

LOCALIZACIÓN DE ÁREAS DE TURBULENCIA EN AIRE CLARO (TAC) USANDO TÉCNICAS OBJETIVAS (*)

L. F. López Cotín
F. J. Montero Alonso

(G.P.V. de Sevilla, -INM-)

RESUMEN

Se analiza uno de los problemas que afecta a la aeronáutica; de interés, tanto por su influencia en la seguridad de las aeronaves como por el coste económico que supone modificar las rutas en vuelo. Frente a la predicción subjetiva clásica, se presenta un método objetivo, consistente en la adaptación del índice TII (Turbulence Index I) utilizado por el NMC (National Meteorological Center) al sistema McIdas. Para una mejor identificación del espesor de las áreas de TAC se propone utilizar distintos estratos. El uso directo de los campos obtenidos del índice TAC promete una operatividad fácil, de aplicación inmediata en productos del INM, tales como el SGWX del RAFC Las Palmas.

1. Consideraciones previas.

Además de ser importantísima, la relación entre la meteorología y la aviación, tiene una clara implicación en la actividad económica del INM. Puede considerarse que el presente trabajo está enfocado en esa dirección. Es por otra parte un ejemplo de la utilización de los medios disponibles en un G.P.V., tanto de las publicaciones, -el artículo base del trabajo que fue publicado por Weather and Forecasting de marzo del 92, fue el primer número recibido de la suscripción de esa publicación-, así como del McIdas, pues se han realizado simples programas McBasi.

2. El problema de la Turbulencia en Aire Claro (TAC).

La turbulencia es uno de los problemas meteorológicos que se presenta en las operaciones aeronáuticas. Hay dos tipos fundamentales de turbulencia lejos de la superficie terrestre, la convectiva y la asociada a capas estratificadas estables, que se denomina TAC, en las que, fundamentalmente, la cizalladura vertical del viento es importante.

Al contrario de la originada por la convección, que resulta fácilmente detectable por los

(*) En la separata de este volumen hay una imagen en color correspondiente a esta comunicación.

pilotos, bien de manera visual, Cu y Cb, o con ayuda del radar de abordó, la TAC suele advertirse demasiado tarde; por tanto sin que se hayan tomado precauciones con anticipación. De ahí la conveniencia de obtener información previa al vuelo sobre estas posibles zonas turbulentas (Eichenberger, 1981).

Entre el 65 y el 70%, -según diferentes autores-, de las áreas de TAC están asociadas a la corriente en chorro; pero no es tan importante el chorro en sí mismo como la cizalladura que le acompaña, sea la horizontal, -poco importante-, o vertical.

3. La predicción de la TAC.

3.1. Escala del fenómeno.

La predicción de la TAC resulta especialmente difícil, ya que se trata de un fenómeno mesoescaico, catalogado (Orlanski, 1975) como *mesogamma*, por tanto dentro del rango espacial de 2 a 20 km y temporal del orden de una hora. De manera que las redes de observación convencionales no son eficaces para observarlas.

Tabla I. Detalle de las escalas meteorológicas, según Orlanski 1975.

1 día	1 hora	1 min	
	Tormentas TAC		20 km
	Efectos urbanos		2 km

Incluso en situaciones de gran escala, la TAC generada puede ser aislada o transitoria de manera que una capa de cierto espesor, que puede ser identificada como de posible TAC, puede prestar turbulencia únicamente en una pequeña subcapa, digamos el 10% de su espesor, de manera que la probabilidad de encontrar turbulencia es relativamente pequeña.

De igual manera, la turbulencia ocurrirá durante un pequeño período de tiempo y desaparecerá cuando cambien las condiciones iniciales que la formaron, ya que la propia turbulencia destruye las fuerzas que la generaron. Sin embargo, las fuerzas a gran escala pueden restablecerla nuevamente, iniciando un nuevo episodio de TAC. Se supone que una capa experimentará turbulencia sólo 10 minutos cada hora.

3.2. Elementos meteorológicos que influyen en la TAC.

Una relación "clásica" de estos factores incluiría: el chorro, la cizalladura del viento, -tanto horizontal como vertical-, el gradiente horizontal de temperatura, -que está asociado a la cizalladura vertical-, las ondas de montaña y de gravedad, la nubosidad y la tropopausa.

3.3. Enfoque histórico de la predicción de TAC. Método subjetivo.

Teniendo en cuenta los factores que influyen en la formación de la TAC, se establecieron reglas para determinar las zonas donde es posible su aparición, destacando fundamentalmente la localización del chorro asociado en el cual aparece

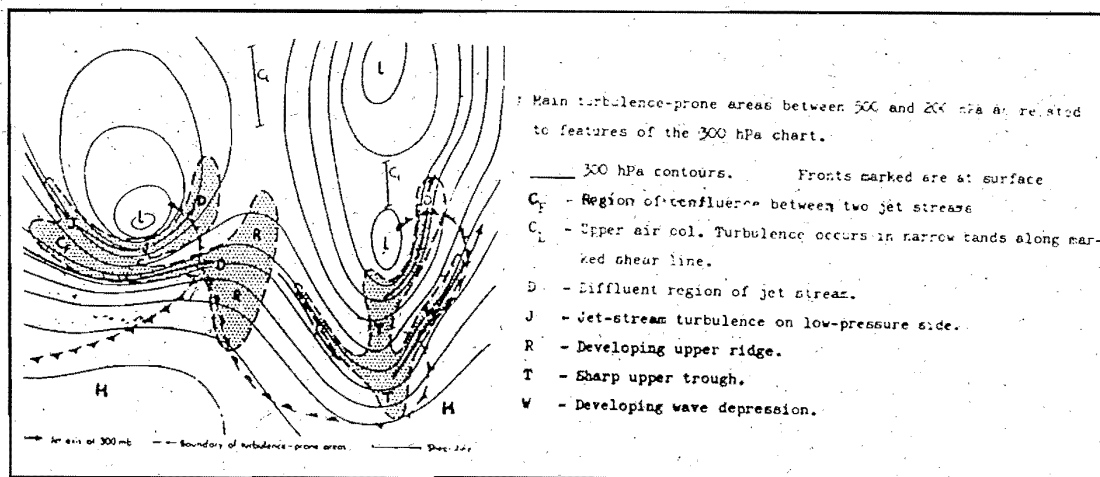


Figura 1

la zona de mayor cizalladura del viento, así como la curvatura de la corriente y otros fenómenos antes enumerados (Eichenberger, 1981).

En definitiva se buscan características sinópticas en las que frecuentemente se localizan las TAC. Así aparecen dibujadas en un mapa de 300 hPa las zonas con mayor probabilidad de TAC entre 500 y 200 hPa (Fig. 1).

En 1969, la Comisión de Meteorología Aeronáutica de la OMM aprobó una recomendación en la que se especifican normas prácticas relativas a la predicción de la TAC. De modo esquemático habría que vigilar:

1. Chorros con velocidad superior a 110 Kt.
2. Sotavento de las cadenas montañosas.
3. En 300 hPa, zona izquierda del chorro, donde la cizalladura horizontal con diferencia de 20 Kt por grado de latitud.
4. Cizalladura vertical superior a 5 Kt. O gradiente vertical de temperatura en 300 hPa de 5°C cada 2 grados de latitud.
5. Chorros ondulados, especialmente en surcos profundos.
6. Delante de los surcos y detrás de la dorsal.

Hay reglas simples utilizadas por los servicios meteorológicos, como las indicadas en la tabla II, del *Meteorological Wing* de Bélgica que sigue un sistema de puntuación para la predicción de TAC (Rousseau, 1984).

Tabla II

Valor numérico	3	2	1
Cizalladura vertical	6Kt/1000Ft	4-6Kt/1000Ft	2-4Kt/1000Ft
Cizalladura horizontal	60Kt/°Lat	40-60Kt/°Lat	20-40Kt/°Lat
Chorro	Delta	Entrada	Centro
Curvatura		a) Ciclónica sobre tierra b) Anticiclónica sobre tierra	a) Ciclónica sobre el mar b) Anticiclónica sobre el mar
Tropopausa asociada al chorro		Menos de 4000Ft	4000-8000Ft

TOTAL ...

El resultado de la suma anterior da directamente el carácter del TAC, según la tabla siguiente:

Nil	0 - 3
Localmente moderada TAC	4 - 5
TAC moderada	6 - 8
TAC moderada localmente severa	9 - 10
TAC severa	11 - 13

3.4. Técnicas objetivas.

Las técnicas para la predicción objetiva de la TAC se han dirigido hacia la predicción numérica de las cizalladuras, vertical y horizontal, del viento; o el cálculo de la tendencia del número de Richardson, que está relacionado con la estabilidad y cizalladura. También se han definido algunos índices como el SCATR (*Specific CAT Risk*), que ha demostrado ser útil cuando se calcula en un sistema de coordenadas isentrópicas, y que en un futuro podría ser aplicado al sistema McIDAS utilizado por el INM o como el que a continuación se explica.

4. Descripción del índice TAC.

Dentro de los métodos objetivos, y siguiendo la definición de un índice de fácil aplicación al sistema McIDAS se adaptó el TI1 (*Turbulence Index 1*) utilizado por el *National Meteorological Center* de Washington (Ellrod, 1991), cuya aportación original consiste en considerar la deformación como un elemento esencial en la localización de áreas de TAC.

La elección de este índice, producto de la deformación y la cizalladura vertical del viento, se hizo tras un estudio estadístico que comparaba la aparición de TAC con diferentes variables meteorológicas.

$$TI1 = VWS \times DEF \quad [1]$$

Otro índice de características similares es utilizado por AFGWC, en el que se tiene en cuenta la cizalladura vertical, la deformación y la convergencia; pero según Ellrod no aporta ventajas destacables incluir este último factor.

4.1. Importancia de la deformación.

La deformación resulta de la desaceleración del aire según el flujo de vientos y de la dilatación

en dirección normal al viento. Está formada por dos componentes, DST y DSH, definidos por:

$$\begin{aligned} \text{DST} &= \frac{\partial u}{\partial v} - \frac{\partial x}{\partial y} \\ \text{DSH} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \end{aligned} \quad [2]$$

resultando la deformación

$$\text{DEF} = (\text{DST}^2 + \text{DSH}^2)^{1/2} \quad [3]$$

El sentido físico del índice propuesto, producto de la deformación y cizalladura vertical del viento, viene explicitado en la ecuación que describe la frontogénesis; ya que la deformación implica un aumento en el gradiente horizontal de temperatura, siempre que el ángulo entre el eje de la dilatación y las isoterms sea menor de 45°. Es necesario un continuo efecto de dilatación, y por tanto aumento del gradiente horizontal térmico, para que se mantengan las condiciones que hacen posible la turbulencia, de otro modo desaparecería rápidamente en la mezcla originada.

$$I_f = |\nabla\theta|(0,5) [\text{DEF}(\cos 2\beta) + \text{CVG}] \quad [4]$$

donde I_f = Intensidad frontogénica.

En una superficie isobárica, y teniendo en cuenta la expresión del viento térmico, quedaría

$$A_T = (0,5) (fT/g) (\text{VWS}) [\text{DEF}(\cos 2\beta) + \text{CVG}] \quad [5]$$

4.2. Cizalladura vertical del viento.

La variación de viento con altura, sea en velocidad o dirección, puede producir remolinos que propagan la energía desde una zona de vientos fuertes a otra de más débiles. La existencia de turbulencia a partir de una fuerte cizalladura produce una amplificación de las ondas a través de una capa estable provocando una mezcla, y disminución de la estabilidad térmica en la capa. Hace falta que la cizalladura alcance un valor umbral para que se desarrolle la TAC, siendo la expresión de la cizalladura vertical de la cizalladura:

$$\text{VWS} = \frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z} \quad [6]$$

5. Adaptación al sistema McIdas.

Los modelos numéricos disponibles en el sistema McIdas son el Modelo de Área Limitada

LAM del INM, el Centro Europeo CEP, y los modelos de Bracknell BRKG, BRK1 y BRKF; además disponemos del análisis ANA. Actualmente, sólo el INM, CEP y ANA contienen los campos necesarios para el cálculo del índice TAC.

Se han realizado dos programas McBasi, uno de ellos presenta una descripción de los factores que intervienen en el índice, con un fin explicativo; el segundo es el programa operativo propiamente dicho en donde se han eliminado los pasos previos y sólo se presentan contorneados los campos con el índice TAC.

5.1. Programa TACDEMO. Descripción del índice TAC.

La idea originaria es mostrar a los posibles usuarios del índice TAC, los campos que han intervenido en el mismo.

El programa está ilustrado tanto en la CRT como en el vídeo. En el gráfico 30, aparecen tres pantallas representando la deformación (DEF) al nivel de vuelo 300, y los dos elementos que la definen, DST y DSH. En el 31, se encuentran representados los vientos en los niveles de vuelo 300 y 240, así como la cizalladura VWS entre ambos.

Mientras que el gráfico 32 muestra el índice TAC.

Sintaxis: RUN MOD PAS PINI FILE, TACDEMO.

5.2. Programa TAC. Uso operativo.

En la versión operativa se presenta el índice TAC en dos estratos diferentes, correspondientes a los FL 240 a 300 y de 300 a 340, con el fin de identificar del mejor modo posible el espesor afectado por la TAC (véase Imagen B11-1, en la separata del libro).

Sintaxis: RUN MOD PAS PINI FILE, TAC.

5.2.1. Umbrales.

Según la corta verificación realizada, podría considerarse, como primera aproximación, área de turbulencia moderada o fuerte, aquella que corresponde a valores de TAC por encima de 15, -según las unidades representadas en el campo- y sólo moderada cuando el índice TAC es mayor que 5.

5.2.2. Opción Bucle.

Para facilitar la evolución temporal de las áreas TAC, se presenta una opción (programa McBasi TACBUCLE) para cubrir un período de 24 horas, con intervalos de 6 a partir de la hora indicada por PINI. Se presentan los dos estratos considerados en el programa TAC, gráficos 30 y 31, con cuatro pantallas en cada uno de ellos.

Sintaxis: RUN MOD PAS PINI FILE, TACBUCLE.

6. Aplicaciones del índice TAC. Modelos disponibles.

De acuerdo con la descripción de los modelos disponibles actualmente en el sistema McIdas, y teniendo en cuenta la zona geográfica cubierta por los mismos, se pueden localizar las áreas con probable TAC en Europa, Norte de África y el Atlántico Norte, con aplicación a los vuelos y rutas en esas zonas.

La confección de los mapas aeronáuticos de tiempo significativo del RAFC Las Palmas queda por tanto cubierta sólo en parte, ya que los datos del Atlántico Sur no están actualmente

cubiertos en estos modelos, -CEP, INM-; sin embargo podrían conseguirse, si resulta operativamente interesante este índice, campos que cubrirían toda la zona de este RAFC, con lo que la localización y trazado de áreas TAC en los mapas SGWX se haría de modo rápido y fácil.

Además, en el seguimiento de la clave SIGMET, por las oficinas responsables.

7. Caso práctico: 22 de octubre de 1992.

7.1. Situación sinóptica.

En superficie encontramos el anticiclón sobre el Atlántico, con 1.040 hPa al Noroeste de Azores. Sobre la Península avanza un frente de Norte a Sur de poca actividad.

En altura, se caracteriza por una pronunciada vaguada en 500 hPa, con eje principal desde el Norte de Italia hacia las Islas Canarias.

Sobre el Atlántico hay una dorsal patente. La misma configuración se repite en el mapa de 300 hPa / FL 300. Los vientos presentan una fuerte

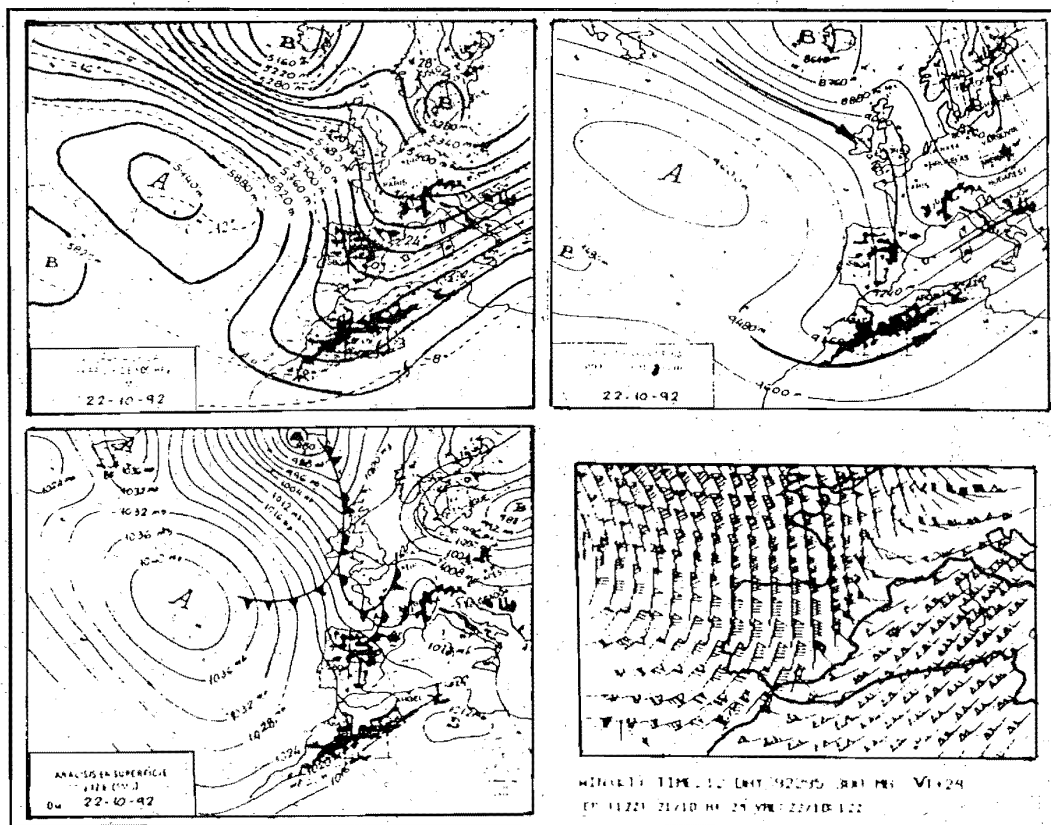


Figura 2

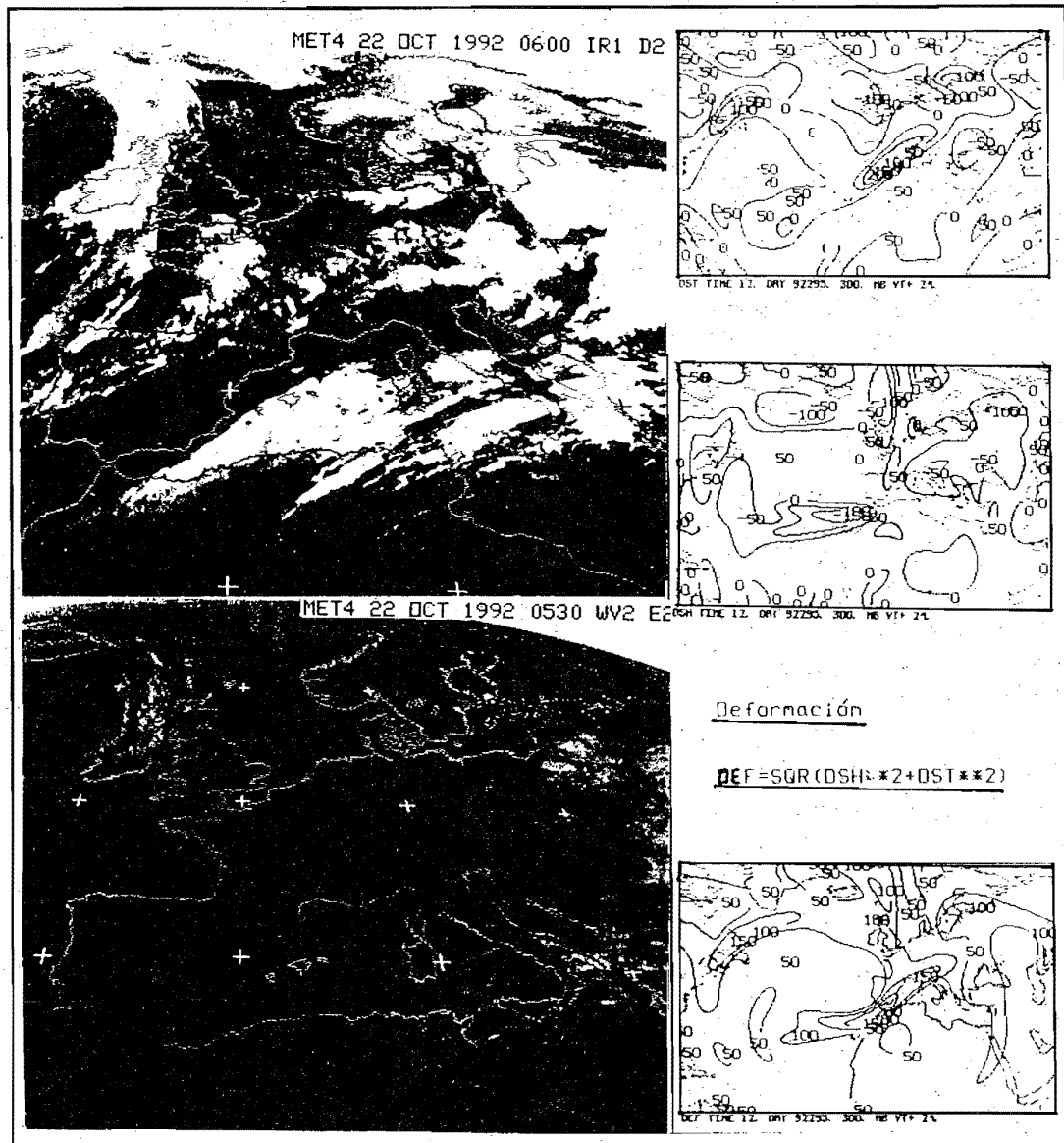


Figura 3

cizalladura en la Península entre el chorro polar, y el subtropical localizado sobre el Magreb.

En las imágenes de satélite WV, VIS e IR, se pone de manifiesto la interacción de la banda subtropical y la polar.

La banda oscura en WV, que se localiza sobre el Levante español, marca la zona de máxima deformación, lo que queda de manifiesto en el campo DEF (Fig. 3).

7.2. Bondad del índice TAC. Comparación con mapas SIGWX.

El índice TAC recoge bien las características de cizalladura de vientos y deformación dando

un máximo acusado sobre la mitad oriental de la Península y en el Mediterráneo Occidental (Fig. 4).

La concordancia de este campo con las áreas de TAC de los mapas significativos de Londres y RAFC Las Palmas es buena. Numerosos informes *sigmets* sobre TAC se recogieron ese día vía TTY, desde Marruecos hasta Rumanía y desde Francia al Reino Unido. No se recibió ninguno de España.

8. Verificación del índice TAC. Noviembre 1992.

De la propia naturaleza del fenómeno, se deduce la dificultad de su verificación. Incluso en áreas de alta probabilidad de ocurrencia de TAC

COMUNICACIÓN B11

un avión no necesariamente acusará la presencia de la misma, dependiendo de su nivel de vuelo exacto y del momento en que la atraviese. De igual modo una zona con pequeña probabilidad de ocurrencia de TAC no asegura que el vuelo sea tranquilo.

estratos de los niveles de vuelo 240 a 300 y 300 a 340, con los mapas SGWX de Frankfurt y los mensajes *sigmets* de los países europeos y norteafricanos.

En el tratamiento seguido para verificar de algún modo este índice se han comparado las zonas indicadas por los campos TAC, en los

La evaluación subjetiva de estos datos indica que la bondad del índice para delimitar áreas de TAC es buena en general, marcando la configuración indicada en los SGWX de Frankfurt y correspondiéndose con los *sigmets* recibidos.

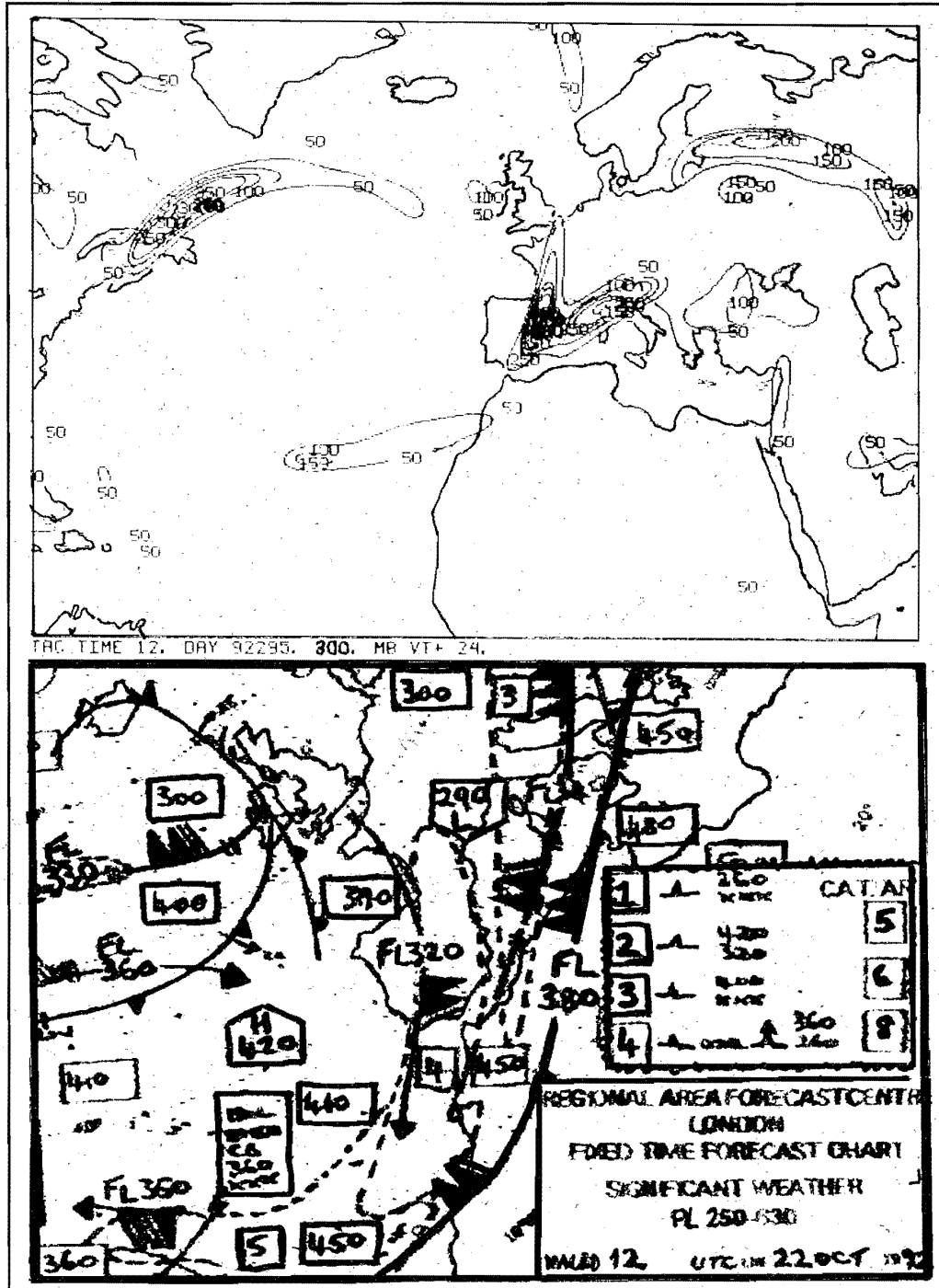


Figura 4

III SIMPOSIO NACIONAL DE PREDICCIÓN

Referencias.

Ellrod, G. (1989). An index for clear air turbulence based on horizontal deformation and vertical wind shear. Third International Conference on Aviation Weather System.

Ellrod, G. (1991). An objective clear air turbulence forecasting technique: verification and operational use. Weather and forecasting. American Meteorological Society. Vol. 7, pp. 150-165.

Eichenberger, W. (1981). Meteorología para aviadores. Segunda edición. Paraninfo.

Godske (1957). Dynamic meteorology and weather forecasting. American Meteorological Society, 777-789.

Hughes (1960). Clear air turbulence. A discussion. Forecaster's notebooks. WBFC, Chicago, Illinois. April.

Marks, D.G. (1989). Current progress at the National Meteorological Center in automated clear air turbulence forecasting. Third International Conference on Aviation Weather System.

Reiter (1975). Handbook for forecasters in the Mediterranean. Weather phenomena of the Mediterranean basin. Part 1: General description of meteorological processes.

Rousseau (1984). Forecaster's reference book. Serial B, No. 7. Belgium Meteorological Wing.