2 - 0.5 \beta_3 - 2.2 \beta_4 + 1.7 \beta_5$
- β_i : Coeficiente de difusão Rayleigh para o c.d.o. i
- $\Delta\delta = \delta_2 - 0.5 \delta_3 - 2.2 \delta_4 + 1.7 \delta_5 \approx 0$
- $\Delta\alpha_{O_3} = \alpha_{2,O_3} - 0.5 \alpha_{3,O_3} - 2.2 \alpha_{4,O_3} + 1.7 \alpha_{5,O_3} \neq 0$
- $\Delta\alpha_{SO_2} = \alpha_{2,SO_2} - 0.5 \alpha_{3,SO_2} - 2.2 \alpha_{4,SO_2} + 1.7 \alpha_{5,SO_2} \approx 0$
- α_{i,O_3} : Coeficiente de absorção do O3 para o c.d.o. i
- α_{i,SO_2} : Coeficiente de absorção do SO2 para o c.d.o. i
- δ_i : Espessura óptica do aerossol para o c.d.o. i

No intervalo espectral em causa, assume-se que a espessura óptica dos aerossóis δ_λ é uma função montónica do comprimento de onda (Carvalho *et al.* 2000). Os factores de ponderação 1.0, -0.5, -2.2 e 1.7 foram seleccionados por forma a que $\Delta\delta$ e $\Delta\alpha_{SO_2}$ fossem desprezáveis. Assim, a Eq. (1) toma a seguinte forma:

$$X_{O_3} = \frac{F_0 - F - \Delta\beta \frac{P}{P_0} m_{air}}{\Delta\alpha_{O_3} m_{O_3}} \quad (2)$$

O mesmo método é aplicado ao cálculo da quantidade total de SO₂, utilizando um novo conjunto de factores de ponderação (*) e o valor de X_{O_3} estimado em (2):

$$S = S_0 - \Delta^* \beta \frac{P}{P_0} m_{air} - \Delta^* \alpha_{O_3} X_{O_3} m_{O_3} - \Delta^* \alpha_{SO_2} X_{SO_2} m_{SO_2} \quad (3)$$

onde:

$$\begin{aligned}S &= \log I_1 - 4.2 \log I_4 + 3.2 \log I_5 \\ S_0 &= \log I_{0,1} - 4.2 \log I_{0,4} + 3.2 \log I_{0,5} \\ \Delta^* \beta &= \beta_1 - 4.2 \beta_4 + 3.2 \beta_5 \\ \Delta^* \alpha_{O_3} &= \alpha_{1,O_3} - 4.2 \alpha_{4,O_3} + 3.2 \alpha_{5,O_3} \\ \Delta^* \alpha_{SO_2} &= \alpha_{1,SO_2} - 4.2 \alpha_{4,S} + 3.2 \alpha_{5,SO_2} \neq 0\end{aligned}$$

$$X_{SO_2} = \frac{S_0 - S - \Delta^* \beta \frac{P}{P_0} m_{air} - \Delta^* \alpha_{O_3} X_{O_3} m_{O_3}}{\Delta\alpha_{SO_2} m_{SO_2}} \quad (4)$$

F_0 e S_0 são as constantes de calibração do instrumento, também chamadas de "constantes extraterrestres", foram determinadas pelo instrumento padrão primário a través do método de extrapolação à massa zero no Observatório de Mauna Loa (Hawaii) durante condições muito

estáveis de ozono, dióxido de enxofre e aerossóis e posteriormente transferidas para os padrões secundários e finalmente para os restantes instrumentos da rede a través de sessões de intercomparação.

O funcionamento conjunto com a plataforma de observação de radiação permitirá obter um conjunto de observações coerentes com aplicação em áreas tão diferentes como a saúde, a agricultura, o ambiente, a engenharia de materiais, os recursos naturais, etc..

Resultados

Nos primeiros 6 meses de funcionamento (Junho a Dezembro de 2004), o sistema de observação teve uma eficácia razoável (~80 %), sendo a maioria das falhas devidas a falhas de energia por motivos de obras de melhoramento no Observatório. Nos meses de Novembro e Dezembro foram registados valores relativamente baixos da quantidade total de ozono (220-230 D) obtidos com luz directa, embora sejam também os meses onde normalmente se observam os menores valores anuais no Hemisfério Norte. Contudo, dado que se tratava ainda de um período experimental, foi decidido confirmar estas observações com as de outro sistema independente. Nesse sentido, os resultados obtidos foram comparados com os do espectrómetro TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) a bordo do satélite Earth Probe (EP) da NASA (Fig. 4).

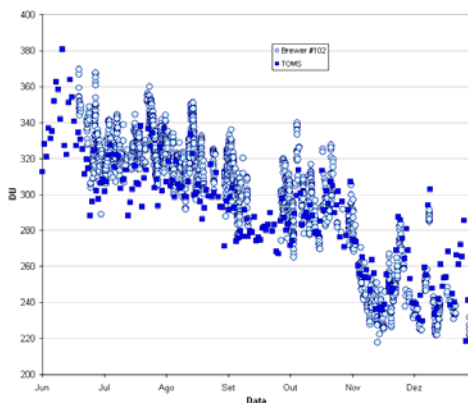


Figura 4. Série de valores diários da quantidade total de ozono observada em Angra do Heroísmo com o espectrofotómetro Brewer e pelo sensor TOMS a bordo do satélite EP.

Os valores TOMS correspondem as leituras efectuadas durante a passagem do satélite próximo das coordenadas de Angra do Heroísmo, pelo que naturalmente é esperada alguma diferença. No entanto, qualitativamente pode verificar-se uma boa concordância entre as duas séries durante este período, repetindo inclusivamente os valores mais

baixos que atingiram valores muito próximos de 220 D.

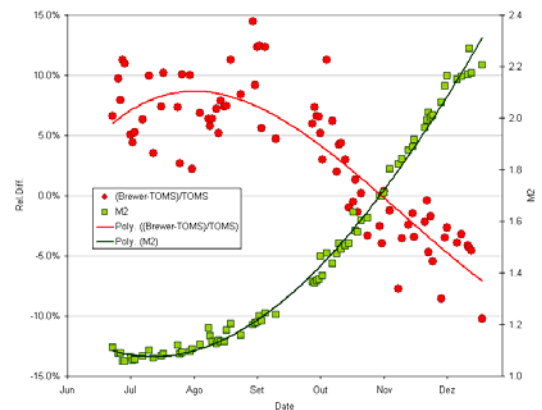


Figura 5. Evolução da diferença relativa Brewer-TOMS e do percurso óptico relativo para o ozono.

Contudo, quando comparados com os valores próximos do meio dia solar, a diferença relativa entre os dois instrumentos varia entre $\pm 10\%$ com um valor médio de $\pm 3,3\%$ e possui também uma variação ao longo do ano que aparentemente está relacionada com a variação do percurso óptico relativo m_{O_3} (M2) (Fig. 5).

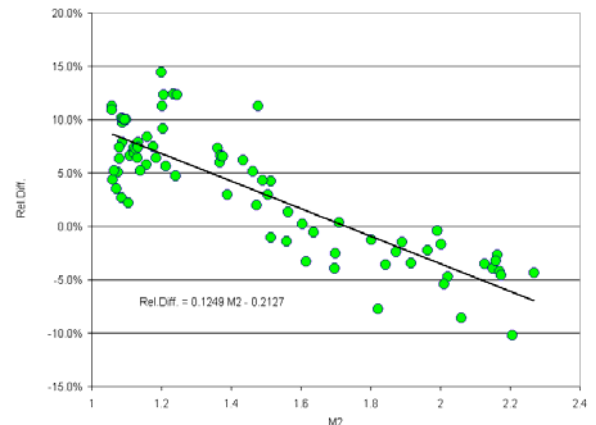


Figura 6. Dependência entre a diferença relativa Brewer-TOMS e do percurso óptico relativo para o ozono (M2).

De facto, verifica-se uma dependência desta diferença com o percurso óptico relativo, a qual tem um valor mínimo para $M2 = 1,7$ (Fig. 6).

Quanto à radiação UV, foi também analisado um período onde se verificou uma diminuição significativa da quantidade total de ozono. O gráfico da figura 7 apresenta os valores da quantidade total de ozono e da irradiância espectral a 320 nm registadas entre 1 e 11 de Novembro de 2004. Neste caso, não existe uma relação muito evidente entre as variações da quantidade total de ozono e a irradiância a 320 nm em virtude do efeito da nebulosidade e principalmente porque que a

absorção pelo ozono neste comprimento de onda ser relativamente fraca.

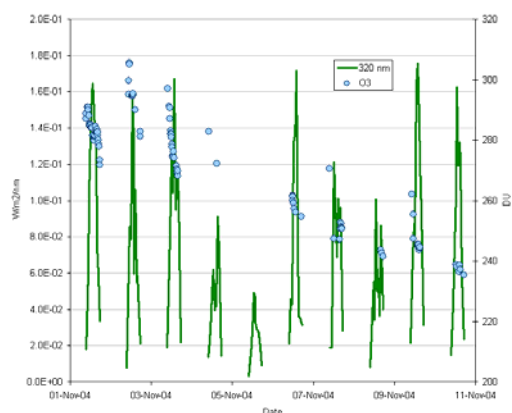


Figura 7. Ozono total e irradiância global espectral a 320 nm observada entre 1 e 11 de Novembro de 2004 no Observatório José Agostinho.

Por outro lado, a figura 8 apresenta o mesmo período mas com a irradiância a 295 nm, onde o ozono absorve muito mais. De facto, uma observação mais cuidada permite detectar variações maiores a 295 nm, ilustrando assim a sensibilidade da radiação UV nos comprimentos de onda mais curtos para as variações de ozono (Carvalho *et al.*, 1997, Henriques *et al.* 1998).

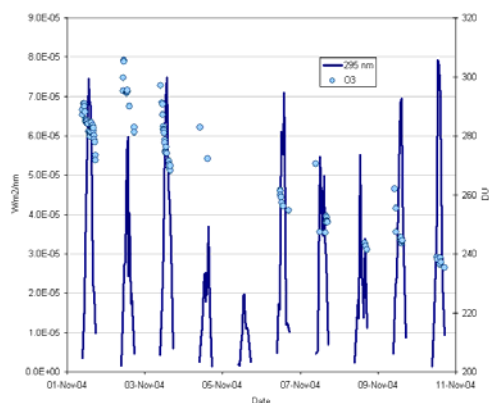


Figura 1. Exemplo de resultados de observações da quantidade total de ozono obtidos no dia 1 de Novembro de 2004.

Conclusões

Nos primeiros 6 meses de funcionamento, o sistema de observação teve uma eficácia razoável (~80 %), sendo a maioria das falhas devidas a falhas de energia por motivos de obras de melhoramento no Observatório.

A quantidade total de ozono observada é consistente com os resultados obtidos pelo TOMS ($\pm 3.3\%$),

embora exista uma pequena dependência com a massa óptica (-2.5% @ $M2=1.5$).

A optimização do processamento de observações com luz zenital permitirá uma maior cobertura temporal das observações, devido as condições de céu muito nublado, características de regiões insulares como os Açores.

Referências

Brewer, A.W., A replacement for the Dobson Spectrophotometer. *Pure and Appl. Geophys.*, Vol. 106-108, 919-927, 1973.

Carvalho F., D. Henriques, Variações da radiação ultravioleta em Portugal: Efeitos nas plantas. XXVII Jornadas científicas de la asociación meteorológica española, Ciudad Real, Espanha (Outubro de 1997)

Carvalho, F., D. Henriques, Use of the Brewer Ozone Spectrophotometer for Aerosol Optical Depth measurements in the Ultraviolet Region", *Advances in Space Research* (2000).

Henriques D.V., A Camada de Ozono: um recurso natural vital", (1999), *Revista Terra Mais*.

Henriques D.V., F. Carvalho, Radiação UV-B em Portugal e Índice de UV", *Revista de Radioprotecção da SPPCR*, 1998.

Henriques D.V., J.M. Vilaplana, J.P. Bolivar, Análise de situações de mínimos da quantidade total de ozono nas estações de Lisboa e El Arenosillo" (2000), Resumos da 2ª Assembleia Luso-Espanhola de Geodesia e Geofísica.

Henriques D.V., S. Antunes, Trinta anos de Observações de Ozono Total em Lisboa", *1º Simpósio de Meteorologia e Geofísica da APMG*, 1999.

Henriques, D.V., The Portuguese Ozone and UV-B Monitoring Stations. *Atmospheric Ozone Dynamics: Observations in the Mediterranean Region*. NATO ASI Series I, vol. 53, 148-156, 1995.

Sci-Tec, Brewer MKII Operations Manual (1994).