

# *Investigación y Programa de Medidas del Ozono Estratosférico y la Radiación Ultravioleta en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica de Izaña (INM)*

Alberto REDONDAS, Emilio CUEVAS y Juan MANUEL SANCHO  
Instituto Nacional de Meteorología (INM)

## **1. INTRODUCCIÓN**

Dos motivos fundamentales impulsaron el programa de medidas de ozono total en columna y de radiación ultravioleta espectral en el Observatorio VAM de Izaña: por un lado la gran escasez de este tipo de observaciones a nivel mundial en el área subtropical, ya que tradicionalmente este tipo de medidas las han llevado a cabo los países desarrollados y por tanto la mayor densidad de medidas se corresponde a latitudes medias y altas. Por otro lado, las excelentes condiciones geográficas y climáticas de las cumbres de Tenerife hacen que el Observatorio de Izaña sea un lugar ideal para realizar medidas espectralradiométricas de gran interés tanto por la limpieza del aire como por el elevado número de días despejados. Esta última circunstancia ha permitido también que en las cercanías del Observatorio de Izaña se encuentren situados los telescopios del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC).

El programa de medidas de ozono estratosférico y radiación ultravioleta se enmarca dentro del grupo de trabajo de ozono y radiación ultravioleta en el que también se desarrolla el programa de medidas de ozono troposférico (ozono superficial en varios emplazamientos y perfiles verticales).

Las medidas de ozono total en columna se vienen realizando en el Observatorio de Izaña desde Mayo de 1991 mediante el espectrofotómetro Brewer N° 33 instalado en la torre del Observatorio a 13 m de altura. El hecho de que el Observatorio se encuentre situado en latitudes bajas (28° N) y a una altitud elevada (2360 m s.n.m.), por encima de la capa de mezcla, así como que las concentraciones de ozono estratosférico sean relativamente bajas, permite el

registro de irradiancias de UV significativas por debajo de 300 nm no detectadas en otros lugares, por lo que este mismo espectrofotómetro es utilizado para obtener medidas diarias de irradiación espectral UV-B a diferentes ángulos cenitales.

El programa de ozonosondeos se inició en Noviembre de 1992 en la estación de radiosondeos de Santa Cruz de Tenerife (36 m s.n.m.) situada a 50 km. del Observatorio. Este programas de medida consiste en un lanzamiento semanal, generalmente los miércoles, y una o dos campañas intensivas de ozonosondeos al año en las que se pueden llegar a lanzar más de 20 ozonosondas por mes. El programa de ozonosondeos ha permitido conocer la distribución vertical del ozono, las variaciones estacionales experimentadas por la denominada “capa de ozono”, y su evolución a lo largo de los años.

Las excelentes condiciones de cielo (gran transparencia y escasa nubosidad) han favorecido la realización de diversas intercomparaciones internacionales de espectrofotómetros para la medida de ozono total y radiación UV espectral, que avalan al Observatorio de Izaña como uno de los mejores emplazamientos del mundo para la realización de este tipo de medidas.

## 2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN

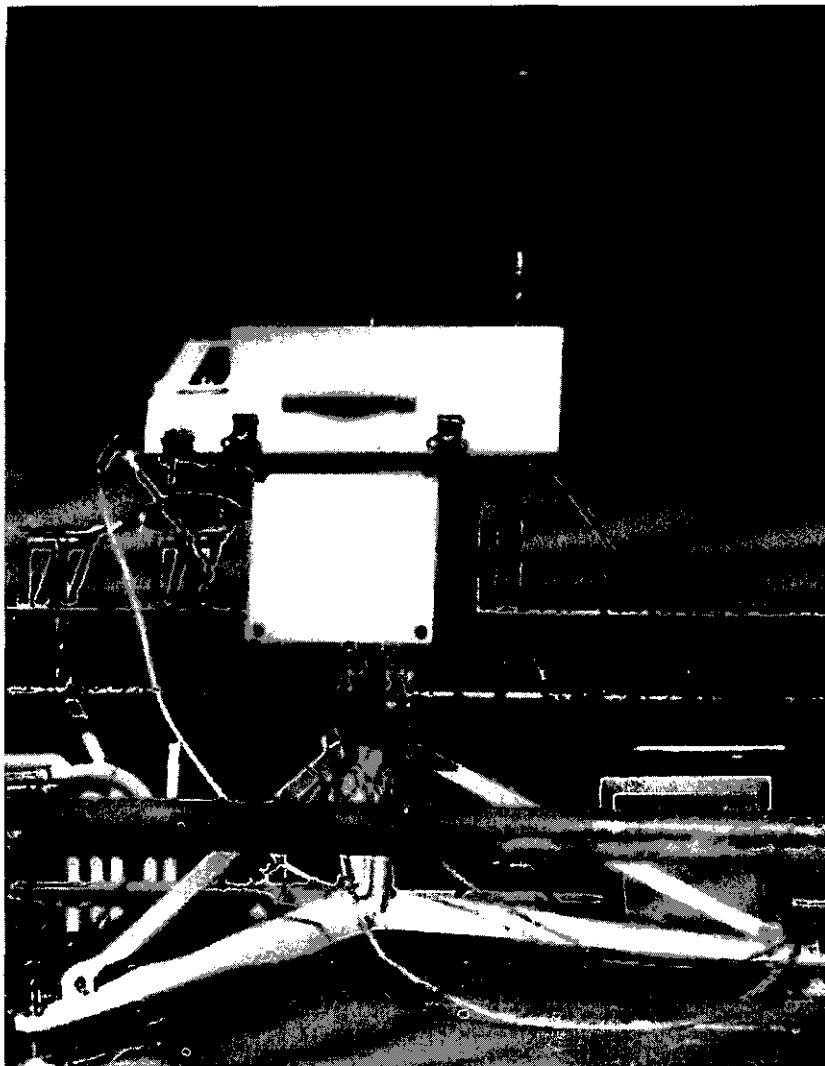
### 2.2. El espectrofotómetro Brewer

El Brewer es un instrumento totalmente automático diseñado para medir ozono total en columna, radiación ultravioleta espectral y determinar perfiles verticales de ozono. Este instrumento está preparado para funcionar a la intemperie, se compone de un sistema de seguimiento azimutal sobre el que se monta una carcasa sellada que alberga el espectrofotómetro (Figura 1). Además, el Brewer mide  $SO_2$  en columna simultáneamente al ozono, con lo cual elimina su interferencia (*Manual del Brewer, 1991*).

Podemos estructurar el instrumento en tres niveles:

- el sistema óptico de entrada
- el propio espectrofotómetro
- el fotomultiplicador

El **sistema óptico de entrada** se encarga de seleccionar la fuente de luz —directa al sol, luz zenital, global ultravioleta o procedente de las lámparas de calibración—, así como de ajustar el ángulo de visión, la atenuación y de seleccionar un plano de polarización de la luz perpendicular a las rendijas de entrada del espectrofotómetro.



**Figura 1.** El espectrofotómetro Brewer # 33 en su instalación habitual en la torre del observatorio de Izaña. Sobre el trípode se puede apreciar el seguimiento azimutal, y sobre éste el espectrofotómetro. En la fotografía se observa un brazo utilizado para medidas de radiación difusa en la intercomparación CASCUM -1995.

El **espectrofotómetro** es un Ebert modificado que opera con una red holográfica de difracción trabajando al segundo orden. Dispersa la luz en el plano focal donde están posicionadas seis rendijas de salida para las corres-

pondientes longitudes de onda ( $\lambda=302.2$  nm —calibración Hg—,  $\lambda_1=306.6$  nm,  $\lambda_2=310.1$  nm,  $\lambda_3=313.5$  nm,  $\lambda_4=316.8$  nm y  $\lambda_5=320.1$  nm) que permiten una resolución de 0.6 nm.

El instrumento tiene dos modos de funcionamiento, uno rápido, empleado en la medida de ozono (1.6 seg.), midiendo de forma cíclica en las 5 longitudes de onda de las rendijas —la red de difracción permanece fija—; y otro lento (6 min.), empleado en la medida de ultravioleta donde es la red de difracción la que se mueve realizando dos barridos —arriba y abajo— entre 290 y 325 nm.

La luz que proviene de las rendijas de salida es focalizada, mediante una lente de Fabry, en el cátodo del **fotomultiplicador** EMI-9789QA, luego los pulsos de fotones se amplifican, se discriminan en amplitud, se dividen y son transmitidos al contador que los registra en un canal determinado por la rendija de salida para ser transmitido a la unidad de control mediante un enlace RS-232. La unidad de control se comunica con el instrumento mediante comandos ASCII. El software que acompaña al instrumento permite la operación automática basada en ángulos zenitales.

## 2.1. El Brewer como sustituto del Dobson

El espectrofotómetro Brewer fue diseñado por el AES (Atmospheric Environment Service, Canadá) en 1978 (*Kerr et al., 1980, Kerr et al. 1984*), como sustituto del Dobson, que ha sido el instrumento de referencia en la medida del ozono total desde la década de los años 30. Respecto a éste, el Brewer mejora algunos inconvenientes de operación y de medición:

1. En los Dobson la calidad de las medidas depende, en gran parte, de la habilidad del operador debido a la falta de automatización de las observaciones del instrumento, que requieren la presencia activa del operador en las medidas y en los test de ajuste.
2. El mantenimiento del equipo y los ajustes necesarios de sus elementos ópticos exigen una gran cantidad de tiempo.
3. El Dobson presenta interferencia en las medidas de ozono con el  $\text{SO}_2$ ; éste presenta bandas de absorción en las longitudes de onda en las que mide el instrumento, por lo que el  $\text{SO}_2$  es contabilizado como ozono. Así, en ambientes polucionados —ricos en  $\text{SO}_2$ —, el Dobson sobreestima el contenido en ozono (*Komhyr & Evans, 1980*).
4. Los coeficientes de absorción asociados a las longitudes de onda elegidas para el espectrofotómetro Brewer son menos dependientes de la temperatura que los asociados a las longitudes de onda utilizadas por el Dobson (*M. Gil, comunicación personal*).

Se han realizado numerosas intercomparaciones entre equipos Dobson y Brewer, que muestran que los valores que registra un Brewer son entre un 2-3% superiores a los registrados mediante un Dobson. Si tenemos en cuenta que ambos equipos utilizan unos coeficientes de absorción para el ozono diferentes<sup>1</sup> y la interferencia del SO<sub>2</sub>, que afecta a los Dobson, la diferencia entre ambos equipos se reduce al ±0.5%; por lo que es factible realizar la sustitución de un Dobson por un Brewer sin riesgo de romper la serie de medidas (Brewer, 1973, De Backer. & De Muer, 1984) (B. Evans, Comunicación personal, 1994). De las numerosas intercomparaciones Dobson-Brewer también parece desprenderse que éste último muestra una dependencia menor con la masa óptica.

### 2.3. El principio de medida

El principio de medida del Brewer (Kerr et al., 1980; Kerr et al., 1984) es el mismo que en el Dobson: la cantidad de ozono se calcula a partir de las medidas de la intensidad relativa de la radiación solar entre longitudes de onda en las que el ozono absorbe fuertemente y longitudes de onda donde el efecto del ozono es menor. De esta forma se evita trabajar con medidas de irradiancia absoluta, siempre difíciles de calibrar en el UV. Estas longitudes se eligen de modo que sean sensibles a las variaciones de ozono y, al mismo tiempo, que al tomar la razón se cancele el efecto de los aerosoles.

Al contrario del Dobson, que utiliza pares de longitudes de onda, el Brewer mide en cinco longitudes de onda simultáneamente lo cual le permite eliminar la interferencia del SO<sub>2</sub>. La primera de ellas -λ<sub>1</sub>=306.6 nm- está cerca del máximo de absorción de SO<sub>2</sub>, mientras que para λ<sub>4</sub>-316.8 nm- y λ<sub>5</sub>-320.1 nm-, la absorción es mínima (en el rango de medida del instrumento).

La intensidad medida en cada una de las longitudes de onda se calculará utilizando la ley de Beer:

$$\log(I_{\lambda}) = \log(I_{0\lambda}) - \beta_{\lambda} \cdot m - \delta_{\lambda} \cdot \sec(\theta) - \alpha_{\lambda} \cdot O_3 \cdot \eta - \alpha_{\lambda} \cdot SO_2 \cdot \eta_S$$

donde:

$I_{\lambda}$ : Intensidad medida a la longitud de onda  $\lambda$ .

$I_{0\lambda}$ : Intensidad extraterrestre medida a la longitud de onda  $\lambda$ .

<sup>1</sup> El Brewer utiliza como referencia los coeficientes de Bass and Paur (1984) y el Dobson utiliza Vigroux (1968).

- $\beta_\lambda$ : Coeficiente de scattering de Rayleigh a la longitud de onda  $\lambda$ .  
 $\delta_\lambda$ : Coeficiente de absorción por aerosoles a la longitud de onda  $\lambda$ .  
 $\alpha_\lambda, \alpha_{s_\lambda}$ : Coeficientes de absorción para el ozono y  $\text{SO}_2$  respectivamente.  
 $m$ : Número de atmósferas que recorre la luz incidente.  
 $\theta$ : Angulo zenital.  
 $\eta, \eta_s$ : Caminos ópticos relativos a la capa de  $\text{O}_3$  y  $\text{SO}_2$  respectivamente .

Realizando una combinación lineal de las ecuaciones para las longitudes de onda 2 a 5 elegimos los coeficientes de tal manera que podamos despreciar los términos de absorción por aerosoles (2-c) y absorción de  $\text{SO}_2$  (2-d), obteniendo:

$$O_3 = \frac{F + \Delta\beta \cdot m - F_0}{\Delta\alpha \cdot \eta} \quad (1)$$

donde:

$$\log(I_\lambda) = \log(I_{0_\lambda}) - \beta_\lambda \cdot m - \delta_\lambda \cdot \sec(\theta) - \alpha_\lambda \cdot O_3 \cdot \eta - \alpha_{s_\lambda} \cdot \text{SO}_2 \cdot \eta_s \quad (2-a)$$

$$F_0 = \log(I_{0_2}) - 0.5 \cdot \log(I_{0_3}) - 2.2 \cdot \log(I_{0_4}) + 1.7 \cdot \log(I_{0_5}) \quad (2-b)$$

$$\Delta\delta = \delta_2 - 0.5 \cdot \delta_3 - 2.2 \cdot \delta_4 + 1.7 \cdot \delta_{5=0} \quad (2-c)$$

$$\Delta\alpha_s = \alpha_{s_2} - 0.5 \cdot \alpha_{s_3} - 2.2 \cdot \alpha_{s_4} + 1.7 \cdot \alpha_{s_{5=0}} \quad (2-d)$$

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - 0.5 \cdot \alpha_3 - 2.2 \cdot \alpha_4 + 1.7 \cdot \alpha_5 \quad (2-e)$$

$$\Delta\beta = \beta_2 - 0.5 \cdot \beta_3 - 2.2 \cdot \beta_4 + 1.7 \cdot \beta_5 \quad (2-f)$$

De la misma forma, para el cálculo de  $\text{SO}_2$ :

$$\text{SO}_2 = \frac{S - S_0 + \Delta\beta' \cdot m + O_3 \cdot \Delta\alpha' \cdot \eta}{\Delta\alpha_s' \cdot \eta_s} \quad (3)$$

donde  $S, S_0, \Delta\beta', \Delta\alpha'$  y  $\Delta\alpha_s'$  son una combinación lineal de las longitudes  $\lambda_1, \lambda_4, \lambda_5$ , con pesos 1, -4.2 y 3.2 respectivamente, y donde  $O_3$  es el valor calculado de ozono.

En las ecuaciones (1) y (3) los componentes de  $F$  son medidos y podemos calcular  $\Delta\beta, m, \eta, \Delta\beta'$  y  $\eta_s$ . La calibración de cada equipo determina  $F_0, \Delta\alpha, S_0, \Delta\alpha'$  y  $\Delta\alpha_s'$  con lo que podemos obtener la cantidad de ozono.

Determinación de las constantes instrumentales (*WMO/GAW, 1990*):

- **$F_0, S_0$** . Se determinan por el método Langley: se realiza una larga serie de medidas en un intervalo de ángulos zenitales lo más grande posible.

Al ajustar las medidas a una recta respecto a la masa óptica se calcula el valor de la intensidad extraterrestre (valor para masa óptica=0). Para que el ajuste sea correcto es necesario que el cielo esté despejado y las condiciones no varíen durante la realización de las medidas. Las excepcionales condiciones de cielo en Izaña permiten realizar estas calibraciones.

- $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\alpha'$   $\Delta\alpha_s'$ . Los coeficientes de absorción del instrumento se determinan para cada longitud de onda realizando una convolución de la "función de rendija" del instrumento con el espectro de absorción del ozono (se utiliza como referencia los de Bass and Paur, 1984; los Dobson utilizan los coeficientes de Vigroux, 1968). Las "funciones de rendijas" se determinan en el laboratorio midiendo con la máxima resolución del equipo: una fuente monocromática, normalmente lámparas de descarga con líneas en la región ultravioleta (Hg, Cd) o, más recientemente, mediante Lasers de He-Cd (325nm).

#### 2.4. Tipos de Medidas en condiciones nubosas – Mapa del cielo

El principio de medida explicado anteriormente se refiere a medidas a sol directo, sin embargo, no siempre son posibles debido a la nubosidad o a la falta de intensidad de radiación solar para ángulos zenitales bajos. La operación del Brewer es flexible y puede ser configurada para realizar diferentes tipos de medidas, respondiendo a condiciones ambientales diferentes. En latitudes altas estos factores se acentúan sobre todo en el invierno para lo cual se han desarrollado diversas estrategias de medida.

Aunque por la latitud del observatorio de Izaña no son necesarios, se han desarrollado algoritmos para medir en condiciones de reducida luminosidad con masa óptica inferior a 4, o utilizando la luna como fuente de luz. Los métodos que se emplean son empíricos, dependen del emplazamiento del instrumento e incluso son dependientes del instrumento mismo ya que se altera la configuración óptica para aprovechar al máximo la reducida intensidad inherente a estas medidas. Los errores de estas medidas son elevados, cercanos al 10 % en los mejores casos (*Josefsson, Comunicación personal*).

En cielos nubosos se utiliza como fuente de luz la proveniente del zenit, que da como resultado las medidas zenitales o ZS (Zenit Sky). La cantidad de ozono es obtenida mediante un algoritmo empírico que depende del emplazamiento del instrumento. El algoritmo denominado "mapa del cielo" supone que existe una relación entre el ángulo zenital y las medidas a sol directo y las zenitales. Se asume la relación empírica de que existe una función polinomial

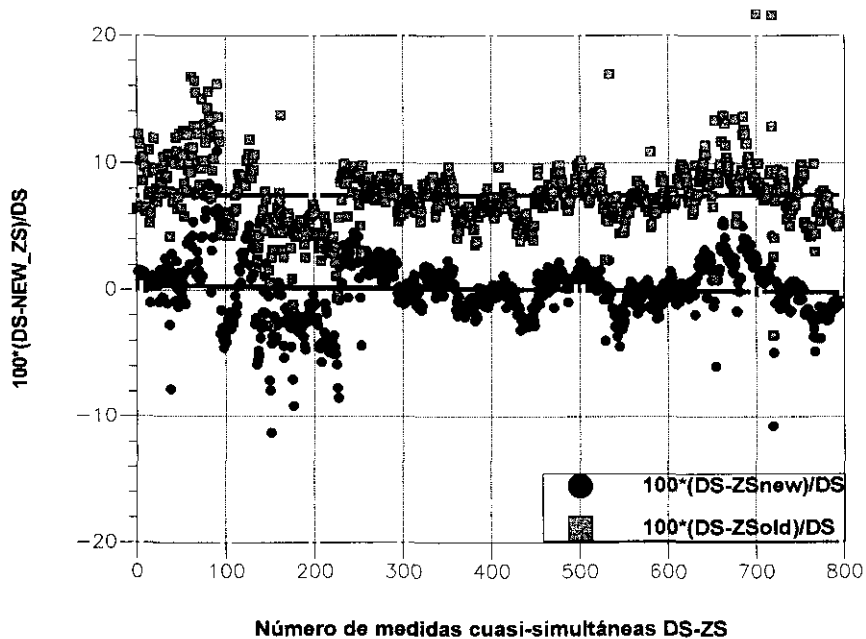
entre las medidas zenitales (ZS) y las medidas directas al sol (DS) donde los coeficientes, a su vez, tienen una relación cuadrática con el camino óptico relativo a la capa de ozono  $\eta$ .

$$ZS = C_2 \cdot DS^2 + C_1 \cdot DS + C_0$$

$$C_i = k_{i2} \cdot \eta^2 + k_{i1} \cdot \eta + k_{i0}$$

Para determinar estos coeficientes debemos de obtener una larga serie, de al menos 500 observaciones cuasi-simultáneas (en un intervalo de tiempo inferior a 10 minutos) de medidas directas al sol y zenitales. Estas han de realizarse bajo condiciones de cielo despejado y han de cubrir tanto el rango de concentraciones de ozono como de masa óptica que presente el emplazamiento. Una vez obtenida la serie se calculan los coeficientes mediante el método de mínimos cuadrados.

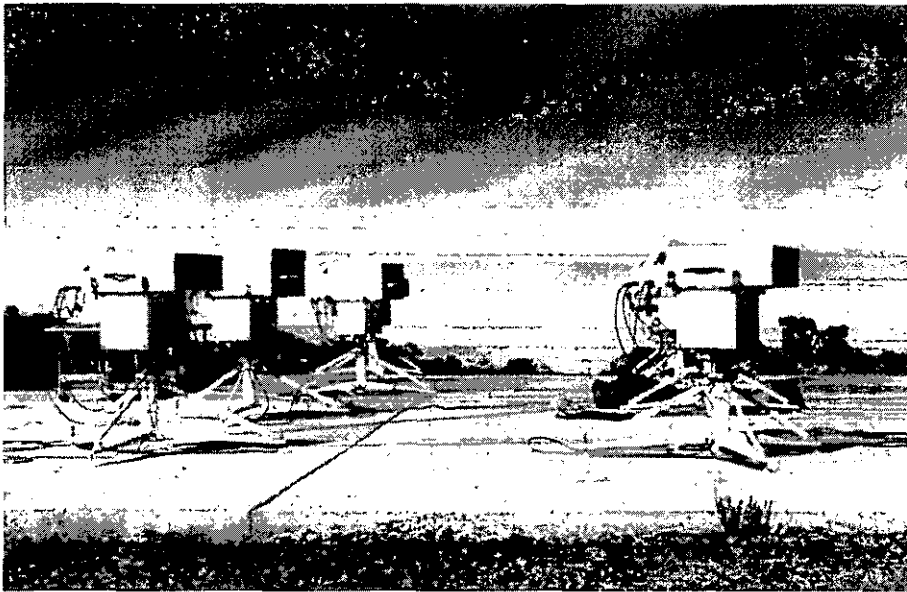
Los coeficientes originales del instrumento fueron calculados en su día para la localidad de fabricación del instrumento (Toronto, Canadá)



**Figura 2.** Resultado de la aplicación del algoritmo del “mapa de cielo” mostrando claramente la mejora producida con los nuevos coeficientes del algoritmo ZS. La diferencia inicial del 7 % se redujo al 0 %.



Dado que la distribución vertical del ozono varía de forma importante con la latitud, es absolutamente necesario determinar el mapa del cielo (relación entre medidas DS y ZS) para cada estación. Este trabajo se realizó en 1992 (Cuevas & Redondas, 1992) con más de 1000 medidas cuasisimultáneas que cubrían todas las estaciones del año y se clasificaron en cinco categorías (despejado, nuboso, niebla, calima y variable) atendiendo a las condiciones de cielo reinante. Los resultados de este estudio se muestran en la figura 3. Actualmente se está desarrollando un nuevo método para condiciones de cielo nubosas utilizando medidas de radiación global ultravioleta.



**Figura 3.** Espectrofotómetros Brewer en el Observatorio de Izaña durante la intercomparación NOG-1996.

## 2.5. Medidas de perfiles verticales de ozono –Método Umkehr

El método de obtención de perfiles verticales de ozono mediante medidas espectroradiométricas desde tierra fue descubierto por Gotz en los años 30. Sin embargo, este método no se extendió hasta los años 60 en que Mateer and Düsh desarrollaron un método computacional de cálculo (DeLuisi, 1979; Mateer & DeLuisi, 1980).

Cuando se realizan medidas zenitales simultáneas de un par de longitudes de onda, en la que una de ellas es fuertemente absorbida por el ozono y la otra no, recorriendo ángulos zenitales bajos, (entre  $90^\circ$  y  $60^\circ$ ) se puede observar cómo la razón entre éstas primero aumenta y luego disminuye debido a que la altura media de scattering para las dos longitudes de onda varían de forma diferente con el ángulo zenital. Este comportamiento es el resultado combinado de la variación del coeficiente de absorción de ozono y del coeficiente de scattering de Rayleigh con la longitud de onda. Gotz interpretó correctamente este fenómeno, por el cual, mediante un método de inversión —conociendo con exactitud el scattering de Rayleigh y asumiendo igual la extinción debida a los aerosoles—, podemos deducir el perfil de ozono en las denominadas capas Umkehr.

El algoritmo Umkehr clásico —“umkehr” significa inversión en alemán— utilizaba un par de longitudes de onda, con medidas entre  $90^\circ$  y  $60^\circ$ . En 1978 Mateer y DeLuisi desarrollan el “algoritmo corto” (DeLuisi, 1979; Mateer & DeLuisi, 1980; Mateer & DeLuisi, 1992) que al emplear tres pares de longitudes de onda reduce el rango de las medidas a  $89^\circ$ - $80^\circ$ , además el cálculo es mucho más rápido al partir de una estimación inicial del perfil obtenida de una climatología de ozonosondeos. El Brewer realiza automáticamente la serie de medidas utilizando 8 longitudes de onda (306.3, 310.1, 313.5, 316.8, 320.1, 323.2, 326.4) lo que le permite mejorar la resolución vertical del método a unos 2 km (McElroy et al., 1988). Este presenta unos errores elevados, sobre todo en las capas alejadas de la densidad máxima, aún en buenas condiciones de medida, debido a las suposiciones sobre la distribución vertical de aerosoles, el efecto del scattering múltiple y los errores inherentes al método de inversión.

Sin embargo, a pesar de todo ello, la gran cantidad de medidas Umkehr realizadas desde los años 30 permiten estudiar la evolución del ozono en las capas estratosféricas con un coste considerablemente menor respecto a otras técnicas (LIDAR, Ozono-sondeos).

## 2.6. Calibraciones y mantenimiento

El estudio de las tendencias y la comparación de resultados requiere que las medidas hayan de ser significativas. Ello sólo es posible si la estabilidad de los instrumentos es conocida en función del tiempo (precisión a lo largo del tiempo) y si son compatibles las calibraciones y las rutinas de medida de los diferentes instrumentos (exactitud relativa). Sólo una adecuada caracterización y seguimiento del equipo y la intercomparación periódica del instrumento, garantizan la calidad de las medidas.

Los Brewer son calibrados en fábrica (véase determinación de las constantes) que garantiza que todos los Brewers muestren un acuerdo del orden

del 1%. Para el mantenimiento de esta calibración se establece una Triada de instrumentos patrón que residen en Toronto (estos equipos mantienen entre si una diferencias menores que 1%) frente al los cuales se calibran los equipos antes de su envío. Además se recomienda que se realice una intercomparación anual frente al standard viajero del AES (*Kerr et al., 1984; 1988*).

El instrumento permite automatizar los test de control, en su interior alberga dos lamparas, una de descarga de Hg y otra halógena. La primera de ellas nos permite mantener la calibración en longitud de onda del equipo mientras que la segunda nos informa del estado general de la óptica y el fotomultiplicador. Los diferentes test se realizan rutinariamente intercalados entre las medidas y los que requieren un mayor tiempo de realización se realizan durante la noche (*Manual del Brewer, 1991*).

El Brewer #033 ha sido comparado cada año respecto al standard viajero de AES #017, además ha participado en tres importantes intercomparaciones mostrándose como un instrumento extremadamente estable en la medida de ozono.

La exactitud conseguida en la medida de ozono, basada en medidas relativas, es muy difícil de alcanzar en la medida absoluta de radiación espectral ultravioleta. De hecho, pocas variables medioambientales, tan importantes como la radiación UV-B, son conocidas con tan poca exactitud. Si observamos la magnitud de los errores (Tabla 1) nos encontramos con que el error mínimo que podemos esperar en es de un 5%, el error típico de un espectrofotómetro ronda el 15 %, reduciéndose a un 8% si esta bien caracterizado. El caso mas extremo se dio en la primera generación de radiómetros UV de banda ancha que, al no estar termoestabilizados, cometían errores cercanos al 20%.

*Tabla 1. Cuadro de errores en la medida de radiación ultravioleta (Leszczynski, 1994)*

Fuente del error	Estimación	Solución
Incertidumbre en las lámparas de calibración primarias	3%	Basar el standard en el detector en lugar que en la fuente
Incertidumbre en la alineación óptica, y precisión (fuerte-shunt y voltímetro)	2%	Mejora de la instrumentación
Respuesta angular (ángulos zenitales >60°)	10% -3%	Caracterización del equipo (el error disminuye al 3%)
Precisión en la longitud de onda	$\Delta 0.1\text{nm} \approx 5\%$	— Lámparas Hg — Líneas de Fraunhofer
Dependencia con la temperatura	$\pm 5\text{ }^\circ\text{C} \approx 5\%$	— Caracterización — Espectroradiómetros controlados por temperatura

Tabla 1. Cuadro de errores en la medida de radiación ultravioleta (Leszczynski, 1994) (Continuación)

Fuente del error	Estimación	Solución
— Radiación parásita	1%	— Doble monocromador, filtros.
— Ancho de banda no ideal		— Caracterización mediante una fuente monocromática

## 2.7. Medidas de perfiles verticales de ozono mediante ozonosondas ECC.

En los ozonosondeos de Tenerife se emplearon ozonosondas electroquímicas ECC, que son descritos en el trabajo titulado “Investigación y Programa de Medidas del Ozono Troposférico en el Observatorio de Vigilancia Atmosférica de Izaña (INM)” publicado en este mismo libro.

La calidad del ozonosondeo se puede determinar mediante el “factor de corrección” que se determina calculando el cociente entre el perfil de ozono integrado desde el nivel de presión equivalente a la altitud del Observatorio de Izaña (en valor promedio es 770 hPa) hasta el límite superior de la atmósfera, y el valor de ozono total en columna proporcionado por el espectrofotómetro Brewer#33 a la misma hora (promedio) del sondeo (Cuevas *et al.*, 1993; Cuevas *et al.*, 1994). La OMM recomienda rechazar el ozonosondeo si el factor de corrección no está entre 0.8 y 1.3. El 80% de los ozonosondeos realizados en Tenerife se encuentran en el rango de factor de corrección de 0.9 a 1.06, por lo que un sondeo es considerado como “defectuoso” si está fuera de este rango, y no se utiliza en el cálculo de perfiles promedios.

El “proceso de normalización del ozonosondeo” (Komhyr, 1986; Claude *et al.*, 1987), por el cual los valores de ozono obtenidos en cada nivel son multiplicados por el factor de corrección, es aplicado cuando se analiza el ozono estratosférico, y no se aplica cuando sólo se utiliza la parte troposférica del sondeo, siguiendo las recomendaciones realizadas por Smit *et al.* (1994). Se sigue este criterio debido a que, en general, los coeficientes sonda/Brewer suelen ser menores a 1, pero en cambio, las sondas ECC suelen sobrestimar el ozono en la troposfera

El ozonosondeo suele llegar a una altura que oscila entre los 30 y los 35 km, por lo que el perfil vertical de ozono no se realiza realmente hasta el límite superior de la atmósfera. A la cantidad de ozono que no es medida por la sonda se le denomina “ozono residual” (Diütsch, 1966), que es añadido al

ozono integrado en el perfil. Para estimar el ozono residual se asume que la razón de mezcla ( $r_3=1.6571 \cdot P_3/P$ ) es constante e igual al último valor medido, para los niveles de altura superiores al alcanzado. Esta suposición se basa en datos experimentales de ozonosondeos que han alcanzado niveles muy altos y de los ozonosondeos realizados con cohetes, que permiten asegurar, sin mucho error, que la razón de mezcla del ozono es constante a partir de un nivel (*Khrgian, 1975*) que varía, naturalmente, de un lugar a otro.

No existe, sin embargo, un criterio único que establezca a partir de qué nivel se debe considerar la razón de mezcla constante y hasta qué nivel los datos proporcionados por el ozonosondeo pueden ser considerados fiables. Existen varios criterios, no encontrándose grandes diferencias en el ozono residual calculados por los mismos, aunque cada uno de ellos se ajusta mejor a los perfiles de ozono donde son aplicados. Así tenemos que:

- *Komhyr (1986)*, en estados Unidos, no integra aquéllos sondeos que no lleguen al nivel de altura equivalente a 15 hPa. Para los que alcanzan niveles entre 15 hPa y 7.8 hPa, supone que la razón de mezcla es constante a partir del último nivel alcanzado, y si el sondeo supera el nivel de 7.8 hPa, supone que éste es el último nivel alcanzado y procede como en el caso anterior, no considerando niveles superiores a alturas equivalentes a 7.8 hPa.
- *Düstch (1970)*, en Alemania, integran los sondeos que alcanzan al menos un nivel de altura equivalente a 17 hPa, considerando que el último valor obtenido de la razón de mezcla es constante hasta la cima de la atmósfera.
- En Izaña se sigue básicamente el criterio de Komhyr, pero flexibilizándolo un poco, de tal manera que los sondeos son integrados si alcanzan claramente el máximo de ozono, aunque no alcancen el nivel de altura equivalente a 15 hPa, aunque en la práctica la gran mayoría de ellos se sitúan en niveles entre 15 hPa y 7 hPa. Esta modificación al criterio de Komhyr se adoptó unos meses después de haber comenzado el programa de ozonosondeos, ya que entonces los equipos no estaban optimizados y era relativamente frecuente alcanzar niveles en el rango de 22 hPa-17 hPa. En cualquier caso se comprobó que el criterio no era malo ya que los factores de corrección frente al Brewer#33 se encontraban en el rango 0.9-1.2. En la actualidad, y aunque los problemas operativos han sido superados, se mantiene el mismo criterio.

Dado que los ozonosondeos se realizan de forma rutinaria una vez por semana como mínimo, independientemente de la situación meteorológica que exista en cada momento, se puede considerar que los perfiles verticales estacionales son representativos de las condiciones atmosféricas medias en la región de las islas Canarias para cada estación.

Los datos de un ozonosondeo son comprobados visualmente, y si existen valores que claramente son erróneos debido a alguna interferencia o fallo en la telemetría, son eliminados. En el proceso de validación de datos para cada nivel, se utilizan además de los valores de ozono, otros datos meteorológicos como temperatura, humedad y dirección y fuerza del viento, y diferentes parámetros de control, en el nivel dado y en los inmediatamente superior e inferior. Pero además de la información objetiva, en el proceso de depuración de datos se utiliza, sobre todo, la experiencia de la persona que evalúa, que es, sin duda alguna, la más valiosa.

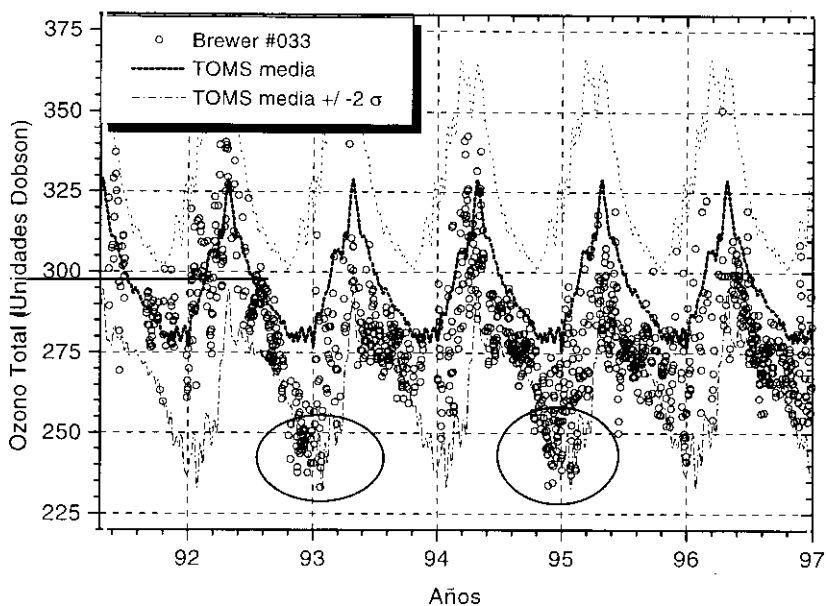
Una vez que los datos son depurados y validados, se realiza el cálculo de determinados parámetros, así como de la interpolación del ozono y demás parámetros meteorológicos en niveles estándar de presión, y en niveles de altura cada 100 ó 250 m. Los más importantes son:

- El ozono residual y el ozono total integrado desde el nivel del mar hasta el límite superior de la atmósfera (UD).
- El ozono integrado desde el nivel de presión de Izaña hasta el último nivel alcanzado por el ozonosondeo (UD).
- El factor de corrección por la medida de ozono total del Brewer#33.
- El ozono integrado en la troposfera, considerando el límite superior de ésta, la tropopausa y el nivel de 200 hPa. (UD).
- El ozono integrado en la estratosfera desde la tropopausa hasta el último nivel alcanzado por el ozonosondeo (UD).
- El ozono integrado desde el nivel del mar hasta el nivel de Izaña.
- El ozono integrado desde el nivel del mar hasta la base de la inversión de temperatura.
- El ozono integrado en las capas Umkehr:
  - Capa 0 (Sup.-1000 hPa).
  - Capa 1 (1000 hPa-500 hPa).
  - Capa 2 (500 hPa-250 hPa).
  - Capa 3 (250 hPa-125 hPa).
  - Capa 4 (125 hPa-62.5 hPa).
  - Capa 5 (62.5 hPa-31.2 hPa).
  - Capa 6 (31.2 hPa-15.6 hPa).
  - Capa 7 (15.6 hPa-7.8 hPa).
  - Capa 8 (7.8 hPa-3.9 hPa).
  - Capa 9 (3.9 hPa-1.96 hPa)
- En los niveles de presión de 1000, 960, 850, 770, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 50, 30, 20 y 10 hPa los datos ozono, temperatura, humedad y viento.
- Determinación para cada nivel del sondeo original y para los niveles interpolados de altura y presión de la densidad parcial de ozono ( $\text{mg m}^{-3}$ ), la

razón de mezcla de ozono (ppbv y  $\text{gr gr}^{-1}$ ), la densidad molecular de ozono ( $\text{molec.cm}^{-3}$ ), la temperatura potencial (K), la tensión de vapor (hPa) y la densidad molecular de vapor de agua ( $\text{molec. cm}^{-3}$ ).

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS

#### 3.1. Serie de Ozono total en columna



**Figura 4.** Serie de la medias de ozono total en columna simultáneas con el paso del satélite a bordo del cual se encontraba el instrumento TOMS, representadas con círculos. La línea gruesa muestra el valor “normal” obtenido de promediar los valores del TOMS V7 (1979-1994), y las líneas discontinuas expresan los intervalos de  $\pm 2\sigma$ . Los valores normales han sido escalados utilizando la recta de interpolación del Brewer #33 frente al TOMS para eliminar la diferencia que existe entre estos instrumentos.

La serie de ozono total obtenida mediante observaciones directas al sol en el Observatorio de Izaña con el espectrofotómetro Brewer#33 se muestran en la figura 4. Aunque las observaciones de ozono en columna se llevan realizando desde hace poco tiempo, hemos tenido la “fortuna” de poder detectar las dos disminuciones de ozono más importantes ocurridas en las últimas décadas a nivel mundial, y que están señaladas en la figura. La primera de

ellas se produjo en el invierno 92-93 y primavera del 93, y la segunda en el invierno 94-95, también existen valores relativamente bajos durante la primavera de 1996. Para resaltar el hecho de que estos valores son extremadamente bajos, se ha dibujado también la curva correspondiente a la “media normal” de ozono total sobre Izaña que es el promedio anual de la serie de datos (1978-1994) del TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), analizada más adelante.

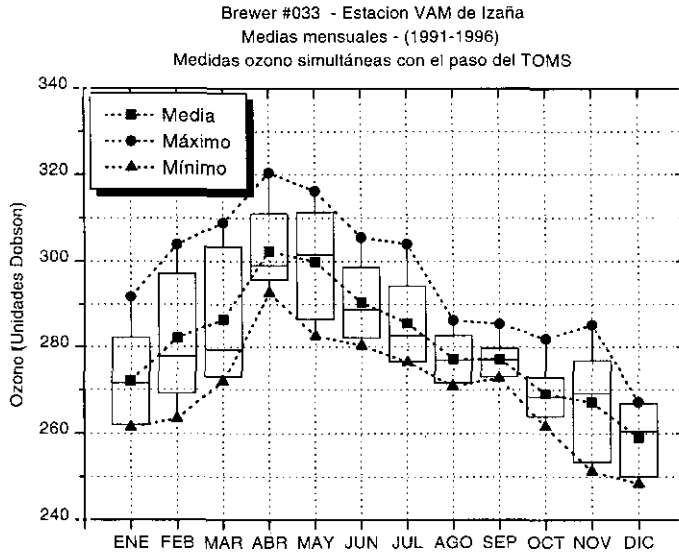
Normalmente el TOMS mide por encima del valor registrado en Izaña por lo que en esta gráfica se ha escalado los valores del satélite utilizando el ajuste lineal del TOMS respecto al Brewer. Para que la comparación sea más exacta se han utilizado los valores del Brewer obtenidos dentro de un intervalo de 10 minutos al paso del satélite por la estación.

Las causas de estas bajas concentraciones de ozono total detectadas en la región subtropical, parecen ser debidas a una mayor frecuencia de masas de aire tropical en la baja estratosfera, normalmente asociadas la oscilación cuasi-bianual (QBO, en sus siglas inglesas). La disminución observada en el invierno 92-93, además parece estar relacionada con algún tipo de perturbación de la composición atmosférica causada por los aerosoles emitidos durante la erupción del volcán Pinatubo en 1991. El episodio de valores anormalmente bajos registrados en 1996 queda fuera del periodo bianual, pero parece responder a la mismas causas, al observarse durante una semana un flujo estratosférico proveniente de regiones ecuatoriales (pobre en ozono). Estas disminuciones se reflejan en un aumento en la radiación UV como veremos mas adelante.

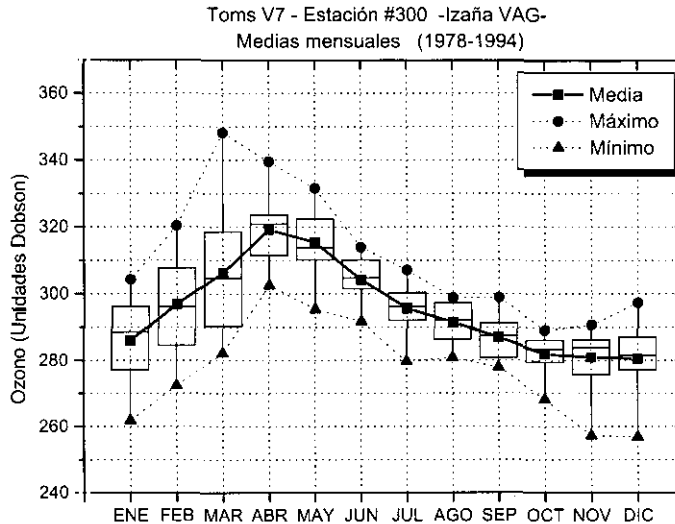
En la figura 5 se representa el “box-plot” de las medias mensuales del Brewer (1991-1997), mostrando claramente la variación estacional del ozono, con máximos en primavera y mínimos en diciembre. Al compararla con la misma gráfica para el TOMS (1979-1994) (figura 6) observamos que el mínimo aparece en octubre-noviembre, en lugar de diciembre. Esto nos muestra la enorme irregularidad del ozono estos últimos años y la imposibilidad de estudiar las tendencias con los datos de los que ahora disponemos. Para ello recurriremos a las medidas de ozono total obtenidas por el instrumento TOMS a bordo del satélite Nimbus-7 a su paso por la vertical de Izaña (Estación N<sup>o</sup> 300 de la NASA)

El TOMS ha sido utilizado para poder conocer la distribución del ozono a nivel mundial y poder estimar las tendencias del ozono en las diferentes regiones de la Tierra en los últimos 15 años (*Stolarski et al., 1991*). La confirmación, oficial y pública, de que la capa de ozono se está deteriorando a nivel mundial se ha podido obtener hace tan sólo unos pocos años. La tendencia del ozono total sobre Europa, en latitudes medias, muestra una clara disminución,



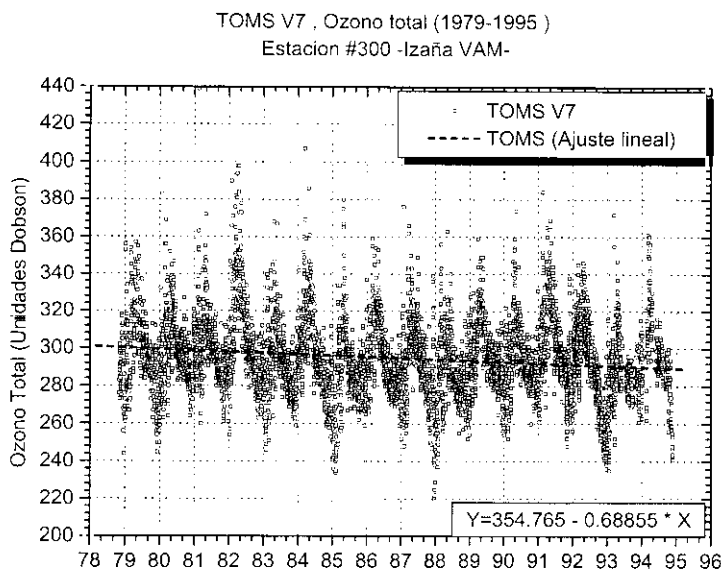


**Figura 5.** “Box-Plot” de las medias mensuales del Brewer #33 (1991-1996) mostrando la estacionalidad de los valores de ozono total con máximos en Abril-Mayo y mínimos en Octubre - Noviembre.



**Figura 6.** “Box-Plot” de las medias mensuales TOMS V7 (1978-1994). Al comparar esta figura con la Figura 5 observamos lo irregular de los datos registrados en el periodo de medida del Brewer, reflejándose las disminuciones de ozono total de los años 1993, 1995 y 1996.

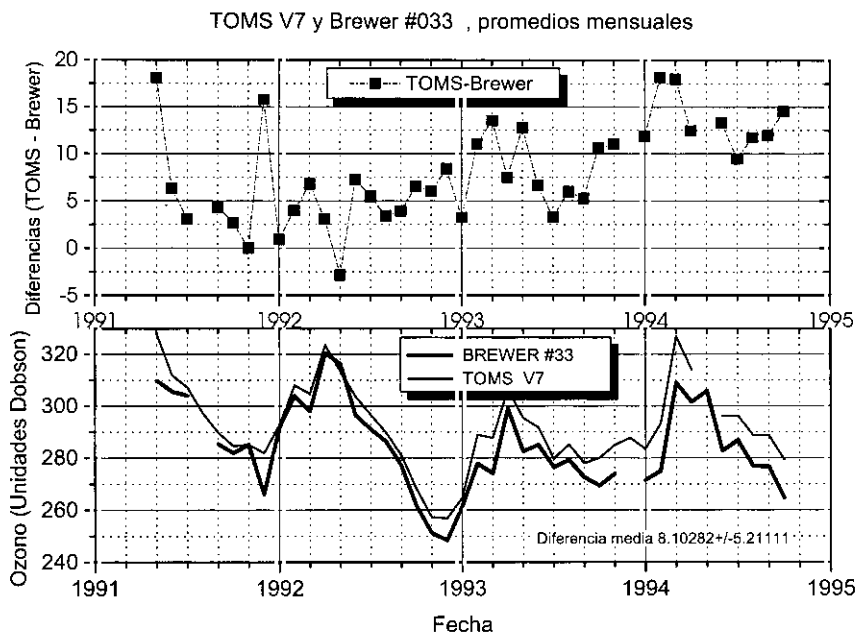
con un  $-3.6 \pm 0.8\%$  por década (Bojkov *et al.*, 1994). Esta disminución del ozono total alcanza también a regiones subtropicales como las islas Canarias, donde según se deduce de la serie de ozono proporcionada por el TOMS, se observa una tendencia negativa de un  $1.7\%$  por década, es decir, una disminución de ozono total de unas 8 UD/10 años (figura. 7). Estos resultados concuerdan muy bien con los obtenidos por Bojkov y Fioletov (1995), que muestran una tendencia de ozono total de  $-0.5 \pm 0.8\%$  por década sobre el ecuador, y de  $-2.4 \pm 1.5\%$  por década sobre el trópico del hemisferio norte. La tendencia sobre los trópicos está fuertemente afectada por los valores de ozono extremadamente bajos que han sido registrados en el periodo 1991-1993, tendencia negativa que se ha acentuado en los últimos años.



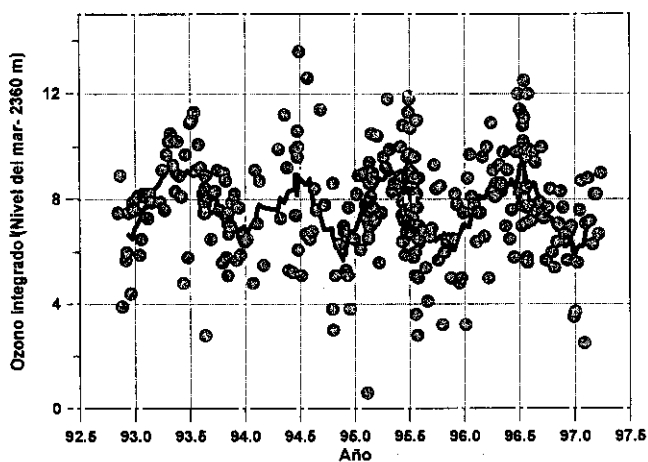
**Figura 7.** Serie de ozono total en columna, obtenidas con las medidas realizadas con el TOMS (NASA) a su paso por la estación de Izaña, mostrando una disminución de 8 UD por década.

Una descripción detallada del instrumento TOMS y de la metodología empleada para obtener ozono total mediante la radiación ultravioleta retrodifundida en tierra o en las nubes, se puede encontrar en Heath *et al.* (1975), Fleig *et al.* (1982) y en Klenk *et al.* (1982).

La figura 8 muestra la diferencia que existe entre el TOMS y el Brewer, debida en primer lugar a la altura de la estación, y a que el Brewer no mide el ozono troposférico por debajo de su nivel (figura 9). Por otra parte el TOMS



**Figura 8.** Diferencia entre los valores de ozono total en columna obtenidos por el TOMS y el Brewe. Se observa una diferencia media de 8 UD que coincide con el valor integrado desde el nivel del mar hasta la altura de la Estación de Izaña (Fig 9).



**Figura 9.** Ozono integrado (UD) desde el nivel del mar hasta 2360 m s.n.m., altitud del Observatorio de Izaña.

no puede medir el ozono que existe debajo de la cobertura nubosa, utilizando una corrección empírica (basada en la climatología de nubes ISCCP) y los datos de reflectividad. Debido a que la cobertura nubosa de las islas está dominada por la inversión del alisio cuya altura y frecuencia de formación tiene un marcada estacionalidad (*Font, 1956*), cabría esperar que las diferencias entre el Brewer y el TOMS reflejaran un carácter estacional, que no se observa en los datos. Asimismo se observa que éstas diferencias aumentan, sobre todo, a partir de 1993 cuando el instrumento se instaló a bordo del satélite Meteor-3 que produjo una discontinuidad en la serie del TOMS. Nuevamente la escasez de los datos (sólo 20 meses en común) no permite establecer conclusiones definitivas.

### 3.2. Perfiles verticales de ozono

La concentración de ozono es prácticamente constante en la troposfera, y aumenta con la altura en la estratosfera hasta un máximo que depende de la latitud y de la estación del año. Por encima de este máximo la concentración decrece casi de una forma exponencial con la altura a través de la estratosfera media y alta, y la baja mesosfera. Las observaciones de ozono con cohetes han demostrado que existe un pequeño máximo secundario en un nivel situado unos pocos kilómetros por encima de la mesopausa (*Thomas et al., 1983*).

Tal y como indica *Khrgian (1975)*, el máximo es tanto mayor cuanto menor sea su altura, encontrándose en los trópicos en primavera, a 25-27 km, con valores de presión parcial de ozono de 140 nb, y en torno a los 18 km, en las regiones polares, con valores de 220 nb (*London, 1985*). La razón de mezcla del ozono (en ppmv) es máxima en los trópicos a una altura de 30-35 km.

La distribución vertical de la presión parcial del ozono está asociada a la cantidad total de ozono, por lo tanto, máximos de ozono altos y situados en niveles bajos están asociados con cantidades de ozono total altas. En cuanto a la climatología de la distribución vertical de ozono y su relación con la meteorología se puede encontrar una descripción detallada en *Dütsch (1978; 1980)*.

En las figuras 10, 11, 12 y 13 se muestran los perfiles completos de ozono y de temperatura en la atmósfera, en la vertical de Tenerife, para el invierno (D,E,F), la primavera (M,A,M), el verano (J,J,A) y el otoño (S,O,N). Los perfiles medios están calculados utilizando todos los ozonosondeos realizados desde Noviembre de 1992 que fueron clasificados como "óptimos" (79, 46, 95 y 61 ozonosondeos para el invierno, la primavera, el verano y el otoño, respectivamente).

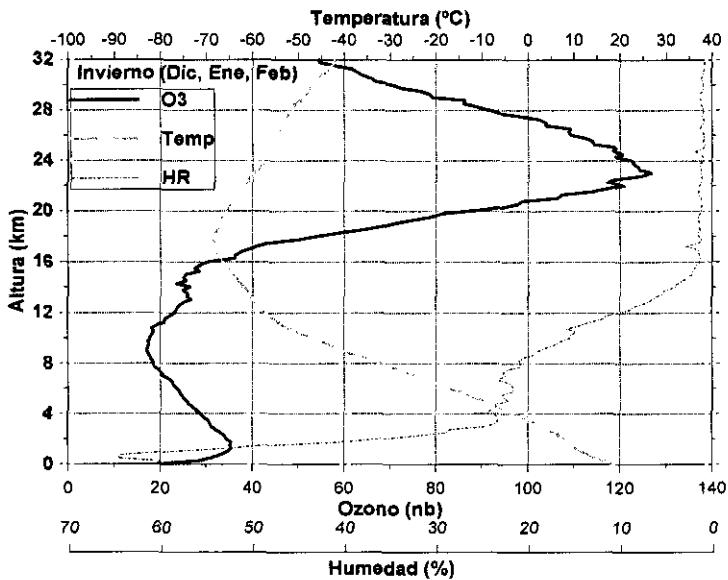


Figura 10. Perfil vertical de ozono (nb), temperatura (°C) y humedad relativa para invierno (Dic, Ene, Feb). (79 ozonosondeos).

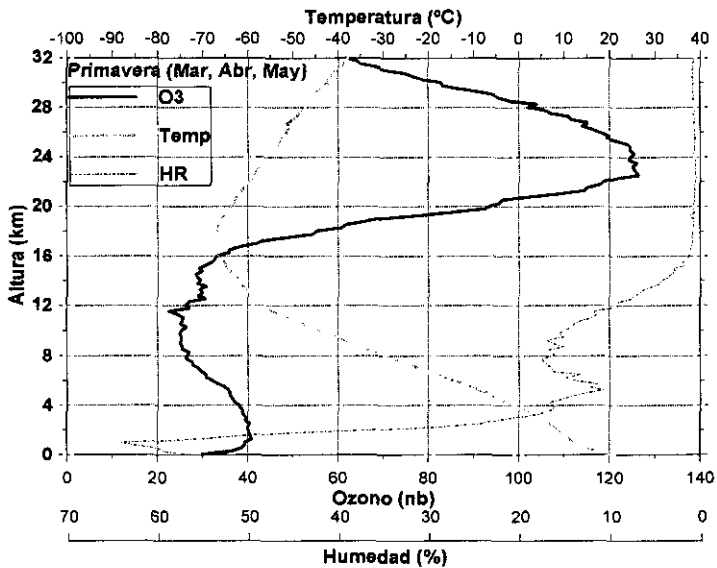


Figura 11. Perfil vertical de ozono (nb), temperatura (°C) y humedad relativa para primavera (Mar, Abr, May). (46 ozonosondeos).

En invierno (figura 10) se observa que el máximo de ozono es de 123 nb y está situado a 23.5 km de altura. El máximo en esta época del año "sufre" frecuentes cambios tanto en su valor como en su altura. La presión parcial de ozono comienza a aumentar a partir de los 12 km, justo a la altitud de la tropopausa en invierno, hasta alcanzar el máximo. En cuanto a la temperatura, el mínimo medio es de unos  $-68^{\circ}\text{C}$ , alcanzado a 17 km de altura.

En primavera (figura 11) el máximo de ozono aumenta ligeramente hasta situarse en unos 126 nb a los 25 km de altura. Se observan variaciones, en torno al máximo de ozono, menores que en el perfil medio correspondiente al invierno, mayores en el resto de la estratosfera, y notablemente mayores en la troposfera. La presión parcial de ozono comienza a aumentar a partir de los 14-15 km de altura ya que la tropopausa se ha elevado en relación al invierno. El perfil de temperatura en primavera muestra un mínimo medio de  $-67^{\circ}\text{C}$ , similar al del invierno, que está situado en niveles próximos a los 17 km de altura.

En verano (figura 12) el máximo de ozono es mayor que el registrado en primavera, alcanzando un valor de casi 132 nb a una altura también algo superior a la que se registra el máximo de ozono en invierno y primavera, 25 km. Los valores de la desviación estándar asociados a los valores medios son relativamente pequeños en torno al máximo y realmente pequeños en el resto de la estratosfera. Sin embargo, en la troposfera, y al igual que sucedía en primavera, las variaciones de ozono son significativas. La presión parcial de ozono comienza a aumentar a partir de los 16 km, resultado que está de acuerdo con el hecho de que la máxima altura de la tropopausa se produce en esta época del año en niveles próximos a los 16 km. El perfil de temperatura muestra que es en verano cuando se registra la mínima estratosférica con casi  $-71^{\circ}\text{C}$ , de nuevo a 17 km de altura.

En otoño (figura 13) el máximo de ozono disminuye de una forma acusada, registrándose un valor medio de 119 nb a unos 27 km de altura. Merece ser destacado el hecho de que es en esta época del año cuando el máximo se sitúa más alto y también cuando las variaciones del mismo, tanto en presión parcial de ozono como de altura, son mayores, observándose un máximo relativamente ancho y desviaciones relativamente grandes en toda la estratosfera. En la troposfera, y al igual que sucedía en invierno, las variaciones de ozono son poco significativas. La presión parcial de ozono comienza a aumentar en niveles mucho más bajos, 12 km, en comparación a los que se registran en verano. Esto es debido a una disminución considerable de la altura de la tropopausa, que se sitúa en ésta época del año entre 12 y 13 km. El perfil de temperatura muestra valores extremadamente estables en la troposfera, salvo en la parte más baja, y desviaciones estándar relativamente pequeñas en la estratosfera. El mínimo de temperatura en esta época del año es de alrededor de  $-69^{\circ}\text{C}$  a una altura de 17 km.

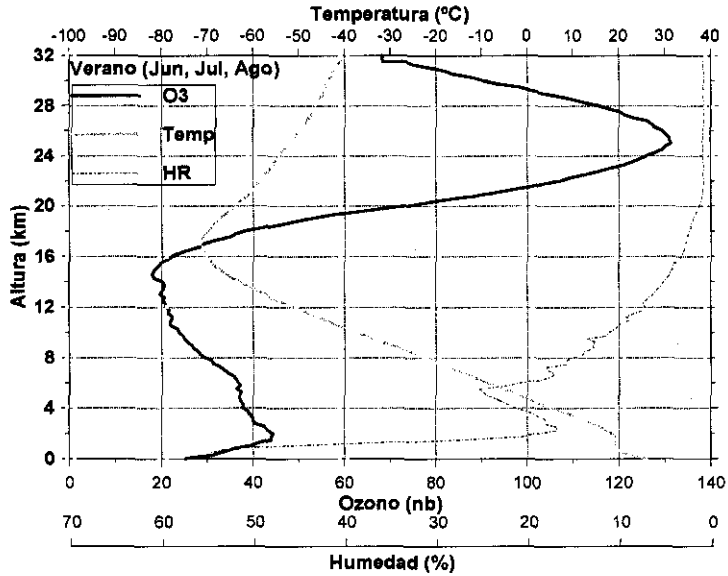


Figura 12. Perfil vertical de ozono (nb), temperatura (°C) y humedad relativa para verano (Jun, Jul, Ago). (95 ozonosondeos).

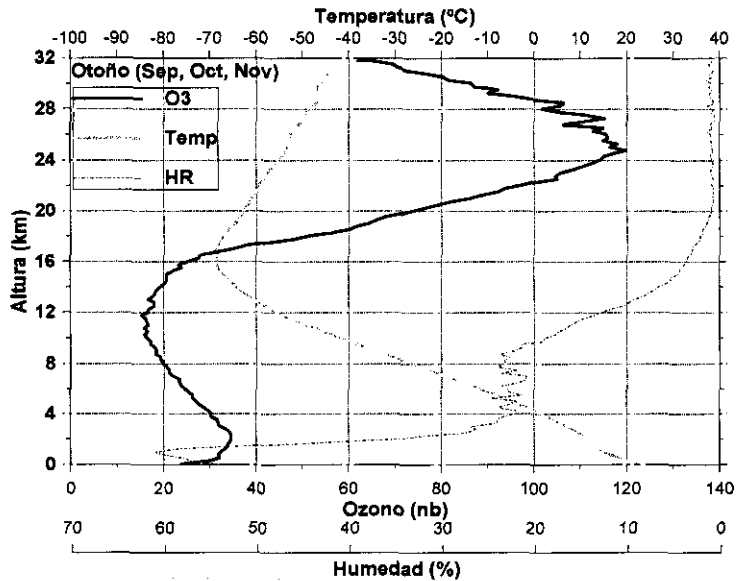
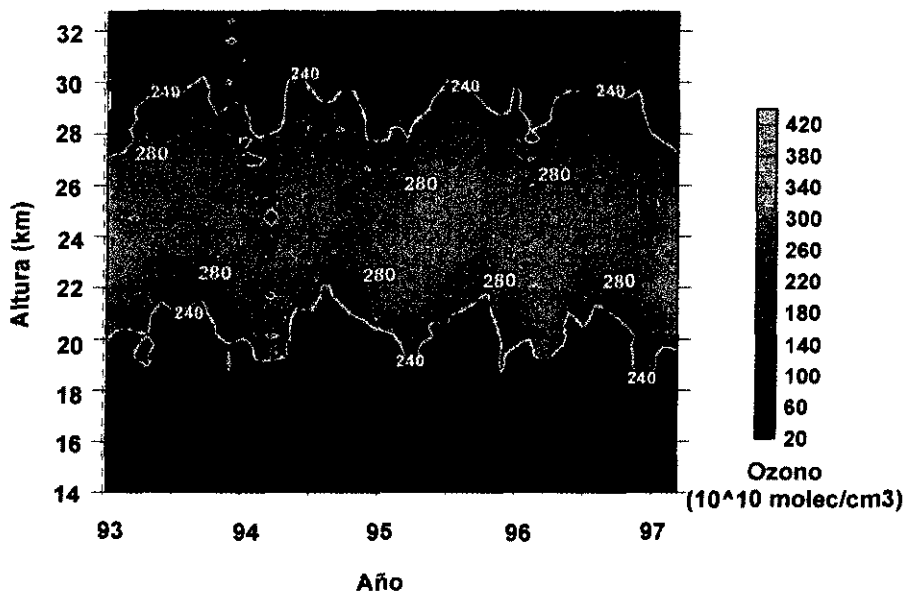


Figura 13. Perfil vertical de ozono (nb), temperatura (°C) y humedad relativa para otoño (Sep, Oct, Nov). (61 ozonosondeos).

El coeficiente de variación del ozono ( $s \times 100 / \text{valor medio de ozono}$ ), disminuye drásticamente en niveles superiores a los 20 kilómetros en las cuatro estaciones, obteniendo coeficientes próximos al 10%. En todos los casos la variabilidad máxima del ozono se registra a la altura de la tropopausa, debido a las frecuentes fluctuaciones en la altura de la misma y a que ésta divide dos regiones donde las concentraciones de ozono son muy diferentes. La variabilidad del ozono en la estratosfera es significativamente menor que la registrada en la troposfera, y en general, la variabilidad del ozono en toda la atmósfera para todas las estaciones del año, es mucho menor que la registrada por estaciones situadas en latitudes mucho más altas como, por ejemplo, la de Åreskutan en Suecia (Bazhanov, 1994).

Resumiendo las características generales de los perfiles estratosféricos, y de acuerdo a la clasificación de perfiles de ozono establecida por Khragian (1975), la distribución vertical de ozono sobre Tenerife corresponde a una atmósfera tipo tropical, con una capa de ozono relativamente alta, muy estrecha y con un contenido de ozono relativamente bajo (figura 14). Las variaciones estacionales son suaves, a diferencia de las encontradas en estaciones situadas en latitudes más altas como, por ejemplo, en Madrid. Así mismo cabe destacar que la temperatura en los diferentes niveles estratosféricos muestra



**Figura 14.** Sección vertical de ozono (tiempo/altura) realizada con todos los ozonosondeos válidos realizados en el período de tiempo marcado. Se muestra la estructura y las variaciones de la denominada "capa de ozono" sobre Tenerife.



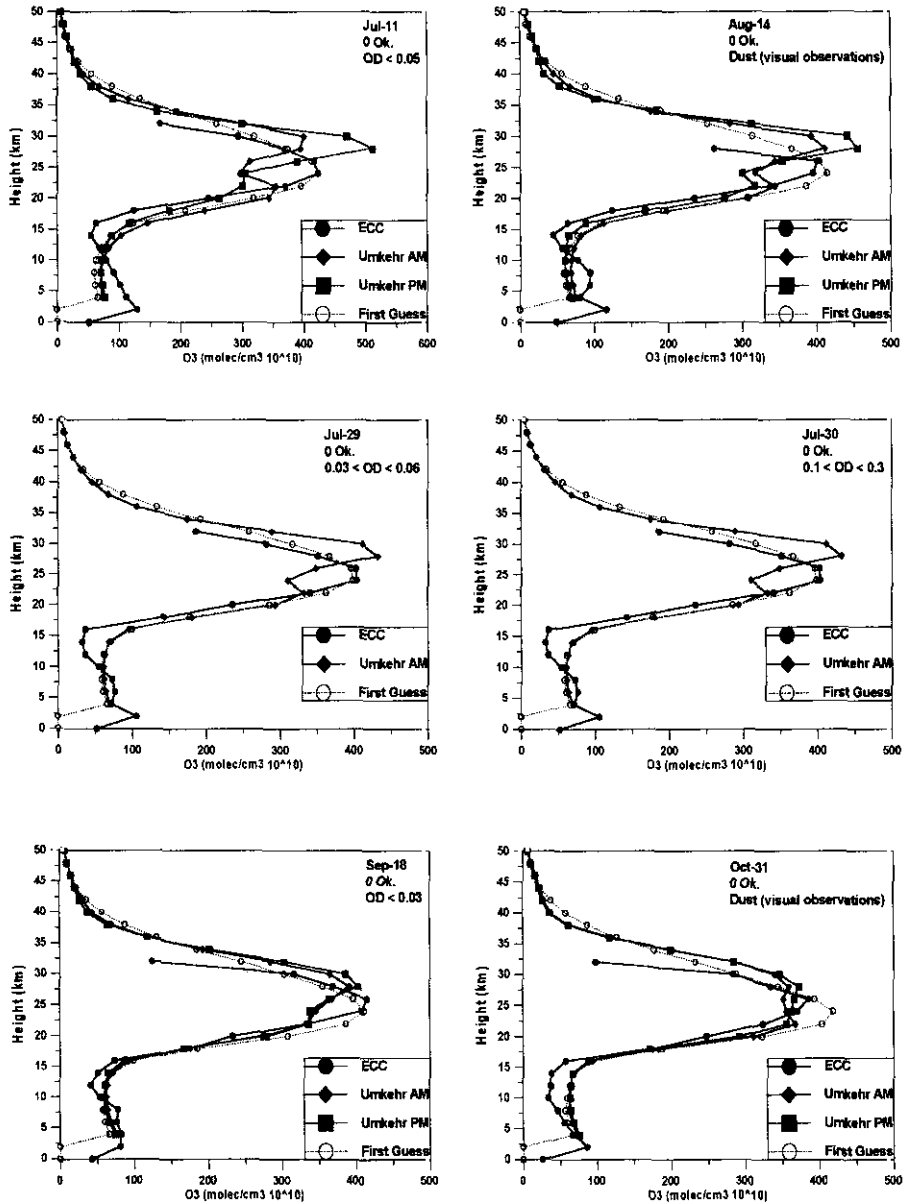


Figura 15. Comparación de perfiles verticales de ozono realizados con ozonosondas ECC y mediante la técnica Umkehr al amanecer (AM) y al atardecer (PM).

pocas variaciones a lo largo del año, menores a 5°C, lo que indica que no existen variaciones importantes en los procesos de transporte en la estratosfera. La escasa variabilidad anual de la temperatura en la baja y media estratosfera es una característica de las atmósferas ecuatorial y tropical (Rex, 1969).

Otro modo de conocer la estructura vertical del ozono en la atmósfera es mediante la realización de perfiles Umkehr. Éstos son obtenidos en el Observatorio de Izaña, diariamente, al amanecer y al atardecer midiendo al cenit con el espectrofotómetro Brewer en el rango de ángulo cenital solar ( $96^\circ - 62^\circ$ ), utilizándose el algoritmo desarrollado por Tom McElroy (AES) basado en el algoritmo corto de Mateer y DeLuisi (Mateer & DeLuisi, 1980). Éste algoritmo específico para los Brewer permite una resolución vertical de 2 Km.

Las figura 15 muestra varios perfiles verticales de ozono realizados con ozonosondeos (ECC) y comparados con perfiles verticales obtenidos mediante la técnica Umkehr. Como se puede comprobar muestran un buen acuerdo en la detección del máximo de ozono, tanto en su magnitud, como en la altitud de éste, pero las diferencias son elevadas en el resto de los niveles. En líneas generales los perfiles Umkehr tienden a sobreestimar el ozono por debajo de la capa de ozono (capas 3-4) con diferencias que rondan el 100% mientras que en las capas próximas al máximo el acuerdo es muy bueno (0-10% en las capas 5 y 6) subestimando el ozono en las capas más altas que el máximo en un 35 %.

### **3.4. La Radiación ultravioleta espectral y su relación con el ozono total en columna y la nubosidad**

La disminución de la capa de ozono en los últimos años tiene una consecuencia directa sobre todos los seres vivos por el aumento en la radiación UV-B que llega a la superficie terrestre. A pesar de la pequeña proporción que representa dentro del espectro solar la radiación UV-B (290-320 nm), su efecto biológico es enorme pues estos fotones son capaces de alterar las moléculas de DNA. El efecto biológico que tiene la radiación ultravioleta es fuertemente dependiente de la longitud de onda y viene representado por las funciones de respuesta biológica. Existen multitud de funciones de respuesta según el organismo o el efecto estudiado, desde cáncer de piel en ratones hasta sus efectos en el placton. La medida espectral nos permite calcular múltiples efectos biológicos frente a las medidas realizadas con instrumentos de banda ancha, que integran la radiación frente a una única función de respuesta, normalmente la respuesta eritemática (enrojecimiento de la piel humana). El efecto de la exposición a la luz ultravioleta viene dado por el concepto de

dosis, así hablamos de dosis eritemática, diaria o mensual según sea el periodo de integración en el tiempo (*Madronich, 1993*).

$$Dosis = \iint Irradiancia(\lambda) * Respuesta(\lambda) \cdot d\lambda \cdot dt$$

El ozono, aunque importante, no es el único factor que interviene en la radiación ultravioleta que alcanza la superficie terrestre. Como en toda radiación solar el factor principal es el astronómico, la rotación terrestre, el ciclo de la distancia Sol-Tierra y la forma esférica de la Tierra, determinan la variación estacional diaria y latitudinal de la radiación ultravioleta (*Zerefos, 1995*).

## Estación de Vigilancia Atmosférica Global de Izaña (INM)

### Dosis eritemática diaria

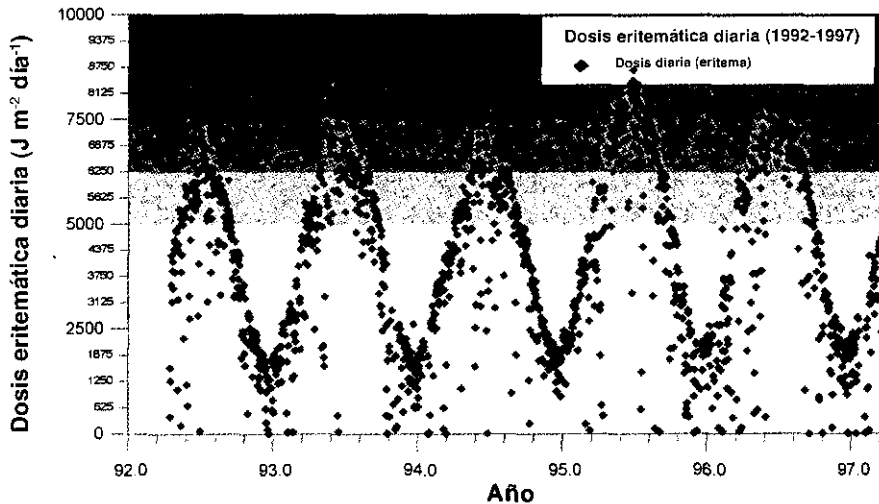
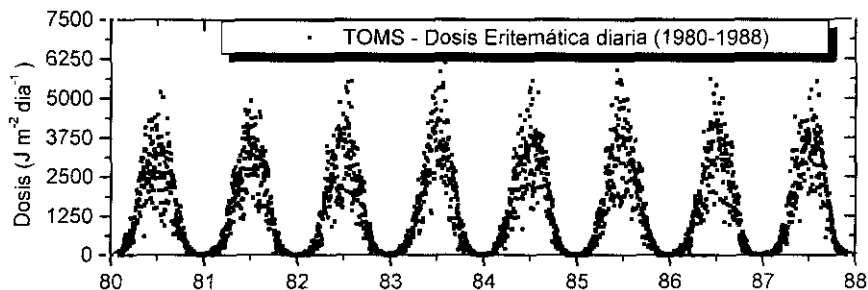


Figura 16. Serie de dosis eritemática diaria medida en el Observatorio de Izaña entre 1992 y 1997.

En la figura 16 se muestra la serie de dosis eritemática diaria entre 1992 y 1997 y no se observa ninguna relación con la gráfica de ozono del mismo periodo. Apenas se notan la disminuciones en la concentración de ozono de los años 93 y 95, ya que lo que “vemos” es el factor astronómico, máximos en verano, y mínimos en invierno.

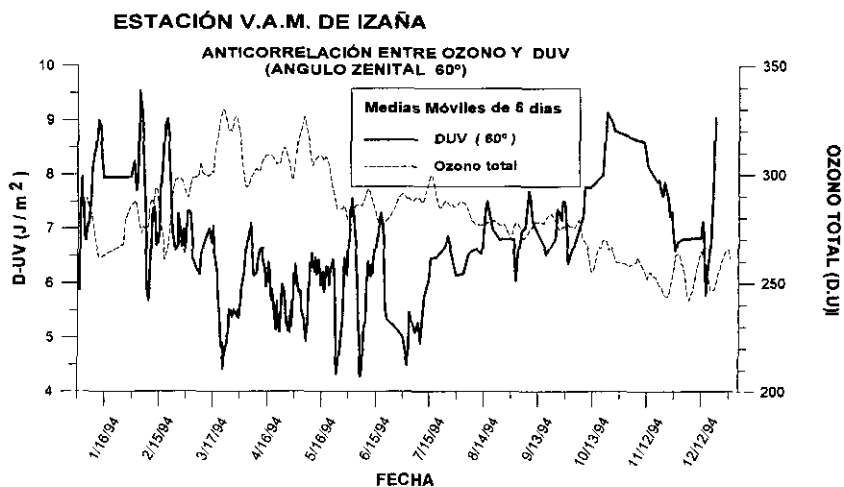
El resto de los factores que influyen sobre la radiación UV son la concentración de absorbentes ( $O_3$ ,  $NO_2$  y  $SO_2$ ), el albedo, los aerosoles, las

nubes y la altitud (Madronich, 1993; 1995). Es difícil atribuir un orden de importancia a estos factores y su efecto conjunto no se traduce en una suma directa de sus efectos. Mientras que una variación de ozono total solo afecta de manera importante al rango espectral del UV-B, variaciones en el albedo, en la nubosidad y en los aerosoles, afectan de manera más uniforme a todo el espectro de la radiación que alcanza la superficie terrestre. La nubosidad puede reducir en un 90% la radiación UV respecto a un cielo despejado, o por el contrario, aumentar en un 30% la radiación misma por reflexión en un cielo parcialmente nuboso si las nubes no están ocultando el sol. Respecto al albedo, incrementa la radiación ultravioleta dependiendo del tipo de la superficie. Es conveniente diferenciar el albedo local (alrededor de unos 100m respecto al sensor) que producen la reflexiones directas, del albedo regional (alrededor de 10 Km respecto al sensor) que contribuye a través de la radiación retrodifundida por la atmósfera mediante las reflexiones múltiples. Los aerosoles disminuyen la radiación, dependiendo de la composición de los mismos y la altura de la capa límite donde se encuentran confinados. Por último la altitud de la estación respecto al nivel del mar tiene un efecto menor, alrededor de un 8% por km. En estaciones en altura, como Izaña, al efecto de la altitud hay que sumar los efectos de la escasa presencia de aerosoles y nubosidad y una relativamente baja concentración de ozono, con lo que los niveles de UV se incrementan de una manera notable.



**Figura 17.** Dosis eritemática diaria obtenidas por el TOMS relativos a nivel del mar sobre Tenerife en el periodo 1980-88.. El grid elegido de extensión  $0.5^\circ$  de latitud y  $1.5^\circ$  de longitud, esta centrado en  $28.5^\circ$  N  $16.9^\circ$  W siendo mar en su mayor parte.

En la figura 17 se representan los valores de Dosis Eritemática diaria obtenidos por el TOMS relativos a nivel del mar que son un 25% más bajos que los valores obtenidos en Izaña que se encuentra a 2.360 m s.n.m..

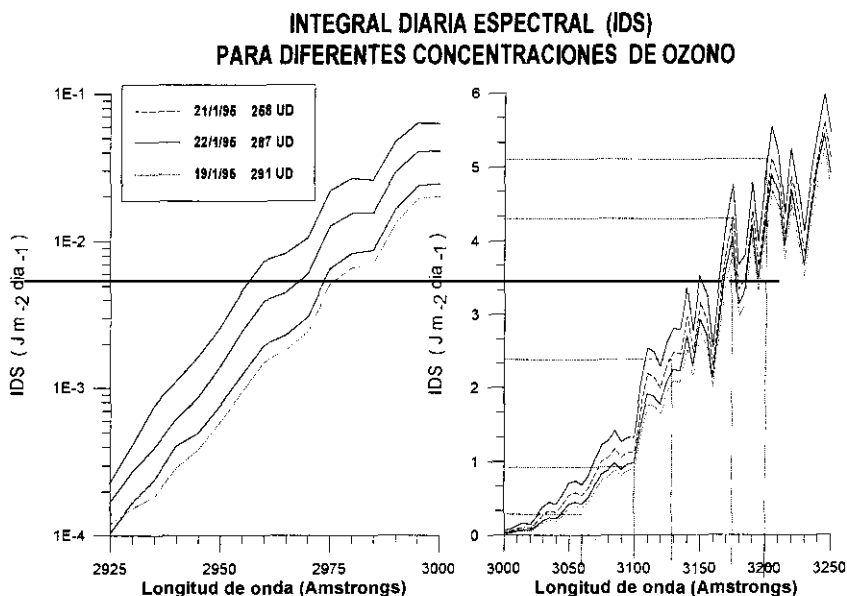


**Figura 18.** La radiación ultravioleta muestra una clara anticorrelación con el ozono total en la columna a lo largo del un año. Para poder detectar claramente esta anticorrelación es necesario eliminar la fuerte dependencia astronómica, seleccionando la radiación ultravioleta integrada en longitud de onda para un ángulo cenital determinado.

Por lo que hemos visto, si deseamos observar el efecto de ozono en la radiación UV debemos aislarlo de otros factores, sobre todo el astronómico, que como hemos visto es el dominante.

La figura 18 muestra la anticorrelación entre el ozono y la radiación ultravioleta, el factor astronómico se ha eliminado representando las dosis (instantáneas) de radiación UV para un ángulo zenital determinado (Redondas, 1995). En la figura 19 se muestra la variación experimentada por el ultravioleta espectral en días muy próximos en los que se registran valores de ozono muy diferentes (Redondas, 1995).

En el marco del programa de ozono estratosférico y radiación ultravioleta del observatorio de Izaña se pretende profundizar en el estudio del resto de los factores que modulan las dosis de radiación UV, para lo cual se instalará, en colaboración con la Universidad de La Laguna un espectroradiómetro a nivel del mar que nos permitirá caracterizar la capa de mezcla y estudiar cómo afectan los aerosoles continentales y marinos, y la nubosidad en la radiación UV espectral.



**Figura 19.** Anticorrelación entre ozono y radiación UV-B. El factor astronómico se ha eliminado al elegir días próximos temporalmente, pero en los que se ha registrado muy diferentes concentraciones de ozono. Se representan también las longitudes de onda que utiliza el Brewer para la medida de ozono.

#### 4. PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN EN ESTE CAMPO

En el Observatorio de Izaña se han llevado a cabo numerosas campañas de intercomparación de espectrofotómetros y piranómetros de radiación ultravioleta y ozono, entre las que cabe destacar las siguientes:

*CAMPAÑA NOGIC-93 "THE NORDIC INTERCOMPARISON OF ULTRAVIOLET AND TOTAL OZONE INSTRUMENTS"*. Financiada por el Consejo de Ministros Nórdico, la Academia de Finlandia, Viäsälä Oy y la Agencia de Protección del Medioambiente Sueca. Se llevó a cabo en el Observatorio de Izaña entre el 24 de Octubre y el 5 de Noviembre de 1993. El principal objetivo fue calibrar (en laboratorio óptico y con medidas al sol) e intercomparar los equipos para la medida de UVB y ozono (Cuevas *et al.*, 1994; Cuevas & Dahlback, 1994) de diferentes grupos de investigación de Finlandia, Suecia, Noruega, Dinamarca, Islandia, Canadá, Grecia y España.

*CAMPAÑA "THE 12HT WMO OZONE COMMISSION DOBSON CALIBRATION AND INTERCOMPARISONS"*. Financiada por la OMM y por la

NOAA (USA). Realizada en Izaña del 14 al 30 de Junio de 1994. El principal objetivo fue realizar la calibración de espectrofotómetros DOBSON para la medida de ozono de países latinoamericanos (Argentina, Perú, Brasil) y europeos (Portugal, España y Alemania) frente al Dobson patrón mundial (NOAA/CMDL, USA) y realizar una intercomparación con espectrofotómetros Brewer (estándar mundial, Brewer N° 17 de AES, Canadá y equipo de Izaña, Brewer N° 33), SAOZ (Francia) y dos espectrofotómetros de filtros M-183 (Rusia y Cuba).

*CAMPAÑA CASCUM-95: INTERCOMPARACION DE INSTRUMENTOS DE ULTRAVIOLETA Y OZONO TOTAL.* Financiada por la Unión Europea, se realizó en Izaña del 12 al 20 de Julio de 1995 y consistió en la intercomparación de espectralradiómetros para la medida de UVB y ozono en el marco del proyecto europeo CASCUM encargado de desarrollar un sistema europeo de calibración de espectralradiómetros. En dicha intercomparación participaron espectralradiómetros de Austria, Gran Bretaña, Grecia y España.

*CAMPAÑA NOGIC-96 "THE NORDIC INTERCOMPARISON OF ULTRAVIOLET AND TOTAL OZONE INSTRUMENTS".* Financiada por el Consejo de Ministros Nórdico, la Academia de Finlandia, Väisälä Oy y la Agencia de Protección del Medioambiente Sueca. Realizada en Izaña entre el 8 y el 21 de Octubre de 1996. El principal objetivo fue calibrar (en laboratorio óptico y con medidas directas al sol) e intercomparar 25 equipos para la medida de UVB y ozono de diferentes grupos de investigación de Finlandia, Suecia, Noruega, Dinamarca, Islandia, Canadá, Grecia, Holanda, Estonia y España.

Gran parte de la investigación desarrollada en Izaña sobre ozono estratosférico se realiza en el marco de proyectos financiados por la CICYT o por la Unión Europea, que son los siguientes:

*PROYECTO SCUVS ("Stratospheric Climatology Using Ultraviolet-Visible Spectroscopy").* Financiado por la CICYT en el periodo 1993-1996, continua hasta la fecha. Su principal objetivo fue el de establecer en Izaña la medida de dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) integrado en la columna atmosférica, mediante un espectrómetro de absorción en el visible desarrollado Laboratorio de Atmósfera (LATMOS), del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) (Yela et al., 1993). En la actualidad los objetivos más importantes de este proyecto conjunto INTA-INM, son los de determinar las variaciones estacionales de  $\text{NO}_2$  en columna en la región subtropical, y sus posibles causas (fotoquímicas y de circulación atmosférica), y la evolución del  $\text{NO}_2$  a lo largo de los años (Yela et al., 1995).

*PROYECTO REVUE ("REconstruction of Vertical ozone distribution from Umkehr Estimates").* Financiado por la Unión Europea, comenzó el 1 de

Enero de 1996 y continua en la actualidad. Su objetivo más importante es el establecimiento, análisis y evaluación de una base de datos mundial de perfiles verticales de ozono obtenidos mediante la técnica Umkehr. El objetivo específico del Observatorio de Izaña es el de validar los perfiles Umkehr frente a sondeos de ozono para diferentes tipos de situaciones meteorológicas.

*PROYECTO SUVDAMA* (“*Scientific UV DATA Management*”). Financiado por la Unión Europea, comenzó el 1 de Enero de 1996 y continua en la actualidad. Los principales objetivos son establecer una base de datos de radiación ultravioleta europea de uso científico e iniciar una interpretación general de las medidas en tierra de radiación UV, intentando comprender los procesos de transferencia radiativa. Este objetivo se conseguirá mediante la medida controlada de alta calidad de UV en diferentes estaciones seleccionadas de Europa, en colaboración con la OMM. Intervienen 18 grupos de investigación europeos.

*PROYECTO SUSPENS* (“*Standardization of Ultraviolet Spectroradiometry in Preparation of an European Network*”). Financiado por la Unión Europea, comenzó el 1 de Enero de 1996 y continua en la actualidad. El principal objetivo es el de establecer una metodología única de calibración de equipos (espectrales y de banda ancha) de medida de radiación ultravioleta en Europa, así como designar los equipos patrones.

*PROYECTO “Investigación de las Interrelaciones de los Niveles de Radiación UV con las Propiedades Radiativas de los Aerosoles Atmosféricos y las Nubes”*, financiado por la CICYT por dos años ha comenzado en Julio de 1997. El principal objetivo de este proyecto es el de determinar las relaciones existentes entre la radiación ultravioleta en diferentes longitudes de onda con la concentración de aerosoles en la atmósfera y la cantidad, tipo y altura de nubes.

*PROYECTO para la implantación de una Red Nacional de Radiación UV*. Este proyecto está financiado por la CICYT por dos años, y ha comenzado, también, en Julio de 1997 y su principal objetivo es la implantación de una red nacional de radiación UV utilizando piranómetros de banda ancha en los rangos A y B.

Por último, existe una línea de investigación muy singular, en colaboración con el INTA y con la NASA que consiste en explicar el denominado efecto GHOST (Global Hidden Ozone Structures from TOMS) (Cuevas et al. 1995).

## 5. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

Como ya se ha explicado anteriormente, el emplazamiento de Izaña es excelente para realizar intercomparaciones de espectroradiómetros y radiómetros y mantener calibraciones precisas de instrumentos patrón mediante el



cálculo de constantes extraterrestres con la técnica de “Langley-Plot”. Una de las líneas futuras sería evaluar un método de calibración de irradiancia mediante “langley plots” utilizando como fuente el sol y validarlo frente a las lámparas estándar. El Observatorio cuenta en la actualidad con un laboratorio de óptica dotado de lámparas externas de calibración que han sido calibradas frente a lámparas patrón NIST (National Institute of Standards and Technology), y en breve contará con un espectroradiómetro de doble monocromador, Bentahm-150, que está llamado a ser el instrumento de referencia nacional para la medida de radiación UV espectral. Por todo lo anterior, este Observatorio será próximamente el Centro de Calibración Nacional (calibraciones de primer orden) en la futura Red Nacional de Radiación UV que en la actualidad está comenzando a implantar el Instituto Nacional de Meteorología. Así mismo se intensificará, sin duda alguna, la frecuencia de las campañas internacionales de intercomparación de instrumentos, sobre todo a nivel europeo. Se puede afirmar, por tanto, que el Observatorio de Izaña jugará en un futuro próximo un importante papel en todas aquellas facetas relacionadas con el control de calidad de las medidas de ozono total y de la radiación ultravioleta espectral.

En otro orden de cosas, la investigación sobre la composición química en la estratosfera y sus posibles cambios está cada vez adquiriendo más importancia por cuanto esta región atmosférica puede mostrarnos pruebas importantes y concluyentes sobre el denominado cambio climático que presumiblemente producirá, a su vez, importantes modificaciones en la circulación general atmosférica. Un pequeño grupo de selectas Estaciones empiezan a conformar la denominada “Red para la Detección de Cambios Estratosféricos” (en inglés, el NDSC —Network for Detection Stratospheric Change—). El Observatorio VAM de Izaña posee en la actualidad parte de la instrumentación mínima requerida en este tipo de Estaciones, y además está situada en uno de los mejores emplazamientos a nivel mundial, tanto por su situación geográfica (en el trayecto de la alta circulación Ecuador-Polo Norte) como por las transparencias de sus cielos, por lo que esta Estación en pocos años se incorporará a la vanguardia mundial de la investigación estratosférica.

El hecho de que la vigilancia atmosférica, en general, y la vigilancia de la capa de ozono y las dosis de radiación UV, en particular, deban ser realizadas a escala planetaria, hace que cada vez se impulse con mayor fuerza la observación atmosférica desde el espacio mediante satélites. Esta circunstancia está exigiendo ya el establecimiento de una serie de estaciones en tierra situadas en excelentes emplazamientos y dotadas de precisa y avanzada instrumentación que sirvan de referencia a la instrumentación instalada en los satélites. El Observatorio VAM de Izaña ya ha comenzado a trabajar en esta línea

sirviendo como Estación de referencia de instrumentos para la medida del ozono estratosférico y de aerosoles instalada a bordo de satélites de la NASA (TOMS en el Earth-Probe), y en un futuro próximo se iniciará un proyecto europeo para validar tanto perfiles verticales de ozono, como ozono total integrado y radiación UV del instrumento GOME instalado en el satélite europeo ERS-2 de la ESA (Agencia Espacial Europea), desde el Observatorio de Izaña.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores muestran su agradecimiento a Pedro Carretero que inició, con muy escasos medios, las primeras observaciones de ozono con el espectrofotómetro Brewer en el Observatorio de Izaña. Asimismo agradecen a Sergio Afonso la gran labor que desarrolla en el programa de ozonosondeos en la Estación de Radiosondeos de Santa Cruz de Tenerife. Al Laboratorio de Atmósfera (LATMOS) del INTA, por su generosa aportación instrumental al laboratorio de óptica del Observatorio de Izaña. A Alkis Bais (Universidad de Tesalónica, Grecia) y a Pedro Gómez (Universidad de La Laguna) por su asesoramiento científico en puntos claves de este programa. Finalmente muestran su gratitud a la Subdirectora General de Programas Especiales e Investigación Climatológica del INM, Rosario Díaz-Pabón, por su decidido apoyo a este programa de investigación del Observatorio VAM de Izaña.

### REFERENCIAS

- BAZHANOV, V. *Surface Ozone at Mount Åreskutan: Connection with Ozone in the Free Troposphere*, Institute of Applied Environmental Research, Report No. 25, Stockholm University, 1994.
- BREWER, A.W. *A Replacement for the Dobson Spectrophotometer?*, Pure Appl. Geophys., 106, 919-927, 1973.
- BOJKOV, R.D., V.E. FIOLETOV, A.M. SHALAMJANSKY. *Total Ozone Changes Over Eurasia Since 1973 Based on Reevaluated Filter Ozonometer Data*, J. Geophys. Res., 99, D11, 22985-22999, 1994.
- BOJKOV, R.D., V.E. FIOLETOV. *Total Ozone Variations in the Tropical Belt: An Application for Quality of Ground Based Measurements*, Meteorol. Atmos. Phys., 1995 (en prensa).

- CLAUDE, H., HARTMANNSGRUBER, U. KÖHLER. *Measurements of Atmospheric Ozone Profiles Using the Brewer/Mast Sonde: Preparation, Procedure, Evaluation*, WMO/TD No.179, 1987.
- CUEVAS, E., A. REDONDAS. *Measurements of Total Ozone and Sulphur Dioxide with Brewer#33 at Izaña Observatory. A Contribution to the Global Atmospheric Watch*, Presentación oral en el "WMO Consultation on Operation of the BREWER Ozone Spectrophotometer", Virginia University, Charlottesville (USA), 1-3 Junio, 1992.
- CUEVAS, E., M. CARRETERO, M.J. BLANCO. *The Ozone Soundings Program at Izaña GAW Station: First Results*; WMO/GAW No.91, 21-24; WMO Region VI Conference on the Measurements and Modelling of Atmospheric Composition Changes including Pollution Transport; 4-8 Octubre, Sofia (Bulgaria), 1993.
- CUEVAS, E., K. LAMB, A. BAIS. *Total Ozone Contents derived by Different Instruments and Soundings*, Meteorological Publications No 27, Finnish Meteorological Institute, 105-119, Helsinki, 1994.
- CUEVAS, E., M. CARRETERO, M.J. BLANCO. *The Ozone Soundings Program at Izaña GAW Station: First Results*; WMO/GAW No.91, pp. 21-24; WMO Region VI Conference on the Measurements and Modelling of Atmospheric Composition Changes including Pollution Transport; 4-8 Octubre, Sofia (Bulgaria), 1993.
- CUEVAS, E., K. LAMB, A. BAIS. *Total Ozone Contents derived by Different Instruments and Soundings*, Meteorological Publications No 27, Finnish Meteorological Institute, 105-119, Helsinki, 1994.
- CUEVAS, E., A. DAHLBACK. *Location and Conditions During the Nordic Intercomparison of Ultraviolet and Total Ozone Instruments at Izaña*, Meteorological Publications No 27, Finnish Meteorological Institute, 105-119, Helsinki, 1994.
- CUEVAS, E., GIL, M., ALONSO, L., RODRÍGUEZ, J., REAL, F. *The Continental Effect on Total Ozone Distribution*, Poster at The International Conference on Ozone in the Lower Stratosphere, Halkidiki (Grecia), Mayo, 15-20, 1995.
- DE BACKER, H. DE MUER. *Intercomparison of Total Ozone Data Measured with Dobson and Brewer Ozone Spectrophotometers at Uccle (Belgium) from January 1984 to March 1991, Including Zenith Sky Observations*, J. Geophys. Res., 96, 20,711-20,719, 1991.
- DELUISSI, J. *Shortened Version of the Umkehr Method for Observing the Vertical Distribution of Ozone*, Appl. Optics, 18, 3190, 1979.
- DÜTSCH, H.U. *Two Years of Regular Ozone Soundings over Boulder, Colorado*, NCAR Tech. Note No 10, USA, 1966.

- DÜTSCH, H.U., W. ZÜLLIG, CH. LING. *Regular Observation at Thalwil, Switzerland and at Boulder, Colorado*, LAPETH-1, Laboratorium für Atmosphärenphysik ETH Zürich, Switzerland, 1970.
- DÜTSCH, H.U. *Vertical Ozone Distribution on a Global Scale*, Pure Appl. Geophys., 116, 511-529, 1978.
- DÜTSCH, H.U. *Vertical Ozone Distribution and Tropospheric Ozone*, Proc. of NATO Advanced Study Institute on Atmospheric Ozone: Its Variation and Human Influences, A.C. Aikin (Ed.) Report No. FAA-EE-80-20, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington D.C., 7-30, 1980.
- FLEIG, A.J., K.F. KLENK, P.K. BHARTIA, D. GORDON. *User's Guide for the Total-Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) Instrument First-Year Ozone-T Data Set*, NASA, Ref. 1096, 1982.
- FONT, I. *El Tiempo Atmosférico de las Islas Canarias*, Servicio Meteorológico Nacional, Instituto Nacional de Meteorología, N° 26, 1956.
- HEATH, D.F., A.J. KRUEGER, H.A. ROEDER, B.D. HENDERSON. *The Solar Backscatter Ultraviolet and Total Ozone Mapping Spectrometer (SBUV/TOMS) for Nimbus G*, Opt. Eng., 14, 323, 1975.
- KERR, J.B., C.T. MCELROY, R.A. OLAFSON. *Measurements of Ozone with the Brewer Ozone Spectrophotometer*, Proc. Quadrennial Int. Ozone Symp. (J. London, Ed.), Boulder, Colorado, USA, 74-79, 1980.
- KERR, J.B., C.T. MCELROY, D.I. WARDLE, R.A. OLAFSON, W.F.J. EVANS. *The Automated Brewer Spectrophotometer*, Atmospheric Ozone, Proc. Quadrennial Int. Ozone Symp. (C.S. Zerefos y A. Ghazi, Eds.), Halkidiki, Grecia, 396-401, 1984.
- KERR, J.B., I.A. ASBRIDGE, W.F.J. EVANS. *Intercomparison of Total Ozone Measured by the Brewer and Dobson Spectrophotometers at Toronto*, J. Geophys. Res., 93, 11129-11140, 1988.
- KHRGIAN, A. KH., G.I. KUZNETSOV, A.V. KONDRAT'EVA. *Atmospheric Ozone*, Edited by D.I. Nasilov, Izdatel'stvo Nauka, Moskva, 30-35, 1975.
- KLENK, K.F., P.K. BHARTIA, A.J. FLEIG, V.G. KAVEESHWAR, R.D. MCPETERS, P.M. SMITH. *Total Ozone Determination from Backscattered Ultraviolet (BUV) Experiment*, J. Appl. Meteorol., 21, 1672, 1982.
- KOMHYR, W.D., R. D. EVANS. *Dobson Spectrophotometer Total Ozone Measurement Errors Caused by Interfering Absorbing Species such as SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, and Photochemically produced O<sub>3</sub> in Polluted Air*, Geophys. Res. Lett., 7, pp 157-160, 1980.
- KOMHYR, W.D. *Operations Handbook. Ozone Measurements to 40 km Altitude With Model 4A Electrochemical Concentration Cell (ECC) Ozonesondes (Used with*

- 1680-Mhz Radiosondes), NOAA Technical Memorandum ERL ARL-149, 49, Boulder, Colorado, USA, 1986.
- LOGAN, J.A. *Tropospheric Ozone: Seasonal Behaviour, Trends, and Antropogenic Influence*, J. Geophys. Res., 90, 10, 463-10482, 1985.
- LONDON, J. *The Observed Distribution of Atmospheric Ozone and its Variation, Ozone in the Free Atmosphere*, R. Whitten and S. Prasad (Ed.), 11-80, Van Nostrand Reinhold Company Inc., New York, 1985.
- MADRONICH, S. *The Atmosphere and UVB Radiation at Ground Level*, Environmental UV Photobiology, Edited by Antony R. Young, 1993.
- MADRONICH, S. *Theoretical Stimulation of Biologically Efective UV Radiation at the Earth Surface*, Solar Ultraviolet Radiation, Edited by Ch. Zerefos & A. Bais, 1995.
- Manual del Espectrofotómetro Brewer, SCI-TEC, Saskatoon, Canadá, 1991.
- MATEER, C.L., J.J. DELUISI. *The Estimation of the Vertical Distribution of Ozone by the Short Umkehr Method*, Proc. Quad. Ozone Symp., Boulder, Colorado (USA), 64-73, 1980.
- MATEER, C.L., J.J. DELUISI. *A New Umkehr Inversion Algorithm*, J. Of Atmos. And Terr. Physics, 54, 537-556, 1992.
- MCÉLROY, C.T., C.L. MATEER, J.B. KERR, D.I. WARDLE. *Umkehr Observation Made with the Brewer Ozone Spectrophotometer*, Proc. Quad. Ozone Symp., Gottingen, Germany, 1988.
- REDONDAS, A. *Programa de Medidas de Radiación Ultravioleta Espectral en el Observatorio VAM de Izaña: Primeros Resultados*, Poster en la VIII Asamblea de Geodesia y Geofísica, Madrid, 29-Mayo a 1-Junio, 1995.
- REX, D.F. (Editor), *Climate of the Free Atmosphere*, World Survey of Climatology (Volume 4), Elsevier Publishing Company, 1969.
- SCHOTLAND, R.M. *Some Observations of the Vertical Profile of water Vapor by a Laser Optical Radar*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Symposium on Remote Sensing of the Environment, U. Of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, USA, 273, 1966.
- SMIT, H.G.J., W. STRÄTER, D. KLEY, M.H. PROFITT. *The Evaluation of ECC-Ozone Sondes Under Quasi Flight Conditions in the Environmental Simulation Chamber at Jülich*, Report to EUROTRAC (Subproject TOR), 1994.
- STOLARSKI, R.S.P., R.D. BLOOMFIELD, R.D. MCPETERS, J.R. HERMAN. *Total Ozone Trends Deduced from Nimbus-7 TOMS Data*, Geophys. Res. Lett., Vol 18, 1, 105-1,018, 1991.

THOMAS, R.J., C.A. BARTH, G.J. ROTTMAN, D.W. RUSCH, G.H. MOUNT, G.M. LAWRENCE, R.W. SANDERS, G.E. THOMAS, L.E. CLEMENTS. *Ozone Density Distribution in the Mesosphere (50-90 km) Measured by the SME Limb Scanning Near Infrared Spectrometer*, Geophys. Res. Lett., 10, 245-248, 1983.

WMO/GAW, *Global Ozone Research & Monitoring Project*, WMO Consultation on Brewer Ozone Spectrometer Operation, Calibration & Data Reporting, Arosa (Switzerland), August, 1990.

YELA, M., M. GIL, S. RODRÍGUEZ, E. CUEVAS, J.M. CISNEROS. *Equilibrio Fotoquímico del NO<sub>2</sub> Estratosférico en Regiones Subtropicales*. XXIV Reunión Bienal de la real Sociedad Española de Física. Jaca (Huesca). 27 Sep- 1-Oct 1993.

YELA, M., S. RODRÍGUEZ, M. GIL, E. CUEVAS, C. PARRONDO, A. REDONDAS. *NO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> at Subtropical Latitudes*, Air Pollution Research Report 56, Proc. 3<sup>rd</sup> Symposium on European Polar Stratospheric Research, Schliersee (Germany), 235-238, Pyle, Harris and Amanatidis Editors, European Comission, Septiembre 1995.

ZEREFOS, CH. *Factors Influencing the Transmission of Solar Ultraviolet Irradiance Through the Earth Atmosphere*, Solar Ultraviolet Radiation, Edited by Ch. Zerefos & A. Bais, 1995.

(Dirección de contacto: aredonas@inm.es)