

DETECCIÓN DE LOS CHORROS SUBTROPICAL Y POLAR MEDIANTE CAMPOS DE OZONO TOTAL

Emilio Cuevas (1)
José Rodríguez (2)

(1) Observatorio Atmosférico de Izaña, INM
(2) Observatorio Atmosférico de Izaña, INM. Ahora en la Universidad de La Laguna

RESUMEN

Un algoritmo para detectar Chorros en altura mediante campos de ozono obtenidos con instrumentos a bordo de satélite como el *TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)* de la *NASA*, o el *GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)* de la Agencia Espacial Europea, ha sido desarrollado como una de las actividades del Instituto Nacional de Meteorología en el Proyecto europeo *TRACAS (Transport of Chemical species Across Subtropical tropopause, ENV4-CT97-0546)*. Parte de los resultados obtenidos con este algoritmo y las validaciones realizadas utilizando análisis diarios *HIRLAM (High Resolution Limited Area Model)* durante los años los años 1998 y 1999 son mostrados en este trabajo.

1. Introducción

El ozono es un gas que está muy relacionado en procesos de transporte tanto en la estratosfera como en la troposfera, y por tanto es ampliamente utilizado como gas traza para estudiar procesos dinámicos, y sobre todo aquellos que implican intercambio entre la troposfera y la estratosfera. Reed (1950) fue el primero en descubrir que tanto la advección como los movimientos verticales podrían alterar la distribución de ozono en vaguadas y dorsales en altura. Cuando tiene lugar subsidencia de aire estratosférico rico en ozono la ecuación de continuidad exige que se produzca convergencia horizontal en la parte superior, de aire también rico en ozono, para ocupar su lugar. El resultado final es que el ozono total en una columna vertical se incrementa a medida que el aire procedente de niveles estratosféricos desciende. Reed (1950) fue también el primero en establecer el concepto de desdoblamiento de tropopausa por la cual se produce una débil entrada de aire estratosférico en la troposfera en las cercanías de la parte central de un Chorro. Danielsen (1968) fue el primero que relacionó de una manera cuantitativa valores altos de ozono al desdoblamiento de la tropopausa. La utilización de campos de ozono total en columna obtenidos del instrumento *TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer)* han sido utilizados para analizar determinado Chorros asociados a vaguadas o depresiones en (Shapiro et al., 1982). Sin embargo estos trabajos están basados en análisis de casos determinados y no realizan un estudio sistemático ni estadístico de detección de Chorros, no necesariamente perturbados, mediante campos de ozono, ni establecen una metodología para la determinación automática operativa de los mismos.

El primer objetivo de este trabajo es el mostrar un procedimiento sencillo, rápido y de bajo coste computacional y de recursos de datos, para detectar un Chorro en altura, en general. El algoritmo que se presenta está diseñado para determinar la posición del Chorro Subtropical (*ChS*) y del Chorro Polar (*ChP*) utilizando datos del *TOMS* que vuela actualmente a bordo del satélite *Earth-probe*, y cuyos datos están disponibles diariamente en <http://toms.gsfc.nasa.gov/>, o utilizando los datos de ozono proporcionados por el instrumento *GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)* de la Agencia Espacial Europea (*ESA*). El segundo objetivo es el de validar dicho algoritmo frente al *ChS* encontrado en 350 K obtenido de los análisis diarios *HIRLAM* para los años 1998 y 1999, que son descritos en Cuevas y Rodríguez (2001).

2. Teoría, datos y método. El algoritmo de detección de la corriente en chorro mediante campos de ozono total en columna

2.1 Teoría. Modelo conceptual

En primer lugar habría que explicar que un Chorro está casi siempre ligado a un salto brusco en la tropopausa. Esto sucede así en una vaguada en altura, en una Depresión Aislada en Niveles Altos (DANA), en una vaguada profunda y también en un Chorro (*ChS*, por ejemplo) sin que éste se encuentre necesariamente perturbado por cualquier otro sistema meteorológico. En la Figura 1 se muestra claramente como un Chorro, en este caso el *ChS*, está asociado a un salto muy brusco en la altura de la

tropopausa que viene indicado en este caso por un gradiente significativo en la vorticidad potencial en 325 K. De hecho se puede observar que entre 1 *UVP* (Unidades de Vorticidad Potencial), y 2 *UVP* se encuentra la tropopausa que separa, a ese nivel isentrópico, la troposfera subtropical de la estratosfera de latitudes medias.

El algoritmo de detección de una corriente en chorro se basa, en primer lugar, en la estrecha relación que existe entre el ozono total y la altura de la tropopausa (Hoinka, Claude y otros, 1996), de tal manera que un descenso en la altura de la tropopausa lleva asociado un aumento en el contenido de ozono total en columna, tal y como se puede ver gráficamente en la Figura 2. En segundo lugar se basa en el hecho de que existan intrusionas de ozono estratosférico en la troposfera en los alrededores de un Chorro, tal y como se muestra en Cuevas y Sancho y otros (2001), aumentando de forma significativa el contenido de ozono total en columna en una determinada región.

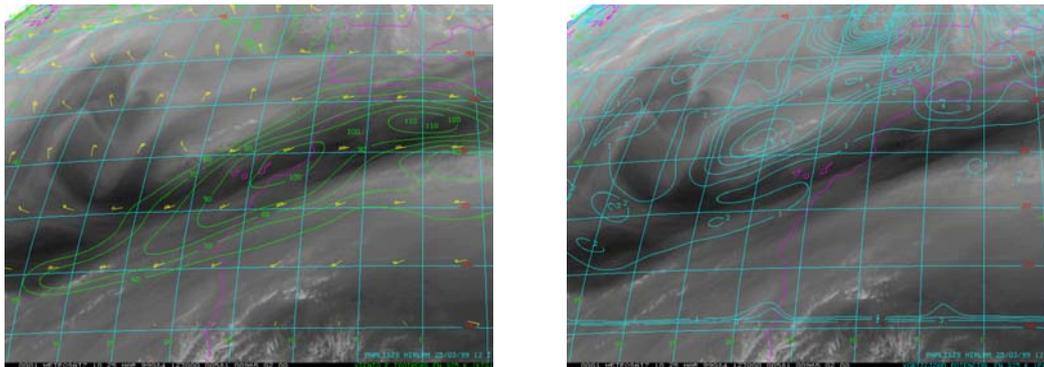


Figura 1: Isotacas a 325 k sobre imagen de vapor de agua del Meteosat para el día 25 de marzo de 1999 a las 12 TMG (izquierda); Vorticidad potencial sobre la misma imagen de vapor de agua para la misma fecha y hora.

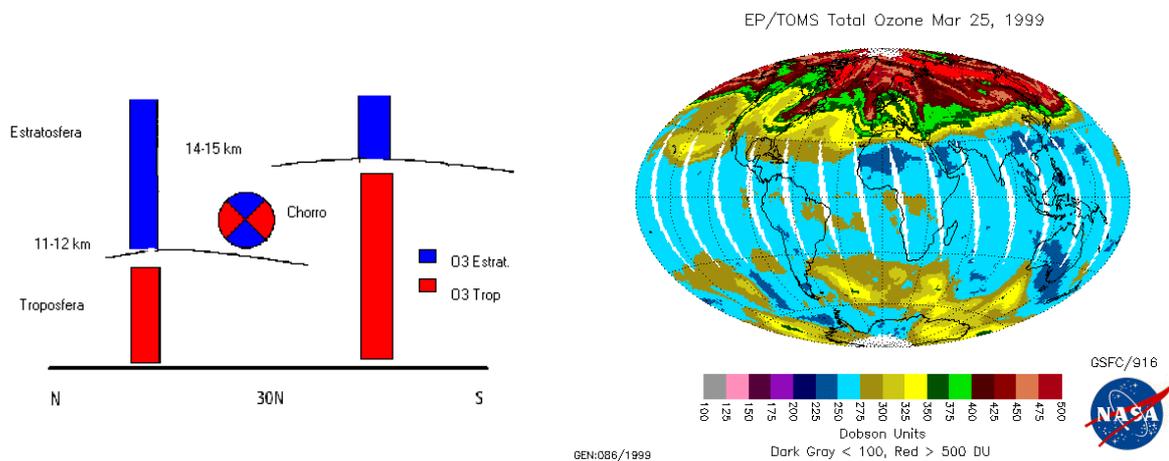


Figura 2: (izquierda); "modelo conceptual" de la distribución de la columna de ozono a uno y otro lado de un Chorro. La concentración de ozono en la columna estratosférica (en azul) es muy superior a la de la columna troposférica (en rojo).

Figura 3: (derecha) Ozono total obtenido del TOMS el día 26 de marzo de 1999.

En la Figura 3 se puede observar como el Chorro mostrado en la Figura 1 constituye una frontera en los valores de ozono total medidos por el TOMS, con valores mucho más bajos al sur del Chorro, coincidiendo con una tropopausa "subtropical" más alta. Por lo tanto el algoritmo de detección del Chorro mediante campos de ozono total se basa en un esquema muy simple. La posición del Chorro está asociada a un salto brusco en la altura de la tropopausa, lo cual produce un gradiente importante de ozono. Tenemos que tener en cuenta que 1 km de desplazamiento vertical de la tropopausa produce una variación de más de 10 Unidades *Dobson* (*UD*) según Steinbrech y otros (1998). Otros autores han ofrecido cifras aun mayores, como las 50 $UD\ km^{-1}$ de Poulin y Evans (1994), o las 13 $UD\ km^{-1}$ de Hoinka y Claude y otros (1996). Cuevas y otros (2001) dan un valor de 8 $UD\ km^{-1}$ para la región de la Península Ibérica.

2.2 Análisis HIRLAM

Con el fin de realizar los estudios previos para la obtención de los parámetros utilizados en el algoritmo de ozono que se expone a continuación, y naturalmente para validar los Chorros que se determinen a partir del algoritmo, se utilizó el Chorro real determinado diariamente a partir de análisis *HIRLAM* para los años 1998 y 1999. La descripción de cómo se obtiene el Chorro real se puede encontrar en este mismo Volumen en Cuevas y Rodríguez (2001).

2.3 Datos de ozono

Los datos diarios de ozono utilizados han sido los proporcionados por el *TOMS* restringidos a la zona de estudio (desde 66.5°W a 30°E, y desde 15°N a 65°N y con resolución de 1,25° x 1°) para los años 1998 y 1999.

2.4 El algoritmo de detección del Chorro mediante campos de ozono

Como se ha dicho anteriormente, existe un gradiente significativo en el ozono total en la región donde se encuentra un Chorro. Para un punto situado en el núcleo del Chorro la variación más importante en el ozono total se observa, en valor promedio, entre 5° al sur y 5° al norte de dicho punto, suponiendo un Chorro que se mueve zonalmente. Teniendo en cuenta estas observaciones se introduce un nuevo parámetro denominado "*Delta*" que tenga en cuenta dicha variación de ozono (en *UD*) en un segmento perpendicular al Chorro de 10° de longitud, aproximadamente.

Se define una matriz que contenga los valores "*Delta*" para cada punto de la malla:

$$D_{i,j} = O_{i-5,j} - O_{i+5,j} \quad (1)$$

donde $O_{i,j}$ indica el ozono registrado en cada punto de la malla. Se seleccionan los puntos de la malla que cumplan las siguientes condiciones:

- Los valores de ozono deben estar entre dos valores dados $O1$ y $O2$ expresados en la Tabla 1.
- El valor "*Delta*" asociado debe estar entre dos valores $D1$ y $D2$ dados en la Tabla 1.
- Si existe más de un punto en la misma columna (longitud) se selecciona aquellos que posean un "*Delta*" más alto. Se seleccionan hasta tres puntos, los demás don descartados.

Los resultados se graban en ficheros *ASCII* que contienen las coordenadas geográficas de los puntos seleccionados y los valores de ozono y de "*Delta*". Dada la enorme complejidad introducida por los sistemas meteorológicos (*DANA*'s y vaguadas en altura principalmente), que llevan asociados Chorros de escala espacial y temporal relativamente pequeños, y dado que existen normalmente dos Chorros (el *ChP* y el *ChS*) en el dominio de trabajo, el algoritmo necesita unos parámetros ($O1$, $O2$, $D1$ y $D2$) de entrada que permitan acotar el Chorro en cuestión que queramos detectar. Para obtenerlos es necesario realizar una estadística de los análisis *HIRLAM* para cada mes. Los parámetros "*Delta*" y ozono son promediados longitudinalmente y guardados en un nuevo fichero junto con su correspondiente desviación estándar. Representando para cada día el ozono, el parámetro "*Delta*" y el viento zonal real, frente a la latitud, tal y como se hace en el ejemplo de la Figura 4 se pueden obtener los parámetros $O1$, $O2$, $D1$ y $D2$ que delimitan y caracterizan cada uno de los Chorros (*ChP* y *ChS*) para cada mes del año. Estos valores son mostrados en la Tabla 1.

En el caso de la Figura 4, entre 36°N y 40°N, tanto la velocidad del viento zonal como el incremento de ozono ("*Delta*") registran los valores más bajos. El *ChS* puede ser encontrado al sur de esta banda, mientras que el *ChP* debe ser encontrado al norte de la misma. De esta forma los parámetros $O1$, $O2$, $D1$ y $D2$ y una "latitud frontera" que divide la región donde se debe encontrar cada uno de los Chorros, se pueden obtener de los perfiles medios mensuales.

En la Tabla 1 se expresan estos valores para cada mes. La denominada "latitud frontera" se suele encontrar entre 34°N y 44°N, pero en los meses de agosto y septiembre no es posible determinarla, lo cual coincide con los resultados obtenidos en la caracterización del *ChS* por Cuevas y Rodríguez (2001).

Este algoritmo fue aplicado a las mallas diarias del *TOMS* para los años 1998 y 1999, y los resultados fueron comparados y validados frente a los Chorros reales obtenidos de los análisis *HIRLAM* en los niveles de 330 K, 340 K y 350 K.

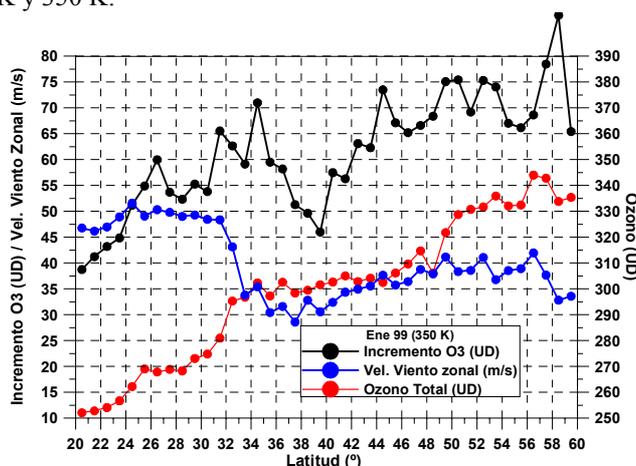


Figura 4: Variación latitudinal del incremento de ozono (UD), ozono (UD) y viento zonal (ms^{-1}) en 350 K para enero de 1999.

Mes 1998-99	Latitud frontera	Chorro Subtrop. D1/D2 (UD)	Chorro Subtrop. O3 (UD)	Chorro Polar D1/D2 (UD)	Chorro Polar O3 (DU)
ENE	37°	35/60	<315	45/70	>315
FEB	41°	30/80	<330	50/75	>330
MAR	42°	35/85	<355	55/75	>355
ABR	43°	40/90	<375	50/75	>375
MAY	42°	35/75	<370	55/85	>370
JUN	40°	40/60	<345	40/70	>345
JUL	44°	30/55	<340	30/55	>340
AGO	---	25/40	300/350	---	---
SEP	---	20/40	290/315	---	---
OCT	34°	20/35	<300	25/45	>300
NOV	36°				
DIC	38°	35/55	<300	30/65	>300

Tabla 1: Valores promedios mensuales (1998 + 1999) de los parámetros asociados al ChS y al ChP.

3. Resultados: validación y estadísticas

Por falta de espacio se expondrán aquí tan solo unos ejemplos. En la figura 5 se muestran las posiciones del *ChP* y del *ChS* obtenidos mediante el algoritmo de ozono (en rojo) y mediante análisis *HIRLAM* (en azul), respectivamente, el día 15 de mayo de 1999. Se han dibujando los puntos (azules) en los que la velocidad del viento es superior a 35 ms^{-1} (primer caso), superior a 30 ms^{-1} (segundo caso) y superior a 25 ms^{-1} (tercer caso). En este ejemplo podemos observar como el algoritmo de ozono "dibuja" el *ChS* y el *ChP*, claramente separados, con bastantes más puntos que el análisis *HIRLAM*, para el que se han dibujado puntos con vientos superiores a 35 ms^{-1} (primer caso), es decir aplicando estrictamente el criterio de Chorro. Siendo menos restrictivos (casos segundo y tercero) podemos comprobar que el análisis *HIRLAM* acaba "copiando" una gran parte del Chorro obtenido con el algoritmo de ozono. Este hecho sucede en numerosos casos, y nos indica que el ozono es enormemente sensible a vientos fuertes sin necesidad de que éstos lleguen a la categoría de Chorros, y de ahí que sea una herramienta interesante para el análisis del viento en altura.

Podemos confirmar que existe un buen acuerdo entre el Chorro real y el determinado mediante el algoritmo de ozono para la mayor parte de los días en los años 1998 y 1999, a pesar de que existen una serie de factores que juegan en contra de este buen acuerdo y que son los siguientes:

a) En numerosos días se encuentra más de un Chorro real a diferentes niveles isentrópicos. Con el propósito de simplificar el trabajo la comparación se ha realizado a un único nivel (normalmente 350 K).

- b) En numerosos días, sobre todo en verano, el umbral de 35 ms^{-1} no se alcanza en ningún nivel isentrópico en amplias regiones, tal y como hemos visto en el ejemplo de la Figura 5.
- c) El hecho de que un Chorro tengan una anchura de cientos de kilómetros y la resolución del TOMS y de los análisis *HIRLAM* sea diferente, introduce incertidumbres en la comparación.

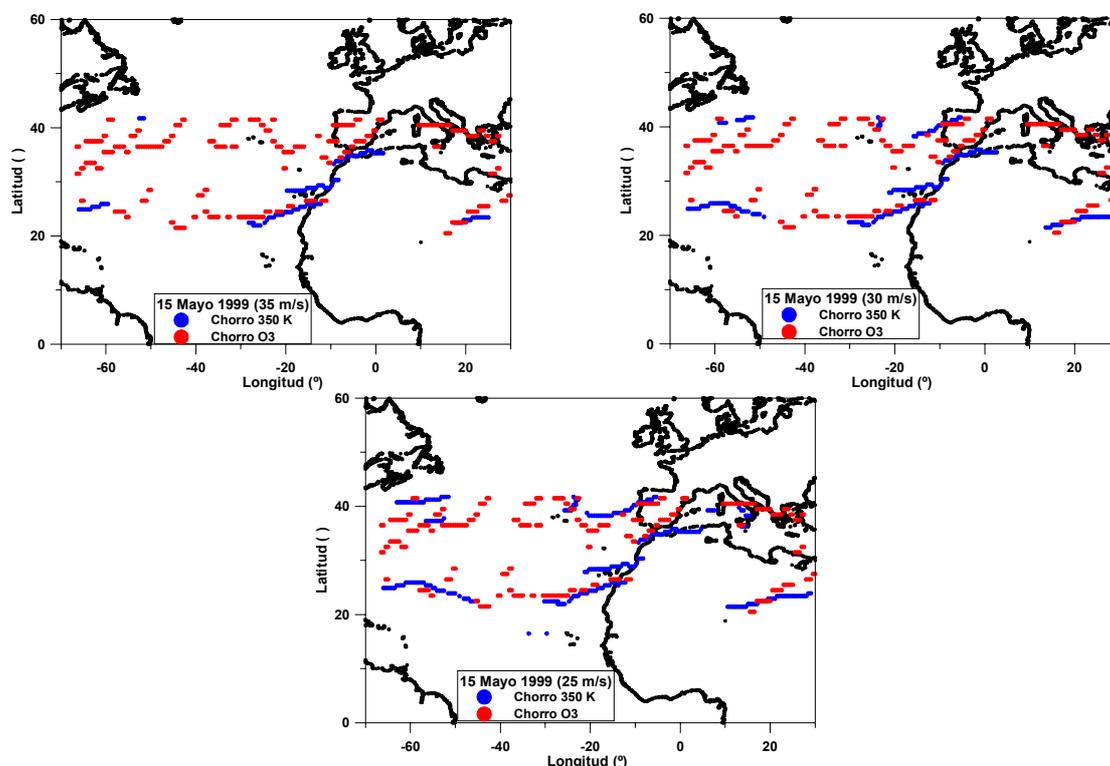


Figura 5: Posiciones de los *ChP* y *ChS* obtenidos mediante análisis *HIRLAM* (en azul) y mediante el algoritmo de ozono (en rojo), respectivamente, el día 15 de mayo de 1999, dibujando los puntos en los que la velocidad del viento es superior a 35 ms^{-1} (primer caso), superior a 30 ms^{-1} (segundo caso) y superior a 25 ms^{-1} (tercer caso).

En la Figura 6, y a modo de ejemplo, se muestran los valores promedios mensuales, con sus correspondientes desviaciones estándar, de las posiciones del *ChS* y del *ChP*, obtenidas mediante análisis *HIRLAM* (en azul) y mediante el algoritmo de ozono (en rojo) para enero de 1998. Se puede comprobar el excelente acuerdo tanto en el valor medio de las posiciones de los Chorros determinados por ambos métodos, como en la dispersión encontrada para cada longitud. Esto indica que el algoritmo de ozono puede ser utilizado para obtener estadísticas de la posición del Chorro con la base de datos del TOMS que comienza en 1978, y detectar posibles modificaciones o tendencias en la posición del mismo a lo largo de los años.

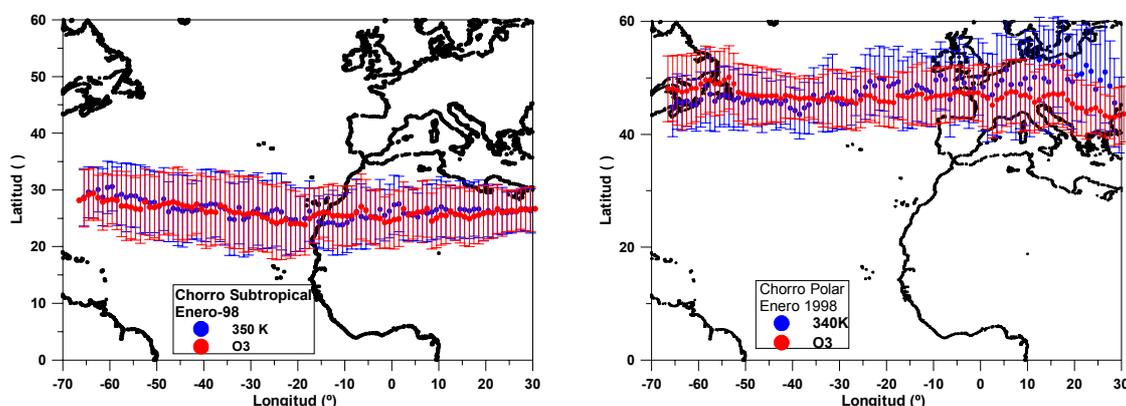


Figura 6: Valores promedios de la posición del *ChS* (izquierda) y *ChP* (derecha) para enero de 1998 determinados con análisis *HIRLAM* (en azul) y con el algoritmo de ozono (en rojo).

4. Conclusiones

El algoritmo de ozono que se presenta proporciona la posición del *ChS* y del *ChP* a partir de campos de ozono total del *TOMS* o del *GOME* con un buen acuerdo con las posiciones de los Chorros resultantes del análisis *HIRLAM*. El algoritmo detecta muy bien Chorros en altura, y también fuertes vientos no necesariamente con velocidades propias de los Chorros. De hecho, en el proceso de validación hubo que reducir el criterio de velocidad del viento a 25 ms^{-1} , e incluso valores inferiores, para poder detectar con los análisis *HIRLAM* regiones de vientos fuertes que estaban marcados como tales en el análisis de los campos de ozono.

La detección de Chorros en altura mediante campos de ozono total puede ser un buen complemento a los análisis de los modelos meteorológicos en la detección de estos Chorros, como lo es actualmente el análisis de imágenes de vapor de agua en las que la información proporcionada por bandas oscuras (subsistencia) y bandas de cirros ayudan a detectarlos. La utilización de campos de ozono puede ayudar, sobre todo, a la determinación de Chorros en altura en aquellas zonas sobre el océano con deficiente observación meteorológica.

En la actualidad se está mejorando el algoritmo, optimizando la detección de gradientes de ozono en la dirección E-W, lo que nos permitirá mejorar la determinación de Chorros asociados a *DANA's* y vaguadas en altura con direcciones N-S.

Agradecimientos

El Proyecto europeo *TRACAS* (*TRansport of Chemical species Across Subtropical tropopause, ENV4-CT97-0546*) financió la beca que disfrutó el informático José Rodríguez. Gracias a esta beca fue posible realizar numerosos trabajos, entre los cuales se encuentra éste.

Los autores expresan su agradecimiento a Juanjo Bustos, del *CMT* en Canarias Occidental, por su ayuda en el tratamiento de los análisis *HIRLAM*.

Referencias

Cuevas, E., M. Gil, J. Rodríguez, M. Navarro, and P. Hoinka, 2001: Sea-land total ozone differences from TOMS: The GHOST effect, Accepted in *J. Geophys. Res.*

Cuevas, E., J. Rodríguez, 2001: Caracterización del Chorro Subtropical, V Simposio Nacional de Predicción, INM, Madrid, Noviembre de 2001, disponible en CD.

Cuevas, E., J. M. Sancho, M. Schneider, 2001: Análisis de Procesos de Intercambio Estratosfera-Troposfera asociados al Chorro Subtropical no perturbado, V Simposio Nacional de Predicción, INM, Madrid, Noviembre de 2001, disponible en CD.

Danielsen, E.F., 1968: Stratospheric-tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity, *J. Atmos. Sci.*, 25, 502-518.

Hoinka, K.P., H. Claude, U. Köhler, 1996: On the Correlation between Tropopause Pressure and Ozone Above Central Europe, AGU, 96GL.

Poulin, L., W.F.J. Evans, 1994: METOZ: Total Ozone from Meteorological Parameters, *Atmos-Ocean*, Vol. 32, 285-297.

Reed, R.J., 1950: The role of vertical motions in ozone-weather relationship, *J. Meteor.*, 7, 263-267.

Shapiro, M.A., A.J. Krueger, and P.J. Kennedy, 1982: Nowcasting the position and intensity of the jet streams using a satellite-borne total ozone spectrometer, Nowcasting, K.A. Browning, De., Academic Press, London 256 pp.

Steinbrech W., H. Claude, U. Köhler, and K.P. Hoinka, Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long term changes, *J. Geophys. Res.*, 103, 19183-19192, 1998.