

MÉTODO DE CALIBRACION DE UN MEDIDOR DE OZONO BREWER RESPECTO  
DE UN ESPECTROFOTOMETRO ESTANDAR DOBSON

A. Díaz, J.C. Guerra y P. Sancho

Dpto. Física Fundamental y Experimental, Universidad de La Laguna,  
(38204) La Laguna. Tenerife. Islas Canarias. España

ABSTRACT

A method of calibration of a Brewer spectrophotometer is proposed. A set of simultaneous observations made with two instruments (Brewer, Dobson) are used. The results obtained in this paper show that a well-operating Brewer is able to simulate a Dobson, as well as another Dobson does.

KEY WORDS: Ozone, Dobson Spectrophotometer, Brewer Spectrophotometer, Calibration, Intercomparison.

RESUMEN

Se presenta un método que permite calibrar un instrumento Brewer respecto de uno Dobson, a partir de un conjunto de observaciones simultáneas de ambos aparatos. Los resultados obtenidos muestran que un Brewer funcionando correctamente es capaz de simular al Dobson utilizado en la calibración, al menos tan bien como lo haría otro Dobson.

PALABRAS CLAVE: Ozono, Espectrofotómetro Dobson, Espectrofotómetro Brewer, Calibración, Intercomparación.

INTRODUCCION

La evolución temporal (comportamiento estacional, tendencia, etc.) y espacial (distribución vertical, variación latitudinal, "agujero" antártico, etc.) del ozono atmosférico constituyen un campo de investigación de inmenso interés, no sólo en el terreno científico, sino también en el ámbito social y político (1-3).

La medida de ozono atmosférico ofrece las siguientes posibilidades (4): 1.- Ozono troposférico o concentración superficial de ozono, medido cerca de la superficie terrestre (5-6). 2.- Perfil vertical de concentraciones de ozono obtenido a partir de globosondas (ozonosondas) (7-8) o de medidas Umkehr (9). 3.- Ozono estratosférico o cantidad total de ozono en una columna vertical (10).

Hasta el presente, y desde hace varias décadas, la cantidad de ozono total se ha estado midiendo en numerosos puntos de la Tierra (Red Mundial de medida de Ozono). De las distintas formas de determinar esta cantidad (satélites y espectrofotómetros desde tierra), la considerada como estándar es la que utiliza un espectrofotómetro Dobson (9).

El instrumento Brewer (11-13) fue desarrollado por el Atmospheric Environment Service (A.E.S), Canadá, con el propósito de sustituir al Dobson en la Red Mundial de medidas de ozono. Es cierto que presenta varias ventajas frente al Dobson:

-Es totalmente automatizado, mientras que el Dobson únicamente opera de manera automática cuando realiza observaciones Umkehr, siendo necesario la presencia de un operador para el resto de las observaciones y realización de los diferentes test.

-Es más versátil que el Dobson (mucho más voluminoso y pesado), pudiéndose considerar como portátil.

-No presenta algunos problemas típicos en el Dobson, como son los desajustes de los elementos ópticos que obliga a un constante mantenimiento de los mismos.

-Puede ser más exacto en las observaciones tipo zenit que el Dobson.

Sin embargo, las contadas ocasiones en las que se han llevado a cabo intercomparaciones entre un Brewer y un Dobson (14-16), o calibraciones (17), los resultados no han sido todo lo buenos que cabrían esperar de un instrumento que aspira a sustituir al Dobson.

En este trabajo presentamos las primeras evidencias serias de que un Brewer puede perfectamente sustituir a un Dobson (incluso al estándar Dobson #83 con sede en Boulder, Colorado, EE.UU), conservándose por lo menos, la misma calidad de las observaciones (precisión, sensibilidad...), siempre que el instrumento Brewer se calibre adecuadamente respecto al Dobson.

#### PARTE EXPERIMENTAL

##### Aparatos

Para este estudio se utilizaron los espectrofotómetros Dobson #61 y Brewer #25, operando ambos en las dependencias de la N.O.A.A. (National Oceanic and Atmospheric Administration) en Boulder, Colorado. El programa de medida del Dobson fue el normal en cualquier Estación-base, constando de tres observaciones diarias centradas al mediodía, complementadas con otras, necesarias para el programa propuesto de intercomparación Brewer-Dobson. El plan de medida del Brewer se estableció de forma que existiese el mayor número posible de observaciones simultáneas con las del Dobson, habiendo sido continuo a lo largo del día cuando el valor de " $\mu$ " (camino óptico relativo) fue menor que 4.

### Tipo de observación

Aparte de las observaciones a sol directo (direct sun) realizadas con ambos instrumentos, únicas utilizadas en este trabajo, también se realizaron observaciones tipo zenit con los dos espectrofotómetros, así como medidas Umkehr con el Dobson, y de intensidad de la radiación ultravioleta solar (directa e integrada) con el Brewer.

### Período de observación

Se midió de manera simultánea ( $\pm 15$  segundos) a lo largo de los meses de Noviembre de 1988 a Marzo de 1989, obteniéndose un total de 359 observaciones válidas, de las cuales 49, que mostraron valores positivos de la cantidad total de  $SO_2$ , no fueron utilizadas en este estudio.

### Cantidad de Ozono

El Brewer suministraba los valores de ozono total directamente, los cuales se imprimían en papel y se registraban en discos magnéticos. Por su parte, el Dobson proveía un valor de ozono total provisional hasta que la siguiente serie de test (lámparas estándar y de mercurio), de periodicidad mensual, se efectuaba. Esto permitía hacer las correcciones oportunas a los valores de ozono total obtenidos en ese mes, ocasionadas por posibles cambios físicos del Dobson. Aun así, estos valores de ozono han de considerarse como provisionales hasta que tenga lugar la próxima intercalibración entre el Dobson #61 y el estándar Dobson #83. Las anteriores intercalibraciones entre estos dos aparatos han reflejado una buena concordancia entre ellos, así como una

gran estabilidad en el tiempo. Se considera que los valores obtenidos con el Dobson #61 son unas 0.6 U.D. inferiores a las del Dobson #83.

#### ASPECTOS TEÓRICOS

Se pretende que un instrumento Brewer simule a uno Dobson. Ello ha de suponer, en sentido estadístico, que suministre los mismos valores de ozono total en las mismas condiciones, esto es, igual valor medio de las observaciones con una desviación estándar del orden de los errores de medida (1%).

Se consideran como exactos los valores dados por el Dobson #61, los cuales no han mostrado poseer ningún tipo de dependencia con  $\mu$ , al menos en el rango de valores empleados en este trabajo ( $\mu \leq 3$ ).

Los valores de ozono dados por el Brewer #25 responden a la expresión (18)

$$(O_3)_B = (R_\sigma - C_{ET}) / (10 \mu \alpha) \quad (1)$$

donde  $R_\sigma$  es la magnitud obtenida experimentalmente a partir de la cuenta de fotones en el fotomultiplicador del Brewer, que es directamente proporcional a la disminución de la radiación ultravioleta solar debida al ozono, y por tanto, a la cantidad total de éste, una vez corregido por los efectos de la temperatura, presión, dispersión de la radiación en la atmósfera (molecular y por partículas), y por la absorción de radiación UV por parte de otros gases ( $SO_2$ ). El parámetro  $\mu$  da cuenta del camino óptico de la radiación UV a través de la capa de ozono,

siendo el cociente entre el camino óptico real y el hipotético si la radiación fuera zenital.  $C_{ET}$  y  $\alpha$  son la constante extraterrestre y el coeficiente de absorción para el ozono, respectivamente. Estas constantes fueron suministradas por A.E.S., entidad responsable de las calibraciones de los instrumentos Brewer. Fueron obtenidas independientemente de cualquier otra técnica de medida de ozono, y dan cuenta además de algunas de las características físicas del mismo, siendo sus valores

$$C_{ET}=3359; \quad \alpha=0.3251(\text{U.D.})^{-1} \quad (2)$$

El Brewer, a diferencia del Dobson, permite medir simultáneamente la cantidad de  $\text{SO}_2$  atmosférico total (18). Cuando la cantidad total de  $\text{SO}_2$  es positiva, es necesario corregir la lectura del Dobson ( $\text{O}_3$ )<sub>D</sub>, dado que este instrumento mide como ozono el  $\text{SO}_2$  presente. Por esta razón, hemos utilizado sólo aquellos datos en los que la lectura del Brewer daba valores negativos de  $\text{SO}_2$ , en cuyo caso se supuso que la cantidad total de éste era cero. Algunas medidas esporádicas de  $\text{SO}_2$  en Boulder, por métodos independientes, apoyaban este criterio.

#### RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Fig.1 muestra los valores de ozono total obtenidos simultáneamente por los dos aparatos en el período de estudio. El Brewer dio sistemáticamente valores de ozono total superiores a los suministrados por el Dobson, aún cuando las diferencias  $D=(\text{O}_3)_B-(\text{O}_3)_D$  (Fig.2) mostraron ser considerablemente variables,

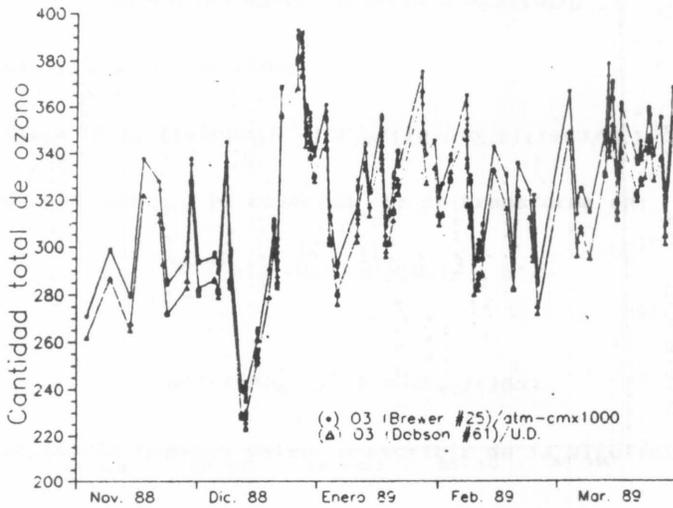


FIG. 1. - Observaciones simultáneas de ambos espectrofotómetros. Las unidades son equivalentes (1 U.D. =  $10^{-8}$  atm-cm), usándose las dos con el fin de diferenciar las medidas de ambos instrumentos.

dando apariencia de ser dependientes de  $\mu$  y de la cantidad total de ozono. Esto fue confirmado cuando se seleccionaron observaciones con la misma cantidad total de ozono y se analizó la dependencia con  $\mu$ , o viceversa, la dependencia con  $(O_3)_D$  de conjuntos de observaciones con  $\mu$  constante. Este análisis condujo a los siguientes resultados:

$$a = [\delta D / \delta (O_3)_D]_{\mu = \text{cte.}} = 0.014 \quad (3a)$$

$$b = [\delta D / \delta (1/\mu)]_{(O_3)_D = \text{cte.}} = 15.889 \text{ U.D.} \quad (3b)$$

Esta dependencia de D con  $\mu$  y con la cantidad total de ozono es la misma que la que presentaría  $(O_3)_B$ , dado que tal dependencia no

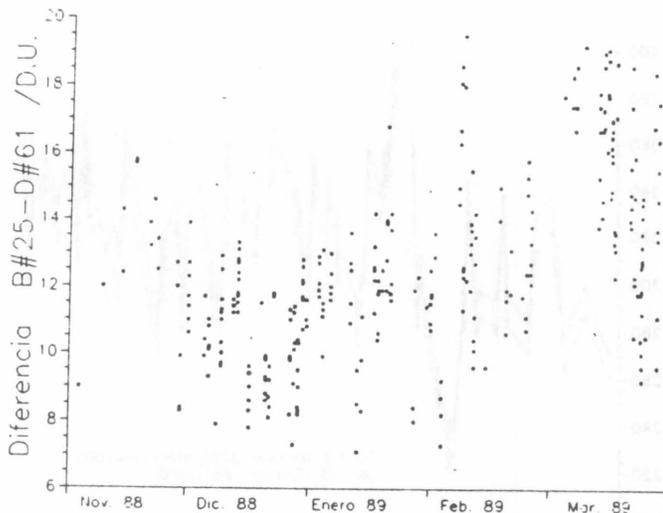


FIG. 2. - Diferencias entre los valores de ozono dados por el Brewer y los correspondientes del Dobson.

se ha observado en los valores de  $(O_3)_D$ . Por tanto, teniendo en cuenta la definición de D y (3a) y (3b), resulta:

$$(O_3)_B = (1+a) \cdot (O_3)_D + b \cdot (1/\mu) \quad (4)$$

La regularidad que reflejaban los datos obtenidos en los test de lámparas estándar y de mercurio para el Brewer nos indujo a pensar que este aparato funcionaba bien. Teniendo en cuenta la ec. (1), unos valores incorrectos de  $C_{ET}$  y  $\alpha$  podrían explicar los resultados obtenidos. Así, podemos escribir  $C_{ET} = (C_{ET})_O + \Delta C_{ET}$  y  $\alpha = \alpha_O + \Delta\alpha$ , donde  $(C_{ET})_O$  y  $\alpha_O$  serían las constantes a emplear en el Brewer para que diese los mismos valores que el Dobson, esto es

$$[(O_3)_B]_C = [R_G - (C_{ET})_O] / (10 \mu \alpha_O) = (O_3)_D \quad (5)$$

De las ecs. (1) y (5) se tiene:

$$(O_3)_B = (O_3)_D (1 + \Delta\alpha/\alpha_O)^{-1} - [\Delta C_{ET} / (10 \mu \alpha_O)] (1 + \Delta\alpha/\alpha_O)^{-1} \quad (6)$$

Suponiendo que  $\Delta\alpha \ll \alpha_O$ , la ecuación (6) se transforma en:

$$D = (O_3)_B - (O_3)_D = a' * (O_3)_D + b' / \mu \quad (7)$$

donde:

$$a' = -\Delta\alpha/\alpha_O \quad \text{y} \quad b' = -\Delta C_{ET} / (10\alpha) \quad (8)$$

La ec.(5) la podemos volver a escribir de la siguiente forma:

$$R_G = (C_{ET})_O + 10\alpha_O * [(O_3)_D * \mu] \quad (9)$$

De estar funcionando correctamente los dos instrumentos, esto es, si existiera una relación directa entre  $R_G$  y  $(O_3)_D$ , la ec.(9) sería la de una recta cuya ordenada en el origen y pendiente nos proporcionaría los valores de las constantes  $(C_{ET})_O$  y  $\alpha_O$ . Esta, a través de la ec.(5), permiten la simulación del instrumento Dobson por parte del Brewer. Si alguno de los dos aparatos funcionase incorrectamente, la representación gráfica de  $R_G$  frente a  $[(O_3)_D * \mu]$  sería una curva, a menos que el malfuncionamiento de ambos aparatos fuese tal que mantuviese la relación lineal entre  $R_G$  y  $(O_3)_D$ . Este hecho es muy poco probable dado que se trata de dos aparatos distintos que emplean técnicas diferentes para la determinación de ozono. Téngase además en cuenta la ya mencionada concordancia entre el Dobson #61 y el estándar Dobson #83, lo cual supone el correcto funcionamiento del Dobson #61.

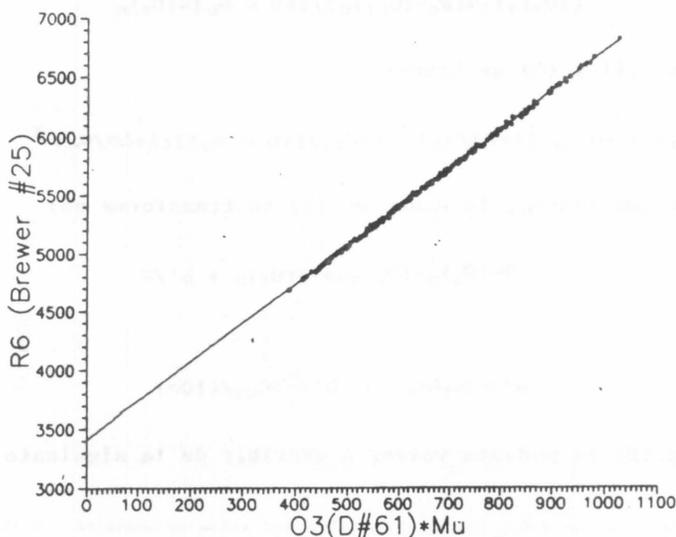


FIG. 3. - Funcion R6 del Brewer frente al producto de la cantidad de ozono del Dobson por  $\mu$ , para medidas simultaneas.

La Fig.3 muestra la linealidad casi perfecta entre  $R_6$  y  $[(O_3)_D \cdot \mu]$ , indicando el buen funcionamiento de los dos instrumentos y permitiendonos determinar los valores de las constantes:

$$(C_{ET})_0 = 3411; \quad \alpha_0 = 0.3297 \text{ (U.D.)}^{-1} \quad (10)$$

Sustituyendo estos valores en la ec.(8), junto con los de las constantes originales [ec.(2)], se obtiene:

$$a' = 0.01395; \quad b' = 15.995 \text{ U.D.} \quad (11)$$

La casi coincidencia de estos coeficientes con los  $a, b$  [ecs.(3a) y (3b)], significa que la aparente dependencia de los valores  $(O_3)_B$  con  $\mu$  y con la cantidad total de ozono [ec.(4)], se

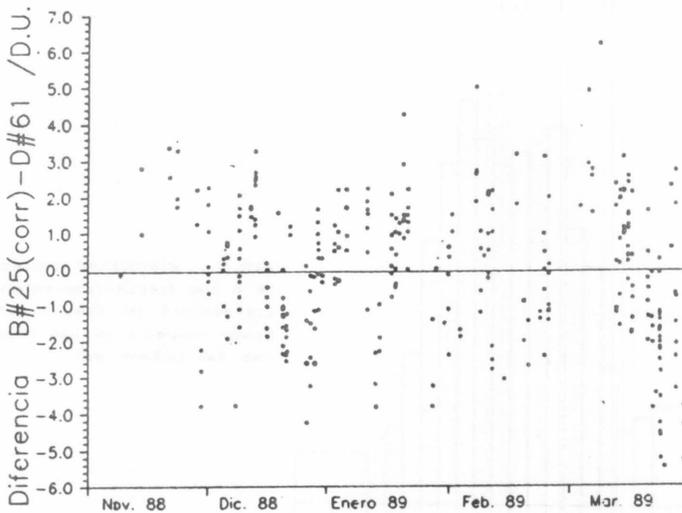


FIG. 4. - Diferencia entre los valores del Brewer corregidos por las nuevas constantes ( $C_{ET} = 2411$ ;  $\alpha = 0.2297$  U. D.  $^{-1}$ ) y los del Dobson

debe al empleo de unas constantes  $C_{ET}$  y  $\alpha$  inadecuadas. Al corregirlas, la anterior dependencia desaparece.

Por tanto, el Brewer #25 operando con las nuevas constantes, debería medir como el Dobson #61. De ser así, el anterior procedimiento puede considerarse un método de calibración de un aparato Brewer respecto de uno Dobson o de cualquier otro instrumento de medida de ozono total.

A partir de los valores experimentales de  $R_0$  y  $\mu$  [ec.(5)], y con las nuevas constantes, se calcularon otra vez los valores de ozono total,  $[(O_3)_B]_C$ , para el Brewer #25, correspondientes a cada una de las observaciones simultaneas. Las diferencias entre los valores de ozono total corregidos para el Brewer y las lecturas del Dobson

$$D_c = [(O_3)_B]_C - (O_3)_D \quad (12)$$

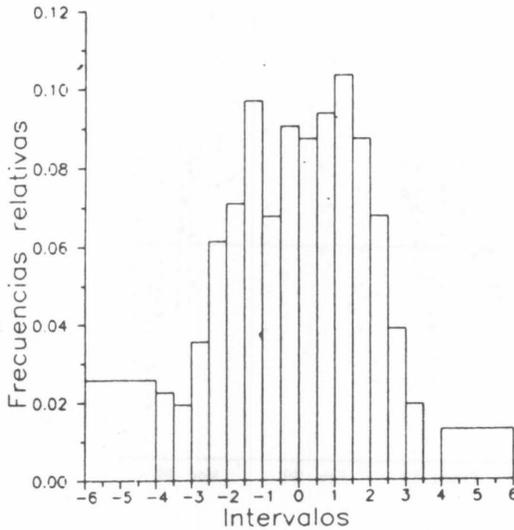


FIG. 5. - Histograma correspondiente a las frecuencias relativas de los errores del Brewer #25 calibrado respecto de las observaciones del Dobson #61.

se muestran en la Fig.4. El mejor ajuste con sentido físico corresponde a una recta de orden cero. Así, esta distribución viene caracterizada estadísticamente por un valor medio,  $\langle D_C \rangle = -0.07$ , y una desviación estándar,  $\sigma_N = 1.93$ . Esto indica, por un lado, que en promedio ambos instrumentos miden igual, y por otro, que los errores en la medida son similares a los obtenidos con el Dobson ( compárese la desviación estándar con los errores aceptados para el Dobson, un 1%, teniendo en cuenta además que las observaciones Brewer fueron seleccionadas de manera que su error fuera menor que 2.5 U.D.). La Fig. 5 representa el histograma correspondiente a la distribución de los errores. De su análisis se concluye que: a) La forma tipo Gaussiana de la distribución de errores indica claramente que éstos tienen carácter aleatorio. b) Un gran porcentaje (70%) de las observaciones tienen errores en el intervalo  $(-\sigma, +\sigma)$ , mientras que

un 90% de las observaciones tienen errores menores al 1%. c) Alrededor de un 10% de las observaciones presentan errores superiores al 1%, quedando por determinar las causas de los mismos, que pueden estar relacionadas con condiciones meteorológicas adversas (temperaturas muy bajas, nubosidad variable, etc.).

#### AGRADECIMIENTOS

A. Díaz expresa públicamente el agradecimiento al Gobierno de la Comunidad Autónoma de Canarias por la Beca de Investigación concedida, gracias a la cual pudo llevarse a cabo un Proyecto de Investigación sobre gases traza atmosféricos.

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) "Network for the detection of the atmospheric change". An Upper Atmosphere Research Program. N.A.S.A. (1986).
- (2) "Atmospheric Ozone 1985". W.M.O., Global Ozone Research and Monitoring Project. Report N.16. (1986).
- (3) R.T. Watson, M.A. Geller, R.S. Stolarski y R.F. Hampson: "Present State of Knowledge of the Upper Atmosphere: An Assessment Report". N.A.S.A., Ref. Pub. 1162. (1986).
- (4) J. London: "The Observed Distribution of Atmospheric Ozone and its Variations", en R.C. Whitten y S.S. Prasad (Ed.), "Ozone in the Free Atmosphere", Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 11-80. (1985).
- (5) J. Fishman: "Ozone in the Troposphere", en R.C. Whitten y S.S. Prasad (Ed.), "Ozone in the Free Atmosphere", Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 161-194. (1985).
- (6) S.J. Oltmans: Surface Ozone Measurements in Clean Air, J. Geophys. Res., 86, 1174-1180, (1981).
- (7) W.D. Komhyr, "Operations Handbook: Ozone Measurements to 40-km altitude with model 4A Electrochemical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes (Used with 1680-MHz Radiosondes)", N.O.A.A. Technical Memorandum, E.R.L., A.R.L.-149. (1986).

- (8) J.M. Coughlin, "The Distribution and Variation of Ozone in the Troposphere and Lower Stratosphere from Ozonesonde Observations", Thesis, University of Colorado. U.S.A. (1984).
- (9) W.D. Komhyr, "Operation Handbook: Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer", W.M.O. Global Ozone Research and Monitoring Project, Report N.6, (1980).
- (10) R.P. Turco, "Stratospheric Ozone Perturbations", en R.C. Whitten y S.S. Prasad (Ed.), "Ozone in the Free Atmosphere", Van Nostrand Reinhold Company, New York, pp. 195-242. (1985).
- (11) A.W. Brewer: A Replacement for the Dobson Spectrophotometer?, Pure Appl. Geophys., 106, 919-927, (1973).
- (12) J.B. Kerr, C.T. McElroy y R.A. Olafson, "Measurements of Ozone with the Brewer Ozone Spectrophotometer", Proc. Quadrennial Int. Ozone Symposium, ( J. London, Ed.), Boulder, Colorado, U.S.A., pp 74-79, (1980).
- (13) J.B. Kerr, C.T. McElroy, D.I. Wardle, R.A. Olafson y W.F.J. Evans, "The Automated Brewer Spectrophotometer", en Atmospheric Ozone, Proc. Quadrennial Ozone Symposium, (C.S. Zerefosy A. Ghazi, Eds.), Halkidiki, Grecia, pp. 396-401, (1984).
- (14) J.B. Kerr, C.L. Mateer, C.T. McElroy y D.I. Wardle, "Intercomparison of the Dobson and Grating Ozone Spectrophotometers", Proc. of the Joint Symposium on Atmospheric Ozone, (K.H. Grasnick, Ed.), Dresden, R.D.A., pp. 109-120, (1976).
- (15) U. Köhler y W. Attmannspacher, Long Time Intercomparison Between Brewer and Dobson Spectrophotometers at the Hohenpeissenberg, Beitr. Phys. Atmosph., 59, 85-96, (1986).
- (16) J.B. Kerr, I.A. Asbridge y W.F.J. Evans, Intercomparison of Total Ozone Measured by the Brewer and Dobson Spectrophotometers at Toronto, J. Geophys. Res., 93, 11129-11140, (1988).
- (17) W.D. Komhyr, R.D. Grass, R.D. Evans y R.K. Leonard, Results of International Dobson Spectrophotometer and Brewer Spectrometer Calibrations, Arosa, Switzerland, 1986. Comunicacion Privada, (1989).
- (18) A. Díaz, J.C. Guerra, P. Sancho: Medida de la cantidad total de ozono en la atmosfera: el instrumento Brewer como sustituto del Dobson en la Red Mundial, ESTA REVISTA, (1990).