



MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE

SUBSECRETARÍA

DIRECCIÓN GENERAL
DEL INSTITUTO NACIONAL
DE METEOROLOGÍA

Nota Técnica número 4
del Observatorio Atmosférico de Izaña

**PROGRAMA DE OZONOSONDEOS
DEL OBSERVATORIO
ATMOSFÉRICO DE IZAÑA:
EL OZONO SOBRE TENERIFE
Y SU RELACIÓN CON LA
PROCEDENCIA DE LAS MASAS
DE AIRE**

CB 1017214
~~no 17071~~

Sig.: NT
OBS AT 1
4



**PROGRAMA DE OZONOSONDEOS DEL
OBSERVATORIO ATMOSFÉRICO DE IZAÑA:
EL OZONO SOBRE TENERIFE Y SU RELACIÓN CON
LA PROCEDENCIA DE LAS MASAS DE AIRE**

Nota Técnica núm. 4
Observatorio Atmosférico de Izaña
Instituto Nacional de Meteorología

JUAN MANUEL SANCHO ÁVILA
MARÍA DEL CARMEN ROMERO PALOMINO

Índice general

1. Introducción	2
2. El Ozono sobre Tenerife	4
2.1. Comparación con otras estaciones de la NDSC	4
2.2. Características de la distribución vertical de ozono estratosférico y troposférico . .	6
2.2.1. Estratosfera	6
2.2.2. Troposfera	7
3. Estudio sobre la procedencia de las masas de aire	14
3.1. Metodología	14
3.2. Estadística de los tiempos de residencia por sectores geográficos	15
3.3. Serie temporal de los tiempos de residencia	17
4. Caracterización de las masas de aire según la región de procedencia	20
5. Disminución de ozono debido a masas de aire procedentes de Africa	25
5.1. Comparación entre los perfiles medios Atlántico Norte y Africa	25
5.2. Análisis de un episodio de disminución drástica de ozono troposférico	27
5.3. Disminución neta de ozono troposférico integrado	33
6. Conclusiones	35

Capítulo 1

Introducción

La estación de Ozonosondeos de Sta. Cruz de Tenerife [28.46N, 16.26W], dependiente del Observatorio Atmosférico de Izaña, lleva a cabo desde Noviembre de 1992 un importante programa de ozonosondeos que continúa sin interrupción hasta la actualidad. A los sondeos de ozono que se realizan semanalmente de forma rutinaria, hay que añadir los obtenidos en campañas intensivas de sondeos diarios (incluso más de un sondeo diario en alguna ocasión), en determinados periodos de tiempo que abarcan desde un mes a casi tres meses como es el caso de la campaña de 1999 en el marco del proyecto TRACAS (Transport of Chemical species Across the Subtropical tropopause). El sensor de ozono utilizado en los ozonosondeos es una célula electroquímica ECC (Electro Chemical Cell) que asciende en la atmósfera gracias a un globo de Helio. Una descripción detallada del programa de medidas en cuanto al principio de operación, procedimiento para la realización de ozonosondeos y control de calidad de los datos, se puede encontrar en *Sancho et al. (2002)*.

La estación de ozonosondeos de Sta. Cruz de Tenerife fue aceptada en Julio de 2000 como estación complementaria de la red NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change). Esta red mundial está formada por estaciones situadas en lugares remotos, cuyas medidas superan unos estrictos controles de calidad y son adecuadas para estudios de la detección de posibles cambios en los estados físicos y químicos de

la estratosfera. Así mismo, esta estación forma parte de la red de Vigilancia Atmosférica Mundial (VAM, GAW [Global Atmospheric Watch]) de la OMM desde sus inicios.

En la Región Subtropical, son muy escasas en el mundo las estaciones de ozonosondeos con programas de medida rutinarios, que hayan estado en operación sin interrupciones por amplios periodos de tiempo y que puedan certificar una gran calidad de los datos de ozono obtenidos. De hecho, dentro de la franja de latitudes comprendida entre -30°S y 30°N, solamente existe en el mundo otra estación de ozonosondeos perteneciente a la NDSC. Se trata de la estación situada en Hilo, Hawaii [19.7N, 155.1W], la cual realiza sondeos semanales desde Agosto de 1991 continuando su programa de medidas en la actualidad. En el Océano Atlántico, la estación de Tenerife es la única en funcionamiento en esta franja de latitudes.

Otro factor que aumenta aún más la importancia de esta estación de ozonosondeos, es el hecho de que por su particular posición geográfica, Tenerife se encuentra localizado frecuentemente en el límite norte de la Célula de Hadley, es decir, en la rama descendente en la cual predomina un régimen de subsidencia en la troposfera libre, y es además el lugar de transición entre la troposfera típica de latitudes medias y la correspondiente a la Región Subtropical. Esto convierte a esta estación en un lugar privilegiado para el estudio de la evolución del ozono en esta

zona de transición y de la influencia del Chorro Subtropical en los procesos de intercambio Estratosfera-Troposfera asociados a éste.

En el Capítulo 2 se muestran los resultados de la comparación de los perfiles medios de ozono troposférico y estratosférico de esta estación (para el periodo 1992-2001) y de otras tres estaciones pertenecientes a la NDSC, para a continuación abordar un estudio estacional del ozono sobre Tenerife. Se presentan también conclusiones acerca de las características de la distribución vertical de ozono sobre Tenerife así como su evolución temporal.

El Capítulo 3 proporciona un estudio estadístico de la procedencia de las masas de aire que alcanzan Tenerife a partir de trayectorias isentrópicas diarias calculadas en el NCEP-NOAA (National Center for Environmental Prediction), para la localización geográfica de Tenerife y dos niveles de presión de destino diferentes (500mb y 770mb). Para este estudio, se han utilizado todas las trayectorias isentrópicas diarias desde Enero de 1991 hasta Diciembre de 2001 y, a diferencia de los trabajos realizados hasta la fecha, que utilizan como criterio de clasificación de las trayectorias isentrópicas el origen de procedencia de las mismas, en el presente estudio se utilizará un umbral para el tiempo de residencia de las masas de aire sobre cada uno de los sectores elegidos.

En el Capítulo 4 se mostrará la influencia, en los perfiles verticales de ozono, de la procedencia de las masas de aire que alcanzan Tenerife a través del estudio estadístico descrito anteriormente basado en el análisis de trayectorias isentrópicas calculadas en la NOAA.

En el Capítulo 5 se tratan en detalle las situaciones en que masas de aire procedentes de Africa alcanzan Tenerife, llegando a la conclusión de que están claramente relacionadas con disminuciones drásticas en el contenido de ozono troposférico en extensas capas de la troposfera. Para ello, se analiza un episodio de Julio

de 1997 y se proporcionan datos que cuantifican la pérdida de ozono troposférico producida.

El estudio más completo existente acerca del ozono troposférico en Tenerife es el realizado por *Cuevas (1995)*, en el cual además de abordar un estudio de la caracterización del ozono troposférico con los datos disponibles hasta el momento, ofrece una teoría para explicar los numerosos episodios de altas concentraciones de ozono superficial registrados en el Observatorio Atmosférico de Izaña sobre todo en los meses de Mayo y Junio. En dicho trabajo, el autor demuestra que los valores muy altos de ozono superficial están relacionados con la llegada al Observatorio de masas de aire procedentes de la parte trasera de DANA's (Depresiones Aisladas en Niveles Altos) situadas al oeste de la Península Ibérica, en donde tienen lugar procesos importantes de subsidencia e intercambio estratosfera-troposfera.

Este trabajo se centrará más en los procesos dinámicos, que sobre todo en Julio y Agosto involucran la disminución de ozono en capas extensas de la troposfera, demostrándose que están íntimamente relacionados con la llegada de masas de aire que proceden del continente africano.

Capítulo 2

El Ozono sobre Tenerife

2.1. Comparación con otras estaciones de la NDSC

Con el fin de tener puntos de referencia que nos permitan tener una idea inicial clara acerca de las características principales de la distribución vertical de ozono sobre Tenerife, es útil la comparación del perfil medio de ozono de la estación de Tenerife con los correspondientes a otras tres estaciones de ozonosondeos pertenecientes también a la NDSC.

En la Figura 2.1 se muestra el perfil de ozono medio de la estación de ozonosondeos de Sta. Cruz de Tenerife obtenido promediando los 595 ozonosondeos realizados desde Noviembre de 1992 hasta Diciembre de 2001. También se muestran en la misma figura los sondeos medios de las siguientes estaciones: Eureka [80.05N, 86.42W] representativa de la Región Polar del Hemisferio Norte (390 sondeos), Hilo [19.72N, 155.07W] representativa de la Región Subtropical (431 sondeos), y South Pole [90S] correspondiente a la Región Polar del Hemisferio Sur (658 sondeos). Como era de esperar, se observa que los perfiles de ozono correspondientes a las estaciones de la Región Subtropical muestran una capa de ozono mucho más alta (máximo aproximadamente en 25 km. para Tenerife y 28 km para Hilo), que los correspondientes a las Regiones Polares (máximo aproximadamente en 18 km para Eureka y South Pole). También se aprecia una sensible diferencia en todos los niveles en

los perfiles de ozono correspondientes a Eureka y South Pole, mostrando la mayor eficiencia de los procesos de destrucción de ozono en el Polo Sur, que son los responsables del agujero en la capa de ozono. Así mismo, se observa que los valores de ozono correspondientes a la estación de Tenerife superan a los de Hilo en todos los niveles hasta los 28 km, siendo el máximo de ozono sobre Tenerife más bajo en altura y más acusado que el correspondiente a Hilo, lo cual confirma lo establecido por *Khrgian (1975)* que afirma que cuanto menor es la altura del máximo, mayores valores alcanza este.

En la gráfica de la derecha de la Figura 2.1, se muestra el coeficiente de variación de ozono definido como el valor porcentual de la desviación standard con respecto al valor medio de ozono en cada nivel.

Es de destacar el hecho de que el coeficiente de variación de ozono en el caso de la estación de Tenerife registra un mínimo a la altitud aproximada del máximo de ozono [25km], alcanzando valores de solo un 13%. El valor de dicho coeficiente a la altura del máximo de ozono para la estación de Hilo [28km] es de aproximadamente 25%, valor mucho mayor que el correspondiente a Tenerife. Esto indica que *la capa centrada en el máximo de ozono sobre Tenerife se caracteriza por una gran estabilidad, sensiblemente mayor que la observada en el resto de las estaciones de la NDSC estudiadas.*

La variabilidad máxima del ozono se registra

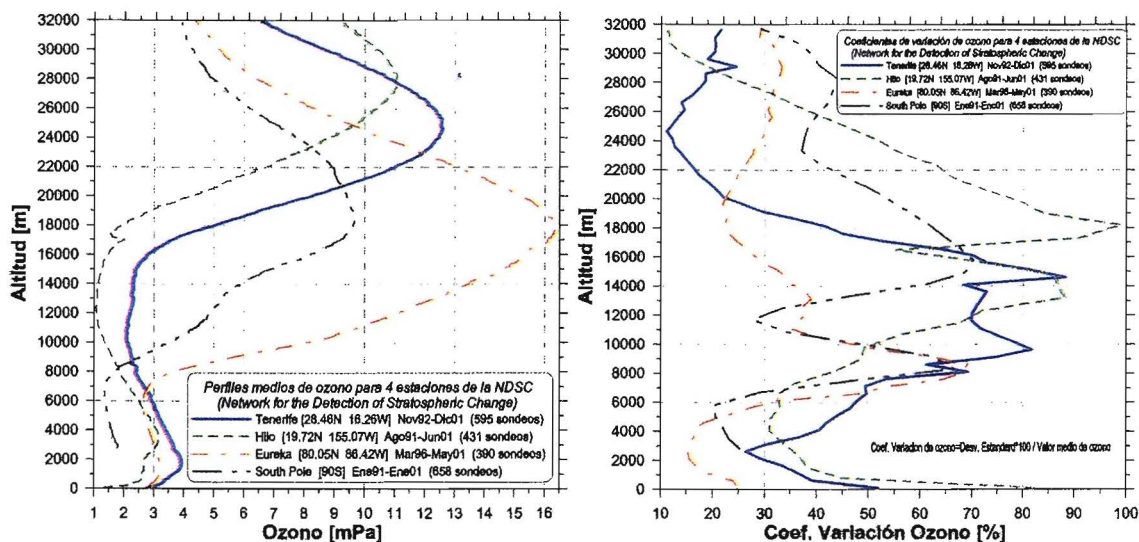


Figura 2.1: Perfiles medios y coeficientes de variación de ozono para 4 estaciones de la NDSC.

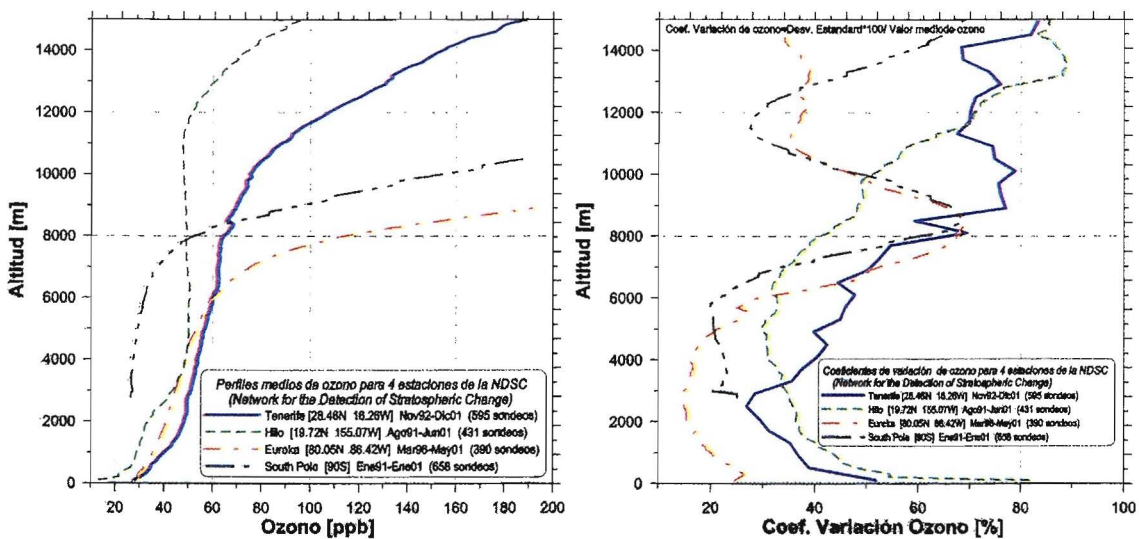


Figura 2.2: Perfiles medios y coeficientes de variación de ozono hasta 15 km para 4 estaciones de la NDSC.

a la altura de la tropopausa para las 4 estaciones analizadas, debido a que esta capa separa dos regiones con concentraciones de ozono muy diferentes y a las variaciones en la altura de la misma, provocando grandes diferencias en los valores de ozono a ese nivel para los distintos sondeos, que influyen en gran medida en el aumento de la desviación estándar asociada al cálculo de los sondeos promedio. Esto está de acuerdo con lo ya señalado por *Cuevas (1995)*.

En relación con el hecho comentado anteriormente, cabe destacar que en el caso de las estaciones subtropicales (Tenerife, Hilo) aparecen 2 valores máximos en el coeficiente de variación de ozono a altitudes relacionadas con las 2 tropopausas observadas frecuentemente en estas latitudes: la tropopausa de latitudes medias y la tropopausa tropical. En el caso de Tenerife las alturas medias de ambas tropopausas son de 12680m (tropopausa de latitudes medias) y 16142m (tropopausa tropical) (*Sancho et al., 2000*). En el caso de las estaciones polares, se observan sendos máximos estrechos a una altitud aproximada de 8000 m relacionados igualmente con la altura de la tropopausa en estas regiones. Es llamativa la aparición de otro máximo a 16000m en el caso de la estación de South Pole, asociado probablemente a los procesos fotoquímicos que son responsables del agujero de la capa de ozono.

En la Figura 2.2 se muestran los perfiles medios de ozono en ppb y los coeficientes de variación de ozono hasta 15km, para las 4 estaciones estudiadas. Se aprecia que, en la región común de la troposfera en todas las estaciones, es decir, hasta aproximadamente 6 km, *la troposfera sobre Tenerife es la más rica en ozono de las analizadas*, mientras que la del Polo Sur es la que registra valores más bajos de ozono. Así mismo, se observa que la variación con la altura del ozono por encima de la tropopausa, es mucho más rápido en el caso de las estaciones polares que en el caso de las estaciones subtropicales.

Por otra parte, el coeficiente de variación de ozono para Tenerife supera al correspondiente a Hilo en todos los niveles por encima de 3000m hasta los 12000m, indicando *una mayor variabilidad en el ozono sobre Tenerife en una extensa región de la troposfera*. Sin embargo, la situación se invierte por debajo de los 3000m, siendo más estable el perfil de ozono sobre Tenerife que el correspondiente a Hilo.

Esto parece indicar que *los procesos que involucran variaciones importantes en el contenido de ozono troposférico están más relacionados con fenómenos que se producen en la troposfera media y alta que con procesos que tienen su origen en capas bajas. Estos procesos pueden provocar, o bien el aumento importante en los valores de ozono troposférico debido a fenómenos de intercambio troposfera-estratosfera principalmente durante el verano (Cuevas, 1995), o como veremos más adelante, la disminución de ozono en extensas capas troposféricas en relación con masas de aire procedentes de Africa y que viajan en niveles de la troposfera media.*

2.2. Características de la distribución vertical de ozono estratosférico y troposférico

2.2.1. Estratosfera

Como ya se indicó en la Sección 2.1., los valores mínimos observados en el coeficiente de variación de ozono en torno al máximo de la capa de ozono sobre Tenerife [aprox. 25km de altitud], nos permiten afirmar, que una de las más importantes características de la ozonosfera sobre Tenerife es su gran estabilidad. La representación de la evolución temporal de los perfiles de ozono desde Noviembre de 1992 hasta Diciembre de 2001, mostrada en la Figura 2.3, indica que los valores de ozono en la región del máximo,

oscilan generalmente entre 12 y 13 mPa, no observándose una dispersión importante en torno a estos valores.

Con el fin de analizar la evolución temporal media del ozono estratosférico a lo largo del año, se han calculado los perfiles medios de ozono para cada una de las 24 quincenas del año, y se han representado dichos perfiles en la Figura 2.4. De nuevo, es apreciable la gran estabilidad de la capa de ozono en todos los meses, con valores en torno a 12-13 mPa. La altura media del máximo oscila entre los 25 km de altitud en los meses de verano y otoño (Junio, Julio, Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre) y los 23 km en invierno y primeros meses de la primavera (Diciembre, Enero, Febrero, Marzo, Abril).

La Figura 2.5 muestra los sondeos medios de ozono para cada una de las estaciones del año y la desviación de estos con respecto al sondeo de ozono medio promediando todos los disponibles, es decir, las anomalías en la distribución vertical de ozono. Como ya se indicó anteriormente, la capa de ozono está situada más alta en verano y otoño y más baja en invierno y primavera. En cuanto a los valores alcanzados en el máximo de ozono, estos son máximos en verano (13mPa) y mínimos en otoño (12.3mPa), siendo en primavera e invierno próximos al valor medio histórico (12.5mPa). Estos resultados confirman los obtenidos por *Cuevas (1995)*.

Es de destacar el hecho de que en la región de la troposfera (12-17km), existe un máximo relativo de ozono en primavera a una altitud aproximada de 13-14km, relacionado con anomalías positivas registradas a esa misma altitud en el perfil de temperatura (Figura 2.6). Este máximo está relacionado con la posición de chorro subtropical, el cual se encuentra en primavera sobre Tenerife, provocando la irrupción de ozono estratosférico en la alta troposfera a través de la tropopausa (*Cuevas et. al., 1999*).

En esta misma región de la troposfera, los valores mínimos de ozono se producen durante el

verano, siendo también durante esta estación del año cuando se registran los valores mínimos en la temperatura de la tropopausa debido a que en esta época del año la tropopausa predominante es la fría tropopausa tropical (*Sancho et al., 2000*). Además, en verano se observan valores superiores al resto del año, entre 6000 m y 8000 m, debido a que, en esta época del año, tiene lugar la formación de un mayor número de DANAS al Oeste de la Península Ibérica que dan lugar a la subsidencia de masas de aire estratosféricas (*Cuevas, 1995*).

Por encima de la tropopausa y en la capa donde se encuentran los valores más altos de ozono (entre 20 y 30km) la temperatura supera en verano hasta en 2°C a los valores normales y es inferior hasta en 3°C en invierno a estos mismos valores medios. En primavera y otoño la temperatura en esta capa se mantiene próxima a los valores medios.

2.2.2. Troposfera

La gran estabilidad de la ozonosfera sobre Tenerife destacada en la sección anterior, contrasta con la alta variabilidad que muestran los valores de ozono en la capa troposférica entre los 3000m y los 12000, superando sensiblemente a los valores correspondientes para la estación subtropical de Hilo (ver Figura 2.2). También se indicó anteriormente, que la troposfera sobre Tenerife puede ser calificada como rica en ozono en comparación con las estaciones estudiadas, siendo los valores de ozono sensiblemente superiores a los registrados para la estación de Hilo en toda la troposfera.

La Figura 2.7 muestra la evolución temporal de la distribución de ozono hasta 12000m para la estación de Tenerife durante el periodo 1992-2001. Se hacen evidentes a simple vista, las fuertes variaciones en los valores de ozono troposférico en casi toda la capa troposférica.

En la Figura 2.8 se representa la evolución

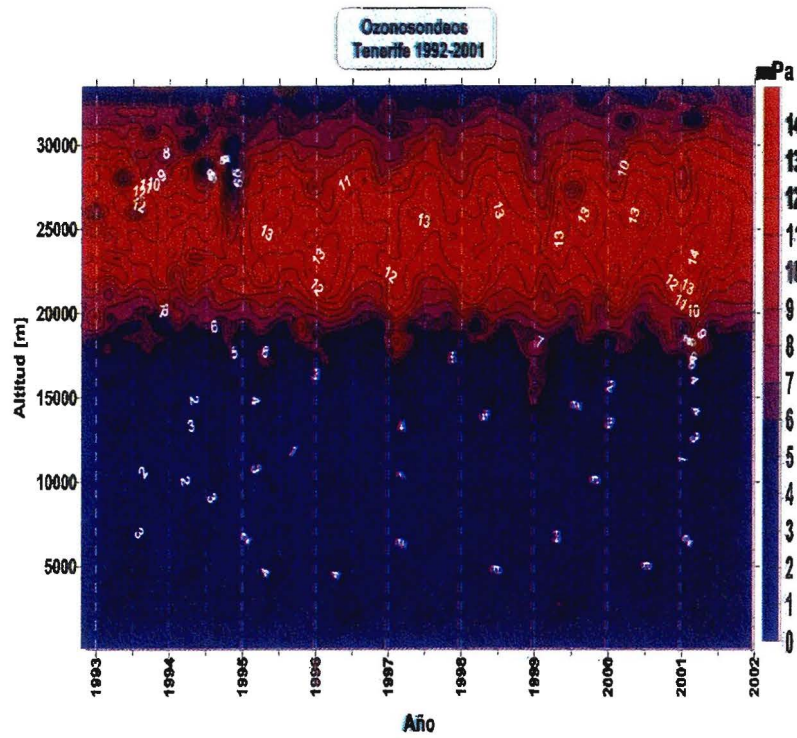


Figura 2.3: Evolución temporal de los perfiles de ozono hasta 32000m para la estación de Sta. Cruz de Tenerife. Periodo: Noviembre-1992—Diciembre 2001

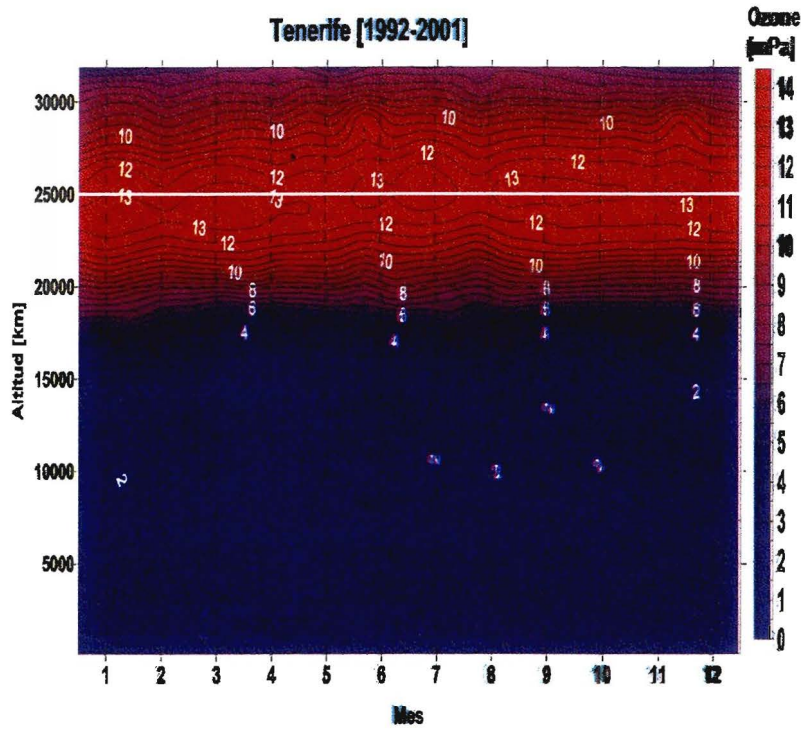


Figura 2.4: Evolución temporal media a lo largo del año de la distribución vertical de ozono estratosférico.

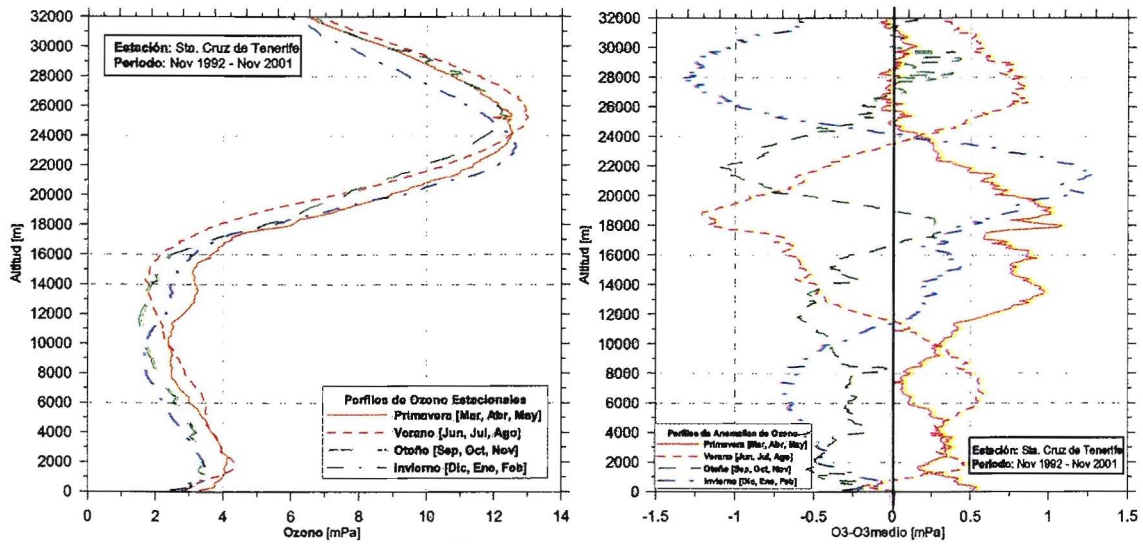


Figura 2.5: Perfiles medios de ozono estacionales y perfil de desviaciones de los valores de ozono respecto al sondeo medio.

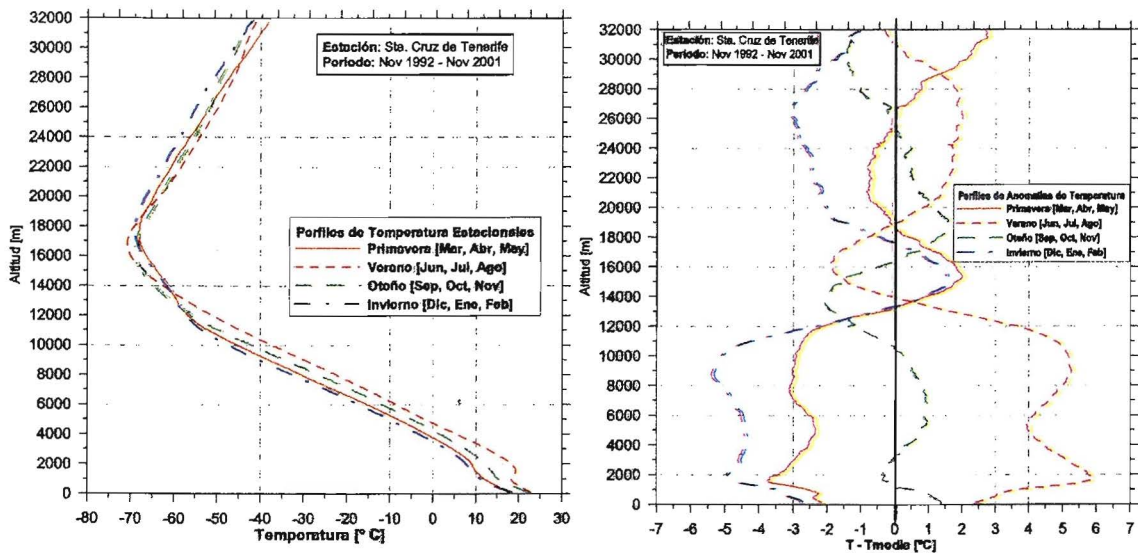


Figura 2.6: Perfiles medios de temperatura estacionales y perfil de desviaciones de la temperatura respecto a los valores medios.

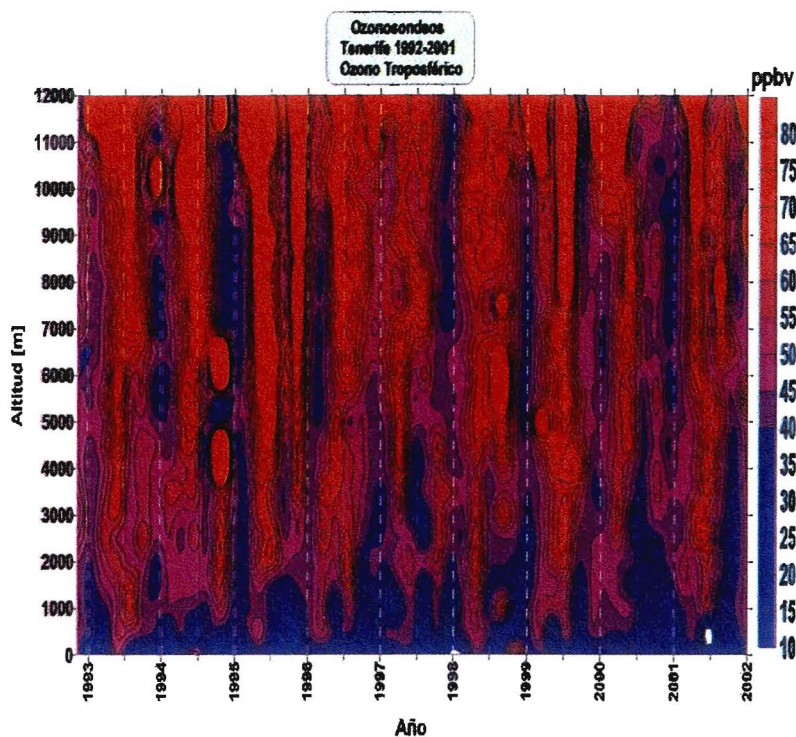


Figura 2.7: Evolución temporal de los perfiles de ozono hasta 12000m para la estación de Sta. Cruz de Tenerife. Periodo: Noviembre-1992—Diciembre 2001

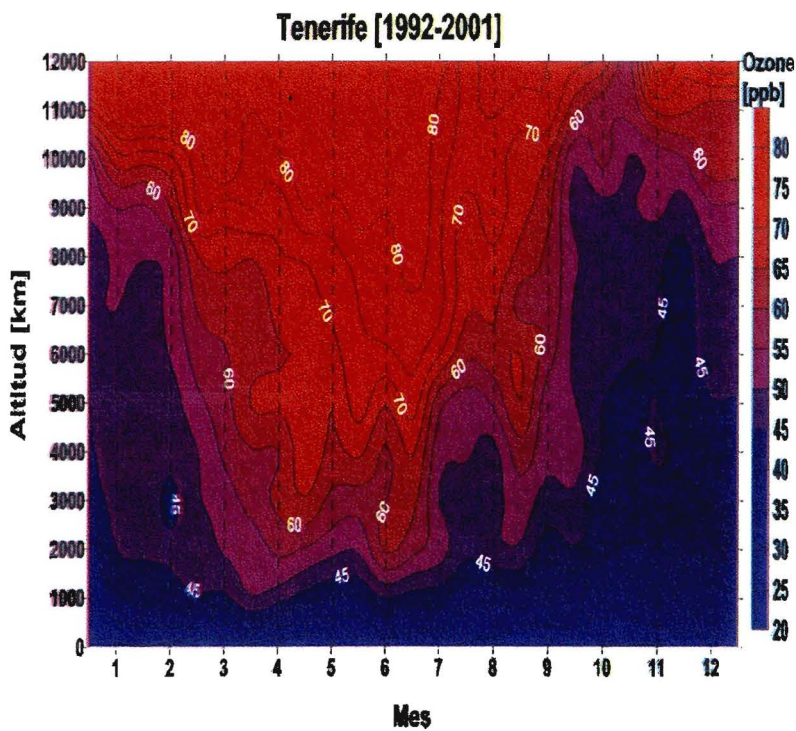


Figura 2.8: Evolución temporal media a lo largo del año de la distribución vertical de ozono hasta 12000m.

temporal de los 24 perfiles medios quincenales, mostrándose la variación media durante el año de la distribución de ozono troposférico sobre Tenerife. Se aprecia una clara oscilación periódica anual, con valores máximos en los meses centrales del año (Mayo, Junio y Julio) y valores mínimos de ozono en los meses de otoño e invierno. También se observa un gradiente vertical en la concentración de ozono que es sensiblemente mayor en los primeros 2000m y por encima de los 10000m. Los valores altos de ozono que, principalmente en el mes de Junio, se registran en niveles bajos de la troposfera, son explicados por el efecto de intrusiones de masas de aire estratosféricas relacionadas con DANA's situadas al Oeste de la Península Ibérica (*Cuevas, 1995*).

Por otra parte, en la Figura 2.8 es importante destacar los valores mínimos que se aprecian entre los 2000 m y los 5000 m durante los meses de Julio y Agosto. Este déficit de ozono troposférico, veremos más adelante en detalle, que está claramente relacionado con masas de aire que provienen del continente africano.

En la Figura 2.9, se representan los perfiles medios estacionales de ozono y sus correspondientes anomalías respecto a los valores medios hasta los 12000m, observándose una clara diferenciación entre las estaciones de primavera y verano, con valores altos de ozono troposférico y el otoño e invierno, con valores bajos en toda la capa troposférica, siendo resultados que están de acuerdo con los obtenidos por *Cuevas (1995)*.

Los perfiles de temperatura mostrados en la Figura 2.10 muestran, como era de esperar, una troposfera cálida en verano y fría en invierno, pero también es importante destacar las diferencias que se observan entre el perfil de verano y el resto de perfiles medios estacionales. En verano, hay un máximo en las anomalías de temperatura a 1500m (justo por encima de la inversión térmica), que alcanza los 6°C y coincide con valores anormalmente bajos de humedad relativa (Figura 2.11) alcanzándose un déficit del 16 %

respecto a los valores normales. A su vez el ozono presenta valores más altos de lo normal en esta misma capa. Esta situación muestra que en verano se producen fenómenos de subsidencia de masas de aire secas y ricas en ozono que se ven limitados en su descenso, por la importante potenciación de la inversión del alisio que tiene lugar durante Julio y Agosto.

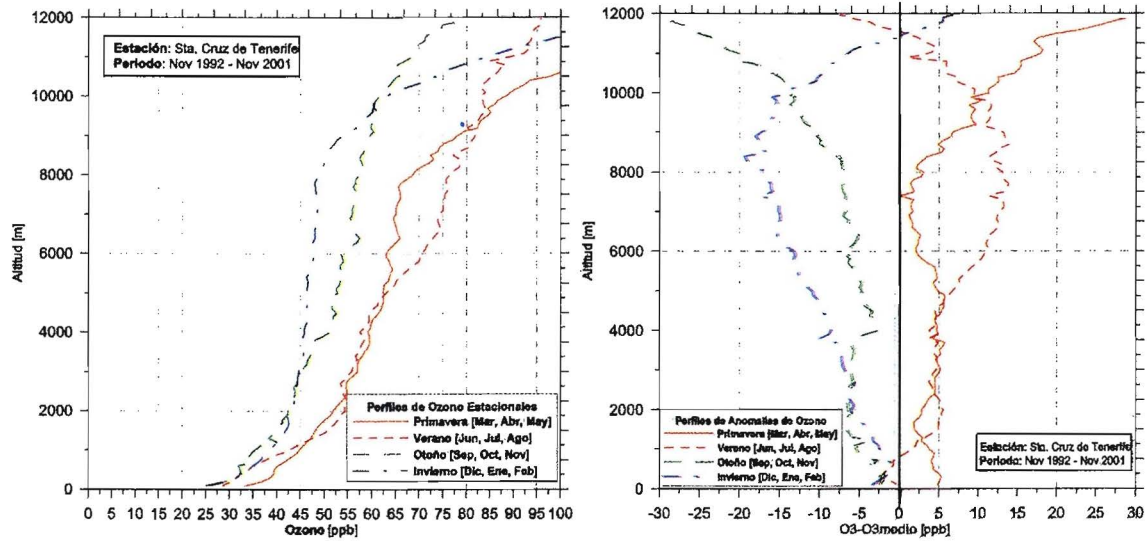


Figura 2.9: Perfiles medios de ozono estacionales y perfil de desviaciones de los valores de ozono respecto al sondeo medio.

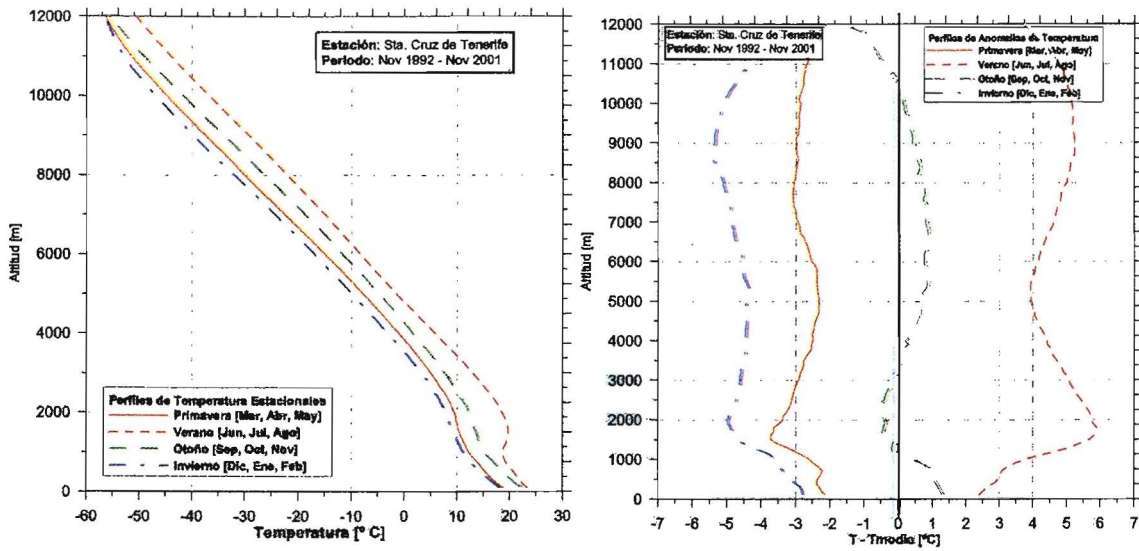


Figura 2.10: Perfiles medios de temperatura estacionales y perfil de desviaciones de la temperatura respecto a los valores medios.

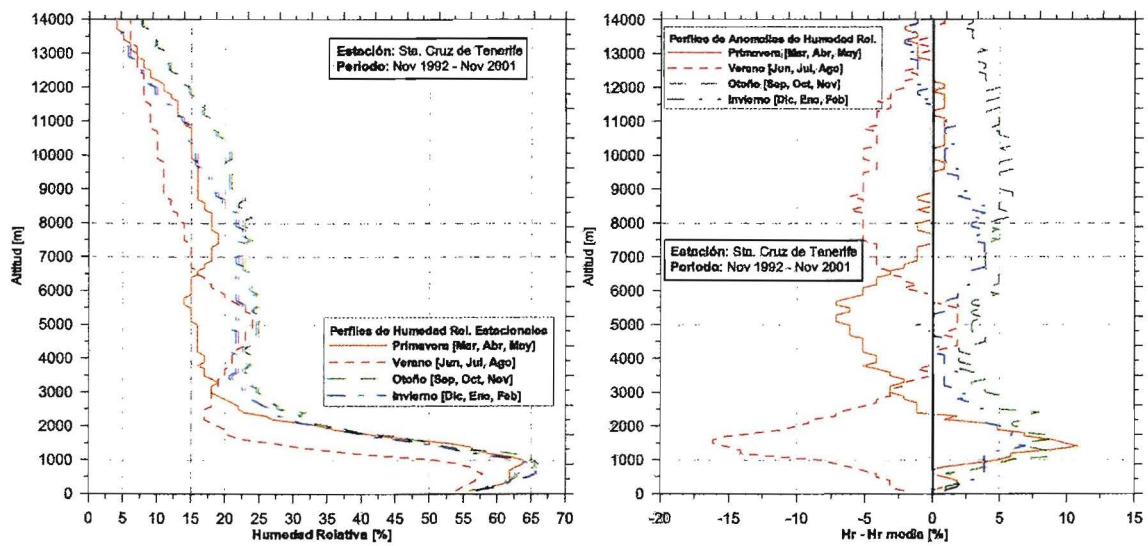


Figura 2.11: Perfiles medios de humedad relativa estacionales y perfil de desviaciones de la humedad relativa respecto a los valores medios.

Capítulo 3

Estudio sobre la procedencia de las masas de aire

3.1. Metodología

Las características de las masas de aire que llegan a Tenerife, definidas por parámetros como la temperatura, humedad relativa y contenido en ozono, dependen de manera importante de las regiones geográficas de procedencia de las mismas. Existen varios trabajos que abordan el estudio de la procedencia de masas de aire que alcanzan Tenerife. Algunos se basan en análisis estadísticos de las retrotrayectorias isentrópicas calculadas para Tenerife (*Bustos et al., 1998; Cuevas, 1995; Torres et al., 2002*), mientras que otros utilizan estadísticas basadas en trayectorias isobáricas (*Sancho et al., 1992*), aunque estas últimas dan una representación menos realista del transporte a larga distancia (*Danielsen, 1961*). Una característica común de todos estos trabajos, es que utilizan como criterio para clasificar las masas de aire que alcanzan Tenerife, las coordenadas geográficas del origen de las trayectorias cinco días antes de alcanzar su destino. *En este trabajo, sin embargo, se utilizará como criterio de clasificación de trayectorias, el porcentaje de tiempo de residencia de las masas de aire en cada uno de los sectores geográficos considerados. Este método de clasificación implica la suposición de forma implícita, de que las características de las masas de aire que alcanzan un cierto lugar, son más dependientes del reco-*

rrido o la historia de dicha partícula de aire que únicamente del lugar de origen de ésta.

En este estudio se utiliza la misma clasificación de sectores geográficos de procedencia que la utilizada por *Torres et al. (2002)*, la cual es similar a la utilizada en trabajos previos mencionados anteriormente (*Sancho et al., 1992; Cuevas, 1995*). Los sectores geográficos utilizados en esta clasificación, pueden observarse en la Figura 3.1. Las posibles regiones de procedencia se dividen en 6 sectores geográficos: Atlántico Norte, Atlántico Subtropical, Local, Africa, Europa y América.

Las trayectorias isentrópicas utilizadas en este estudio, han sido calculadas en The Atmospheric Chemistry and Dynamics Branch, NASA/Goddard Space Flight Center a través del ordenador del banco de datos de la NDSC (Network for the Detection of Stratospheric Change).

Estas trayectorias isentrópicas son calculadas utilizando los campos de vientos generados por el NCEP (National Center for Environmental Prediction). Son trayectorias de 5 días con valores calculados cada 29 minutos, por lo que cada trayectoria está formada por 250 puntos. La razón de la elección de trayectorias de 5 días en lugar de trayectorias que abarquen períodos mayores, es que se ha demostrado que la precisión de las mismas disminuye rápidamente por

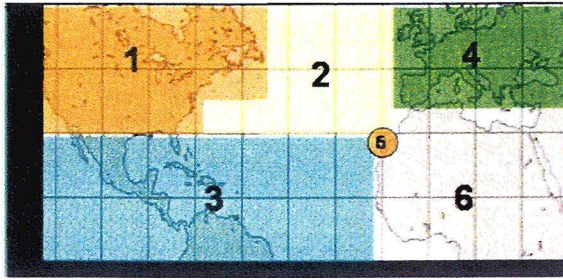


Figura 3.1: Clasificación de Sectores de Procedencia de Masas de Aire

encima de 5 o 7 días, aunque esta precisión depende a su vez de las condiciones del flujo y de la precisión en el análisis de viento. En todo caso, la posición latitudinal de una masa de aire es más precisa que la posición longitudinal, debido a que las promedios meridionales de la velocidad del viento son mucho menores que los correspondientes a la componente zonal del mismo.

El estudio se ha realizado analizando todas las trayectorias calculadas diariamente para las 12 GMT, desde Enero de 1991 hasta Diciembre de 2001, y que tienen como punto de destino las coordenadas geográficas del Observatorio Atmosférico de Izaña (Tenerife) [28.46N, 16.26W]. Se han considerado dos niveles de presión de destino diferentes: la presión media registrada en el Observatorio Atmosférico de Izaña, 770 mb y un nivel representativo de la troposfera media, 500 mb. Esto se ha hecho para estudiar las posibles relaciones entre los patrones de flujo para el nivel del Observatorio de Izaña y los correspondientes a procesos de transporte que se producen al nivel de la troposfera media (500 mb).

A continuación se describe el método de cálculo utilizado:

- En primer lugar, se han calculado todas las trayectorias isentrópicas con temperaturas potenciales en el rango 294K - 330K cada 2K. Es decir 21 trayectorias para cada día desde Enero de 1991 hasta Diciembre de 2001.
- Posteriormente se ha seleccionado diaria-

mente, la trayectoria cuya presión del punto de destino es más cercana a cada uno de los dos niveles de presión mencionados (770mb y 500mb).

- En un paso posterior, y a partir de las trayectorias isentrópicas calculadas previamente, se obtuvo, también para cada día, el porcentaje de tiempo de residencia de las masas de aire en cada uno de los sectores mostrados en la Figura 3.1.

3.2. Estadística de los tiempos de residencia por sectores geográficos

Con el fin de tener una idea clara acerca de qué tipo de masas de aire están alcanzando Tenerife en cada época del año, se han promediado los porcentajes de tiempo de residencia en cada sector geográfico de todas las trayectorias para cada uno de los meses del año, obteniéndose los resultados que muestra la Figura 3.2. Es importante destacar, que en esta gráfica se muestran los valores de porcentaje de tiempo de permanencia medio de las masas de aire en cada uno de los sectores, con independencia del sector de origen de las trayectorias. Suponiendo que las características físicas de una masa de aire dependen de manera más importante del tiempo de permanencia en las diferentes regiones consideradas, que únicamente del lugar origen cinco días antes, podemos extraer importantes conclusiones acerca de las propiedades de las masas de aire que alcanzan Tenerife a partir de los resultados mostrados en la Figura 3.2.

En cuanto a las masas de aire que alcanzan Tenerife al nivel del Observatorio Atmosférico de Izaña (770mb), se aprecia un predominio de permanencia de éstas en el sector Atlántico Norte en la mayoría de los meses del año, con valores medios de permanencia superiores al 30 %, sal-

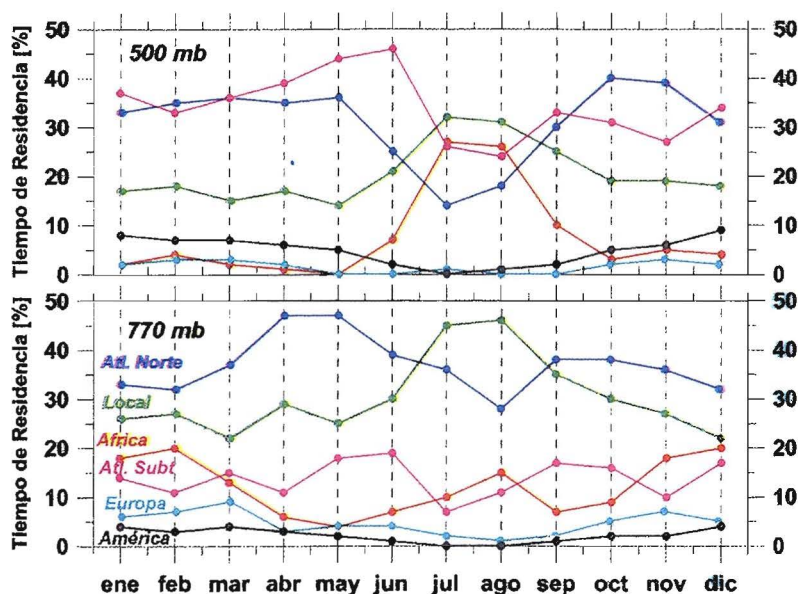


Figura 3.2: Tiempos de residencia medios de las masas de aire que alcanzan Tenerife en los 6 sectores geográficos considerados, para los niveles de 770mb y 500mb, en cada mes del año.

vo en los meses de Julio y Agosto, en los que predomina la permanencia en el sector Local. El tiempo de permanencia promedio en el sector Atlántico Norte, registra un máximo durante los meses de Abril y Mayo (45-50%), estando el resto del año en valores comprendidos entre 30 y 40%, salvo en Agosto cuando alcanza un valor mínimo del 27%. Estos resultados están de acuerdo con los obtenidos por *Torres et al. (2002)*, que a partir de un estudio estadístico de retrotrayectorias isentrópicas entre 1986 y 1997 y utilizando criterios de clasificación basados en la localización del origen de dichas trayectorias, concluyen que entre Abril y Junio el Observatorio de Izaña está afectado por un mayor número de trayectorias procedentes del sector Atlántico Norte.

El siguiente sector geográfico en importancia es el sector Local, que alcanza un predominio máximo en Julio y Agosto (más de 45%), seguidos por los sectores en Atlántico Subtropical y Africa, predominando el sector Africa durante los meses de Julio y Agosto y de Noviembre a Febrero y el sector Atlántico Subtropical en el resto de los meses. Los sectores Europa y Améri-

ca muestran tener poca importancia en el tiempo de residencia en cualquier mes del año, no superándose en ningún caso valores superiores al 10%.

Es de destacar que es en los meses de invierno (de Noviembre a Febrero), cuando el tiempo de residencia de las masas de aire sobre el sector Africa alcanza los valores máximos (hasta un 20% en Febrero), siempre superiores a los correspondientes al verano (Julio y Agosto) con un valor máximo en agosto del 15%. Sin embargo, observando la gráfica superior de la Figura 3.2, que muestra los resultados para el nivel de destino de 500mb, vemos que el tiempo de permanencia en el sector Africa alcanza un máximo durante los meses de Julio y Agosto, con valores superiores al 25%, mientras que permanece con valores muy bajos durante el resto del año (menores que 5%), no observándose ningún valor máximo durante los meses invernales que sean reflejo de lo que ocurre en niveles más bajos. *Esto parece indicar, que las trayectorias con marcada influencia del sector Africa que durante los meses de Julio y Agosto alcanzan el Observatorio de Izaña, están relacionadas con flujos que*

en niveles de la troposfera media (500mb) proceden también del sector africano, siendo por tanto fenómenos que involucran una gran extensión de la troposfera libre, y que como veremos más adelante tienen una importante influencia en diferentes parámetros que definen estas masas de aire (temperatura, humedad relativa, ozono troposférico). Por otra parte, las trayectorias con influencia del sector africano que alcanzan el Observatorio en los meses de invierno están, sin embargo, relacionadas con fenómenos de transporte que afectan a capas más bajas pero no a niveles de la troposfera media.

Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Torres et al. (2002), cuando concluyen que en verano, cuando la inversión del Alisio es más fuerte, las masas de aire procedentes de África afectan solo a la troposfera libre, pero no a la capa de mezcla marítima donde sigue predominando la situación normal de Atlántico Norte y que la capa de mezcla únicamente se ve afectada por masas de aire procedentes de África durante los meses de invierno.

Siguiendo con el análisis de las trayectorias que alcanzan el nivel de 500mb, durante los meses de Julio y Agosto, al igual que ocurría en el nivel de 770mb, se produce un máximo en el tiempo de permanencia en el sector Local de aproximadamente un 30%. Es destacable el hecho de que durante los meses de Julio y Agosto, tanto el máximo del tiempo de permanencia de las trayectorias en el sector África como el mínimo en el correspondiente al sector Atlántico Norte son sensiblemente más pronunciados en el caso del nivel de destino de la troposfera media (500mb) que en el nivel de 770mb, apoyando la idea expuesta anteriormente de que este fenómeno está más relacionado con mecanismos de transporte en niveles de la troposfera media que con procesos de transporte en niveles bajos y que además afecta a una extensa capa troposférica.

Por otra parte, el sector Atlántico Subtropi-

cal, que en caso de las trayectorias que llegan al nivel de 770mb juega un papel secundario, (menos importante que los sectores Atlántico Norte y Local), cobra una gran importancia cuando se considera el nivel de destino de 500mb, superando en tiempo medio de permanencia incluso al sector Atlántico Norte durante la mayor parte del año (de Abril a Septiembre y de Diciembre a Enero), con un marcado máximo en Junio (46%), y un mínimo en Julio y Agosto coincidente con los máximos para los sectores África y Local.

3.3. Serie temporal de los tiempos de residencia

A continuación analizaremos la evolución temporal de los tiempos de residencia de las masas de aire en los sectores geográficos Atlántico Norte y África. La selección de estos dos sectores se debe a que el sector Atlántico Norte es, como hemos visto antes, el sector predominante a lo largo de casi todo el año, y el sector África cobra una gran importancia durante los meses de verano para el nivel de 500mb, influyendo además de manera importante, como veremos en el capítulo siguiente, en las características de las masas de aire que alcanzan Tenerife en una extensa capa troposférica.

En la Figura 3.3 se representan las medias móviles de tres meses de los tiempos de residencia de las trayectorias isentrópicas sobre los sectores de África y Atlántico Norte, para los 2 niveles de destino estudiados (770mb y 500mb).

Para el nivel de 770mb se aprecia un comportamiento mucho más ruidoso de la serie, observándose la sucesión de los máximos en el tiempo de residencia sobre el sector África durante los meses de invierno (coincidentes con el máximo observado en la Figura 3.2), salvo algunas anomalías observadas en los años 1996 y 2001, en los que no se apreció máximo alguno.

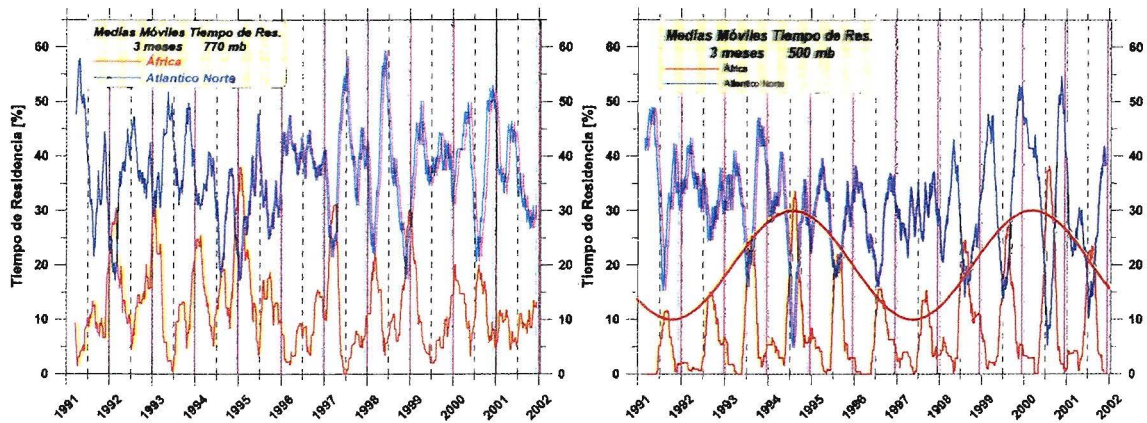


Figura 3.3: Series históricas de tiempos de residencia de trayectorias isentrópicas en los sectores de Africa y Atlántico Subtropical para 2 niveles diferentes de destino de masas de aire: 770mb y 500mb

Dichos valores máximos están claramente anticorrelacionados con los tiempos de residencia en el sector Atlántico Norte. Es destacable el máximo de los meses de invierno de 1995 en los que se alcanzaron valores cercanos al 40 %, que pueden considerarse muy altos si tenemos en cuenta que se trata de medias móviles de 3 meses. Los inviernos de 1993, 1997 y 1999 también tuvieron máximos destacables. En los meses de verano se aprecian máximos secundarios en los tiempos de residencia sobre Africa, siendo estos sensiblemente más bajos que los máximos de invierno. Es importante destacar en este punto, que durante los meses de Julio y Agosto, el sector predominante es el Local aunque muchas masas de aire tienen su origen en el sector africano. De hecho, como veremos en el capítulo siguiente, las propiedades de temperatura y humedad relativa de las masas de aire procedentes de los sectores Local y Africa son bastante similares, lo que parece indicar que las masas de aire que en verano tienen su origen en el sector Africa permanecen mucho tiempo sobre el sector Local. Esto supone una infravaloración de los máximos secundarios

de verano en los tiempos de residencia sobre el sector Africa (Figura 3.3).

Si fijamos la atención en el nivel de 500mb, observamos diferencias destacables frente al nivel de 770mb. Se aprecian máximos en los meses de Julio y Agosto para los tiempos de residencia en el sector Africa, que coinciden perfectamente con mínimos en los tiempos de residencia en el sector Atlántico Norte. Además, es importante destacar que parece apreciarse una función periódica que modula la amplitud de los máximos en verano del tiempo de residencia sobre el sector africa (o de los mínimos para el sector Atlántico Norte) (ver gráfica derecha de la Figura 3.3). Con las trayectorias utilizadas en este estudio (desde 1991 hasta 2001), se ha realizado una estimación de dicha función de modulación periódica, obteniéndose un buen ajuste considerando un periodo para esta función de 5.5 a 6 años. Queda pendiente la confirmación de este hecho en futuros trabajos que consideren un mayor número de trayectorias, ya que puede ser insuficiente el periodo considerado en este estudio para obtener resultados concluyentes en cuanto

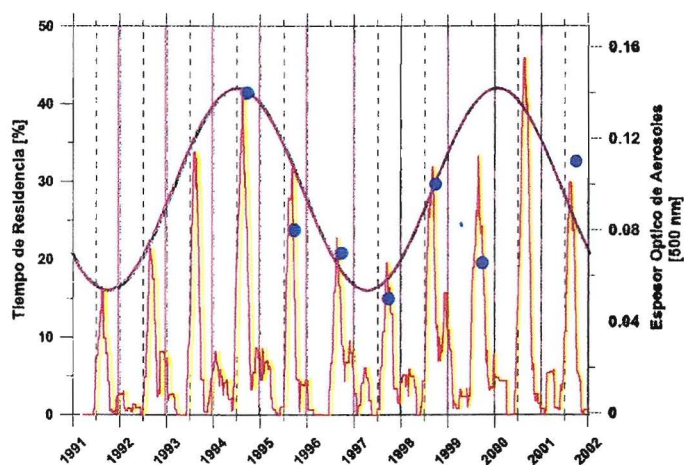


Figura 3.4: Serie histórica de las medias móviles de 2 meses de los tiempos de residencia de masas de aire en el sector África para el nivel de destino de 500mb y valores medios en Julio y Agosto de los espesores ópticos de aerosoles en 500nm obtenidos con el fotómetro solar PMOD/Rocket instalado en el Observatorio Atmosférico de Izaña (salvo el valor correspondiente al año 2001, obtenido con el nuevo fotómetro solar PFR).

a la existencia de esta modulación. En el caso de confirmarse, significaría una herramienta importante de predicción de probabilidad de afluencia de trayectorias con tiempos de residencia importantes sobre el continente africano, que en muchos casos están relacionadas con invasiones de masas de aire con gran contenido de polvo sahariano, como lo demuestra el hecho de que los valores medios del espesor óptico de aerosoles para los meses de Julio y Agosto (en 500nm) parecen estar bien correlacionados con los máximos en los tiempos de residencia sobre el sector africano (ver Figura 3.4).

Capítulo 4

Caracterización de las masas de aire según la región de procedencia

En el capítulo anterior se mostró que existe una gran dependencia de la procedencia de las masas de aire que alcanzan Tenerife con la época del año que se considere, siendo especialmente relevante el drástico cambio que tiene lugar durante los meses de Julio y Agosto, en cuanto a los valores medios de tiempo de residencia de las masas de aire en cada uno de los diferentes sectores. Como vimos, es en esta época cuando se produce un sensible aumento de los tiempos de residencia sobre los sectores Africa y Local para el nivel de 500mb, y sobre el sector Local para 770mb, por lo que cabe esperar, que las características de las masas de aire que alcanzan Tenerife en esta época del año muestren ciertas peculiaridades en cuanto a los perfiles medios de temperatura, humedad relativa y ozono.

Como requisito previo para abordar la caracterización de las masas de aire que alcanzan Tenerife, es necesario elegir un criterio para clasificar las trayectorias isentrópicas según los seis sectores de procedencia considerados. En este trabajo, *supondremos que una masa de aire procede de un cierto sector geográfico, cuando el tiempo de residencia sobre dicho sector de la trayectoria isentrópica correspondiente a ese día es superior a 2.5 días (es decir mayor del 50 %*

de la duración de la trayectoria). Este criterio implica el reconocimiento de que la situación más corriente es que las trayectorias crucen varios sectores geográficos durante sus 5 días de recorrido, por lo que no es práctico establecer un criterio de clasificación en base a trayectorias “puras” procedentes de un solo sector. Se ha elegido el umbral del 50 % para el tiempo de residencia en la suposición de que es un tiempo suficiente para que las masas de aire adquieran las características distintivas del sector considerado, y al mismo tiempo no tan grande como para que la muestra de trayectorias para cada sector se reduzca a niveles que no permitan obtener resultados significativos.

En la Tabla 4.1 se muestran el número de sondeos de ozono seleccionados según el criterio descrito anteriormente para cada uno de los sectores geográficos considerados. Se observa como la mayoría de los sondeos se corresponden a días en los que predomina el sector Atlántico Norte en el caso del nivel de destino del Observatorio de Izaña (52 %), siendo predominante el sector Atlántico Subtropical, con un 42 % de los sondeos, si consideramos el nivel de destino de 500mb. En cuanto a los sondeos seleccionados en días en los que predomina el sector Africa (14 %

y 11 % de los casos según el nivel de destino) cabe destacar que en el caso del nivel de 770mb, el 30 % de los sondeos se realizaron en los meses de Julio o Agosto, y en el caso del nivel de 500mb esta cifra asciende al 76 % de los casos.

En la Figura 4.1 se muestran los perfiles medios de anomalías de temperatura para masas de aire procedentes de los distintos sectores para los dos niveles de presión de destino considerados (770mb y 500mb), según el criterio de clasificación descrito anteriormente. El perfil de anomalías de temperaturas para las masas de aire procedentes del sector Atlántico Norte, muestra un comportamiento muy diferente al correspondiente a los restantes sectores, con un mínimo de anomalía de temperatura en 1300m y un máximo en 5500m. Sin embargo, los perfiles para los sectores Africa, Atlántico Subtropical y Local muestran un comportamiento inverso, con máximos de anomalías de temperatura acusados entre 1000m y 1500m y mínimos en 5500m. Sucede lo mismo para los dos niveles de presión considerados, aunque el perfil del sector Atlántico Subtropical para el nivel de 500mb muestra menos variaciones con la altura respecto al valor medio. En la Figura 2.10 se observa como los perfiles medios de anomalías de temperatura estacionales siguen un perfil más parecido al correspondiente al sector Atlántico Norte para todas las estaciones del año salvo en verano, lo cual es debido al predominio de la influencia del sector Atlántico Norte en todos los meses del año, salvo Julio y Agosto (Figura 3.2). En verano, el perfil medio es similar al correspondiente al sector Local debido a que es el predominante durante esta época del año. Es destacable la gran similitud entre los perfiles de anomalías de temperatura para el caso de trayectorias africanas que llegan al nivel de 500mb y las trayectorias locales que alcanzan el nivel de 770mb, lo cual parece indicar que gran parte de las masas de aire de carácter africano que viajan en el nivel de 500 mb descienden al nivel de 770mb

permaneciendo la mayor parte del tiempo en el sector Local.

También es destacable el valor mínimo de temperatura alcanzado en 5500m en el perfil correspondiente al sector Africa para el nivel de 770mb con un déficit de más de 2°C respecto al valor medio a dicha altitud, indicando que *las masas de aire que proceden del sector Africano y alcanzan el Observatorio de Izaña son frías en niveles de la troposfera media, contrastando este hecho con los valores anormalmente altos que alcanza la temperatura a 1000m (más de 4°C superiores al valor medio)*. Las temperaturas más altas (para 770mb) se alcanzan a 1500m cuando se consideran las trayectorias que proceden del sector Local, con valores casi 6°C superiores a los valores medios. Para el nivel de destino de 500mb se observa, en el caso de las trayectorias africanas, unos excesos de temperatura de hasta 10°C en 1500m y un mínimo en 5500m con un valor que supera en 2°C al valor medio.

En cuanto al perfil medio de humedad relativa para los distintos sectores de procedencia y nivel de destino de 770mb (Figura 4.2), caben destacar las diferencias que se observan entre las trayectorias que proceden de sectores al norte de Tenerife (Europa y Atlántico Norte) con valores de humedad relativa altos entre 1000m y 2500m y bajos por encima de 2500m, y las que proceden de sectores al sur de Tenerife (Atlántico Subtropical, Africa y Local), con valores de humedad relativa más bajos entre 1000m y 2500m y altos por encima de 2500m con máximos en 5500m que coinciden con los mínimos de temperatura observados en la Figura 4.1 para estos mismos sectores. Los valores mínimos de humedad se alcanzan en 2000m por las trayectorias que proceden del sector Local con valores menores del 20 %, seguidos por los valores menores del 25 % a ese mismo nivel correspondientes al sector Africa. Estos mínimos en la humedad relativa coinciden con los valores máximos en la temperatura ya observados en la Figura 4.1. Es

CAPÍTULO 4. CARACTERIZACIÓN DE LAS MASAS DE AIRE SEGÚN LA REGIÓN DE PROCEDENCIA 22

	ATL. NORT.	ATL. SUBT.	AFRICA	LOCAL	AME.	EUR.
770mb	255 [52 %]	71 [14 %]	68 [14 %] (30 % en Jul. o Ago.)	85 [17 %]	0	14 [3 %]
500mb	168 [36 %]	197 [42 %]	51 [11 %] (76 % en Jul. o Ago.)	47 [10 %]	4 [0.8 %]	3 [0.6 %]

Cuadro 4.1: Número de sondeos de ozono clasificados en cada sector geográfico según el criterio de que la trayectoria para el día del sondeo permanezca sobre el sector más del 50 % del tiempo.

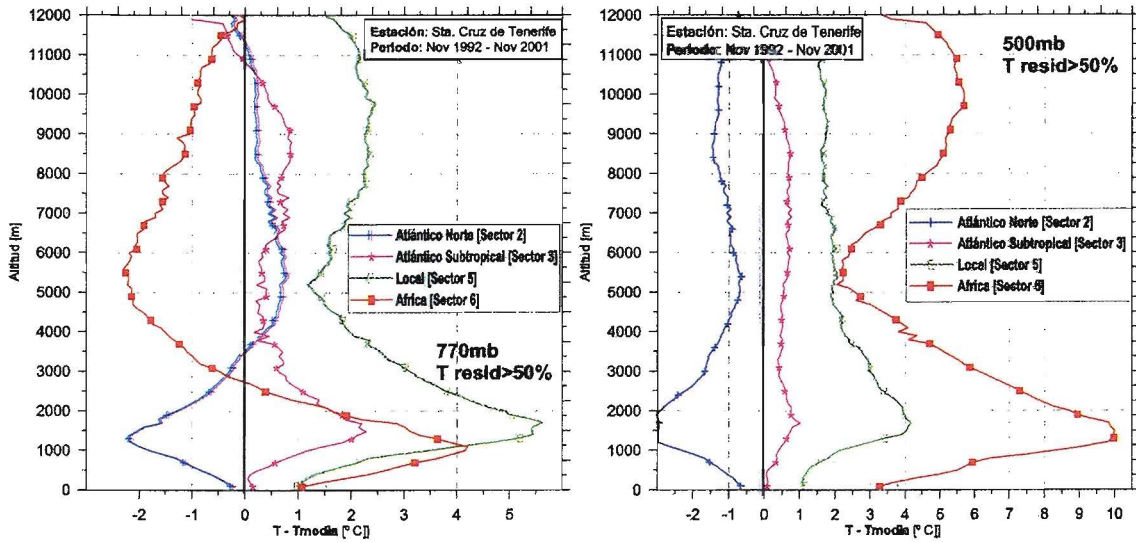


Figura 4.1: Perfiles medios de anomalías de temperatura según el origen de procedencia de las masas de aire para los niveles de 770mb y 500mb.

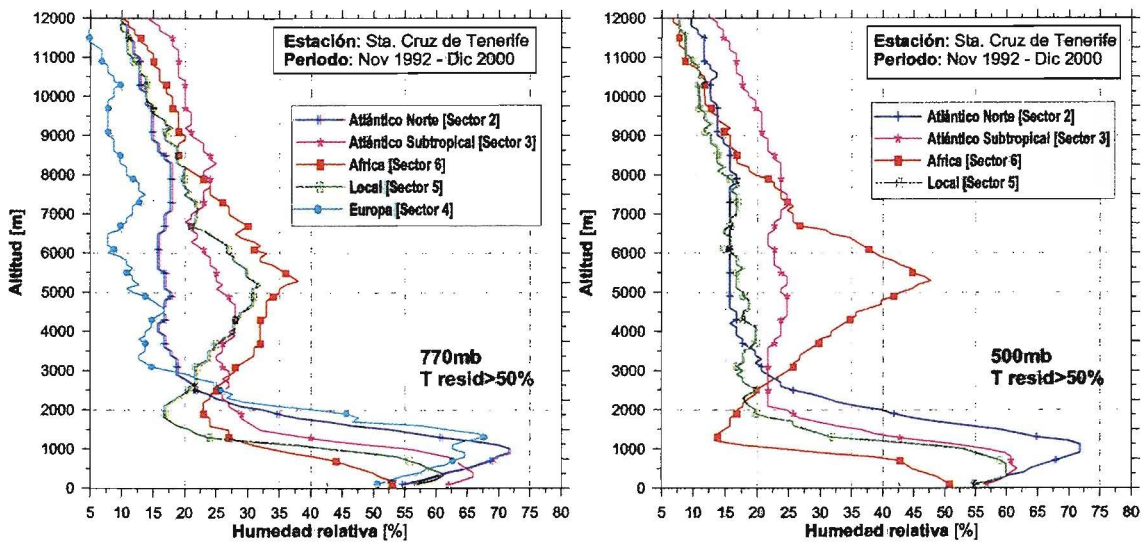


Figura 4.2: Perfiles medios de humedad relativa según el origen de procedencia de las masas de aire a Tenerife para los niveles de 770mb y 500mb.

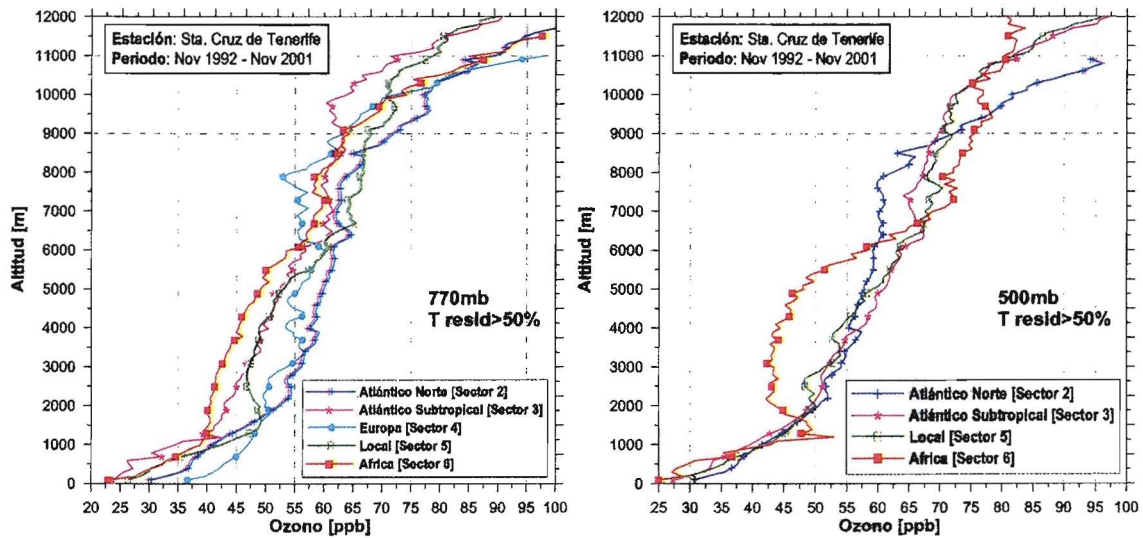


Figura 4.3: Perfiles medios de ozono troposférico según los sectores de procedencia de las masas de aire a Tenerife para los niveles de 770mb y 500mb.

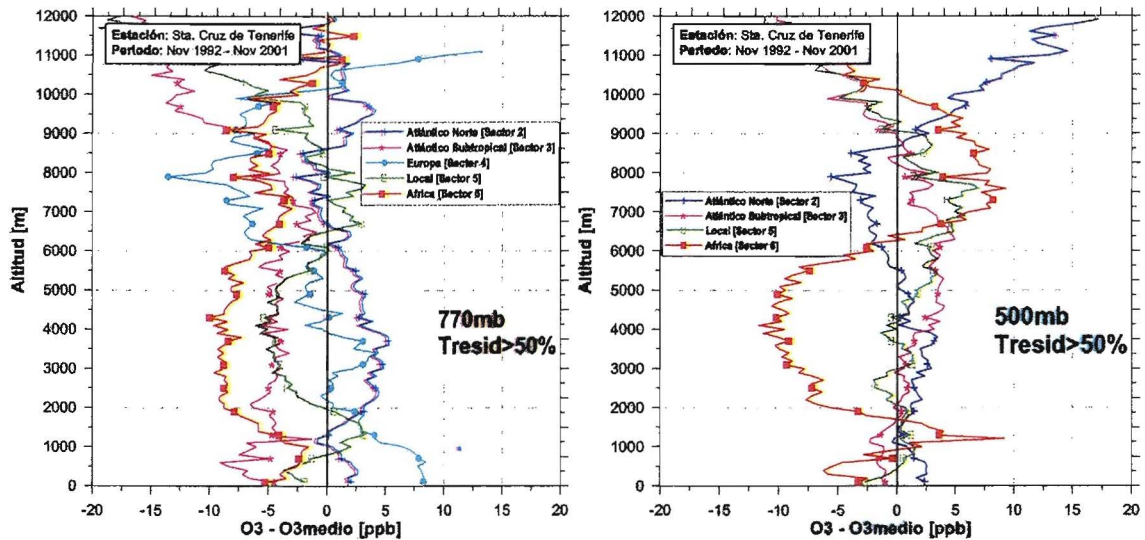


Figura 4.4: Perfiles medios de anomalías de ozono según los sectores de procedencia de las masas de aire a Tenerife para los niveles de 770mb y 500mb.

importante destacar, que solo en el caso de masas de aire que proceden de Africa en ambos niveles de destino (770 mb y 500mb), la humedad relativa disminuye constantemente desde el nivel de la superficie hasta los 2000m, sin alcanzar un máximo por debajo de la capa de inversión como ocurre con el resto de sectores predominantes.

En la gráfica de la derecha de la Figura 4.2, correspondiente al nivel de destino de 500mb, es importante de destacar *el máximo acusado de humedad relativa en 5500m y el mínimo en 1300m para las masas de aire con predominio en el sector Africa*. Esta intensificación del máximo de humedad relativa en 5500m, se comprobará más adelante que está íntimamente relacionada con mecanismos de transporte de vapor de agua en la troposfera media desde el continente africano. En la Figura 4.3 se muestran los perfiles medios de ozono troposférico para cada uno de los sectores de procedencia. Se observa que, considerando el nivel de destino de 770mb, los valores de ozono troposférico más bajos entre 1000 y 6000m tienen lugar bajo la influencia de trayectorias procedentes de Africa, mientras que los valores más altos, por encima de los 2000m, están relacionados con las masas de aire procedentes del Atlántico Norte. La disminución de ozono troposférico debido a la influencia de las masas de aire procedentes de Africa entre 1000 y 6000m es sensiblemente más importante cuando consideramos como nivel de destino el correspondiente a 500mb, mientras que el resto de sectores dan lugar a valores de ozono muy similares para este nivel. Esto se observa más claramente en la Figura 4.4 donde se representan las anomalías de ozono respecto a sus valores medios para cada nivel. También es destacable que entre 6000m y 10000m hay un exceso de ozono para las trayectorias africanas (nivel 500mb) que contrasta con el déficit en niveles medios mencionado anteriormente. También se observa un máximo de ozono en estas circunstancias entre 1000m y 1500m, coincidente con el mínimo

de humedad relativa que muestra la Figura 4.2 a esa altitud. Trataremos estos resultados con más detalle en el capítulo siguiente.

Capítulo 5

Disminución de ozono debido a masas de aire procedentes de Africa

5.1. Comparación entre los perfiles medios Atlántico Norte y Africa

En el capítulo anterior hemos visto que existen claras diferencias en cuanto a las características de las masas de aire que alcanzan Tenerife según el sector de procedencia de las mismas. A la vista de los resultados, se pone en evidencia que las masas de aire que han permanecido durante su trayectoria más del 50% del tiempo sobre el sector africano, son las que muestran las diferencias más notables en los perfiles verticales medios de temperatura, humedad relativa y ozono. Otro hecho importante es el claro predominio de las situaciones bajo la influencia de masas de aire procedentes del Atlántico Norte (salvo en Julio y Agosto), imponiéndose así las características peculiares de estas masas de aire al perfil medio de temperatura, humedad relativa y ozono troposférico.

Entre las características más destacables de las masas de aire que proceden de Africa se encuentran:

- Un máximo de temperatura entre 1000 y 1500m coincidente con un mínimo de hu-

medad relativa (sobre todo para el nivel de destino de 500mb) y que a su vez coincide con valores anormalmente altos de ozono (para el nivel de destino de 500mb).

- Un mínimo de temperatura en 5500m coincidente con un máximo en la humedad relativa que es más importante cuando se considera el nivel de destino de 500mb, alcanzando valores cercanos al 50%. Este máximo está claramente relacionado, como se comprobará más adelante, con un déficit en los valores de ozono troposférico entre 1000 y 6000m.

A continuación se mostrarán los resultados de la comparación de los perfiles medios de humedad relativa y ozono para las situaciones con predominio del sector Atlántico Norte y Africa considerando los niveles de destino de 770mb y 500mb.

En la Figura 5.1 se observa, como en niveles por debajo de la inversión de temperatura (1000m-1500m), el ozono es algo inferior en el caso de las trayectorias africanas que en el de las procedentes del sector Atlántico Norte, pero siguiendo un ritmo de aumento con la altitud bastante similar. Sin embargo, es por encima de

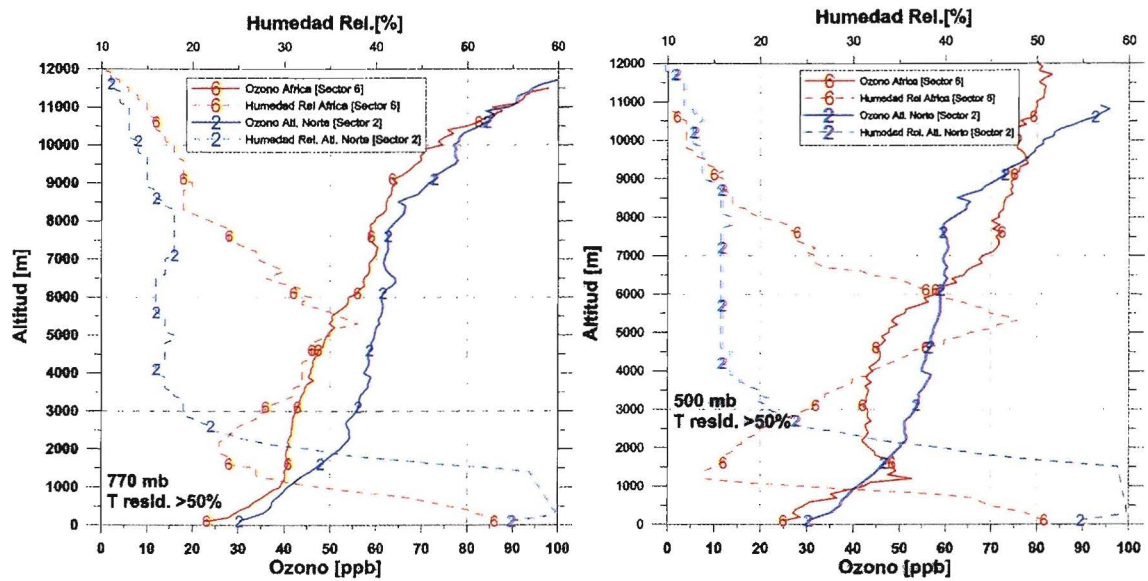


Figura 5.1: Perfiles medios de ozono y humedad relativa para masas de aire procedentes de los sectores Atlántico Norte y Africa.

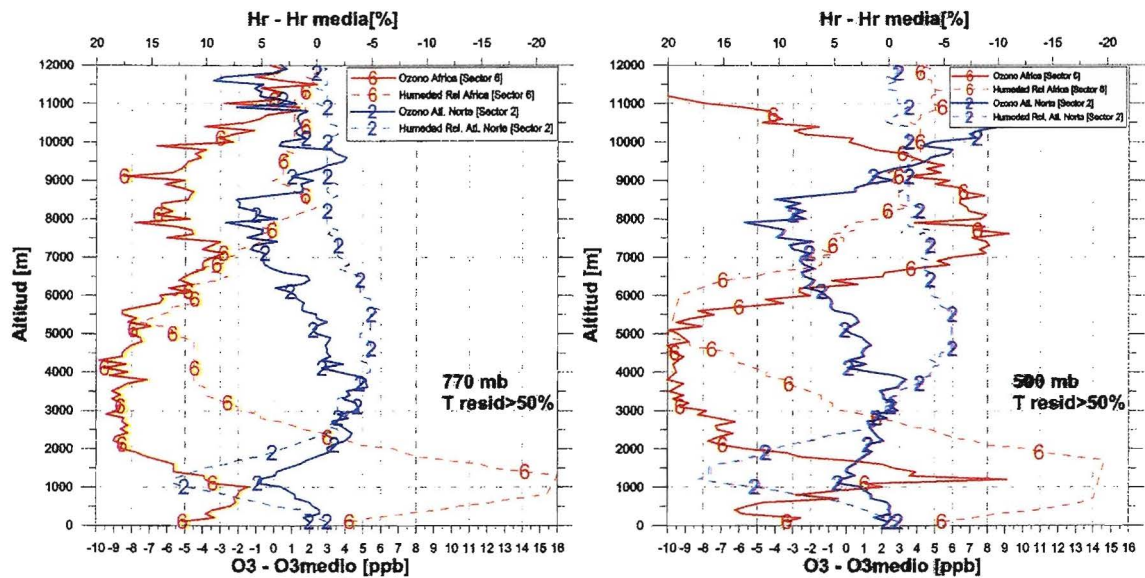


Figura 5.2: Perfiles medios de anomalías de ozono y humedad relativa para masas de aire procedentes de los sectores Atlántico Norte y Africa.

la capa de inversión y hasta el nivel de 6000 m, cuando aumenta la diferencia entre los valores de ozono para ambos sectores de procedencia, *produciéndose una disminución muy importante de los valores de ozono troposférico en una extensa capa cuando las trayectorias proceden del sector africano*. Esta disminución del ozono troposférico alcanza hasta los 10ppbs (Figura 5.2), lo que supone déficits de aproximadamente un 25 %, valores muy importantes si tenemos en cuenta que se trata de valores medios y no episodios concretos. A partir de los 6000m, las diferencias disminuyen en el caso del nivel de 770m, mientras que el ozono para el sector Africa llega a superar al correspondiente al sector Atlántico Norte si consideramos el nivel de 500 mb.

En la Figura 5.2 se aprecia la clara anticorrelación entre la humedad relativa y los valores de ozono en todos los niveles (obsérvese que el eje de humedad relativa está invertido). Se aprecia claramente que *la extensa capa con valores bajos de ozono está estrechamente relacionada con la capa de humedad relativa con su máximo en 5500m (aprox. 500mb)*.

Dado que durante los meses de Julio y Agosto es cuando tiene lugar un máximo en los tiempos de residencia sobre el sector Africa de las masas de aire que alcanzan Tenerife en el nivel de destino de 500mb (Figura 3.2), y que se ha comprobado la disminución en una extensa capa del ozono troposférico provocado por las trayectorias procedentes de este sector, podemos concluir, que *el déficit de ozono que se aprecia en la Figura 2.8 durante estos meses de verano, es debido a la mayor afluencia de este tipo de trayectorias que transportan vapor de agua del continente africano en niveles de la troposfera media, que podría influir considerablemente sobre la disminución del contenido de ozono troposférico sobre Tenerife*.

5.2. Análisis de un episodio de disminución drástica de ozono troposférico

En esta sección, analizaremos en detalle un episodio en el que se produjo una disminución importante en el contenido de ozono troposférico debido a la llegada de una masa de aire procedente del sector Africa. Se seleccionó una situación que tuvo lugar durante la campaña intensiva de ozonosondeos que se desarrolló durante el mes de Julio de 1997, en la que se lanzaron 25 ozonosondeos con una frecuencia casi diaria. Se dispone, por lo tanto, de una detallada evolución temporal del perfil de ozono troposférico durante ambos episodios. Se han encontrado otras situaciones análogas a la estudiada durante las campañas intensivas de Julio de 1995 y Julio de 1996.

Episodio del 26 al 29 de Julio de 1997

En los días previos a este episodio, las masas de aire que alcanzan Tenerife provienen principalmente del sector Atlántico Norte con un tiempo de residencia que supera incluso el 70 % (Figura 5.3). Durante los días 26 al 29 la situación cambia, siendo las masas de aire predominantes del sector Africa tanto en el nivel de 500mb (t. resid. > 60 % para los días 27 y 28), como en el de 770mb (t. resid. > 40 % para el día 27) aunque en este último nivel también cobra importancia el sector Local, sobre todo durante los 2 días previos (días 25 y 26).

En la Figura 5.4 se muestran las trayectorias isentrópicas para los niveles de destino de 770 mb, 500 mb y 330K durante el episodio estudiado, junto con los perfiles de ozono y humedad relativa para cada día. El día 25, la trayectoria correspondiente al nivel de 770 mb transcurre sobre los sectores Atlántico Norte y Local, mientras que la correspondiente al nivel de 500

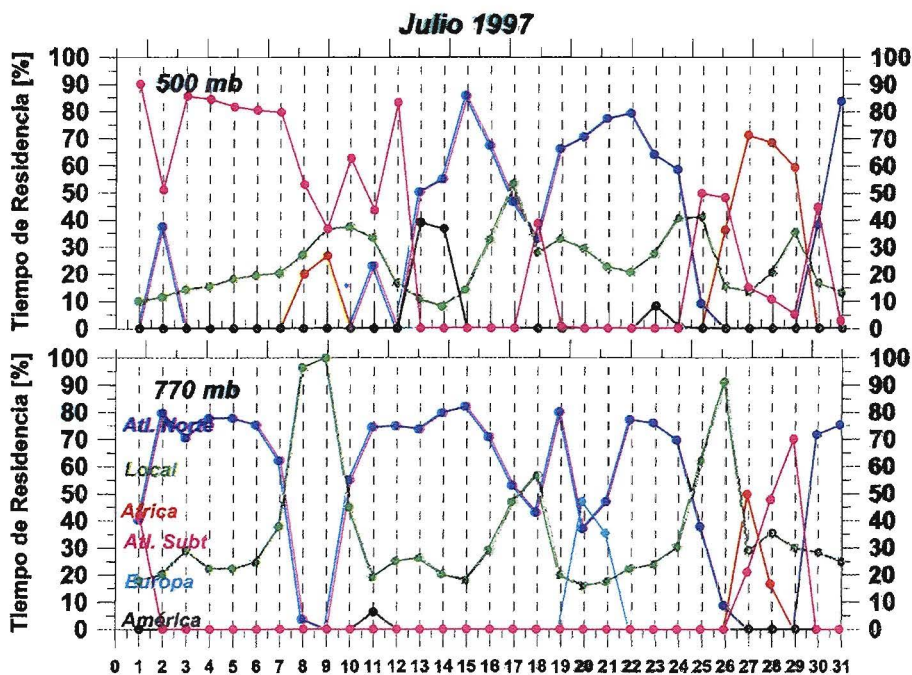


Figura 5.3: Tiempos de residencia sobre los diferentes sectores geográficos de las trayectorias isentrópicas diarias de Julio de 1997 para 2 niveles de destino diferentes: 770 mb y 500mb.

mb pasa sobre todo por los sectores Subtropical y Local. Para este día, por encima del nivel de 770 mb, los valores de ozono son altos y la humedad relativa se mantiene en valores bajos inferiores a 18%.

Durante los días 26, 28 y 29, se produce una disminución importante de ozono entre 3000 y 5500m que coincide casi exactamente con un máximo de humedad relativa en esos mismos niveles. El día 26, la trayectoria correspondiente al nivel de 500mb procede de Africa, mientras que las otras dos continúan teniendo su origen en el Océano Atlántico, produciéndose un aumento importante de la humedad relativa en una extensa capa coincidente con una caída en el contenido de ozono. El día 28 persiste la capa de humedad relativa entre 700 mb y 500 mb, siendo las 3 trayectorias procedentes del continente africano. El día 29 se produce un aumento en los valores de humedad relativa y una disminución aún mayor en el ozono respecto al día anterior con las 2 trayectorias altas procediendo de Afri-

ca y la correspondiente a 770 mb teniendo ahora su origen en el Océano Atlántico. Así mismo, es importante destacar que durante estos días, el mínimo de humedad relativa que se produce entre 1000 y 1500 m coincide con un aumento en los valores de ozono, lo cual ya fué descrito en el Capítulo 4.

El día 30 se reestablece la situación previa a la invasión de aire procedente de Africa, con trayectorias procedentes del sector Atlántico Norte, valores altos de ozono y valores bajos de humedad relativa en la mayor parte de la troposfera.

En las Figuras 5.5 y 5.6 se muestran la evolución diaria de los perfiles de ozono troposférico y humedad relativa respectivamente durante todo el mes de Julio de 1997. Se aprecia que la disminución de ozono troposférico durante los días 26 al 30 afecta principalmente a una capa comprendida entre los 3000 y 5500 m y que casi exactamente coincide con el incremento en la humedad relativa que se produce en esa misma región de la troposfera. Es también destacable la

CAPÍTULO 5. DISMINUCIÓN DE OZONO DEBIDO A MASAS DE AIRE PROCEDENTES DE AFRICA29

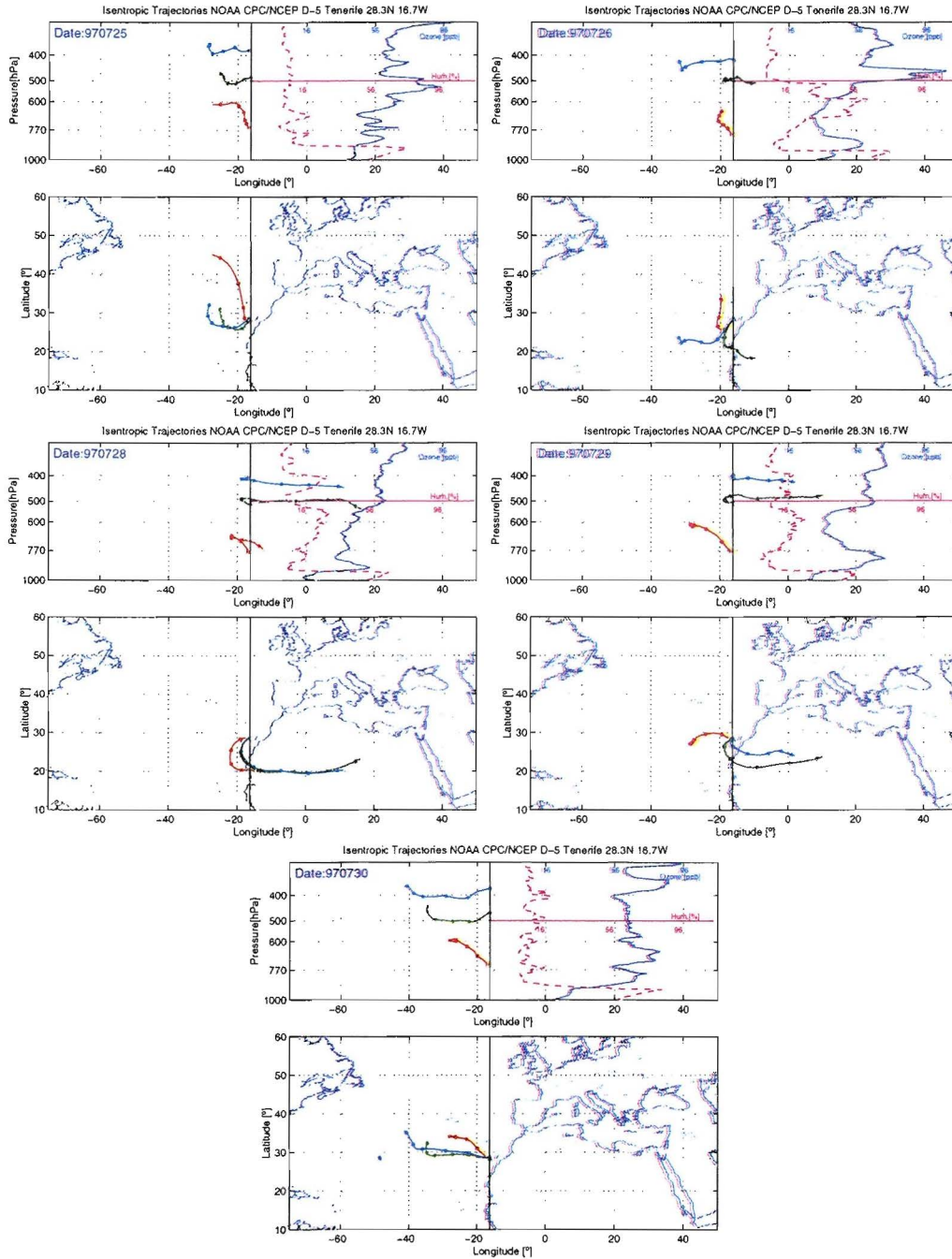


Figura 5.4: Trayectorias isentrópicas durante el episodio de Julio 1997 para los niveles de 770 mb (rojo), 500 mb (verde) y 330K (azul). Los puntos indican la posición en cada uno de los 5 días de duración de las trayectorias.

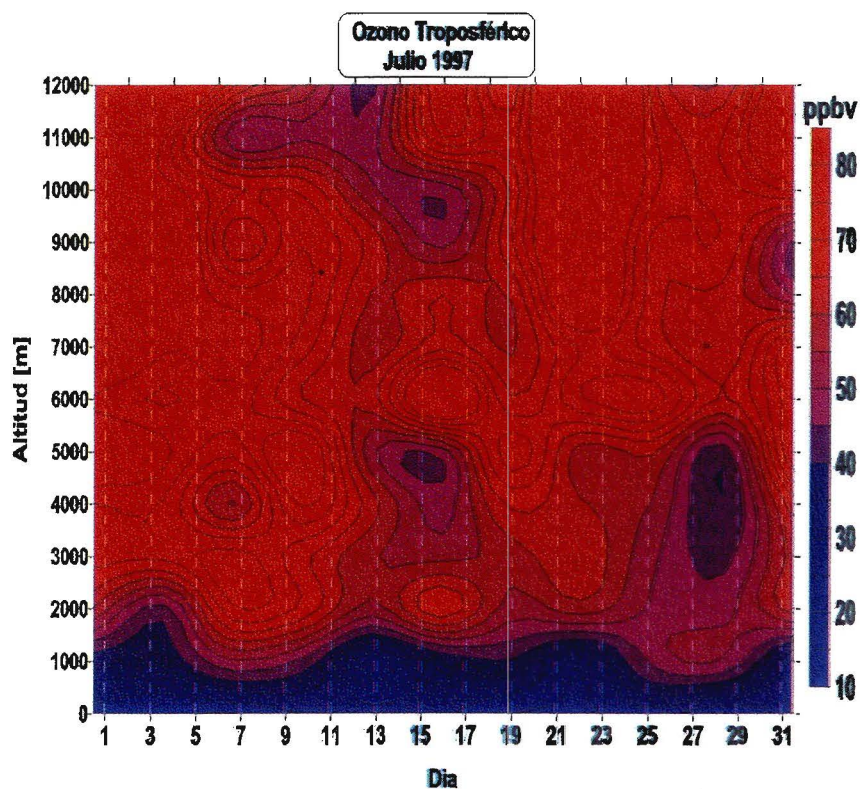


Figura 5.5: Ozono troposférico durante la campaña intensiva de ozonosondeos de Julio de 1997

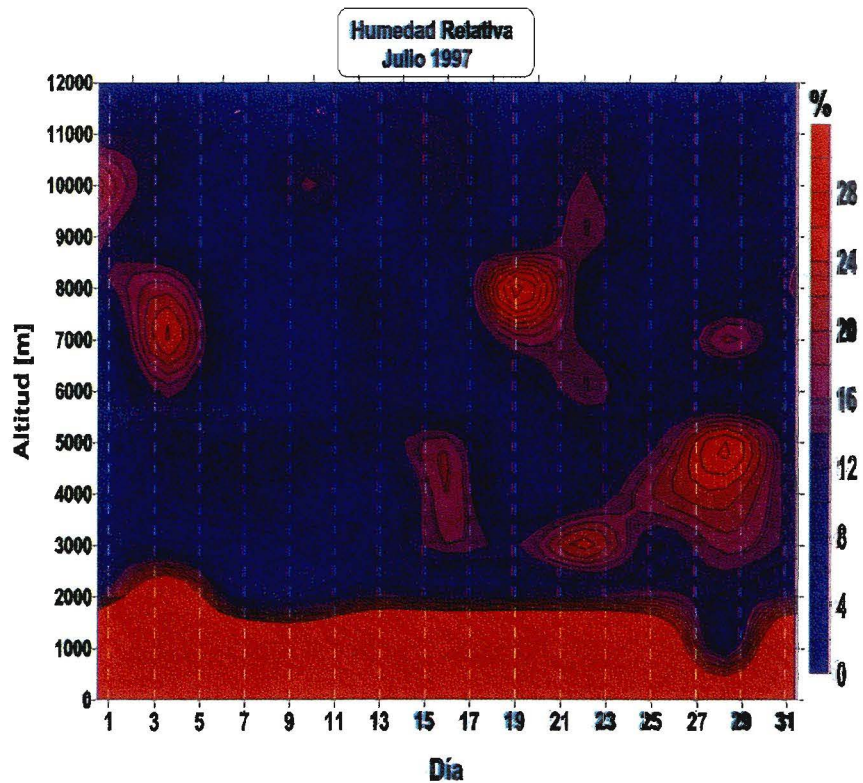


Figura 5.6: Humedad relativa durante la campaña intensiva de ozonosondeos de Julio de 1997

CAPÍTULO 5. DISMINUCIÓN DE OZONO DEBIDO A MASAS DE AIRE PROCEDENTES DE AFRICA31

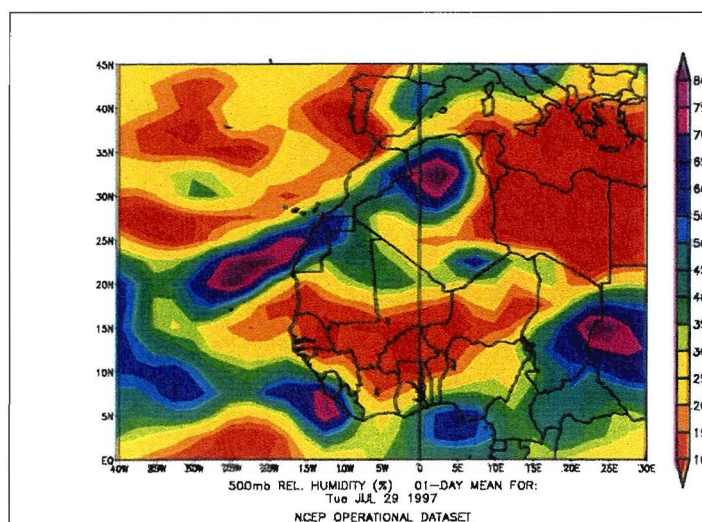
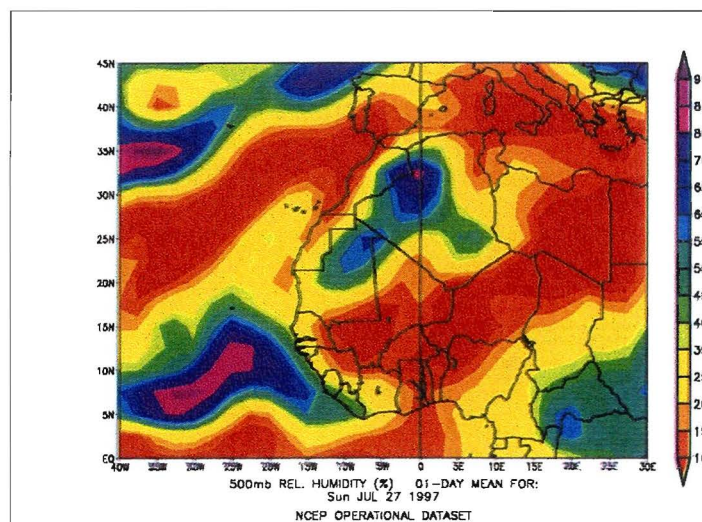
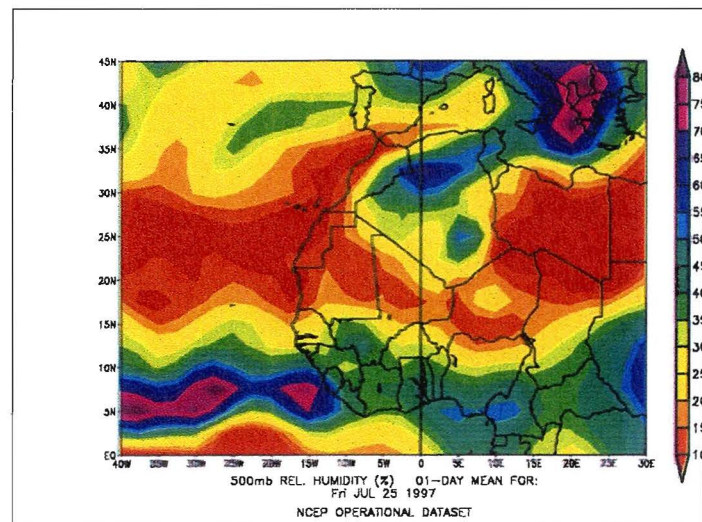
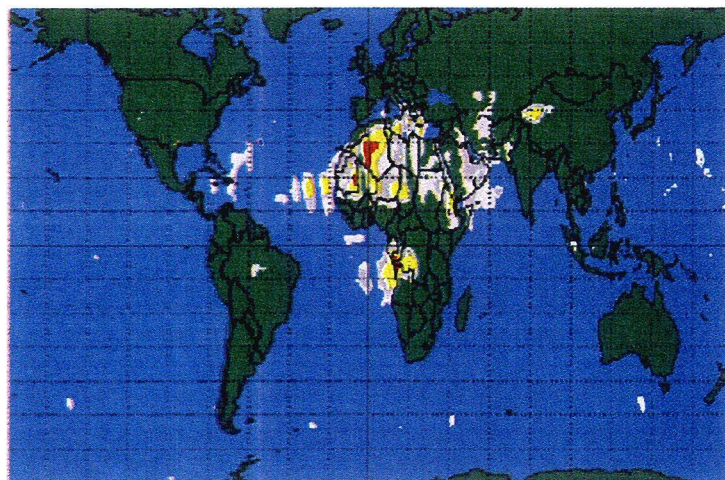
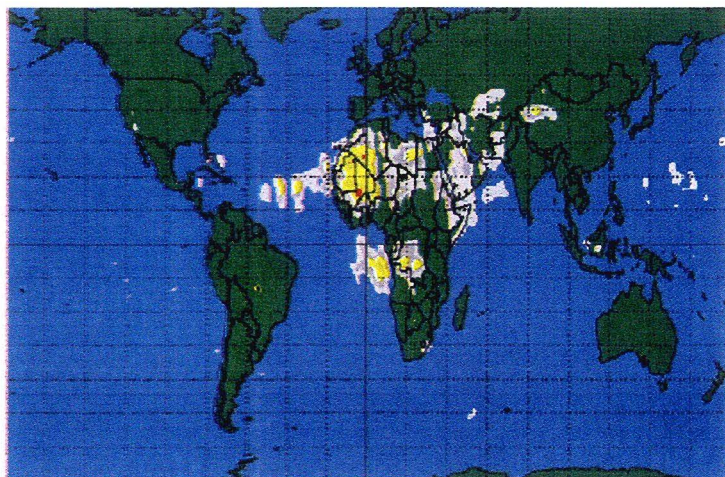


Figura 5.7: Mapas de Humedad Relativa en 500 mb para los días 25, 27 y 29 de Julio de 1997. Imágenes proporcionadas por el NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Boulder, Colorado, USA (<http://www.cdc.noaa.gov/>)

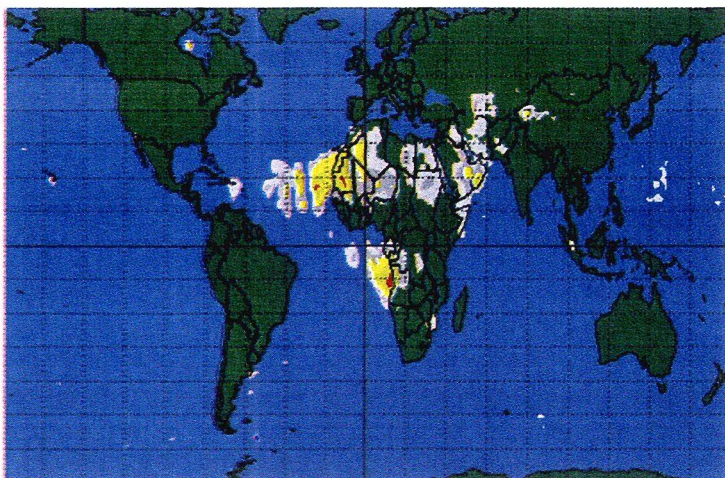
Earth Probe TOMS Aerosol Index
on July 25, 1997



Earth Probe TOMS Aerosol Index
on July 27, 1997



Earth Probe TOMS Aerosol Index
on July 29, 1997



Goddard Space
Flight Center

Figura 5.8: Índice de aerosoles del TOMS. Imágenes proporcionadas por NASA/Goddard Space Flight Center (<ftp://jwocky.gsfc.nasa.gov/pub/>)

disminución de humedad coincidente con un pico de ozono entre 1000 y 1500 m, que contrasta con los valores mucho más altos de humedad relativa en esa capa durante el resto de los días del mes. Por otra parte, la humedad disminuye de forma monótona desde la superficie hasta aproximadamente 2000 m, no registrándose ningún máximo, como sí ocurre en el resto de los días del mes.

La Figura 5.7 muestra los campos de humedad relativa correspondientes al análisis de datos diarios que realiza el NCEP (National Center for Environmental Prediction) en el nivel de 500mb para los días 25, 27 y 29 de Julio de 1997. Se aprecia como durante estos días existen valores altos de humedad relativa en el nivel de 500mb sobre una amplia extensión del norte de Africa y un desplazamiento hacia el suroeste de estos embolsamientos de humedad. *Las imágenes del índice de aerosoles que ofrece el TOMS para estos días (Figura 5.8), muestran que los embolsamientos de humedad relativa en 500 mb en el Norte de Africa ocupan regiones que también tienen un alto contenido en aerosoles, y que se desplazan de la misma manera hacia el suroeste. El día 29 de Julio, Tenerife se encuentra al norte de la región con altos valores de índice de aerosoles y humedad relativa en 500mb, siendo este hecho el responsable de la disminución de ozono en la troposfera media.*

5.3. Disminución neta de ozono troposférico integrado

Integrando el contenido de ozono troposférico entre los niveles de 900mb a 270mb, equivalente aproximadamente a la capa comprendida entre 1000 y 10000m y calculando las anomalías porcentuales respecto al valor medio anual de ozono integrado para esta misma capa, se obtienen los resultados que muestra la Figura 5.9. *Se aprecia*

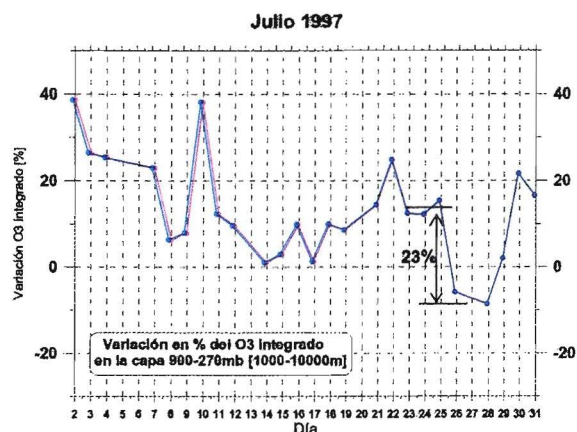


Figura 5.9: Variación de ozono troposférico integrado en la capa 900-270 mb durante Julio de 1997

que durante el tránsito de la situación en la que predomina el sector Atlántico Norte a la situación dominada por masas de aire procedentes de Africa en niveles de la troposfera media, se produce una disminución de ozono de 6 D.U. (23 % del ozono troposférico) en un solo día (del 25 al 26). Esta cantidad supone, así mismo, una caída de aproximadamente un 2 % del ozono total integrado, incluyendo la estratosfera.

Sin embargo, no es este el episodio más importante de los analizados en cuanto a la disminución de ozono troposférico. Durante la campaña intensiva de ozonosondeos de Julio de 1995, se produjo una situación análoga a la estudiada anteriormente, pero con consecuencias más drásticas en cuanto a la caída de ozono troposférico. En este caso, el ozono troposférico integrado cayó 11 D.U del día 18 al 19, lo cual representa una disminución de aproximadamente un 35 % del ozono en la troposfera y del 4 % si se tiene en cuenta la estratosfera (ver Figura 5.10).

Este resultado puede significar otra confirmación experimental que se suma a las pruebas presentadas por M. Gil et al. (2002) y que contradice el modelo de transferencia radiativa de Torres y Barthia (1999), el cual sugiere que la presencia de aerosoles absorbentes en el rango ultravioleta puede contribuir a errores signifi-

CAPÍTULO 5. DISMINUCIÓN DE OZONO DEBIDO A MASAS DE AIRE PROCEDENTES DE AFRICA34

cativos en la medida del contenido de ozono. Según estos autores, los aerosoles de tipo silicato, como los que ascienden en las tormentas de polvo de los desiertos, pueden llegar a infravalorar el contenido de ozono obtenido por el instrumento TOMS en un 10%. Sin embargo, M. Gil et al. (1999), basándose en medidas simultáneas de ozono durante un episodio de invasión por aerosoles saharianos, realizadas por varios instrumentos, tales como, espectrómetros de absorción diferencial en el visible (RASAS, EVA), un espectrofotómetro que emplea radiación directa en ultravioleta (BREWER), e instrumentos orbitales como el TOMS y el GOME, llegan a la conclusión de que el modelo de Torres y Barthia (1999) sobreestima significativamente la magnitud del posible error del TOMS. Sin embargo reconocen la existencia de la improbable posibilidad de que todos los instrumentos se vean afectados por el polvo de la misma manera. Este trabajo, podría suponer un apoyo más a las conclusiones de M. Gil et al. (2002); a partir de medidas proporcionadas por ozonosondeos, en el caso de que se confirmara el aumento del contenido en aerosoles saharianos debido a la invasión de masas de aire procedentes de Africa en la troposfera media, como parece indicar la correlación entre el índice de aerosoles en 500nm y los máximos en los tiempos de residencia en verano (Figura 3.4) y las imágenes del Índice de Aerosoles del TOMS para el episodio de Julio de 1997 analizado en la Sección 5.2 (Figura 5.8).

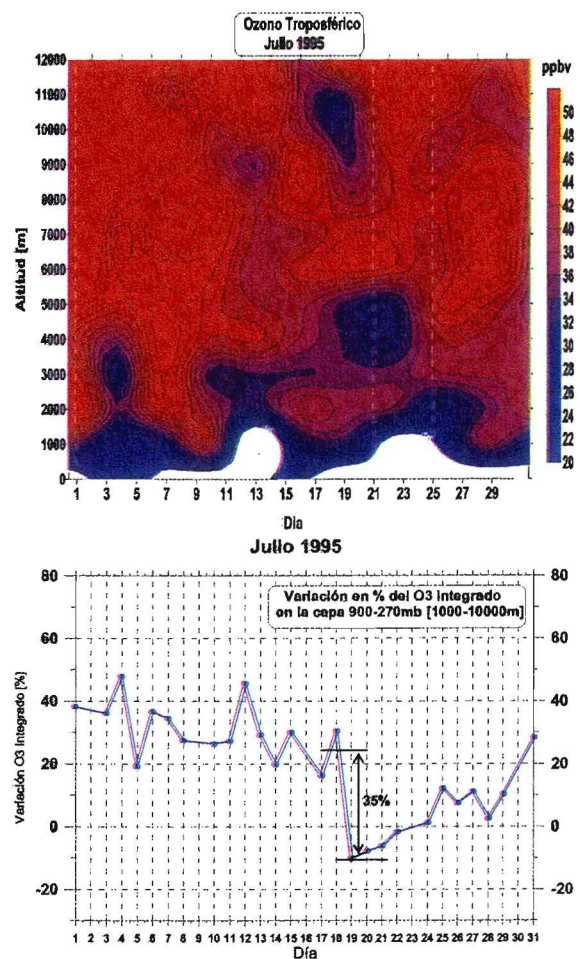


Figura 5.10: Perfil de ozono y valor integrado (900-270mb) durante la campaña de Julio de 1995.

Capítulo 6

Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- La capa estratosférica centrada en el máximo de ozono sobre Tenerife se caracteriza por una *estabilidad sensiblemente mayor* que la observada para las estaciones de ozonondeos de Hilo, Eureka y South Pole.
- De las cuatro estaciones analizadas (Hilo, South Pole, Eureka y Tenerife), la troposfera sobre Tenerife *resulta ser la más rica en ozono*.
- La *variabilidad del ozono* sobre Tenerife es mayor que la correspondiente a la estación de Hilo en una extensa región de la troposfera (3000-12000 m), invirtiéndose esta situación por debajo del nivel de 3000 m, siendo en este caso más estable el perfil de ozono sobre Tenerife.
- La evolución temporal media a lo largo del año del ozono troposférico sobre Tenerife muestra una *oscilación periódica anual, con valores máximos en los meses centrales del año (Mayo, Junio y Julio) y mínimos en otoño e invierno, apreciándose valores anormalmente bajos entre los 2000 m y los 5000 m durante los meses de Julio y Agosto*.
- Existe un *claro predominio de permanencia sobre el sector Atlántico Norte de las masas de aire que alcanzan Tenerife al nivel de 770 mb en la mayoría de los meses del año, salvo en los meses de Julio y Agosto, en los que predomina el sector Local*.
- Considerando las trayectorias que alcanzan Tenerife al nivel de 500 mb, se aprecia la existencia de un *importante máximo en el tiempo de permanencia de éstas sobre los sectores Africa y Local durante los meses de Julio y Agosto, coincidente con un máximo de los sectores Local y Africa al nivel del Observatorio de Izaña (770mb)*. Esto indica que las masas de aire con influencia del sector Africa, que alcanzan el nivel del Observatorio, están íntimamente relacionadas con flujos que, en niveles de la troposfera media (500 mb), proceden también del continente africano, siendo por tanto fenómenos que involucran una gran extensión de la troposfera libre.
- Durante los 10 años de trayectorias isentrópicas analizadas, parece existir una *modulación periódica en la amplitud de los máximos de verano del tiempo de residencia en el sector Africa* con un periodo aproximado de 5.5 - 6 años, que parece estar bien correlacionado con los valores medios en Julio y Agosto del espesor óptico de aerosoles en 500nm..
- *Las masas de aire que alcanzan el Observatorio Atmosférico de Izaña y que proceden del sector Africa, son frías y húmedas en*

niveles de la troposfera media (500 mb) y anormalmente cálidas y secas a 1000m de altitud. Se aprecia una extensa capa (1000-6000m) con valores bajos de ozono, estrechamente relacionada con la región con valores altos de humedad relativa. Existen evidencias que parecen indicar que éstas masas de aire contienen un alto contenido en aerosoles procedentes del continente africano.

- *El déficit de ozono observado entre los 2000 m y los 5000 m, durante los meses de Julio y Agosto en la gráfica de la evolución temporal media anual (Figura 2.8), es debido a la mayor afluencia de trayectorias del continente africano que transportan humedad en niveles de la troposfera media, influyendo sobre la disminución de ozono troposférico sobre Tenerife.*

Agradecimientos

Los autores quisieran expresar su agradecimiento hacia las siguientes personas e instituciones:

- A Sergio Afonso por su constante esfuerzo en la realización de los ozonosondeos de Sta. Cruz de Tenerife desde los inicios de la Estación, tanto en el programa semanal rutinario como en las campañas intensivas, sin cuyo trabajo no habría sido posible este estudio.
- Al Dr. Emilio Cuevas, Director del Observatorio Atmosférico de Izaña, por sus importantes aportaciones en este campo de investigación como es el Ozono Troposférico sobre Canarias, y por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.
- Al Dr. Roger Lin, NOAA/NCEP; NDSC Data Host Facility (DHF), por su ayuda en la solución de problemas de programación para el cálculo de las trayectorias isentrópi-

cas para Tenerife, que han servido de base para este estudio.

- A la NDSC Data Host Facility por proporcionar los ozonosondeos de las estaciones de Eureka, South Pole e Hilo y las facilidades para el cálculo de las trayectorias isentrópicas de forma remota.

Bibliografía

- [1] BUSTOS, J.J.; E.CUEVAS; C. MARRERO Y S. AFONSO; *Caracterización de las masas de aire de la troposfera libre y en la capa de mezcla en Canarias*; IX Asamblea de Geodesia y Geofísica, Aguadulce (Almería); Febrero 1998
- [2] CUEVAS, EMILIO; *Estudio del Comportamiento del Ozono Troposférico en el Observatorio de Izaña (Tenerife) y su Relación con la Dinámica Atmosférica*, Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid ISBN 84-669-0399-2, 1995
- [3] CUEVAS, EMILIO; J.J. BUSTOS; J.M. SANCHO; M. GIL AND C. PARRONDO, *TRACAS Field Experiment in the Northern Hemisphere Ozone Sonde Intensive Campaign Report*, A contribution of INM and INTA to TRACAS (Transport of Chemical species Across the Subtropical Tropopause) Project (ENV4-CT97-0546)
- [4] CUEVAS, EMILIO; JUAN MANUEL SANCHO; ALBERTO REDONDAS, *Investigación y programa de medidas del ozono troposférico en el Observatorio Atmosférico de Izaña (INM)*, Servicio de Publicaciones U.C.M. Física de la Tierra, No. 9, 1996
- [5] DANIELSEN, E. F.; *Trajectories: Isobaric, isentropic and actual*, Journal of Meteorology, 18, 479-486, 1961
- [6] GIL, MANUEL; E. CUEVAS; M. YELA; O. PUENTEDURA, V. CARREÑO Y A. REDONDAS; *Errores en las medidas de O₃ mediante satélite por radiación solar retrodifundida durante episodios de aerosoles absorbentes saharianos*; 3ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Valencia 2002
- [7] KHRGIAN, A.; G.I. KUZNETSOV; A.V. KONDRAT'EVA; *Atmospheric Ozone*, Edited by D.I. Nasilov, Izdatel'stvo Nauka, Moskva, 30-35, 1975
- [8] QUEROL, XAVIER; S. RODRÍGUEZ, E. CUEVAS, M. VIANA Y A. ALASTUEY; *Intrusiones de masas de aire africano sobre la Península Ibérica y Canarias: Mecanismos de transporte y variación estacional*; 3ª Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Valencia 2002
- [9] REDONDAS, ALBERTO; EMILIO CUEVAS; JUAN MANUEL SANCHO, *Investigación y programa de medidas del Ozono Estratosférico y la Radiación Ultravioleta en el Observatorio Atmosférico de Izaña (INM)*, Servicio de Publicaciones U.C.M. Física de la Tierra, No. 9, 1996
- [10] SANCHO, JUAN MANUEL; SERGIO AFONSO; EMILIO CUEVAS; *Programa de Ozonosondeos del Observatorio Atmosférico de Izaña*; Nota Técnica No. 3 del Observatorio Atmosférico de Izaña; Centro de Publicaciones; Secretaría General Técnica; Ministerio de Medio Ambiente; ISBN: 84-8320-196-8; Febrero 2002
- [11] SANCHO, JUAN MANUEL; EMILIO CUEVAS Y VIRGILIO CARREÑO; *Characterization of the double-tropopause over the subtropical region from 1981-1996 radiosonde observations*

- at Tenerife; 2^a Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Lagos (Portugal); Febrero 2000*
- [12] SANCHO, P AND J. DE LA CRUZ; *A five-year climatology of back-trajectories from the Izaña Baseline Station, Tenerife, Canary Islands; Atmospheric Environment Vol. 26A, No.6, 1992*
- [13] TORRES, CARLOS; EMILIO CUEVAS Y JUAN CARLOS GUERRA; *Caracterización de la capa de mezcla marítima y de la atmósfera libre en la región subtropical de Canarias; 3^a Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica, Valencia 2002*
- [14] TORRES, O., AND P.K. BHARTIA; *Impact of tropospheric aerosol absorption on ozone retrieval from backscattered ultraviolet measurements, J. Geophys. Res., 104, 21,569-21,577, 1999*