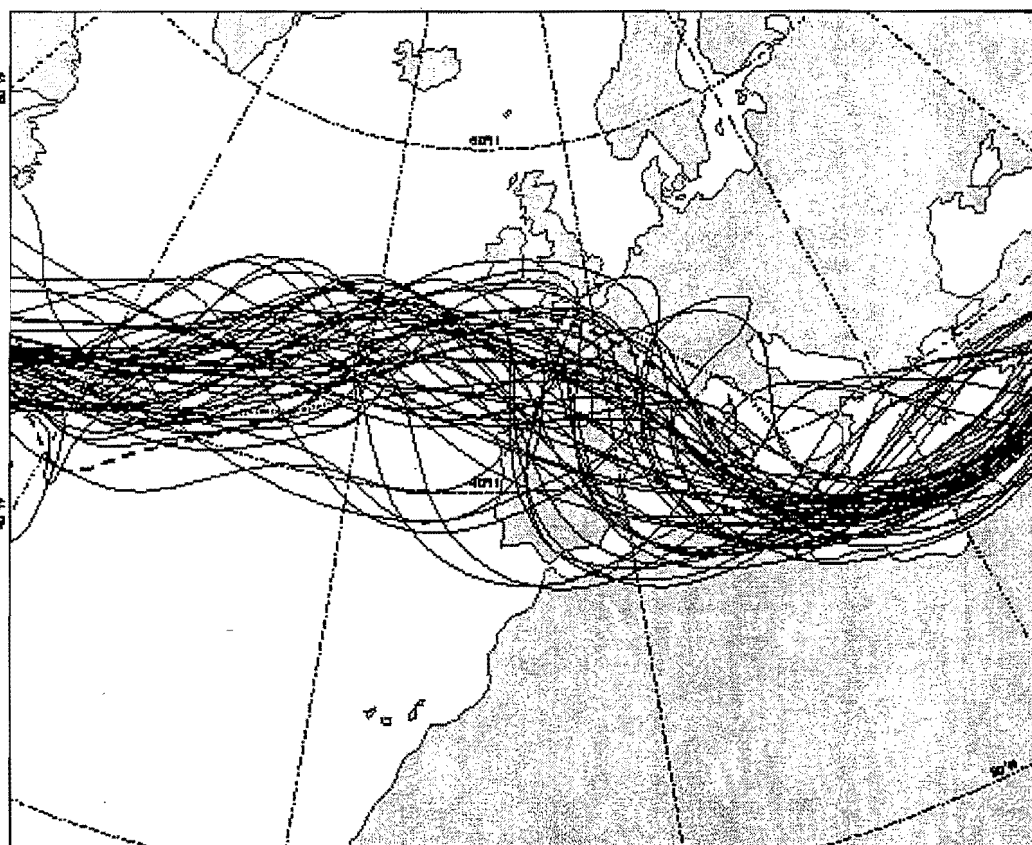




SISTEMA DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS (EPS: ENSEMBLE PREDICTION SYSTEM)

NOTA TÉCNICA S.T.A.P. N° 33



Benito Elvira Montejo
Aurora Martín Sanz

Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (S.T.A.P.)

Area de Predicción y Aplicaciones
Subdirección General de Redes, Sistemas y Producción Meteorológica



8 NOV 1999

*Nota Técnica del
Servicio de Técnicas
de Análisis y Predicción (STAP)*

Edita: Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Medio Ambiente ©

NIPO: 310-99-019-4
Depósito Legal: M-14487-1999

Imprime: Centro de Publicaciones

Impreso en papel reciclado

SISTEMA DE PREDICCIÓN POR CONJUNTOS

INDICE

1. INTRODUCCION

2. DESCRIPCION DEL EPS

2.1 El EPS en el CEPPM

2.2 El EPS en el NCEP

2.3 Comparación entre ambos

3. PRODUCTOS DEL EPS DEL CEPPM

3.1 Campos directos de las 51 predicciones

3.2 Descripción de los productos gráficos

4. CLASIFICACION DE LAS PREDICCIONES DEL EPS

4.1 Algoritmos de agrupamiento

4.2 Método de los tubos (tubing)

4.3 Red neuronal

5. VERIFICACION DEL EPS

5.1 Evaluación de la dispersión y de los miembros del EPS

5.2 Verificación de grupos y tubos

5.3 Verificación de la predicción probabilística: diagramas de fiabilidad, curvas de ROC

6. PREDICCIÓN DE MEDIO PLAZO EN ESPAÑA

6.1 Antes del EPS (hasta diciembre de 1992)

6.2 Primeros pasos con el EPS (desde diciembre de 1992 hasta 1998)

6.3 Futuro inmediato

7. USO OPERATIVO DEL EPS EN OTROS PAISES

7.1 Alemania

7.2 Francia

7.3 Reino Unido

7.4 Italia

7.5 Noruega

7.6 Suiza

8. BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUCCION AL SISTEMA DE PREDICCION POR CONJUNTOS

Durante las últimas décadas y especialmente en el periodo 1981- 86, los modelos numéricos de predicción meteorológica han mejorado sustancialmente (**figura 1.1.a**: evolución temporal del *índice de pericia* (destreza o calidad) (*Skill Score*) del modelo CEPPM: Centro Europeo de Predicción de Plazo Medio (en inglés, *ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*). Esta mejora se aprecia fundamentalmente en el corto plazo (hasta D+2) y medio plazo cercano (D+3 hasta D+5). Sin embargo para los últimos periodos, por ejemplo, D+7 y D+8, el avance es muy escaso, si es que se produce.

Otro índice para evaluar el comportamiento de un modelo numérico es mediante el índice llamado de **correlación de anomalías** (*ACC*). En la **figura 1.1.b** aparece representada la evolución temporal del periodo de predicción para el cual la correlación de anomalías es de un 60%. Suponiendo que este porcentaje se considere como el valor umbral para definir una predicción como válida o útil, podemos observar en la figura como, por ejemplo para Europa, en los últimos 17 años se ha pasado de un periodo de 5.3 a 6.7 días. La mejora ha sido más marcada en el Hemisferio Sur, debido al aumento de los datos de observación, principalmente la inclusión de datos de satélite en la construcción de los análisis.

Este aumento gradual del periodo de validez de la predicción se debe a dos causas:

- a) Disponibilidad de análisis más fiables (mejor descripción de las condiciones iniciales).
- b) Formulación más completa del modelo.

Recordemos que Bjerknes (1904) al formular matemáticamente el problema de la predicción del tiempo ya mencionó estas dos causas: "las condiciones necesarias y suficientes para una solución racional del problema de la predicción meteorológica son, por una parte, el conocimiento con suficiente precisión del estado de la atmósfera en un momento dado y, por otra, las leyes que gobiernan el movimiento atmosférico".

En el primer punto intervienen, a su vez, dos factores; por una parte, la calidad de los datos de observación y, por otra, el sistema de asimilación de los mismos para construir el análisis. Es importante destacar que en la calidad del análisis ha intervenido más la asimilación (la forma de incluir las observaciones en el análisis) que las mejoras en el sistema de observación. Esto se ha comprobado durante el proyecto de reanálisis del CEPPM (Gibson et al. 1996). Durante el mismo periodo que el representado en la figura 1.1.b se han generado de nuevo predicciones con el mismo sistema de asimilación de datos y el mismo modelo, encontrándose que la curva de la calidad de estas predicciones apenas mostraba variación temporal, era por lo tanto prácticamente estacionaria. Esto indica la relativamente escasa influencia de los sistemas de observación frente a sistemas de asimilación y formulación del modelo en cuanto a las mejoras en la calidad del análisis se refiere.

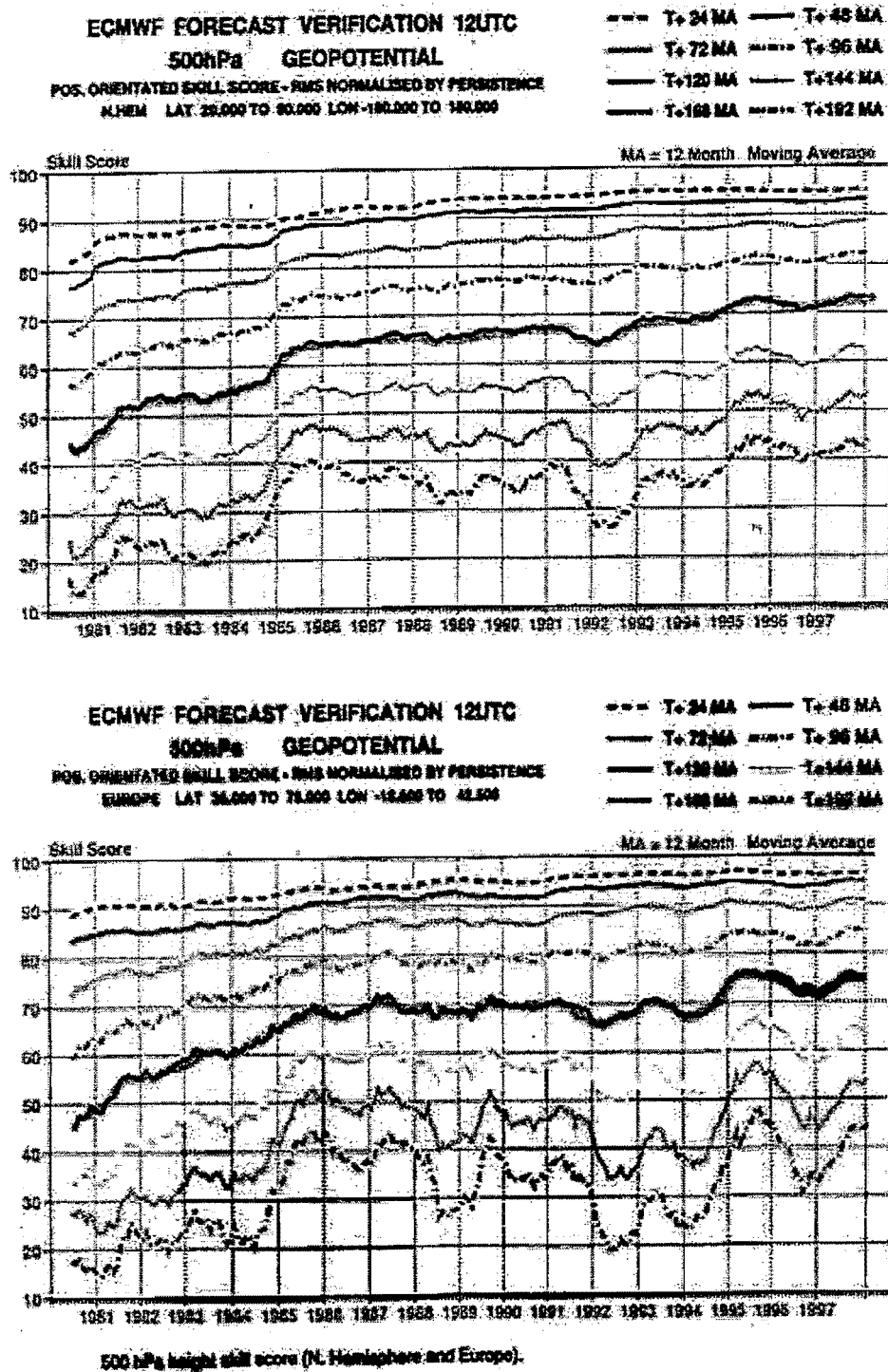


Fig.1.1.a.- Evolución del índice de pericia (Skill Score). Arriba: Hemisferio Norte. Abajo: Europa

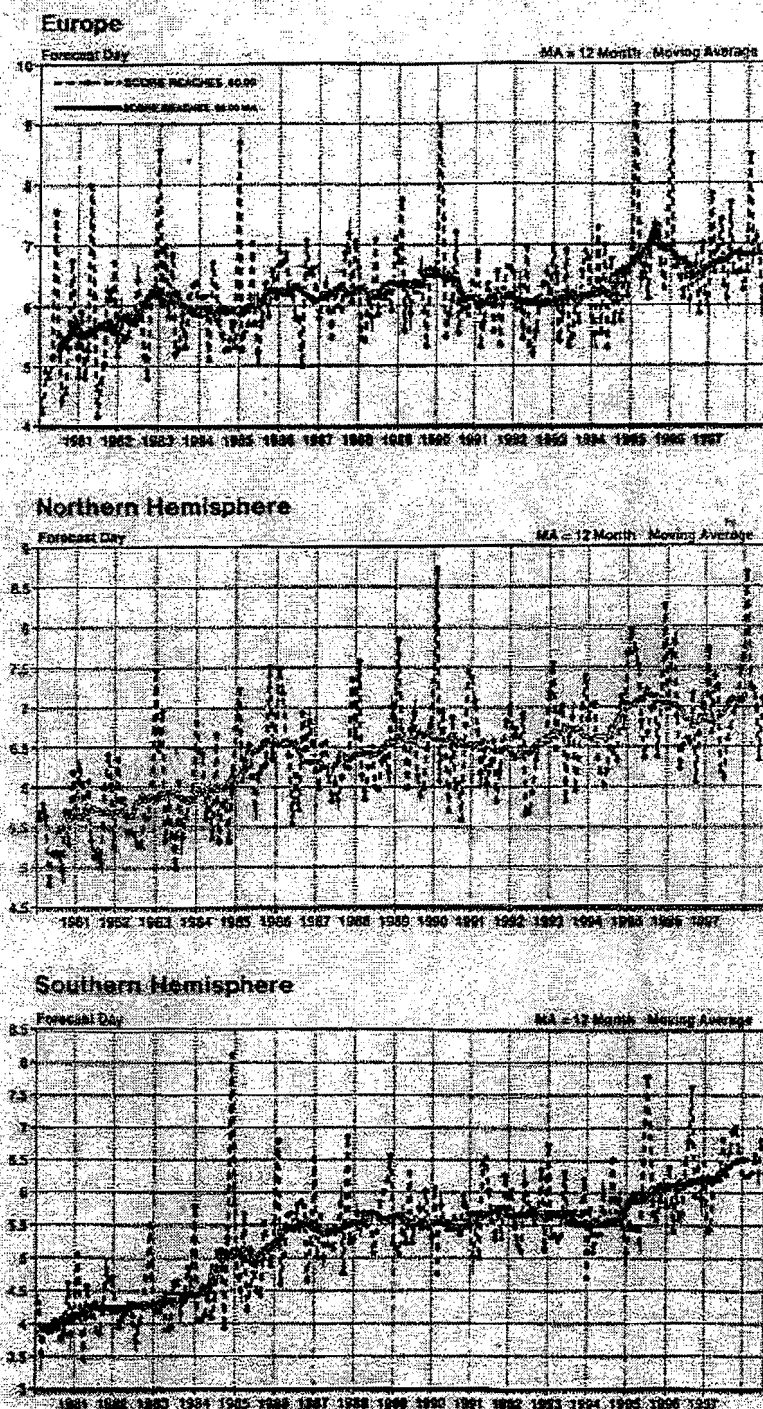
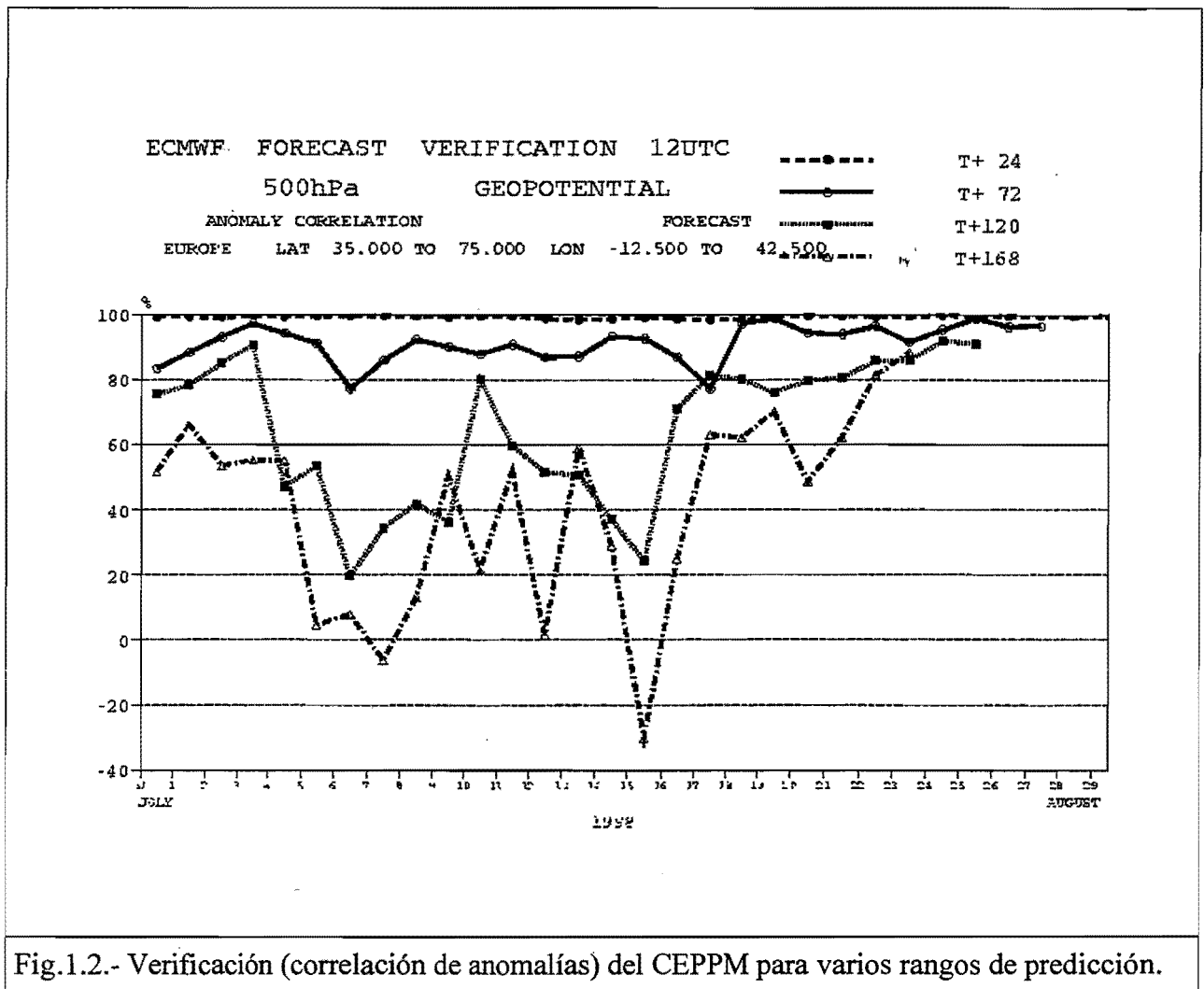


Fig.1.1.b.- Evolución temporal del rango de predicción con Skill Score=60%. Arriba: Europa. Medio: Hemisferio Norte (H.N.). Abajo: H.S.

A pesar de la cada vez mayor calidad de las predicciones meteorológicas, la mejora de los modelos globales de alta resolución (incluyendo los avanzados sistemas de asimilación de datos) no está consiguiendo predicciones fiables mas allá de unos pocos días. Durante los primeros días de predicción ésta es más precisa, pero no suele ser válida mas allá de los 3-7 días, dependiendo del régimen atmosférico (**figura 1.2**: índices de verificación del modelo CEP para varios periodos de predicción).



A las fuentes de error de la predicción ya comentadas, Lorenz añade una más que está asociada con la primera. La existencia de errores, aunque sean pequeños en el conocimiento del estado inicial de la atmósfera, impone una fuerte limitación en la validez de los modelos numéricos. Lorenz (1963, 1965, 1969) afirmó (aproximadamente) lo siguiente: "los errores en las condiciones iniciales, NO IMPORTA COMO SEAN DE PEQUEÑOS, imponen un límite en la validez temporal de la predicción". El más pequeño error en la especificación de cualquier

variable meteorológica (viento, presión, temperatura, ..) en algún lugar del mundo se amplificará, al cabo de un cierto número de días, dando lugar a una predicción sin valor alguno. En otras palabras, la atmósfera es un SISTEMA CAOTICO. Lorenz define el CAOS como: "Sistemas o fenómenos donde estados que parecen idénticos, pero que en realidad no lo son, pueden evolucionar hacia estados claramente diferentes"; estos sistemas dependen, entonces, de forma sensible de las condiciones iniciales (Conferencia de Lorenz en la Universidad de Reading; UK. 1997). De acuerdo con Lorenz, el límite máximo teórico para el que la predicción es válida es de aproximadamente dos o tres semanas; predicciones mas allá de este periodo no aportan nada a la climatología (no tienen pericia o *skill*). De otra forma, los mínimos errores que pueda haber en las condiciones iniciales requieren unas dos semanas en afectar a la configuración sinóptica. La *predecibilidad* de la atmósfera es, por lo tanto, limitada. Esta predecibilidad está asociada a un problema de valores iniciales (lo que ocurre en la predicción meteorológica con un modelo atmosférico y en la predicción estacional con un modelo acoplado: oceano-atmósfera) y se denomina *predecibilidad de primer tipo*. Cuando nos referimos a la incertidumbre de un sistema dinámico ante una modificación en el valor de una variable, por ejemplo como cambiará el clima duplicando la cantidad de dióxido de carbono, entonces se trata de *predecibilidad de segundo tipo*. En este documento nos referiremos únicamente a la primera.

En la **figura 1.3** se representan los errores del análisis y la evolución de estos a errores de predicción, mediante la llamada Función de Distribución de Probabilidad (PDF). La evolución de esta función pasa por varias fases: a) a b) fase lineal; b) a c) no lineal débil; c) a d) no lineal fuerte. La predecibilidad disminuye a partir de a) y desaparece en e). La duración de estas fases depende del tamaño de las isopletas (isosuperficies de la PDF); cuanto mayor sea el tamaño de los errores del análisis menor es la duración. Para errores de aproximadamente la desviación standard del error del análisis la PDF evoluciona linealmente durante 2-3 días y el comportamiento débilmente NO lineal se da durante unos 7 días.

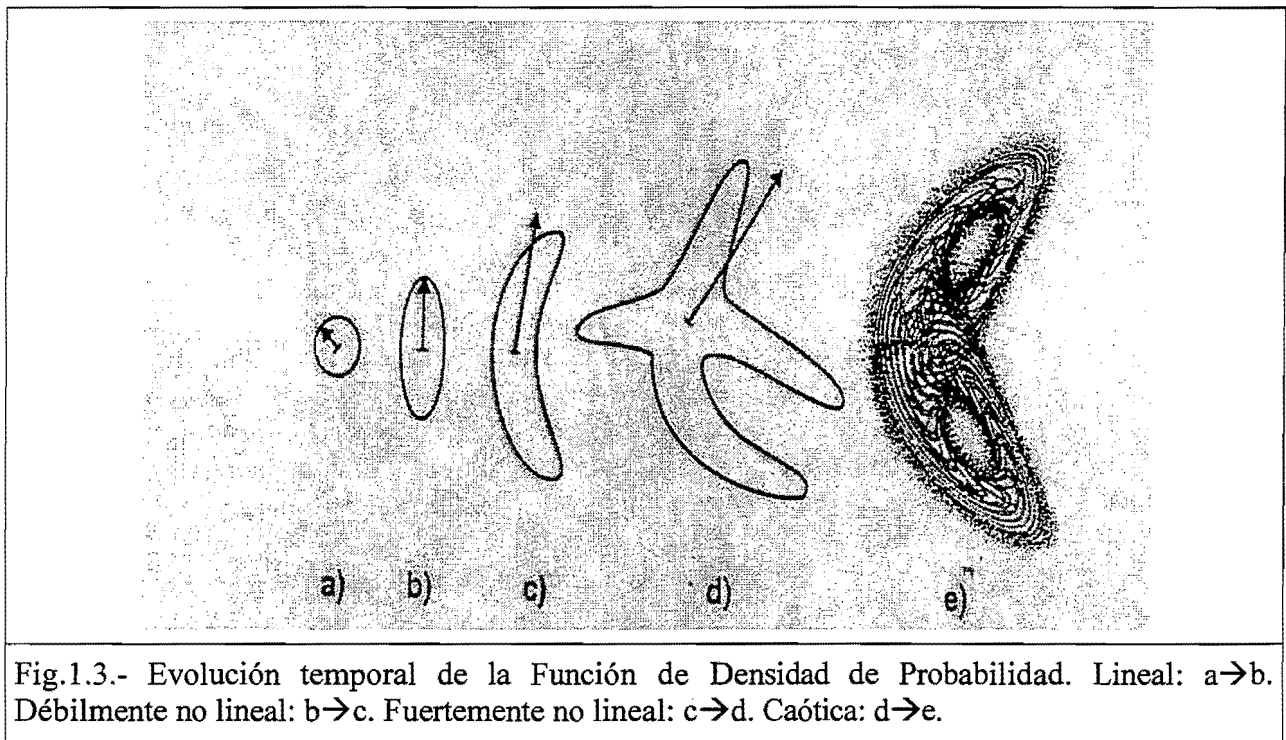
En este punto conviene aclarar que:

* por una parte no nos estamos refiriendo a la predicción estacional (**figura 1.4.a:** predicción de anomalía de precipitación media; **figura 1.4.b:** predicción de probabilidad de anomalía positiva de precipitación) sino a la predicción meteorológica día a día.

* por otra parte, aun NO nos encontramos en el caso de errores MUY PEQUEÑOS en el análisis ni disponemos de un modelo perfecto. Por lo tanto, es de esperar que, disminuyendo los errores del análisis y mejorando el modelo en los aspectos de formulación adiabática, parametrización de la física, el periodo de validez de la predicción determinista continuará aumentando aunque, probablemente, de forma lenta.

Está muy claro que no nos podemos fiar totalmente del modelo operativo para elaborar la predicción de medio plazo. En este punto nos podemos preguntar:

Qué estrategia se ha de seguir con los modelos numéricos de forma que las predicciones resultantes de los mismos sean útiles en el medio plazo?



No podemos hacer NADA acerca del hecho de que la atmósfera solo es predecible para un número finito de días. Lo que sí se puede hacer es, entre otras cosas, intentar prever la fiabilidad del modelo, la cual estará asociada a la predecibilidad de la atmósfera para cada día.

El uso de solo un modelo y una única pasada para la elaboración de la predicción da lugar a una predicción DETERMINISTA. Cuando se consideran otras salidas de modelos como puede ser la predicción del día anterior, otros modelos, la predicción surge de un consenso de esas fuentes de información; aunque, la predicción en este caso también puede redactarse de forma determinista, puede entrar en juego el concepto de predicción PROBABILISTICA. Esta se puede definir como aquella predicción que está elaborada con términos que expresan probabilidad y/o que incluye varios escenarios alternativos (ver más adelante).

La estrategia seguida por el CEP y el NCEP ((National Centers for Environmental Prediction) se basa en la suposición de que los errores de predicción se deben **fundamentalmente** a errores del análisis de partida. Este análisis que es el mejor que, en estos momentos, se puede construir, NO es perfecto; conocemos, por tanto, la atmósfera solamente de forma aproximada.

Con intención de tener en cuenta los posibles errores del análisis, éste se modifica ligeramente dando lugar a un conjunto de análisis perturbados. Para cada uno de estos análisis se ejecuta un modelo de predicción (de menor resolución al operativo) dando lugar a un conjunto de predicciones validas para un determinado rango temporal y para la misma zona geográfica. Esta técnica de predicción se conoce como Sistema de Predicción por Conjuntos (*EPS: Ensemble Prediction System*).

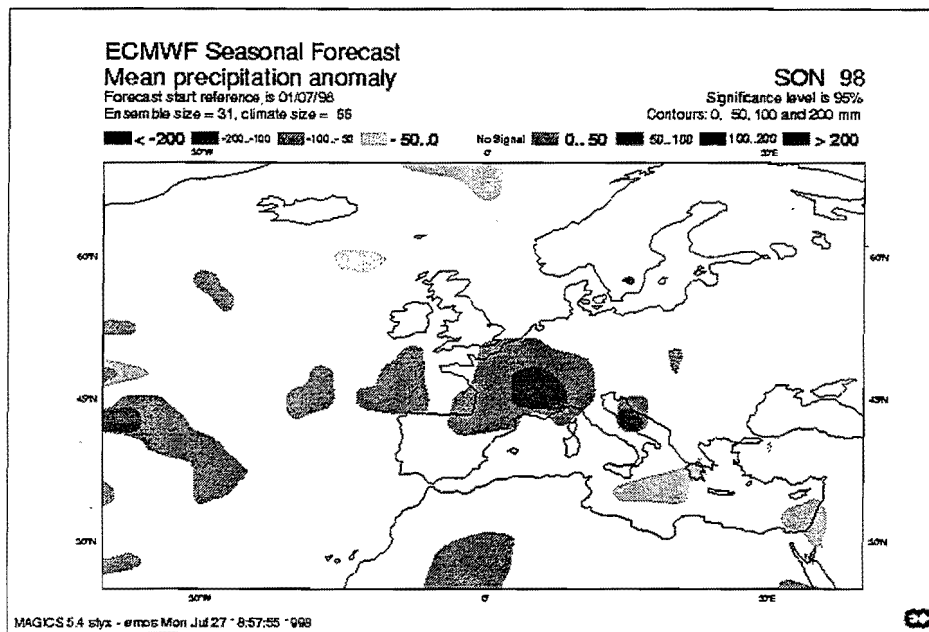


Fig.1.4.a.- Predicción estacional: anomalía de precipitación media para el período Sep, Oct. y Nov. de 1998.

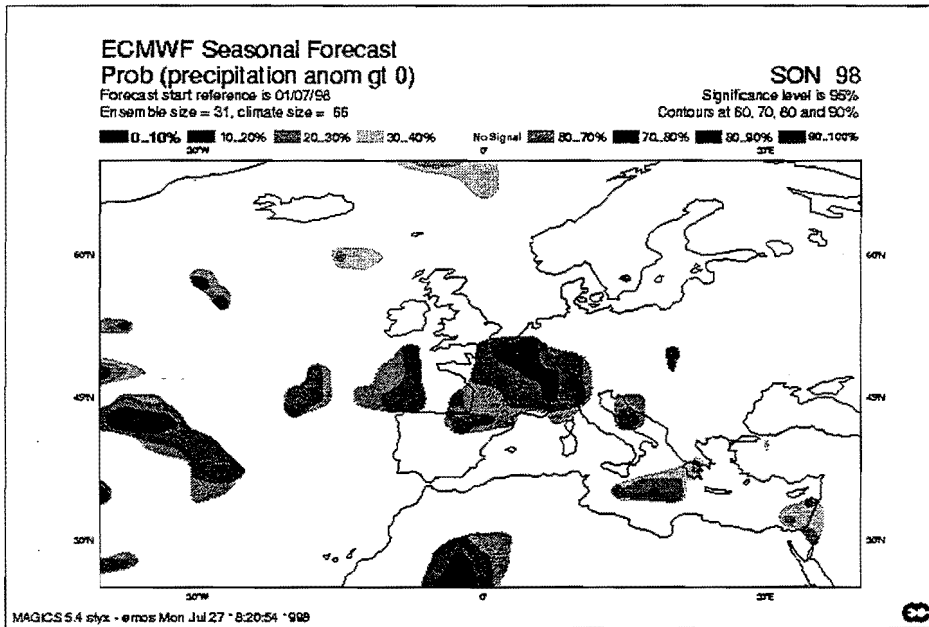
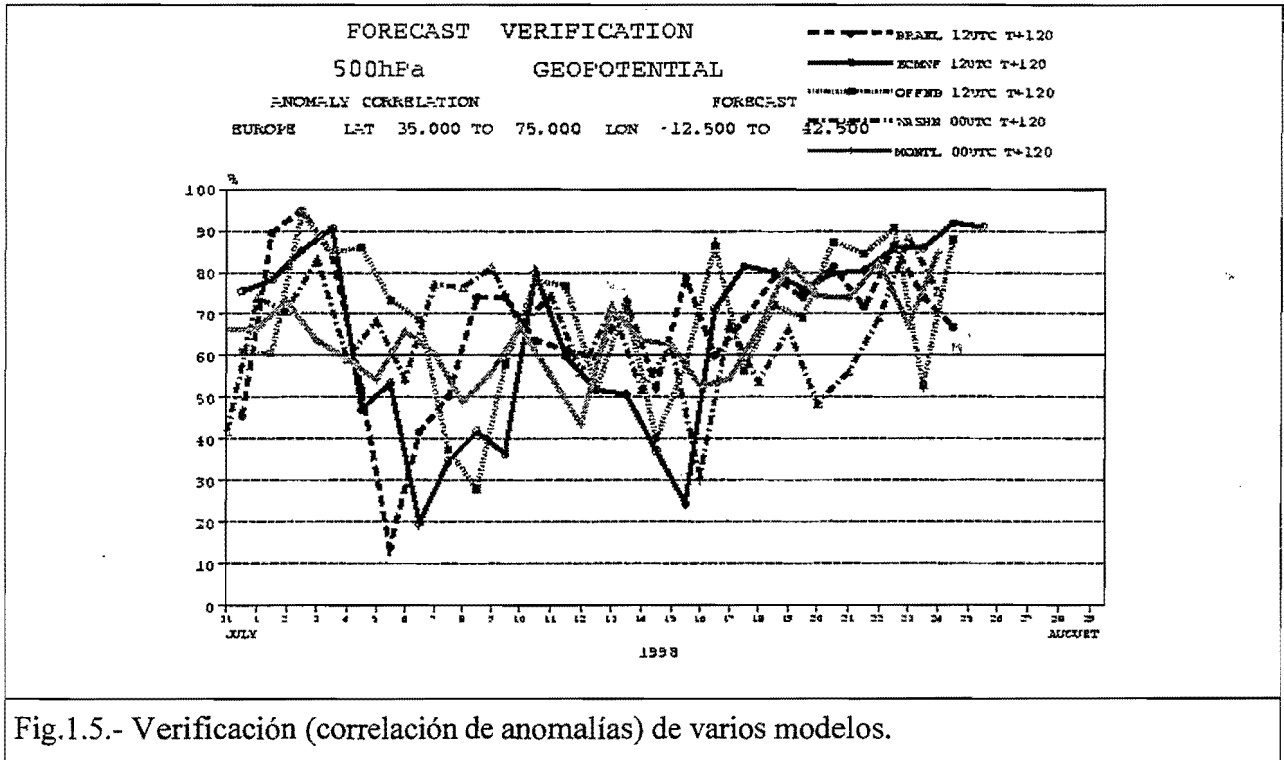


Fig.1.4.b.- Predicción estacional: probabilidad de precipitación > 0 para el período Sep, Oct. y Nov. de 1998.

Hasta hace poco los errores del análisis se tenían en cuenta mediante la consideración de varias pasadas (CONSISTENCIA) y/o varios modelos (**figura 1.5**: índices de verificación de varios modelos; **figura 1.6**: campos de varios modelos). Esto constituye también un conjunto de predicciones: sistema de predicción por conjuntos del hombre pobre (*poor man ensemble*).



Modelos / Geopotencial en 500 hPa

17 Ago. 98 / D + 5 / valido para: 22 Ago. 98, Sabado

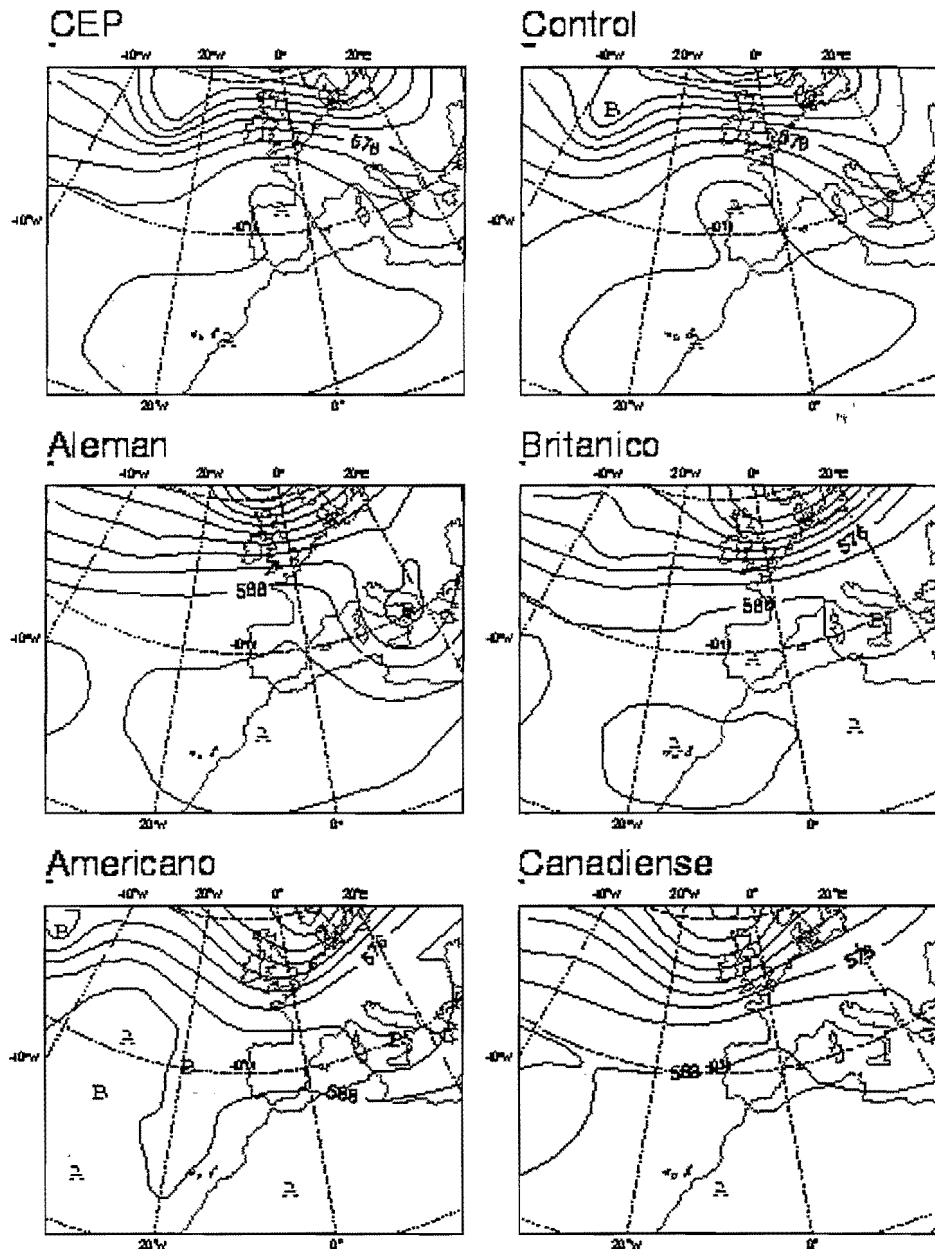


Fig.1.6.- Ejemplo del campo Z-500 de varios modelos

2. DESCRIPCION DEL EPS

2.1. El EPS en el CEPPM

2.2. El EPS en el NCEP

2.3. Comparación entre ambos

Como se mencionaba en la introducción, la estrategia del EPS (CEPPM y NCEP), se basa en la suposición de que los errores de predicción se deben principalmente a errores del análisis de partida. Un sistema de predicción construido de esta forma, tendrá éxito solamente si el modelo de predicción es lo suficientemente bueno como para considerar los errores de dicho modelo pequeños frente a los errores del análisis.

La forma de tener en cuenta los errores del análisis (llamado a partir de ahora, análisis de Control) es considerar perturbaciones pequeñas en diferentes regiones del espacio. A partir de estas perturbaciones se origina un conjunto de análisis perturbados y a partir de estos, un conjunto de predicciones.

Los errores del análisis tienen su origen, por una parte, en los errores de rápido crecimiento generados dinámicamente por el uso de los sucesivos campos previos (*first guess*) (En la **figura 2.1.a** y **figura 2.1.b** se representan gráficamente los llamados incrementos del análisis, definidos como la diferencia entre análisis y *first guess*) y, por otra, en la falta de calidad de los datos y sistema de asimilación de los mismos; sin embargo, estos datos de observación deberían ser capaces de corregir los errores del *first guess*. De todas las perturbaciones que se pueden aplicar al análisis de Control, solamente unas pocas, del orden de decenas ($O(10)$), son las que, desde el punto de vista dinámico más rápidamente pueden crecer en una región y tiempo determinados. Estas perturbaciones, asociadas con direcciones inestables en el espacio de las fases de la atmósfera, son las que más nos interesan, por las siguientes razones:

- los errores de predicción proceden, en buena parte, de estas perturbaciones (ver más abajo, apartado 2.1).
- son fácilmente identificables mediante métodos matemáticos. Se trata de encontrar las correspondientes direcciones en el espacio de las fases de la atmósfera.
- es un número manejable, varias decenas, que permite a los centros operativos de predicción muestrear bastante bien el estado inicial de la atmósfera.

La otra parte de los errores de predicción se encuentra en perturbaciones dinámicamente neutras o en decadencia. El número de estas es del orden del número de variables de un modelo

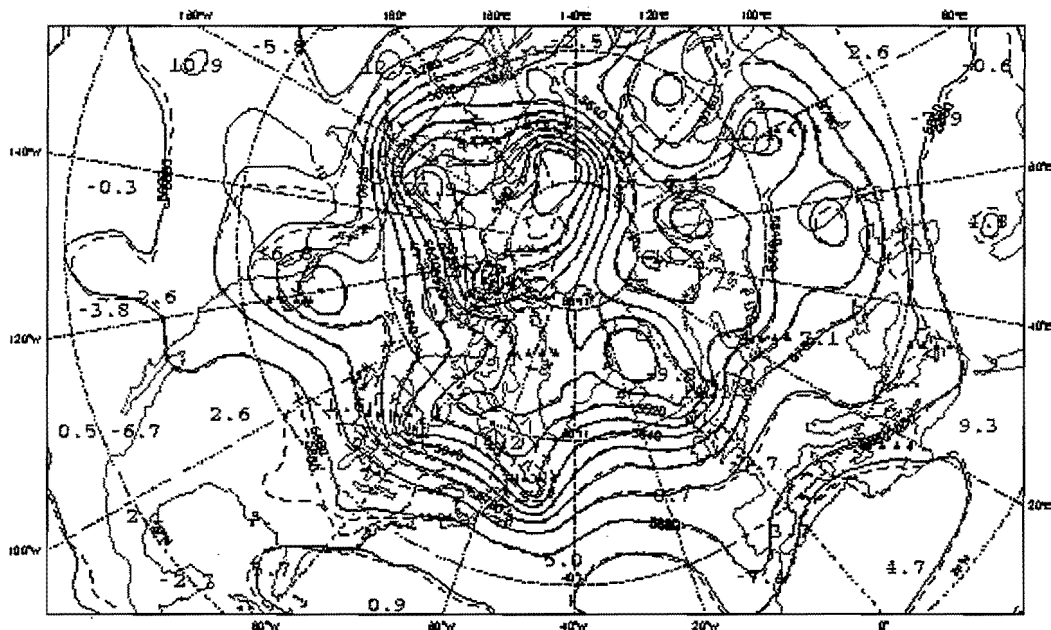
numérico $O(10^{**6})$. Es evidente que no se puede muestrear bien el subespacio de estos posibles errores con tan solo unas pocas perturbaciones. Houtekamer y otros (1996) hicieron experimentos de generación de análisis perturbados a partir de perturbaciones de los dos tipos. Se considera que el aporte de las del segundo tipo es muy poco importante; de ahí la estrategia seguida por el CEPPM y el NCEP, de focalizarse únicamente en las perturbaciones de máximo crecimiento.

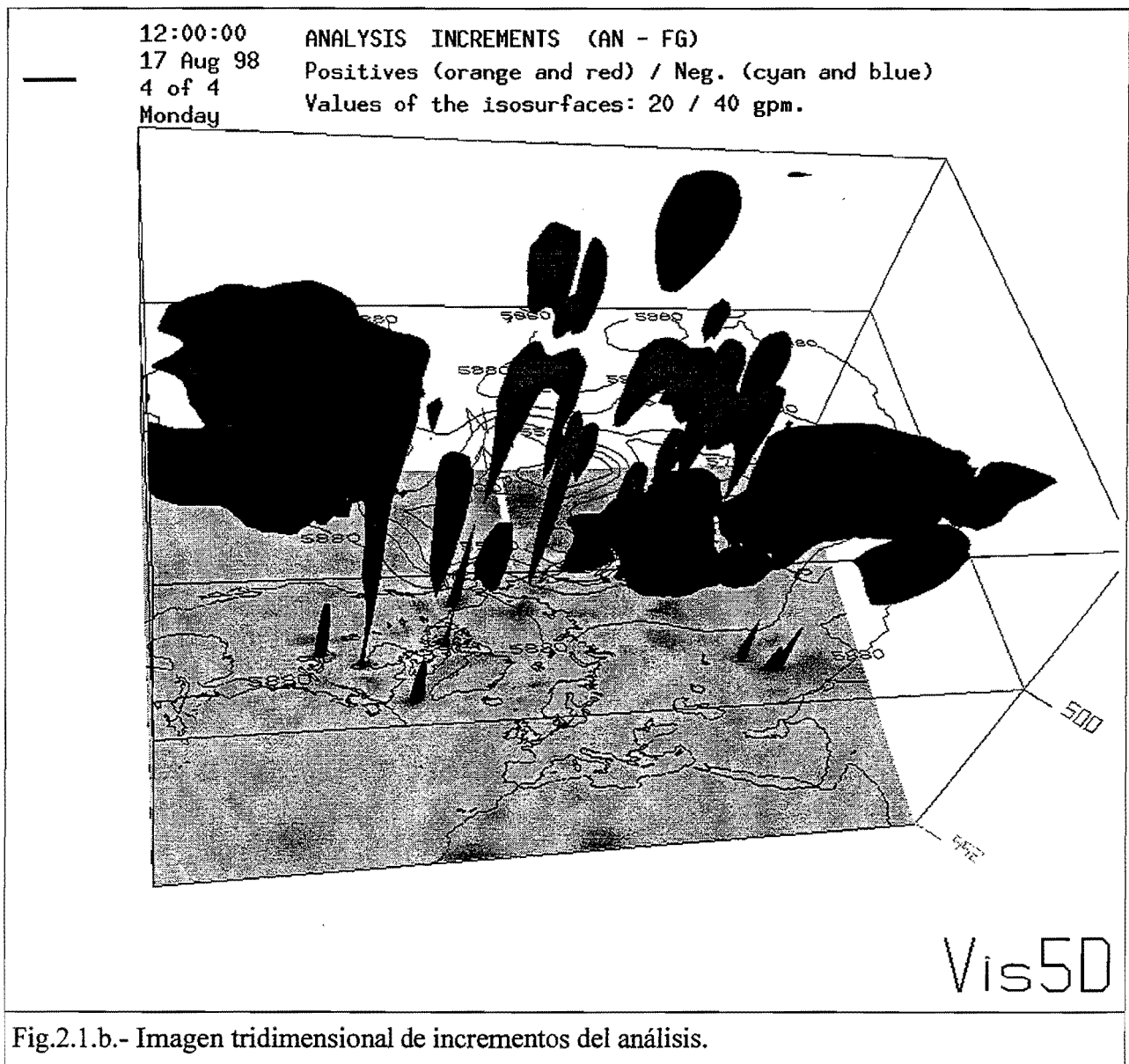
Se trata, entonces, de identificar aquellas direcciones del espacio de las fases de la atmósfera asociadas con inestabilidades dinámicas que determinarán el fuerte crecimiento de pequeñas perturbaciones.

Las técnicas utilizadas por el CEPPM y el NCEP, para la generación de las perturbaciones, son diferentes.

Incrementos del análisis: $Z(\text{ana}) - Z(\text{FG})$

Fecha: 17 Ago. 98 a las 12 UTC





2.1. EL EPS EN EL CEPPM

2.1.1. Generación de las perturbaciones iniciales

Lorenz (1965) enunció que para un determinado periodo de tiempo en el que el modelo presenta un comportamiento lineal, las perturbaciones de crecimiento máximo pueden obtenerse con facilidad a partir de conceptos matemáticos, principalmente, el concepto de Vectores Singulares de un operador lineal.

2.1.1.1. Vectores Singulares (VS)

Consideremos una versión simplificada lineal A del modelo operativo del CEPPM de ecuaciones:

$$\frac{dx}{dt} = Ax \quad (1)$$

siendo la solución:

$$x(t) = Lx_0 \quad (2)$$

donde L es el Propagador Lineal.

La energía total de la perturbación en el instante t viene dada por la norma de la perturbación:

$$\|x(t)\|^2 = (Lx_0; Lx_0) = (x_0; L^* Lx_0) \quad (3)$$

donde L^* es el operador adjunto de L .

Las propiedades del operador simétrico $L^* L$ permiten definir la ecuación de autovalores y autovectores:

$$L^* L v_i = \alpha_i^2 v_i \quad (4)$$

siendo α_i los autovalores y v_i los autovectores de $L^* L$, que a su vez, son los valores y **vectores singulares**, respectivamente, del operador lineal L .

El factor de amplificación de un VS es:

$$\alpha_i = \frac{\|x_i(t)\|}{\|x_i(t_0)\|}$$

Propiedades de los VS:

- los VS definen las direcciones de máxima inestabilidad del espacio de fases de la atmósfera, que están asociadas con el máximo crecimiento de las perturbaciones (según Lorenz).
- dependen del llamado *intervalo de tiempo de optimización* T (periodo de tiempo durante el cual se considera una evolución lineal de las perturbaciones y en el que, por tanto, el modelo A tiene validez; suele estar comprendido entre 36 y 48 horas) y de la definición de *norma* de la perturbación.
- los VS de mayor crecimiento, para $T = 48$ horas, tienen factores de amplificación entre 10 y 20.

- tienden a estar localizados y concentrados en las principales regiones de cizalladura vertical de viento (W del Atlántico y Pacífico).

Relación VS - Errores del Análisis:

Una vez que sabemos como generar estructuras en las condiciones iniciales (a través de los VS) que presentan un crecimiento máximo, vamos a ver que relación tienen con lo que realmente nos interesa: los errores de la predicción y del análisis. Trataremos de responder a la pregunta ¿son adecuados los VS para generar las perturbaciones del EPS?

Las perturbaciones más idóneas que podríamos considerar serían aquellos errores del análisis que presentan un crecimiento mayor, evolucionando hacia grandes errores de predicción; lo cual no implica, necesariamente, que se correspondan con grandes errores del análisis.

* Errores del análisis y campo de sensibilidad S:

La evolución de los errores del análisis viene dada según la ecuación (2):

$$e(t) = Le(t_0) \quad (5)$$

Los errores $e(t)$ pueden seguirse hacia atrás haciendo uso del operador L^* :

$$S = L^* e(t) \quad (6)$$

Matemáticamente, S es el gradiente de la norma de energía de $e(0)$ y representa el campo de sensibilidad del error de predicción a las condiciones iniciales. Este campo describe las componentes más inestables del error del análisis.

* Campo de sensibilidad S y VS:

No conocemos, a priori, el campo de sensibilidad S, pero existe una relación entre S y los VS, que justifica el uso de éstos para generar las perturbaciones:

De las ecuaciones previas (5) y (6):

$$S = L^* Le(t_0) \quad (7)$$

Expandiendo $e(t_0)$ en términos de los VS:

$$e(t_0) = e_1 u_1 + e_2 u_2 + e_3 u_3 + \dots + e_N u_N \quad (8)$$

y haciendo uso de la definición de los VS, ecuación (4), llegamos a:

$$S = \alpha_1^2 e_1 u_1 + \alpha_2^2 e_2 u_2 + \dots \quad (9)$$

El campo S está dominado por los VS de mayor crecimiento. Para $T = 48$ horas, el valor singular $\alpha_1^2 \approx 200$.

2.1.1.2. Perturbaciones iniciales

De todos los VS se seleccionan $N/2$ (N es el número de análisis y predicciones perturbados que se pretenden construir, actualmente $N=50$), con los siguientes criterios:

- los primeros VS son siempre seleccionados (asociados con los mayores autovalores de L^*L).
- no se permite que una zona geográfica esté sobrerrepresentada por VS, para ello un VS será seleccionado, solamente, si la mitad de la energía total está localizada fuera de las regiones representadas por VS ya seleccionados. De esta forma se evita solapamiento de los VS.

Los VS seleccionados están muy localizados, por lo que se les aplica una rotación en el espacio de las fases para dar lugar a $N/2$ campos con una distribución espacial más uniforme. También son escalados para que tengan un tamaño comparable al de los errores locales del análisis. Para controlar el cambio de escala se utiliza un factor constante α , definido como el cociente máximo entre la amplitud de la perturbación y el error del análisis. El resultado son las llamadas PERTURBACIONES INICIALES (**figura 2.2**). Hay que tener en cuenta que estas se calculan y aplican en todo el globo, si bien son fundamentalmente las generadas en el hemisferio norte las que más afectan a Europa; en la **figura 2.3.a** aparecen las modificaciones del análisis correspondientes a la perturbación número 20 y en la **figura 2.3.b** la estructura tridimensional.

Una de las hipótesis en que se basa el EPS es: las perturbaciones con tamaño similar al de los típicos errores del análisis evolucionan casi de forma lineal hasta el tiempo de optimización. En otras palabras, un límite superior del intervalo de tiempo de optimización está determinado por la validez de la aproximación lineal utilizada para el cálculo de los vectores singulares. Este aspecto fue estudiado por Buizza (1995), concluyendo que la evolución temporal de las perturbaciones, obtenidas a partir de los VS mediante el modelo T21L19 con $T = 48$ horas y $\alpha \leq 2$, era en buena medida lineal.

2.1.2. Generación de las N condiciones iniciales

Las diferentes condiciones iniciales o análisis perturbados se obtienen a partir del análisis de Control (NO perturbado), sumando y restando las $N/2$ perturbaciones iniciales.

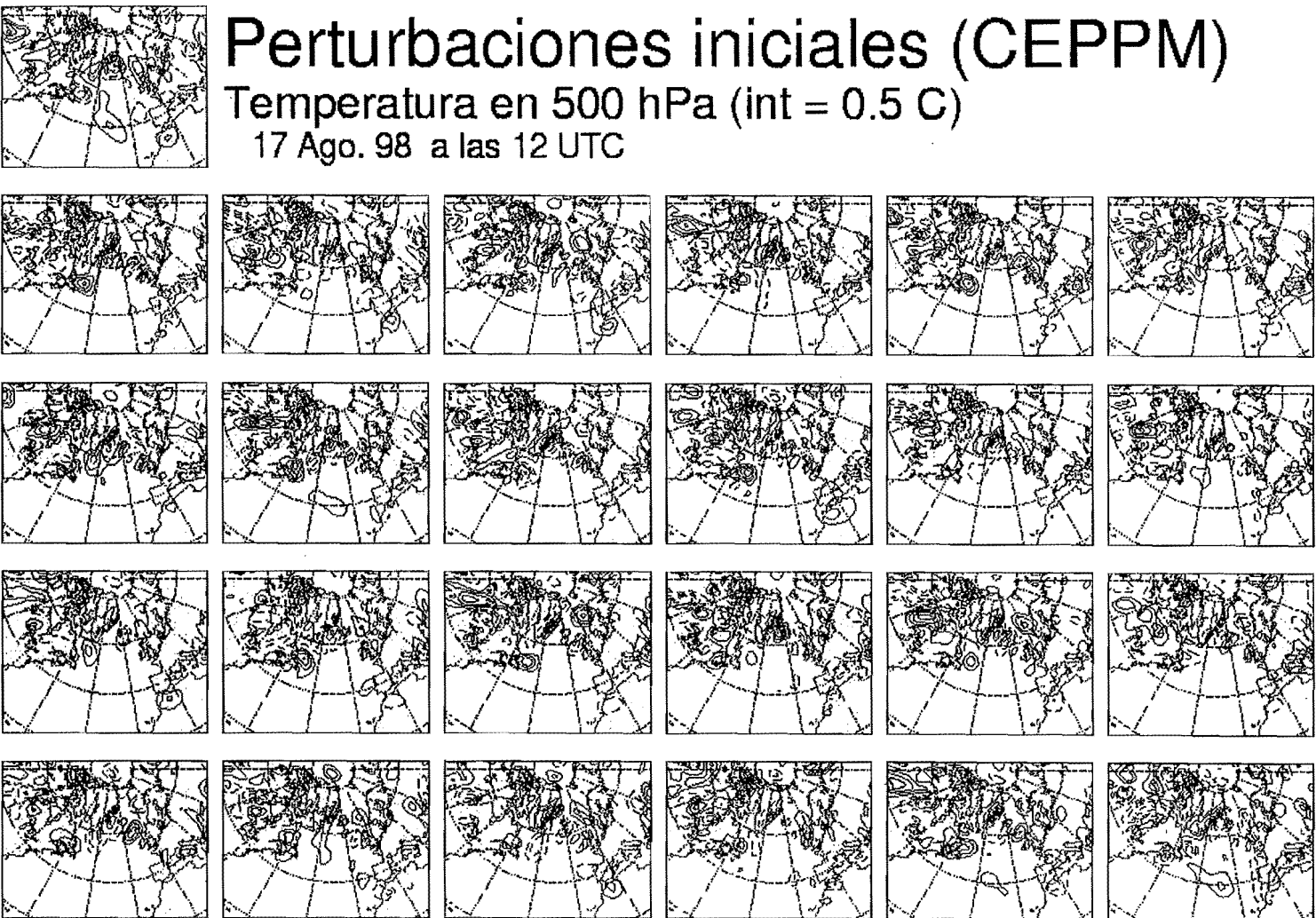


Fig.2.2.- Perturbaciones iniciales.

Perturbacion inicial numero 20

Temperatura en 500 hPa (int = 0.5 C)

17 Ago. 98 a las 12 UTC

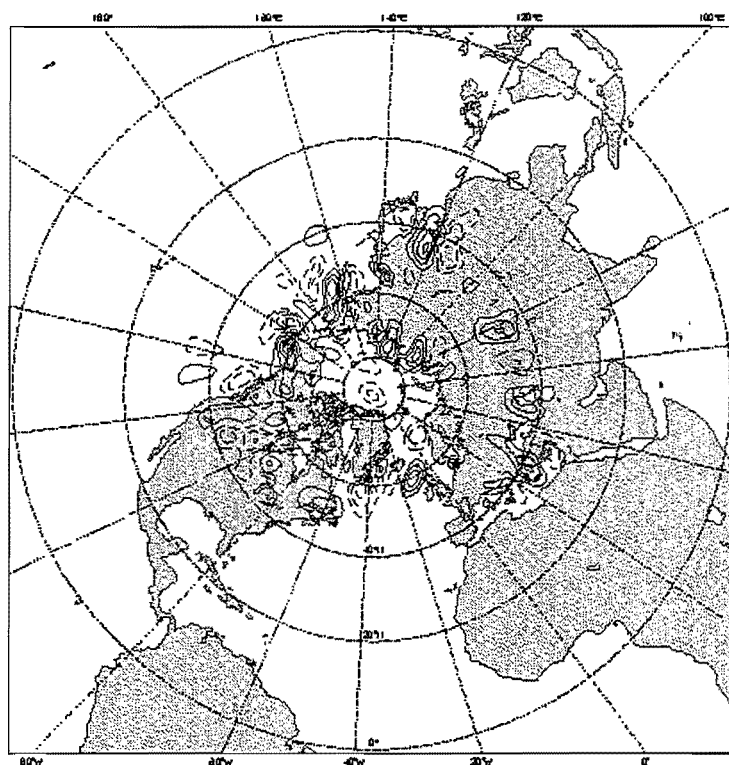


Fig.2.3.a.- Perturbación inicial número 20.

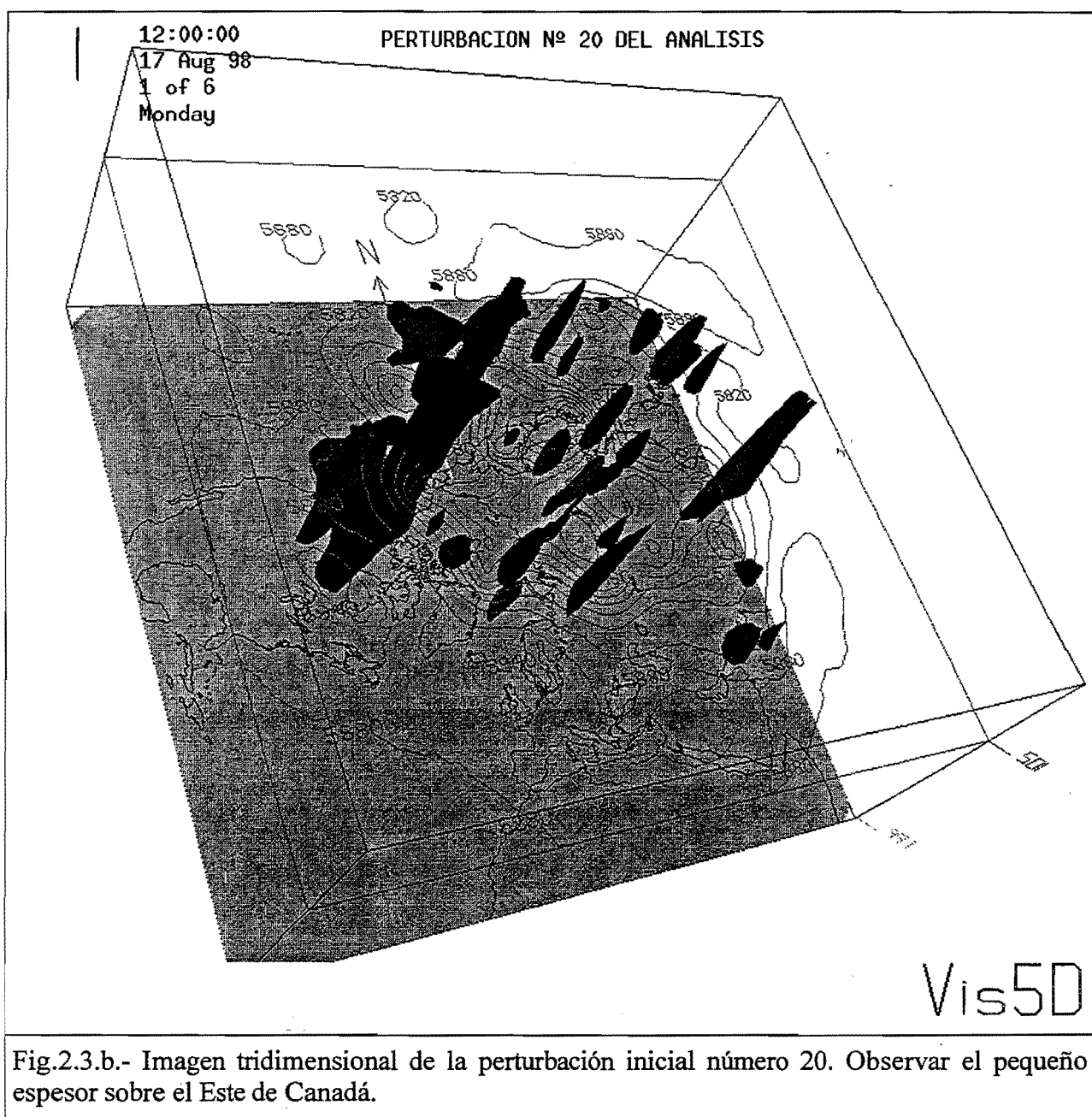


Fig.2.3.b.- Imagen tridimensional de la perturbación inicial número 20. Observar el pequeño espesor sobre el Este de Canadá.

2.1.3. Obtención del conjunto de N+1 predicciones

La integración numérica de los N análisis perturbados, mediante un modelo con menor resolución (T159L31) que el operativo (T319L31), da lugar a las N predicciones. Paralelamente, a partir del análisis no perturbado, también se genera la predicción de Control. Disponemos por lo tanto, además de la predicción del modelo operativo de alta resolución, de N+1 predicciones

para el mismo periodo de validez (hasta 10 días). En la **figura 2.4** se representan varias trayectorias del aire correspondientes a varias predicciones; en la **figura 2.5** aparecen todas las predicciones (Z-500): Control y miembros perturbados. En la **figura 2.6** se representan los valores de precipitación previstos por parte de las 51 predicciones; el crecimiento y decrecimiento, alternativamente, de estos valores refleja, aunque no siempre, la forma en que se han generado los correspondientes análisis perturbados (sumando y restando perturbaciones al análisis de Control). Las 51 predicciones se consideran **equiprobables**.

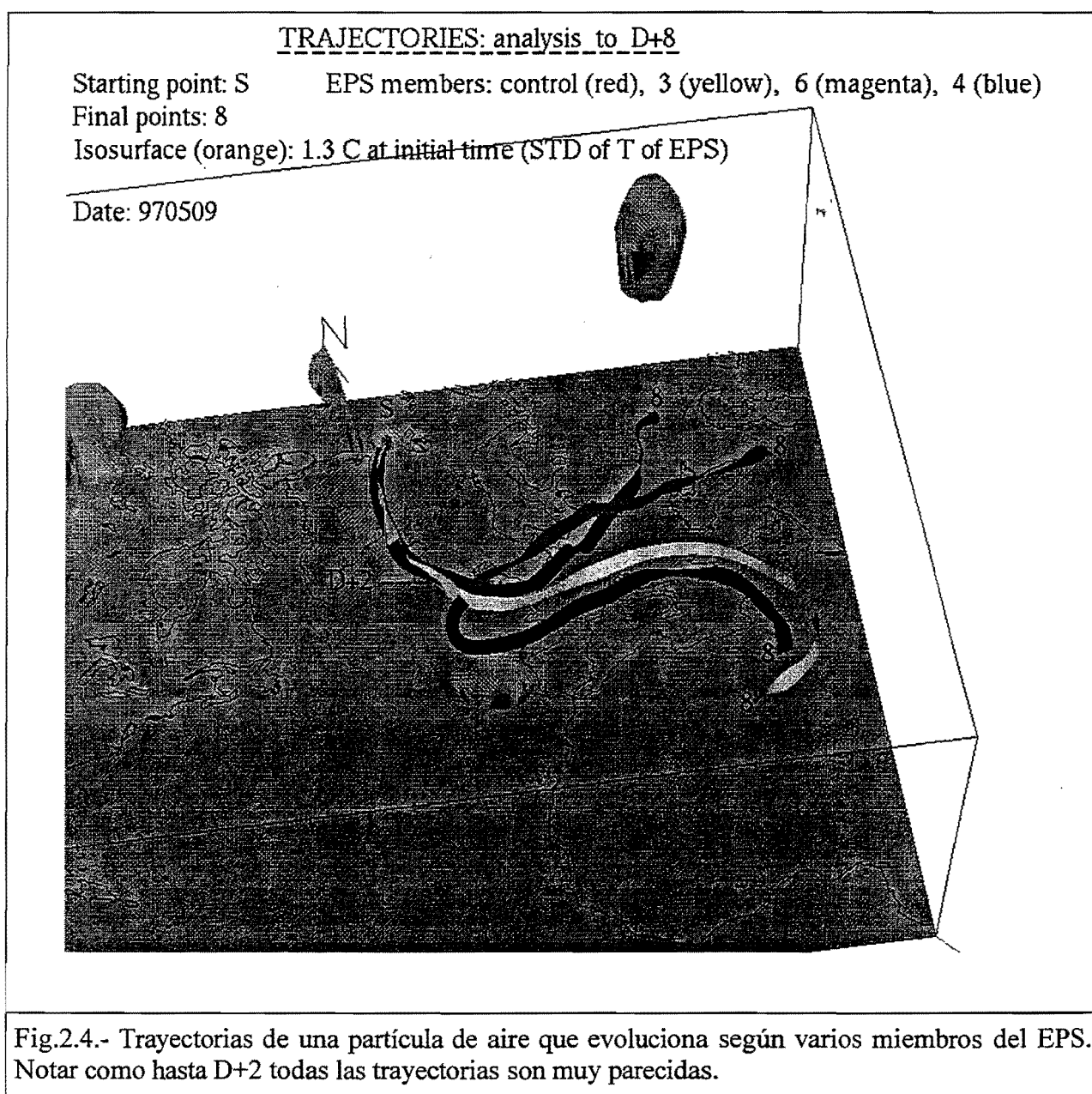
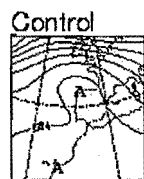


Fig.2.5.- "Sellos": Predicciones del EPS (Control + 50 miembros).



Predicciones del EPS: Control + 50 miembros

17 Ago. 98 / D + 5 / valido para: 22 Ago. 98, Sabado



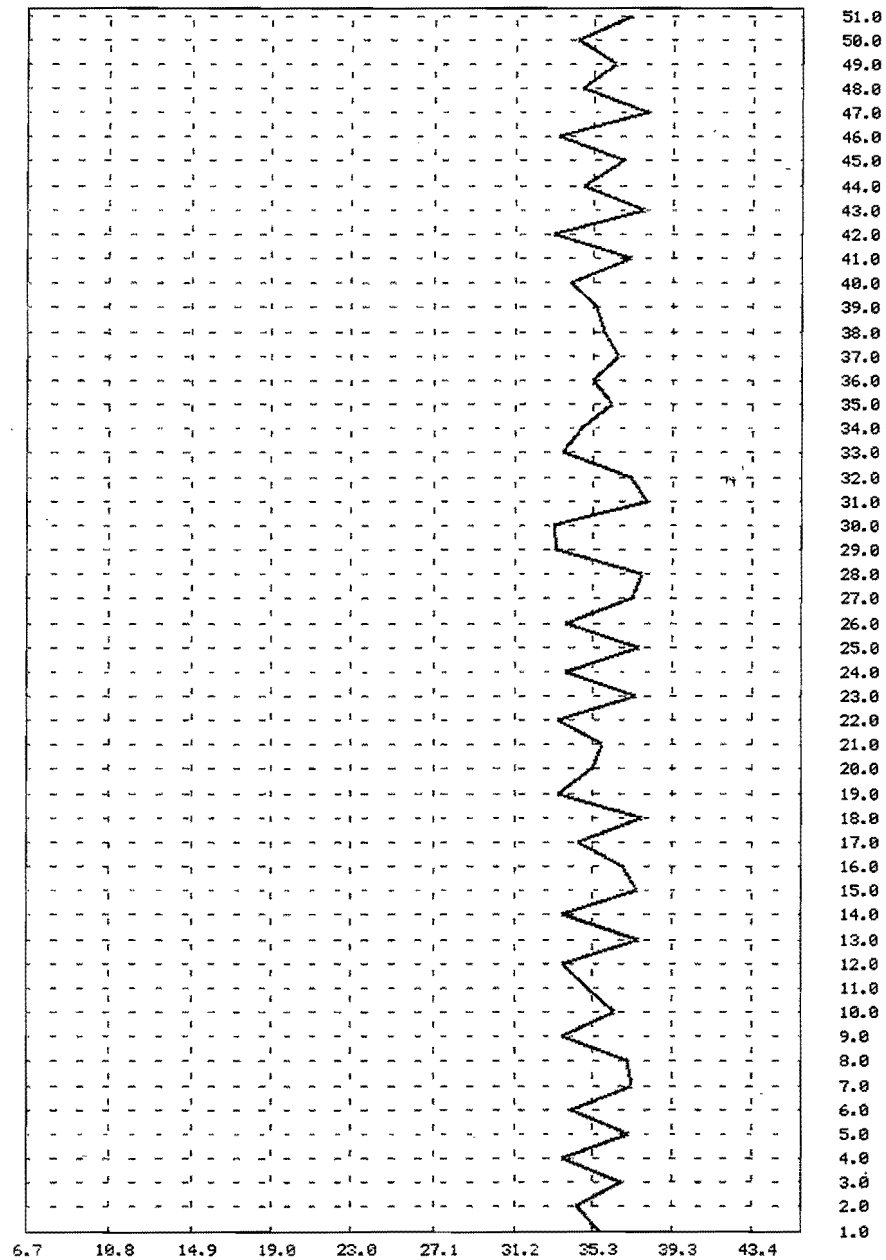


Fig.2.6.- "Sondeo Vertical" en un punto próximo a Alicante, de precipitación prevista por el EPS.

2.1.4. Breve historia del EPS en el CEPPM

Las predicciones del EPS están fuertemente influidas por:

- la forma en que se generan las perturbaciones iniciales
- el modelo de predicción utilizado para integrar los correspondientes análisis perturbados.

A continuación vamos a describir brevemente los cambios introducidos en el EPS desde su inicio:

**** Comienza la operatividad del EPS (19 de diciembre de 1992)***

En esta fecha, después de un mes de pruebas, comienza de forma operativa la obtención de productos del EPS, únicamente los sábados, domingos y lunes. El modelo simplificado para calcular los vectores singulares y, a partir de estos las perturbaciones, era el T21L19. En cuanto al tiempo de optimización, después de varias pruebas con distintos tiempos del intervalo: 12-72 horas, fue fijado en 36 horas. El tamaño de las perturbaciones iniciales estaba definido por el factor: $\alpha = \sqrt{2}$

Número de predicciones: 32 perturbadas y 1 no perturbada (Control); integradas con el modelo: T63L19 con un periodo de validez de 10 días.

**** Introducción de un operador de proyección local (20 de marzo de 1993)***

Durante el verano, en el Hemisferio Norte, el conjunto de predicciones mostraba pocas diferencias entre ellas. Para evitar este problema se modificó ligeramente la forma de cálculo de los VS en el H.N. El resultado fue un pequeño incremento de la dispersión en el H.N. durante el verano y casi despreciable durante el invierno.

**** Operatividad diaria (1 de mayo de 1994)***

**** Incremento de la amplitud inicial y del tiempo de optimización (23 de agosto de 1994)***

Evaluaciones del EPS mostraban una dispersión demasiado pequeña; en otras palabras, era frecuente que el análisis verificador "cayera" fuera del rango de las predicciones del conjunto. Para aumentar la dispersión, se decidió incrementar la amplitud inicial de las perturbaciones hasta $\alpha=2$.

Durante el invierno 1994/1995, se realizaron experimentos de "sensibilidad". Se trataba de identificar las mínimas perturbaciones que, introducidas en el análisis de Control, fueran capaces de reducir al máximo el error de la predicción D+2. Estas perturbaciones, llamadas campos de sensibilidad, fueron calculadas con la versión del modelo adjunto. De la comparación de los campos de sensibilidad y de los vectores singulares se pueden obtener algunas pistas sobre el papel de los vectores singulares en la explicación del crecimiento de los errores de predicción; para facilitar esta comparación, el intervalo de tiempo de optimización de los vectores singulares fue incrementado a 48 horas.

*** Aumento de la resolución del modelo para el calculo de los VS (14 de marzo de 1995)**

Varios estudios y experimentos, tales como la comparación de errores de predicción, campos de sensibilidad y VS, pusieron en evidencia que un aumento de resolución en el modelo para el calculo de los VS, de T21 a T42, era mas apropiado para captar las direcciones, en el espacio de las fases, dinámicamente relevantes. Los VS obtenidos con este modelo (T42L19) poseen una intensidad de amplificación mayor; debido a ello y para mantener comparable el tamaño de la dispersión del EPS con el error de la predicción de Control en el tiempo de optimización T=48 horas, fue necesario disminuir la amplitud inicial de las perturbaciones a $\alpha = \sqrt{1.5}$.

*** Nueva configuración (más miembros y mayor resolución) (10 de diciembre de 1996)**

Con el objetivo de incrementar la dispersión y la pericia (calidad) de las predicciones, se hicieron nuevos experimentos (Buizza et al., 1997a; Buizza et al., 1997b), que aconsejaron los siguientes cambios en la configuración del EPS operativo:

- aumento de la resolución horizontal y vertical del modelo con que se genera el conjunto de predicciones (Control y perturbadas); se ha pasado del T63L19 al T159L31. Este último no es muy diferente del T213L31 (hasta hace unos meses modelo operativo) ni tan siquiera del actual T319L31.
- el numero de miembros perturbados ha pasado de 32 a 50.

Estos cambios fueron posibles con el entonces nuevo Fujitsu VPP700; a ello contribuyo la reducción de tiempo de calculo que se obtuvo al implementar algunas mejoras en la parte numérica del modelo: introducción del esquema semi-Lagrangiano con dos pasos de tiempo y uso de "grid" lineal.

Algunas ventajas del aumento de la resolución del modelo son:

- el T159 amplifica más realistamente las perturbaciones, con lo que este modelo tendrá una mayor y, climatológicamente mas correcta, variabilidad sinóptica. Esto se ha de notar tanto para desarrollos baroclínicos intensos de pequeña escala como para configuraciones de gran escala.
- la teóricamente gran similitud entre el T159 y T213 casi asegura que este último se encuentre en el abanico de las predicciones del conjunto. Actualmente, el T319 es más fácil que no este en ese abanico.
- al aumentar la dispersión, es de esperar que disminuya el número de casos en que el análisis verificante se encuentra fuera del rango del EPS. A esta ventaja, también contribuye el aumento en el número de miembros.
- algunos parámetros meteorológicos de superficie, tales como temperatura a 2 m, viento a 10 m y precipitación deben tener un comportamiento mas realista debido a la mejor parametrización física de la convección y los flujos de humedad que el nuevo modelo incorpora.

- los errores de interpolación en puntos próximos a la costa quedan reducidos al considerar una máscara de tierra más detallada.
- la relación entre dispersión del conjunto y pericia de la predicción de Control debe mejorar con claridad.

*** *Inclusión de Vectores Singulares Evolucionados ("Evolved Singular Vectors")* (Marzo de 1998)**

Hasta esta fecha, como perturbaciones iniciales, solamente se consideraban aquellas que presentaban un crecimiento rápido durante el llamado periodo de optimización (48 horas). Una forma de incluir aquellas que han presentado un mayor crecimiento durante el periodo de asimilación de los datos es usar VS que crecen en el pasado y que han evolucionado hasta la hora del análisis. De esta forma las perturbaciones iniciales para un determinado día D (a las 12 UTC) se obtienen, por una parte a partir de los VS que crecen en el periodo D a D+2 y los VS que han crecido en el periodo D-2 a D.

Al igual que con las anteriores perturbaciones iniciales, se escalan en el instante inicial, de manera que en promedio sobre el Hemisferio Norte y en el periodo D+2, la dispersión del EPS se ajuste al error RMSE de la predicción de Control.

Los resultados previos a su implementación indican que:

- mejora la pericia (Skill) del EPS
- reduce el porcentaje de casos en que el análisis está fuera del rango del EPS, especialmente en el medio plazo cercano (D+3, D+4).

*** *Simulación de errores aleatorios del modelo debidos a la parametrización de procesos físicos* (Octubre 1998)**

El actual esquema de simulación puede considerarse como un primer intento de simular los errores aleatorios del modelo debidos a los procesos físicos parametrizados. Se basa en la idea de que estos errores son coherentes entre los diferentes módulos de parametrización y que tienen, además una cierta coherencia en las escalas temporal y espacial representadas por el modelo. El esquema supone que cuanto mayor es la tendencia del proceso físico parametrizado mayor es la componente del error aleatorio.

Puesto que el esquema se basa en factores determinados de forma aleatoria también se denomina física estocástica.

La inclusión de la física estocástica conlleva:

- aumento de la dispersión del EPS
- mejora del comportamiento del EPS, especialmente para la predicción de parámetros de superficie tales como la precipitación.

2.1.5. Nuevos desarrollos

**** Inclusión de física lineal en el cálculo de los VS en los Trópicos***

El EPS ha mostrado desde su comienzo muy escasa dispersión sobre la zona tropical. Aunque la predecibilidad de la atmósfera es, en general, mayor en esta zona que en latitudes extratropicales y por lo tanto habría que esperar una menor dispersión del EPS, no hay duda de que ésta es excesivamente pequeña. De forma que muy frecuentemente el análisis verificante está fuera del rango de predicciones del EPS. El problema del déficit de dispersión también se ha estado presentando en toda la evolución del EPS en las zonas extratropicales, si bien se ha mejorado bastante rápidamente a través, principalmente, del incremento de resolución del modelo de integración del EPS y del aumento del número de predicciones. Significativos avances se están dando a partir de 1998 con la inclusión de la física estocástica. Los últimos desarrollos, todavía en fase experimental, van a suponer un paso enorme en la mejora del EPS en los Trópicos: se trata de incluir, en el cálculo de los VS sobre la zona tropical, una variable fundamental, la humedad específica. Esta variable está todavía ausente en el EPS operativo.

El uso de la humedad en la obtención de los VS que darán lugar a las perturbaciones iniciales, ha requerido un cambio en la definición de la norma usada para definir los VS. Esta norma ha sido aumentada en un término que tiene en cuenta el crecimiento de la humedad específica.

En el CEPPM se han hecho varias pruebas; la comparación de EPS con y sin VS en la zona tropical (ambos casos sin perturbaciones estocásticas en la física) indica que, en el primer caso, la dispersión es considerablemente mayor.

El impacto de los VS en la zona tropical sobre el actual EPS (con física estocástica) se está investigando. Unos primeros resultados obtenidos en el grupo de predecibilidad del CEPPM, principalmente, por Jan Bakmeijer y Kamal Puri, muestran una mayor dispersión para el caso de EPS con VS sobre los Trópicos.

**** Incremento de la resolución horizontal***

El incremento de resolución del modelo del EPS de Noviembre de 1996 fue crucial para el aumento de la dispersión, disponer de una predicción de Control más parecida al modelo operativo y para una mayor calidad de los parámetros de superficie previstos por el EPS.

Actualmente se están haciendo ensayos con el modelo T319L31 (igual que el anterior modelo operativo). Se han obtenido resultados para cuatro casos de precipitación intensa sobre Europa. El impacto parece ser muy positivo sobre los parámetros de superficie tales como la precipitación.

**** EPS con multi-análisis y/o multi-modelos***

En el EPS operativo, las perturbaciones iniciales se están aplicando al análisis del ECMWF. También se pueden aplicar a análisis de otros Centros de Predicción y/o a análisis de consenso. Los análisis perturbados resultantes pueden, a su vez, integrarse, con cualquier modelo de

predicción. En la Met. Office (UK) se están realizando pruebas para obtener un EPS **combinado**, bien con análisis perturbados donde intervienen análisis de los dos centros ECMWF y UKMO o bien, predicciones obtenidas con los dos modelos. En cualquiera de los dos casos se obtienen mejores resultados.

*** Predicciones por Conjuntos de área limitada anidadas en el EPS del ECMWF**

En el NCEP se trabaja de forma operativa con EPS de área limitada (para predicción de corto plazo) desde 1995. Un EPS de área limitada contempla alguna (o algunas) de las siguientes posibilidades: consideración de perturbaciones específicas para el área de interés (TEPS: *Targeted* EPS) y/o integración de los análisis perturbados mediante modelos de área limitada. En colaboración con el ECMWF hay tres grupos investigando EPS específicos para el área europea y para un rango temporal de 3-4 días:

- Instituto Meteorológico de Holanda (KNMI). Contruyen un EPS de 51 miembros específico para Europa (TEPS). Parece ser que mejora la predicción de fenómenos extremos.
- Universidad de Oslo. Se han comparado las integraciones con modelo de área limitada de análisis del EPS y del TEPS; resultados preliminares indican que para la probabilidad de precipitación el TEPS presenta mayor pericia.
- Grupo Italiano integrado por Servicio de Emilia Romagna y el CINECA. Han estado estudiando la posibilidad de integrar solamente unos pocos análisis del EPS con el modelo de área limitada. Los primeros resultados indican que un EPS de alta resolución con tan solo 5 miembros puede resultar exitoso.

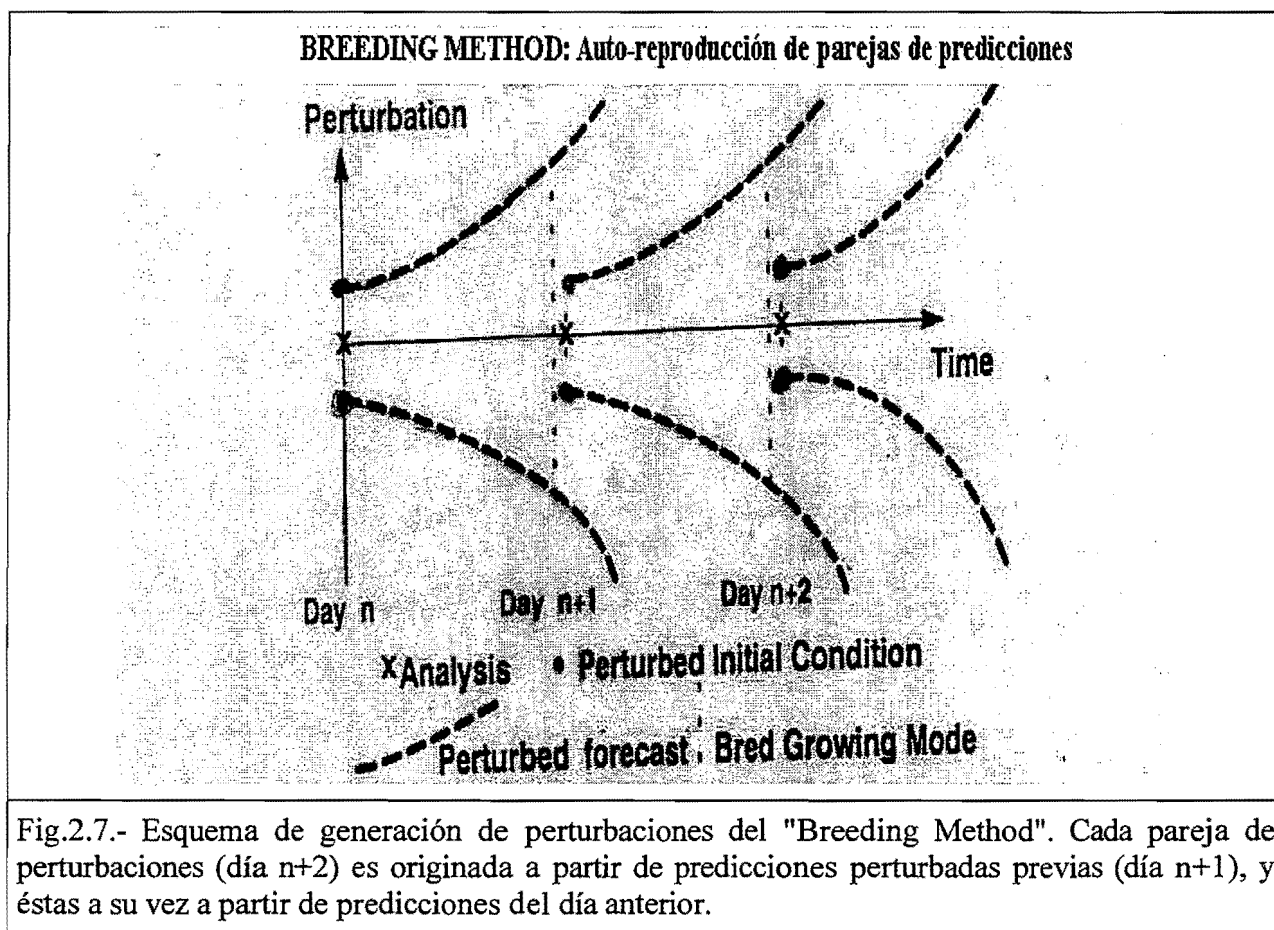
2.2. EL EPS EN EL NCEP

2.2.1. Generación de las perturbaciones

El argumento fundamental del NCEP es el siguiente: el crecimiento de los errores de predicción se manifiesta ya en los primeros pasos de tiempo (muy corto y corto plazo), lo cual significa que los campos del análisis ya contienen los errores (del análisis) de crecimiento rápido y, a su vez, estos errores proceden de sucesivos campos previos. La razón de fondo para achacar a los campos previos este tipo de errores es que en zonas con ausencia de datos el análisis coincide prácticamente con el campo previo y por tanto contiene errores similares a los errores de predicción H+6, 12. Puesto que el campo previo en un ciclo (hora determinada: 00, 06, 12, 18) esta determinado por el análisis del ciclo inmediatamente anterior (H+06 o H+12), tenemos que los análisis anteriores al de la ultima pasada intervienen en la definición de las perturbaciones. De ahí proviene el nombre : método de reproducción (*breeding method*).

Mediante este método se trata, entonces, de identificar los errores del análisis de crecimiento rápido puesto que se consideran los máximos responsables de los errores de la predicción de Control. Se intenta imitar el comportamiento de los errores que crecen más rápidamente en el

corto plazo. En el EPS operativo, el campo resultante de la diferencia entre predicciones perturbadas simétricas $D+1$ (obtenidas a partir de análisis perturbados que a su vez provienen de la adición y sustracción de perturbaciones iniciales al análisis de Control), procedente del día anterior y válidas para la hora del último análisis, se utiliza como punto de partida de las nuevas perturbaciones iniciales. Simplemente se reduce su tamaño para adecuarlas a la amplitud típica de los errores del análisis (**figura 2.7**). Así por ejemplo, perturbaciones iniciales sobre el Pacífico, donde escasean los datos convencionales, tienen una amplitud unas tres veces mayor que las originadas sobre el continente, donde la cantidad de datos es mayor. De esta forma, se obtienen dos análisis perturbados (sumando y restando las perturbaciones engendradas o reproducidas ...) por cada pasada (ciclo) anterior al último análisis. Basta considerar un mayor número de pasadas para obtener nuevas perturbaciones (operativamente, 7 pasadas) que solo difieren entre ellas en las condiciones iniciales de una pasada anterior cuando el EPS es inicializado. Esto se hace cada 3 o 4 días. Este tipo de perturbaciones están estrechamente relacionadas con los llamados Vectores de Lyapunov de la atmósfera.



Las perturbaciones procedentes de diferentes pasadas tienden a converger en regiones donde hay rápidos desarrollos y de alta inestabilidad (por ejemplo, ciclogénesis). Sin embargo cuando una baja profunda se está rellenando, las perturbaciones comienzan a ser menos parecidas.

El uso de las perturbaciones engendradas como perturbaciones iniciales queda justificado por la consideración de que las primeras pueden asimilarse a errores en el campo previo y en el análisis. Se ha realizado una comparación objetiva entre perturbaciones engendradas y análisis/campo-previo confirmando la presencia de perturbaciones engendradas dentro de los errores del análisis. Hay que recordar que para que un EPS tenga éxito se requieren perturbaciones que representen a posibles errores del análisis.

2.2.2. Configuración del EPS del NCEP

Al igual que en el CEPPM, el NCEP genera productos del EPS de forma operativa desde diciembre de 1992.

Actualmente, contiene 17 predicciones (**figura 2.8**):

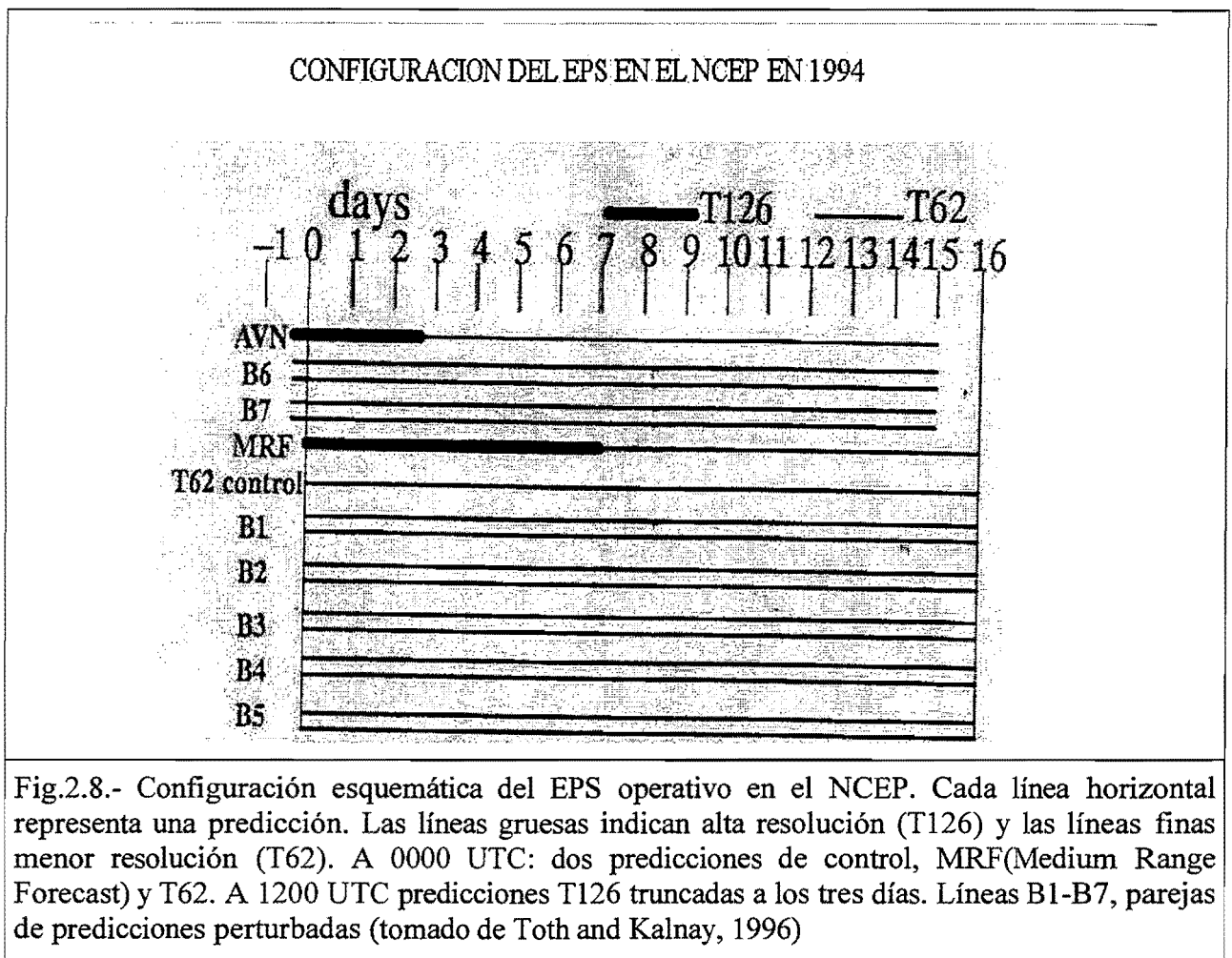
A partir de análisis de 00 UTC:

- Control, hasta D+7 mediante T126 y hasta D+16 mediante T62.
- Control hasta D+16 mediante T62
- 10 predicciones perturbadas. Las perturbaciones iniciales proceden de 5 pasadas (o trayectorias de reproducción) independientes.

A partir de análisis de 12 UTC:

- Control hasta D+3 mediante T126
- 4 perturbadas basadas en dos pasadas independientes

Evaluaciones de su comportamiento indican que, más o menos, para la primera semana y, utilizándolo para cada día de predicción, el conjunto de 17 miembros es suficiente. Para la predicción operativa D+6 a D+10, se considera información adicional consistente en la inclusión del EPS procedente de las pasadas de los previos dos días; de esta forma el número total de predicciones es de 46 (12+5+12+5+12).



2.3. BREVE COMPARACION ENTRE EL EPS DE LOS DOS CENTROS

Haciendo una rápida comparación del EPS europeo y americano, se observan algunas diferencias:

- para el europeo el EPS de un día es independiente de los de otros días, para el americano hay una clara dependencia entre el EPS de un día y el del siguiente
- el EPS americano es, en términos de tiempo de ordenador, muy barato. Las perturbaciones engendradas se obtienen a partir de las diferencias de las predicciones perturbadas simétricas del día anterior (que por tanto, ya están disponibles y son "gratis"). En el CEPPM el calculo de los vectores singulares requiere casi la tercera parte del EPS, que representa aproximadamente un poco menos de la mitad del tiempo utilizado por el modelo operativo; en valores absolutos, antes del cambio del EPS del 10 de diciembre, ese tiempo era de 0.8 horas mientras que el tiempo utilizado por el T213 era de 2 horas.

Comentario: Estamos ante dos aproximaciones al problema de generación del conjunto de predicciones. También podrían ser generadas de otra forma: variando la física del modelo, utilizando análisis de varios modelos , De cualquier forma, no hay nada definitivo y se está investigando, principalmente en ambos centros.

3. PRODUCTOS DEL EPS DEL CEPPM

3.1. Campos directos de las 51 predicciones

3.2. Descripción de los productos gráficos

De toda la información procedente de las 51 predicciones podemos distinguir, por una parte, los campos directos y, por otra, productos probabilísticos.

3.1. CAMPOS DIRECTOS DE LAS 51 PREDICCIONES

*** Niveles de presión** (1000, 850, 700, 500 y 200 hPa)

Variables: Z, T, Q, W, Vo, D, R

*** Superficie.**

A continuación se mencionan los considerados más importantes:

Temperatura superficial

Humedad de la superficie del suelo

Profundidad de la capa de nieve

Precipitación

de gran escala

convectiva

en forma de nieve

Presión a nivel del mar

Flujos de calor latente y sensible

Cobertura nubosa total

Viento a 10 m

T y Td a 2m

Radiación solar

Qué hacer con esta enorme cantidad de información?

- Presentarla de forma atractiva
- Simplificarla

3.2. DESCRIPCION DE LOS PRODUCTOS GRAFICOS

3.2.1. Campos directos del EPS

Sellos

Consiste en la representación gráfica de todas las predicciones del EPS: Control y los 50 miembros. Es el producto más básico y también el más difícil de tratar (**figura 2.5**, ver capítulo anterior).

Espaguetis

Se trata de dibujar las 51 predicciones en el mismo mapa, pero solamente una isolínea de forma que se pueda observar, a grandes rasgos el comportamiento de todos los miembros sobre una zona determinada. Muy útil para inferir la dispersión del EPS. (**figura 3.1**). Si de entre todos los espaguetis seleccionamos unos pocos que se parecen y que por lo tanto representan configuraciones sinópticas parecidas, observamos que aunque son parecidos, todavía presentan ligeras diferencias (**figura 3.2**).

Penachos ("plumes") (de una variable para un punto dado)

Consiste en la representación gráfica de una variable en función del rango de predicción para un punto determinado. Normalmente la nube de valores de la variable se ensancha con el paso del tiempo (aumento de la dispersión), indicando una disminución de la predecibilidad de la atmósfera para ese punto y rango de predicción; esto NO implica que para periodos posteriores la dispersión continúe aumentando. En la **figura 3.3.b** hemos representado la precipitación para Madrid.

3.2.2. Campos de probabilidad

Mapas de probabilidad

A partir de los valores de diversas variables procedentes de las 51 predicciones se pueden obtener con facilidad mapas de probabilidad. Estos expresan la probabilidad de que dicha variable esté comprendida en un determinado rango, que sea superior o inferior a un valor umbral, ... Se obtienen para parámetros de superficie (precipitación, viento, ..) y temperatura de 850 hPa. En la **figura 3.4** podemos observar los mapas de probabilidad que se generan de forma operativa en el CEPPM.

Espaguetis: Isolínea de 5880 mgp

17 Ago. 98 / D+5 / valido para 22 Ago. 98

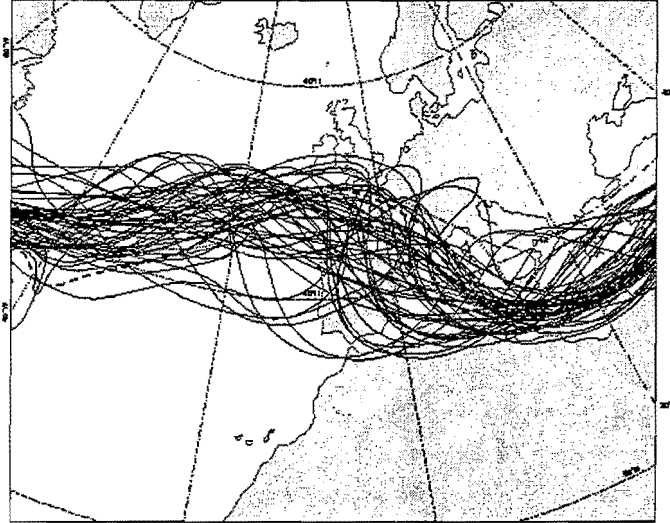


Fig.3.1.- Espaguetis. Isolínea de 5880 mgp del campo Z-500hPa.

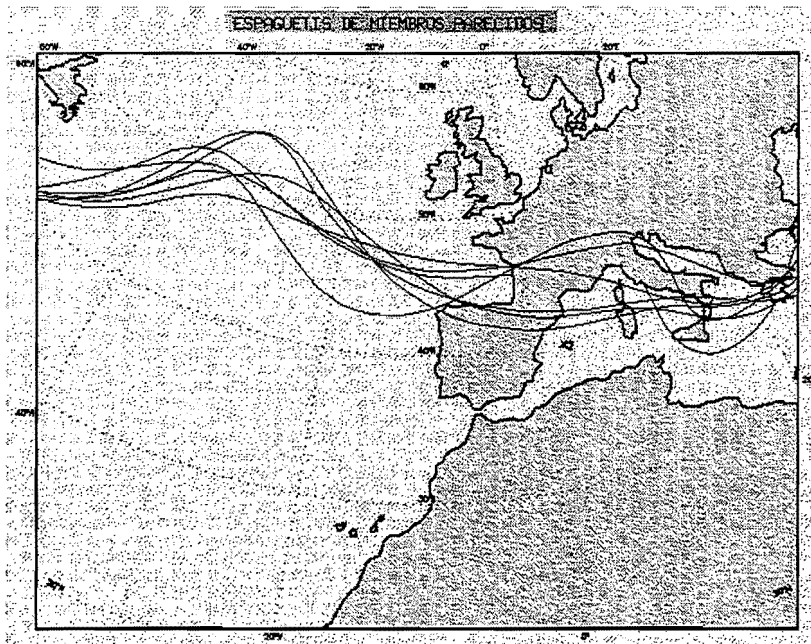


Fig.3.2.- Espaguetis correspondientes a varias predicciones no demasiado diferentes.

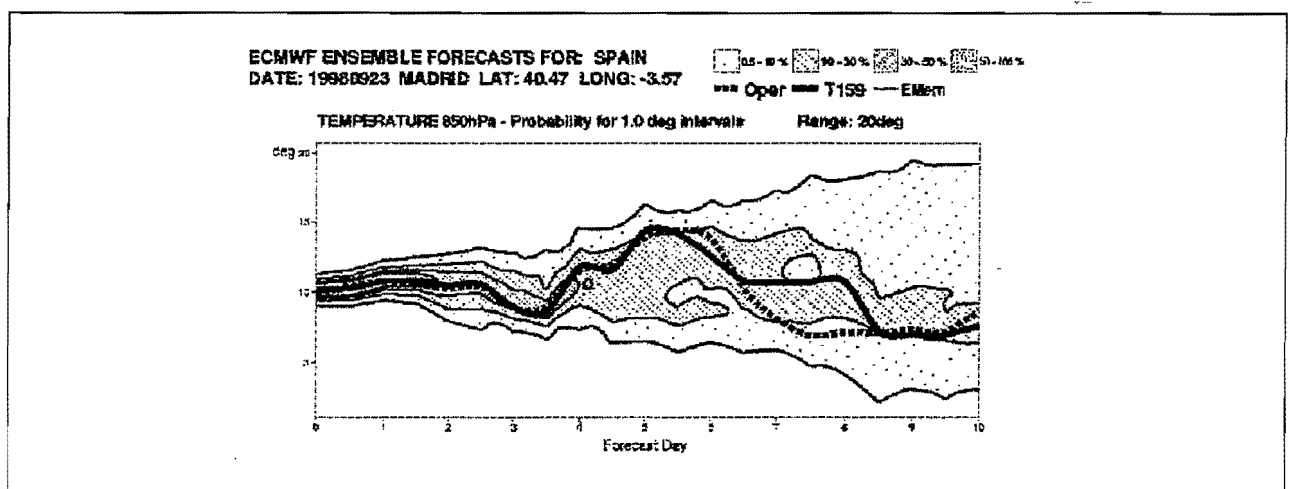


Fig.3.3.a.- Penachos de probabilidad de la variable T-850 hPa.

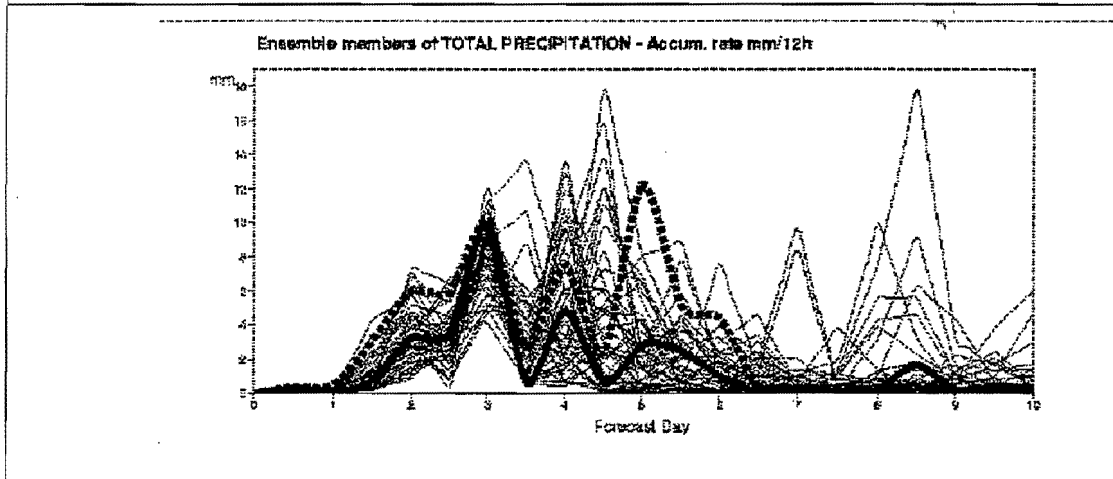


Fig.3.3.b.- Penachos de la precipitación para Madrid.

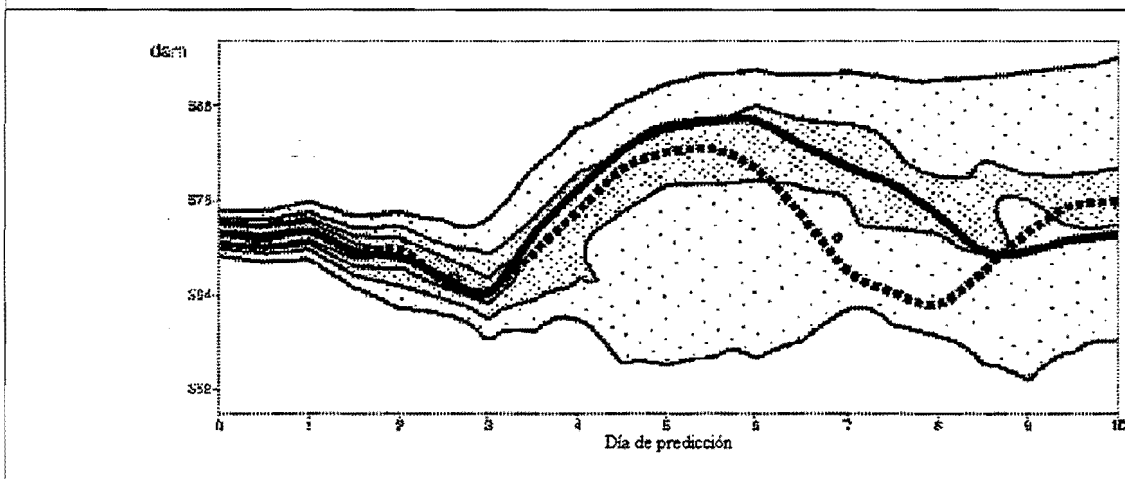
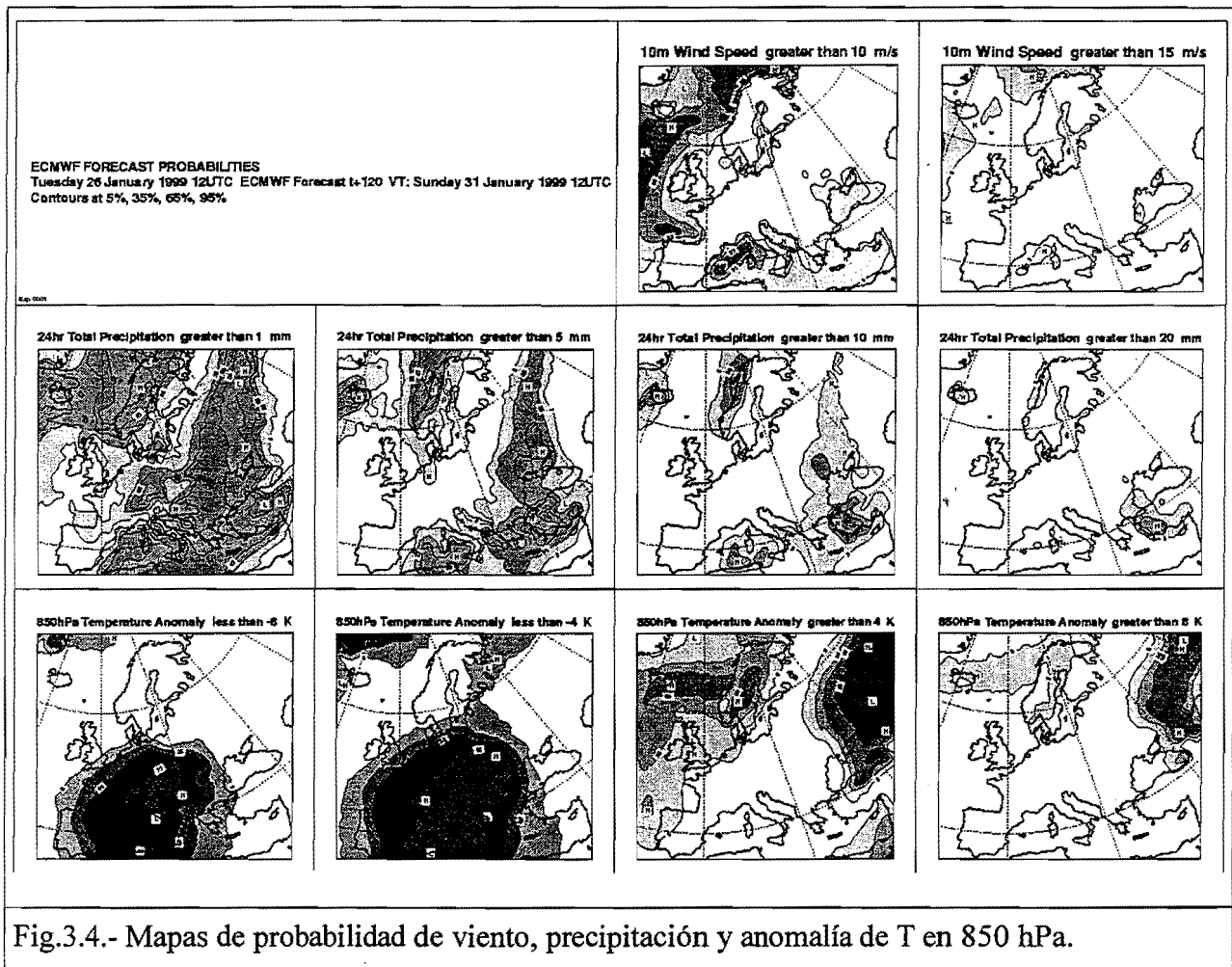


Fig.3.3.c.- Penachos de probabilidad del geopotencial de 500 hPa en Madrid.



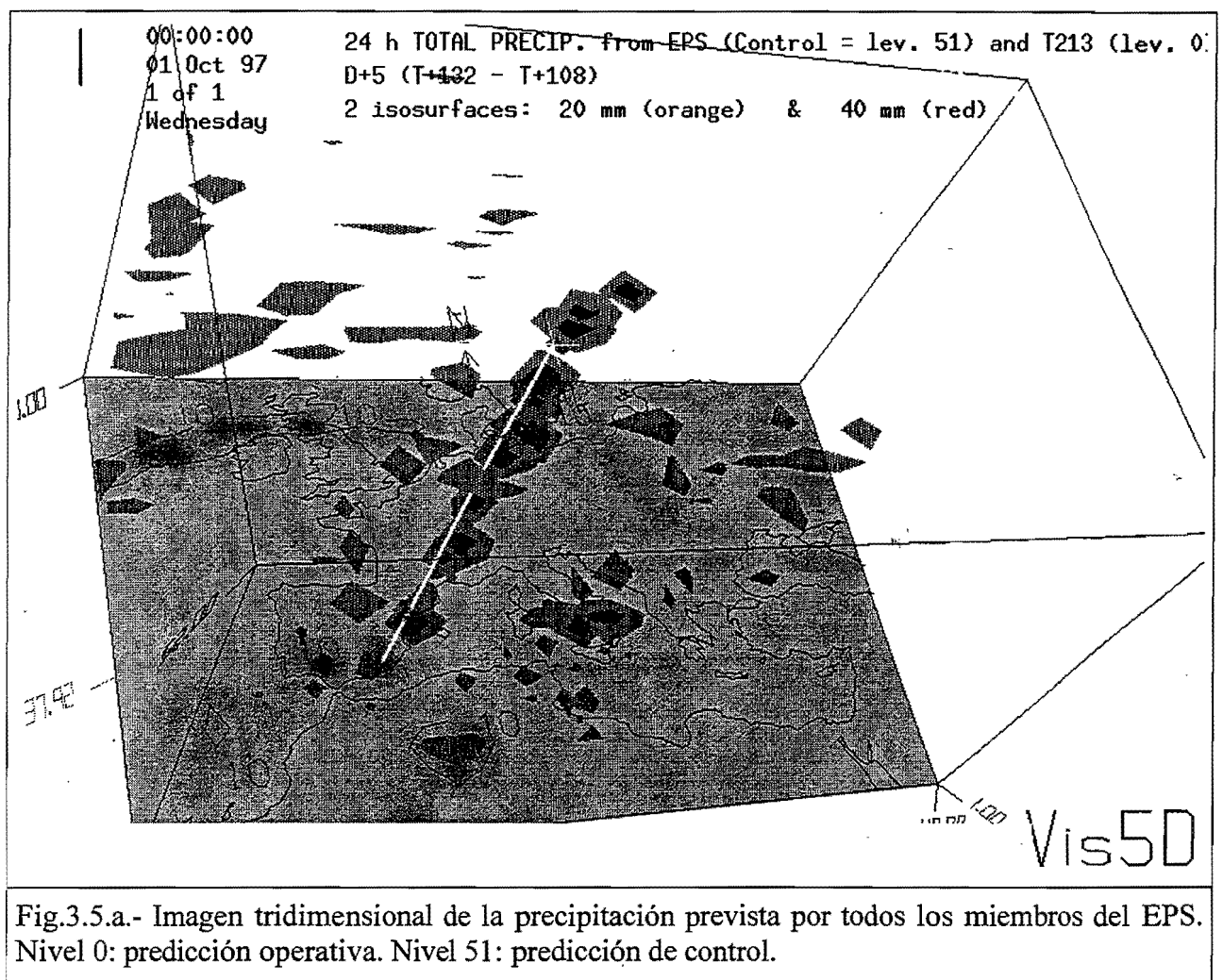
Penachos de probabilidad

De forma similar a los penachos, en lugar de representar el valor de la variable se considera la probabilidad de dicha variable para diferentes rangos de la misma (**figura 3.3.a** y **figura 3.3.c**: ejemplos para la temperatura en 850 hPa y geopotencial de 500 hPa, respectivamente, para la posición de Madrid).

3.2.3. Visualización tridimensional y cortes "verticales"

Si hacemos el **truco** de sustituir la verdadera coordenada vertical (altura o presión) por la variable: número de la predicción (de 1 a 51), podremos representar en "tres dimensiones" los 51 miembros del EPS.

Ejemplo 1: Precipitación sobre el SE de la Península (**figura 3.5.a** y **figura 3.5.b**)



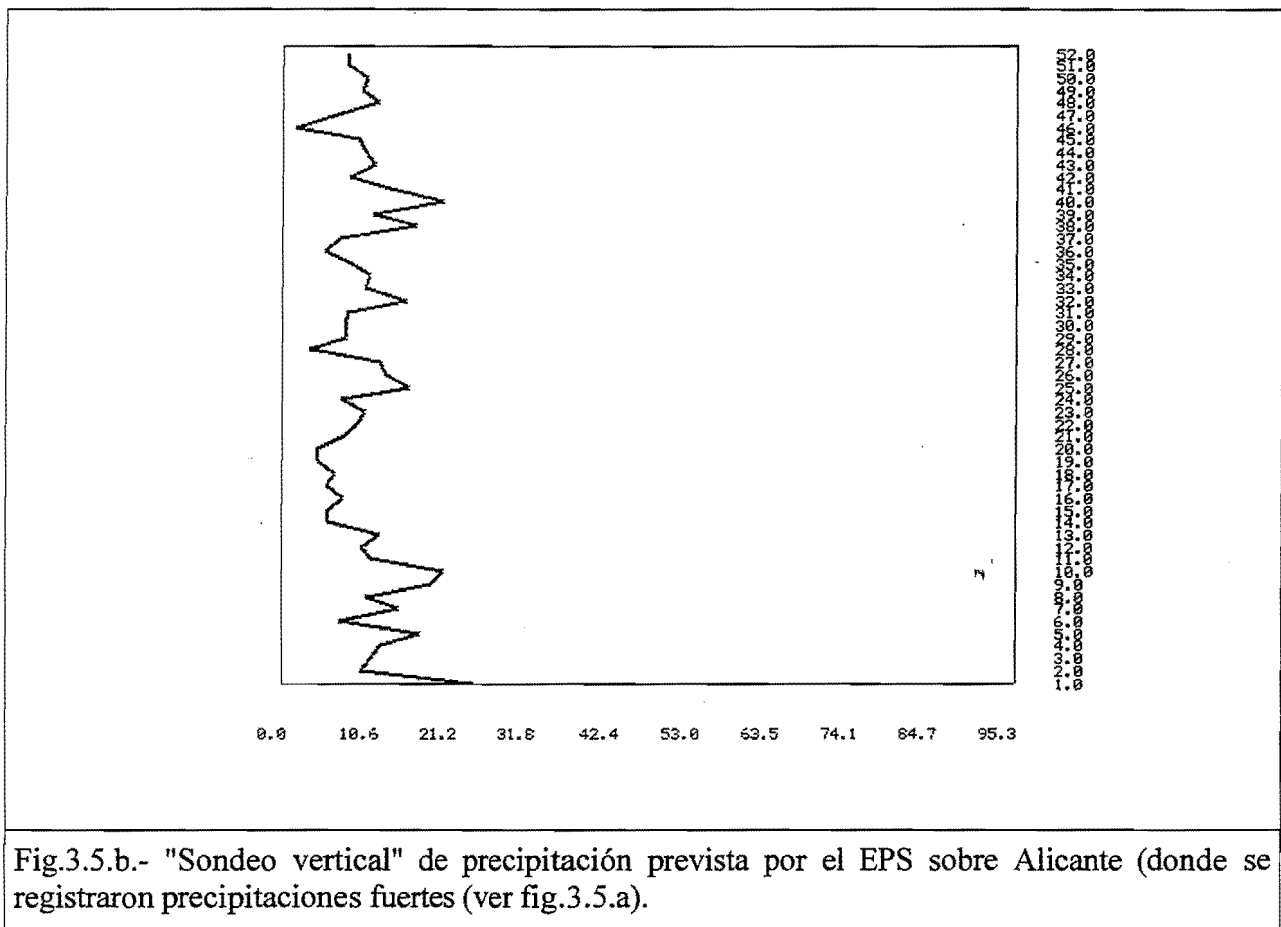
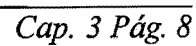
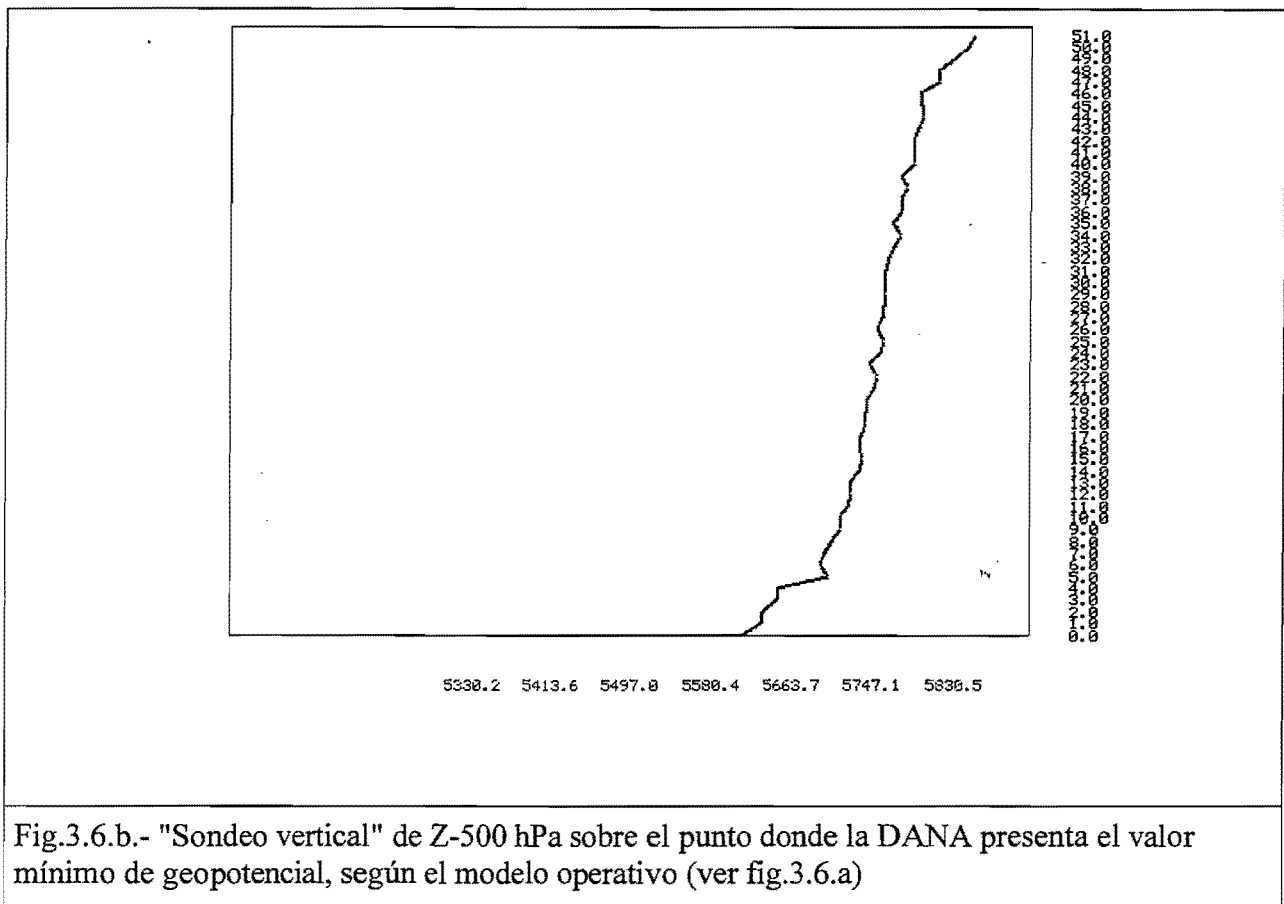


Fig.3.5.b.- "Sondeo vertical" de precipitación prevista por el EPS sobre Alicante (donde se registraron precipitaciones fuertes (ver fig.3.5.a)).





4. CLASIFICACION DE LAS PREDICCIONES DEL EPS

4.1. Algoritmos de agrupamiento

4.2. Método de los tubos (*tubing*)

4.3. Red neuronal

Como se mencionaba en el apartado anterior, la cantidad de información del EPS es enorme. En este apartado se describen tres técnicas de clasificación del conjunto de predicciones: agrupamiento, *tubing* y red neuronal. El punto de partida es el conjunto de $N+1$ predicciones (**figura 2.5**, ver capítulo 2); generalmente se considera como variable de referencia el geopotencial de 500 hPa, lo cual no significa que no se puedan tener en cuenta otros campos y/o niveles. El resultado final es un conjunto de un número manejable de productos (de 1 a 8, aproximadamente), lo cual simplifica significativamente los productos del punto de partida.

Los tres métodos se utilizan de forma operativa en diferentes países. De forma paralela, a la descripción de los métodos de clasificación, se presentan ejemplos, de la predicción D+5, basada en el 17 de Agosto de 1998.

4.1. ALGORITMOS DE AGRUPAMIENTO

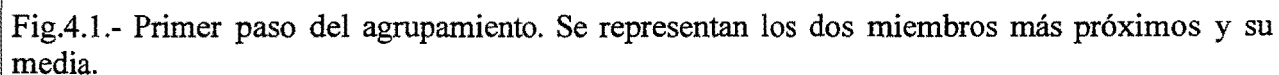
A continuación describimos brevemente varios algoritmos para agrupar el conjunto de las $N+1$ predicciones en varios subconjuntos o grupos. Diferenciamos en primer lugar los algoritmos **jerárquicos** de los que **no** lo son. En los primeros se realizan sucesivas **fusiones** o **divisiones** de la información de partida; una vez que un objeto (predicción) es asignado a un grupo siempre pertenecerá a él. Dentro de los algoritmos jerárquicos se distinguen los métodos **aglomerativos**, que parten de $N+1$ grupos iniciales y los nuevos grupos se obtienen por fusión, y los métodos **divisivos** que consideran toda la información de partida como único grupo inicial; en este último caso los nuevos grupos se generan por división.

En este apartado vamos a describir, principalmente, los algoritmos jerárquicos aglomerativos.

4.1.1. Algoritmos jerárquicos aglomerativos

El punto de partida son las $n = N + 1$ predicciones del EPS, que conforman, inicialmente, n grupos; el principio de estos algoritmos consiste en unir en cada paso los dos grupos más próximos o similares entre sí.

Estos algoritmos pueden resumirse de la siguiente forma:



Segundo paso y sucesivos: Se trata de aplicar sistemáticamente el paso anterior, reduciendo, en cada paso, en una unidad el número de grupos.

Fase final del proceso: Terminaría, si no imponemos ninguna condición acerca del número final de grupos, cuando se hayan agrupado todos los miembros en un único grupo que representaría la media del conjunto. Sin embargo, estamos interesados en la obtención de varios grupos que nos den una idea de las diferentes situaciones meteorológicas que se presentan (que podría ser solamente una).

Hay varias opciones para decidir el punto de corte:

- número **fijo** de grupos
- número **variable** de grupos:
 - que las diferencias entre los miembros que componen un grupo no sean muy grandes. Estas diferencias se suelen cuantificar mediante la llamada **varianza interna** de un grupo. Puede ser un valor absoluto (por ejemplo: 50 mgp) o bien una función de la dispersión (p.e. 60% de la desviación típica del conjunto).
 - que los grupos resultantes contengan buena parte de la información inicial. Normalmente se utiliza la llamada **varianza explicada** por los grupos. Se trata que ésta supere un valor umbral (p.e. 50% de la varianza total).
 - cuando el número de miembros en un grupo supera un número máximo. Algunas de estas opciones pueden ser usadas de forma simultánea.

El caso de número variable es interesante dado que este número está relacionado con la dispersión del EPS; de tal forma, que un número muy pequeño (p.e. 1) indicaría una dispersión muy pequeña, mientras que un número grande (p.e. 5) estaría relacionado con dispersión grande. Normalmente, la dispersión es un índice de evaluación de la fiabilidad de la predicción de Control, de forma que dispersión grande indicaría predicción de Control poco fiable.

Dependiendo de la definición de **distancia** entre grupos, se pueden considerar los siguientes métodos de agrupamiento:

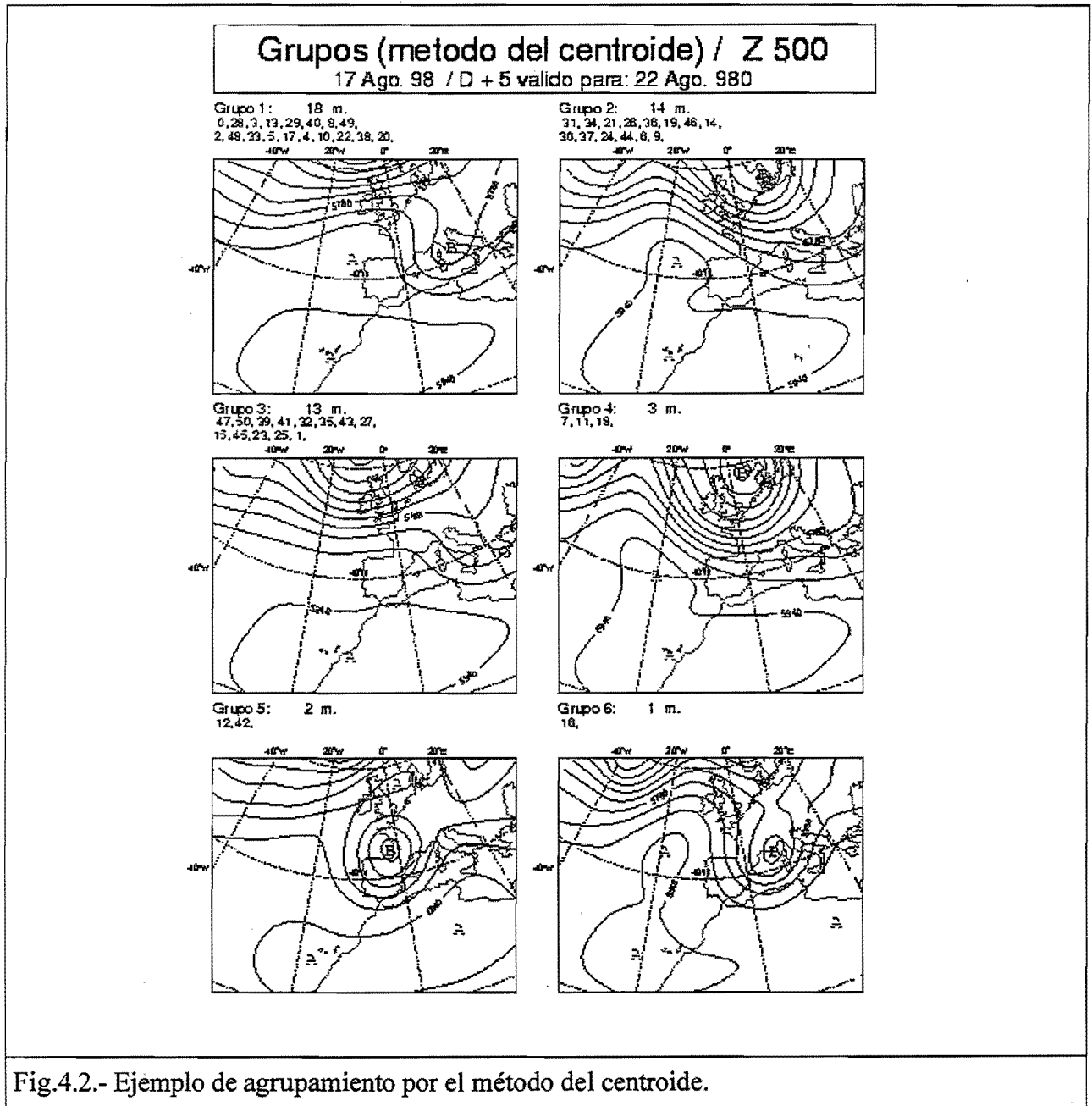
Método del centroide

La similitud entre dos grupos es el cuadrado de la diferencia entre sus medias o centroides (cuadrado de la distancia euclídea). Dados dos grupos, i y j , con valores medios, x_{mi} y x_{mj} , la **distancia** entre ellos, DC , para este algoritmo, queda definida en la forma:

$$DC = [x_{mi} - x_{mj}] ** 2 \quad (4.1)$$

Este método tiende a agrupar muchos miembros en unos pocos grupos (con frecuencia 1) muy poblados y el resto en pequeños grupos de muy pocos miembros ("snowballing effect"). Es frecuente la aparición de grupos con un único miembro, representando situaciones meteorológicas "extremas". Se puede decir que tiende a realzar la monomodalidad (o a disminuir

la multimodalidad) del Conjunto. Ver en el ejemplo de la **figura 4.2.** como aparecen 3 grupos bastante poblados y otros 3 muy minoritarios.



Algoritmo de Ward

En este algoritmo se minimiza la pérdida de varianza que se experimenta al fusionar dos grupos. Sean dos grupos i, j que se van a unir formando un nuevo grupo k ; la *distancia* o pérdida de varianza, DW , se puede expresar mediante la ecuación:

$$DW = n_i * [(x_{mi} - x_{mk}) ** 2] + n_j * [(x_{mj} - x_{mk}) ** 2] \quad (4.2)$$

donde n_i y n_j son las poblaciones de los grupos i y j , respectivamente.

La ecuación 4.1. se puede expresar en función de la distancia del centroide, DC :

$$DW = [(n_i * n_j) / (n_i + n_j)] * DC \quad (4.3)$$

DW depende, entonces, de la distancia euclídea (al cuadrado), DC , y de la población de los grupos candidatos a fusionarse. De esta forma se consideran más distantes aquellos grupos cuya fusión conlleva una mayor disminución de la varianza. Se prima, por lo tanto, la fusión de grupos con pocos miembros frente a los grupos muy poblados.

Tiende a producir grupos con una varianza interna similar y con poblaciones no excesivamente diferentes. La varianza explicada por los grupos formados es alta. Sin embargo, se podrían mezclar en un mismo grupo miembros no muy parecidos. Al contrario de lo que ocurre en el método del centroide, aquí se tiende a realzar la multimodalidad del Conjunto, tendiendo a formar grupos con poblaciones no muy diferentes (ver ejemplo en **figura 4.3**).

Método de las conexiones medias (average linkage method)

La *distancia* entre dos grupos se define como la distancia cuadrática media de todas las parejas de miembros que pertenecen a cada grupo. La diferencia con los métodos previos es la consideración de todos los miembros que pertenecen a los dos grupos candidatos a fusionarse, en lugar de sus campos medios.

$$DL = [1 / (n_i * n_j)] * [(d_{ij,jm}) ** 2] \quad (4.4)$$

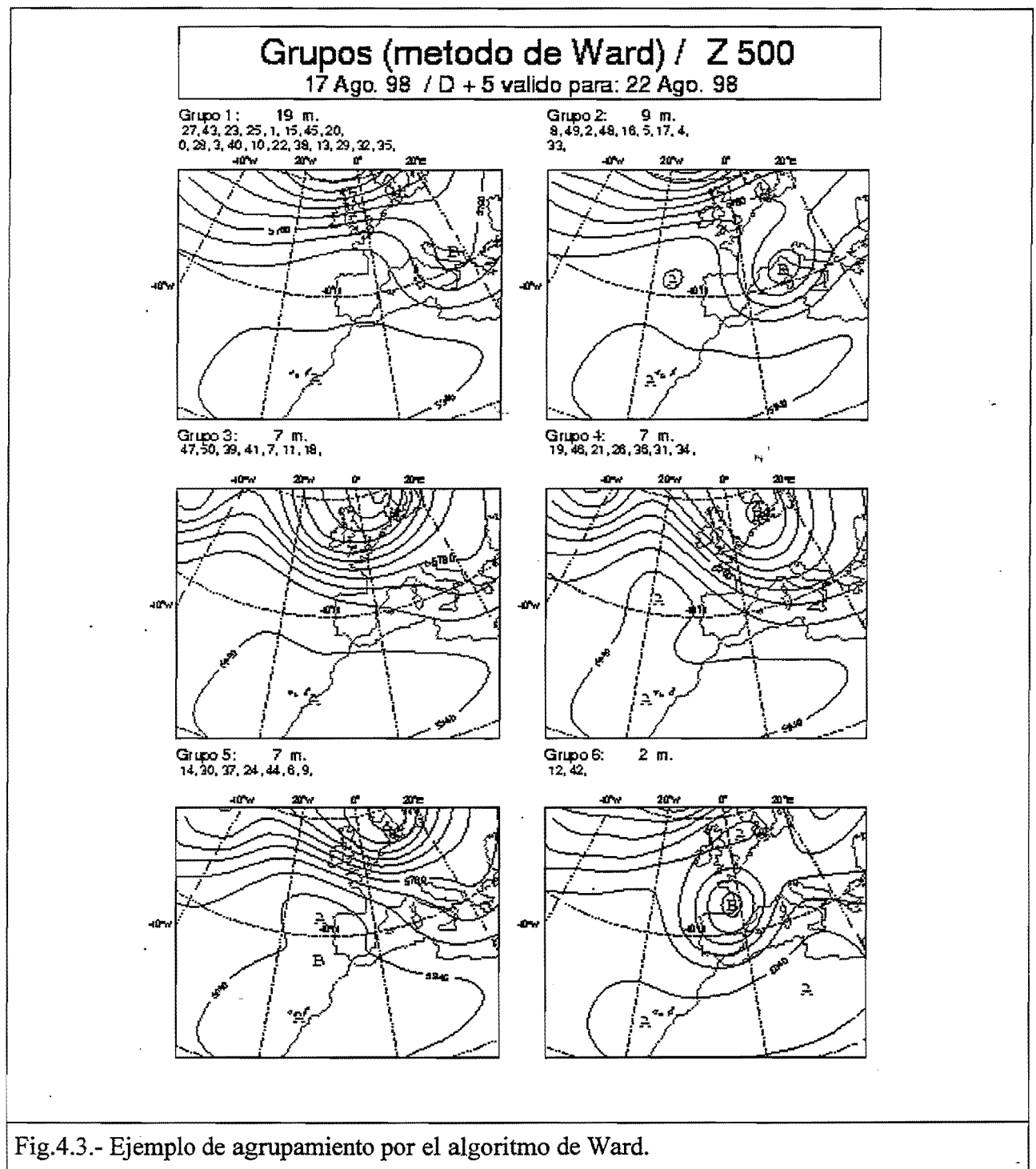
donde $(d_{ij,jm}) ** 2$, representa la suma del cuadrado de las distancias de las $n_i * n_j$ parejas de miembros.

La distancia DL puede expresarse en función de DC :

$$DL = DC + vari + varj \quad (4.5)$$

siendo $vari$ y $varj$, las varianzas de los grupos i y j , respectivamente.

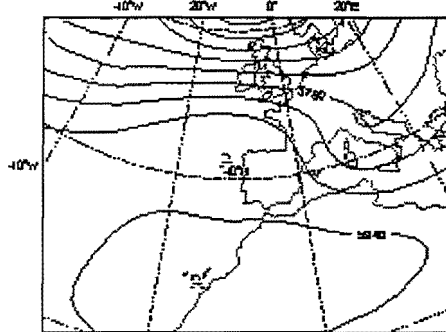
Se ha diseñado para equilibrar los efectos de los dos métodos anteriores: por una parte, tiende a maximizar la varianza entre los grupos y, por otra, a minimizar la varianza interna de los grupos. Este algoritmo ha sido considerado por Kalstein (1987) el más adecuado para la clasificación climatológica de situaciones sinópticas. Ver ejemplo en la **figura 4.4**.



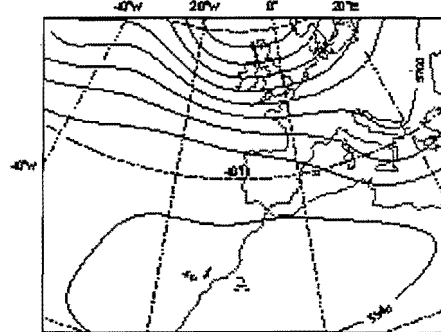
Grupos (metodo de conexiones) / Z 500

17 Ago. 98 / D + 5 valido para: 22 Ago. 980

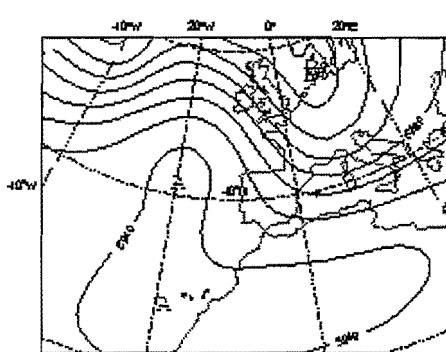
Grupo 1: 30 m.
37, 51, 10, 22, 33, 40, 30, 11,
20, 22, 35, 14, 20, 0, 28, 3, 9, 37, 2, 43, 4, 5, 17, 8, 43, 20, 1, 24, 44, 6



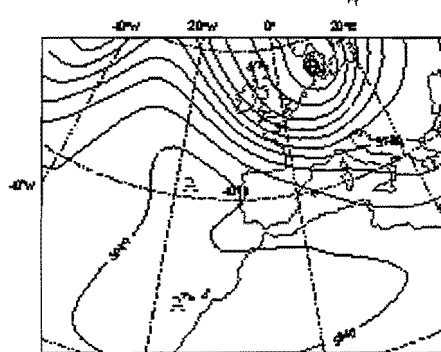
Grupo 2: 10 m.
15, 45, 23, 25, 43, 27, 39, 7,
11, 18,



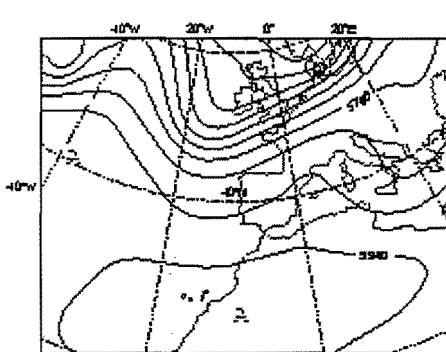
Grupo 3: 7 m.
19, 46, 26, 36, 21, 12, 16,



Grupo 4: 2 m.
31, 34,



Grupo 5: 1 m.
41,



Grupo 6: 1 m.
42,

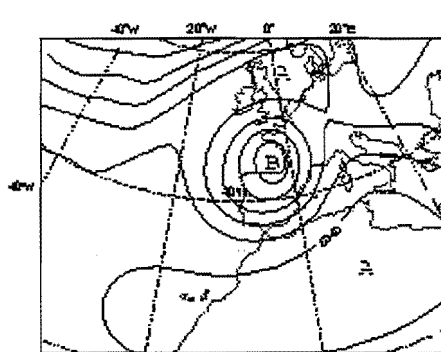


Fig.4.4.- Ejemplo de agrupamiento por el método de las conexiones.

Comparación entre los tres métodos:

Según lo expuesto hasta ahora puede ocurrir que un mismo miembro sea incorporado a grupos diferentes dependiendo del método utilizado. El algoritmo de Ward es el que mejores resultados presenta en términos de varianza explicada. En nuestro ejemplo, la varianza explicada por los 6 grupos finales es: 68%, 73% y 40% para los tres métodos, centroide, Ward y conexiones, respectivamente. El algoritmo utilizado en el CEPPM e INM es el de Ward.

4.1.2. Algoritmos no jerárquicos

Método de los grupos diferentes

Agrupamiento que utiliza una distancia definida como la correlación de anomalías (diferencia entre campo de un miembro y campo climatológico). El proceso comienza buscando los dos miembros más diferentes (distancia máxima); cada uno de ellos constituye el germen de un grupo. Los miembros restantes son agrupados en estos grupos iniciales siempre que su distancia sea inferior a un valor umbral. Si un miembro pudiese ser agrupado en dos grupos, será introducido en el más próximo. En una segunda etapa, se busca la pareja más próxima de miembros similares (la distancia entre ellos es inferior al umbral), y se agrupan miembros en torno a ellos. Este proceso se repite hasta que todos los miembros sean agrupados.

Este método se basa en la suposición de que el rango de alternativas viene dado por el intervalo definido por los dos miembros más distantes. Tiene la ventaja de poder definir "predicciones similares" o "diferentes" en función del umbral. De este método no se puede esperar una gran varianza explicada.

Se utiliza en el NCEP para los 17 miembros de su EPS.

Método del grupo central

Consiste en agrupar miembros en torno a la media del Conjunto; esta se considera el "centro" de la distribución de los miembros. En este caso se supone que la distribución del conjunto es más bien monomodal, alrededor de su media. Se genera, entonces, un grupo llamado central. El número de miembros que pertenecen a este grupo puede ser fijo o bien función de su varianza interna.

El resto de los miembros (periféricos) se agrupan siguiendo uno de los métodos aglomerativos jerárquicos descritos. El crecimiento de los grupos está limitado por su varianza interna, que no puede exceder la del grupo central.

El grupo central representa la opción principal (apoyada por la mayoría de los miembros); **otras alternativas, menos probables, representan situaciones extremas**. Este método realza la monomodalidad del conjunto, más incluso que el método de los centroides.

Método de los modelos

Se basa en la mayor fiabilidad que presentan cada uno de los modelos de "alta" resolución, actualmente operativos, comparada con la de los miembros del EPS. También se considera el hecho, de que en general es más fiable la predicción de Control que las predicciones perturbadas. La idea es, entonces, utilizar las "mejores" predicciones como gérmenes de grupos. Resultados de la configuración previa (33 miembros) muestran que el grupo asociado a Control, es generalmente el más poblado, poniendo de relieve la, entonces, escasa dispersión del EPS y la gran proximidad de los miembros perturbados a Control. Por otra parte era relativamente frecuente que los grupos asociados a los otros modelos estuvieran vacíos.

4.1.3. Agrupamiento en el CEPPM y en el INM

Agrupamiento operativo en el CEPPM

Presenta las siguientes características:

- Utiliza el algoritmo de Ward
- Considera tres rangos de predicción: D+5, D+6 y D+7, para hacer el agrupamiento. No se trata de buscar los dos miembros o grupos más próximos para un momento determinado (p.e. D+5), sino los más próximos en un periodo de tiempo (D+5 hasta D+7) se trata, entonces, de buscar evoluciones próximas entre sí y agrupar los miembros correspondientes. El resultado de este agrupamiento se extrapola a otros periodos próximos tales como D+4 y D+8.
- El número de grupos es variable y está determinado, por una parte, por la varianza total del EPS y, por otra, por unos valores estacionales de la varianza del EPS (a partir de información de años anteriores).
- Considera varias áreas: A, B, C, D, E (**figura 4.5**) para intentar satisfacer los intereses de todos los países europeos.

Comparando los agrupamientos para áreas E (D+5, **figura 4.6.a**; D+6, **figura 4.6.b**; D+7, **figura 4.6.c**) y C (D+5, **figura 4.7.a**; D+6, **figura 4.7.b**; D+7 **figura 4.7.c**), se observa, por una parte, que la población de los grupos para cada una de estas áreas es diferente y, por otra, que el número de grupos es el mismo para cada periodo de predicción. También se aprecian, como era de esperar, configuraciones más diferentes en la zona peninsular para el caso del área C.

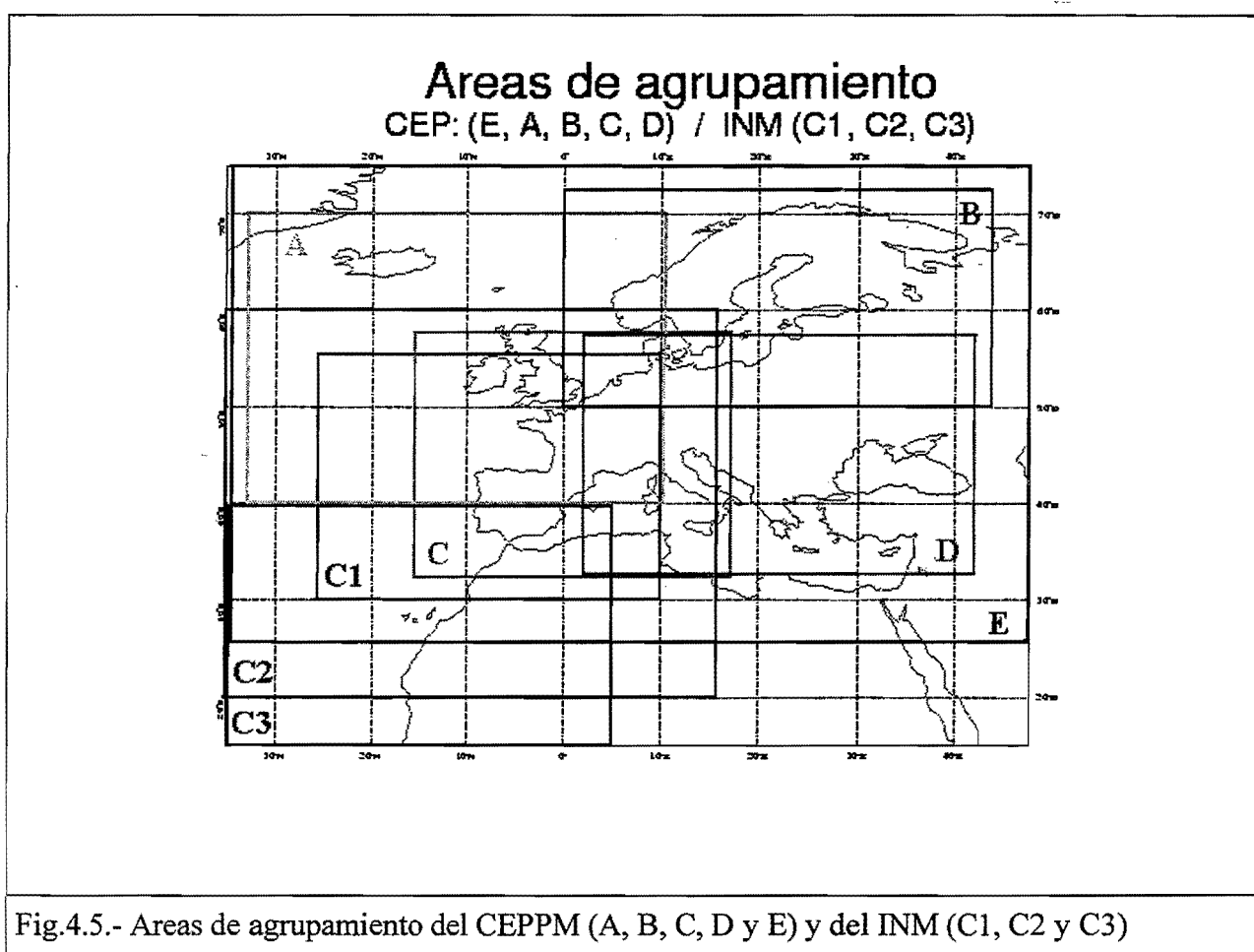
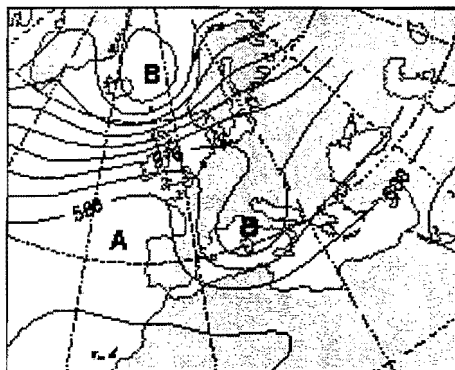


Fig.4.5.- Areas de agrupamiento del CEPPM (A, B, C, D y E) y del INM (C1, C2 y C3)

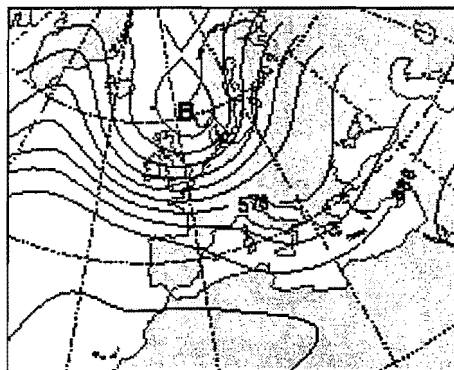
Grupos del CEP / Area E (Europa)

17 Aug 98 / D + 5 valido para 22 Aug 98

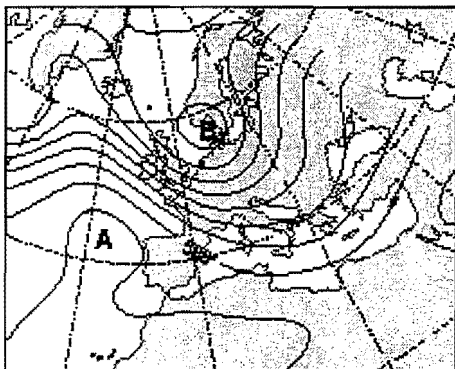
Grupo 1 (14 miembros)



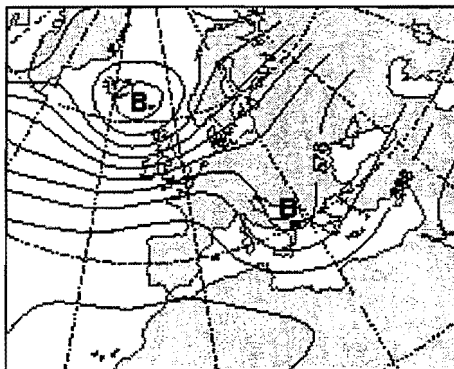
Grupo 2 (10 m)



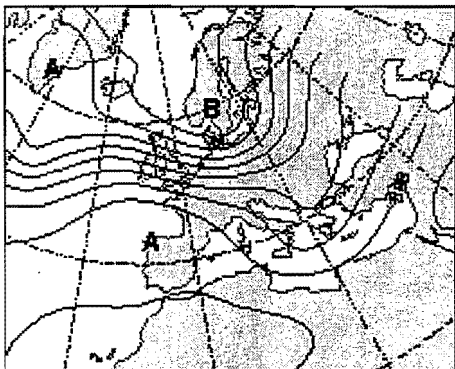
Grupo 3 (10 m)



Grupo 4 (8 m)



Grupo 5 (7 m)



Grupo 6 (2 m)

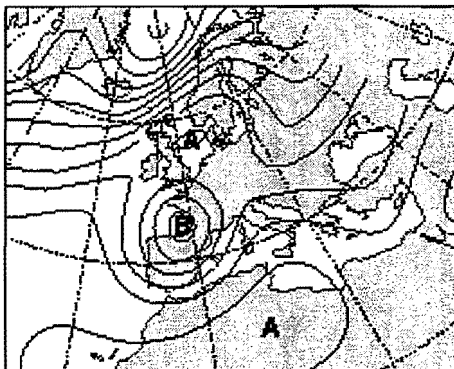


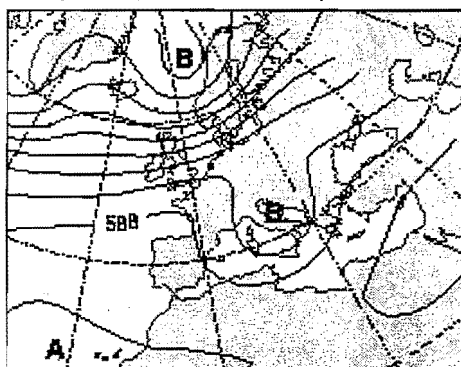
Fig.4.6.a.- Agrupamiento (Ward) para el área D, para D+5.

17 Aug 98 / D + 6 valido para 23 Aug 98

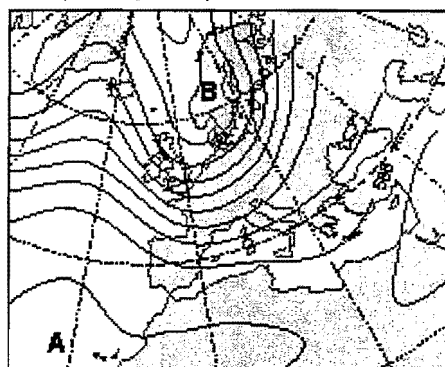
17 Aug 98 / D + 6 valido para 23 Aug 98

Fig.4.6.b.- Agrupamiento (Ward) para el área D, para D+6.

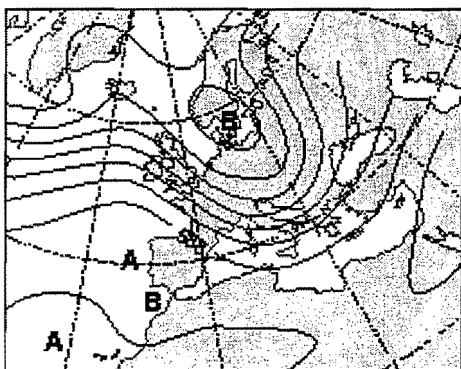
Grupo 1 (14 miembros)



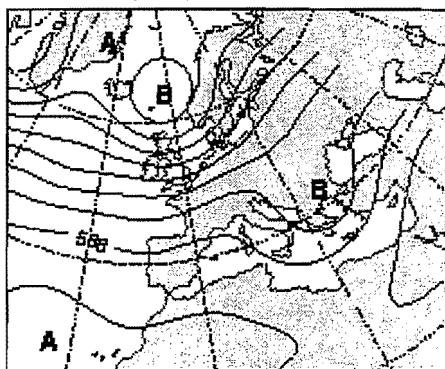
Grupo 2 (10 m)



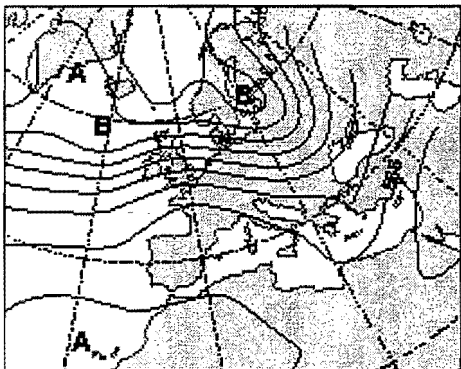
Grupo 3 (10 m)



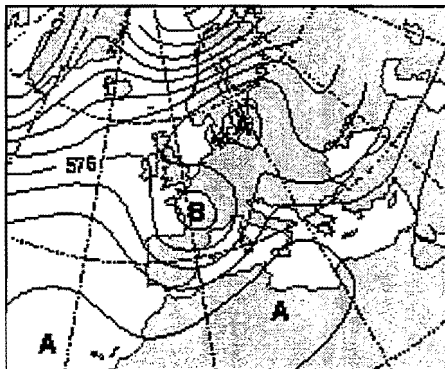
Grupo 4 (8 m)



Grupo 5 (7 m)



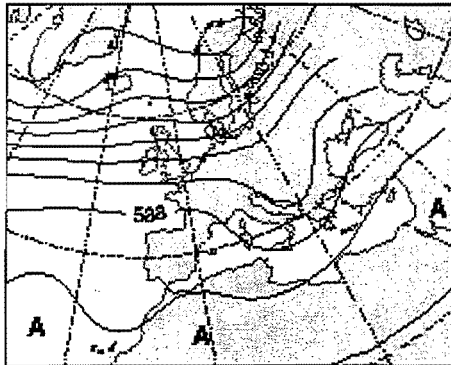
Grupo 6 (2 m)



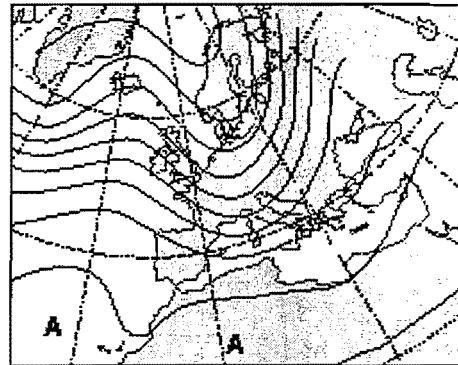
Grupos del CEP / Area E (Europa)

17 Aug 98 / D + 7 valido para 24 Aug 98

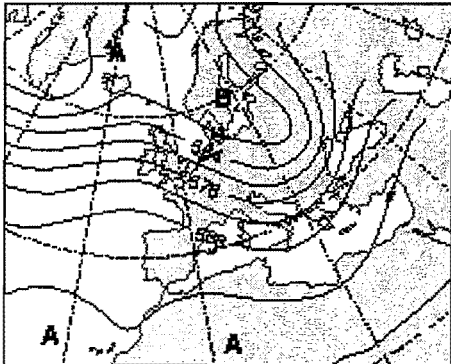
Grupo 1 (14 miembros)



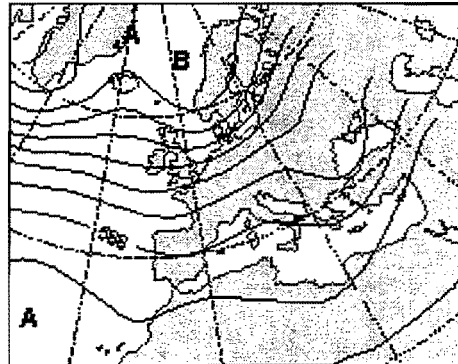
Grupo 2 (10 m)



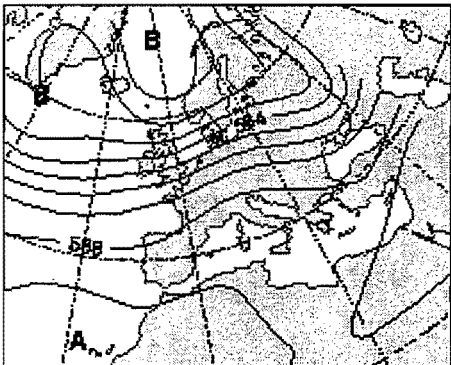
Grupo 3 (10 m)



Grupo 4 (8 m)



Grupo 5 (7 m)



Grupo 6 (2 m)

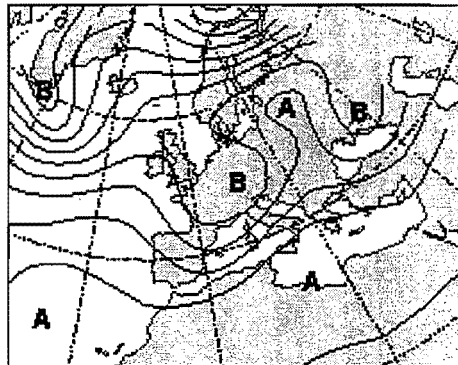
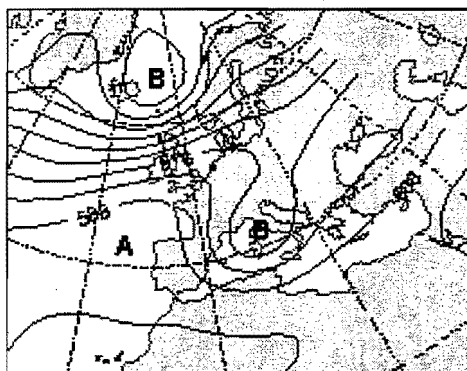


Fig.4.6.c.- Agrupamiento (Ward) para el área D, para D+7.

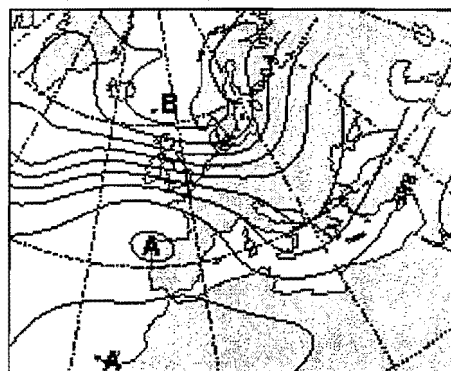
Grupos del CEP / Area C (SW de Europa)

17 Aug 98 / D + 5 valido para 22 Aug 98

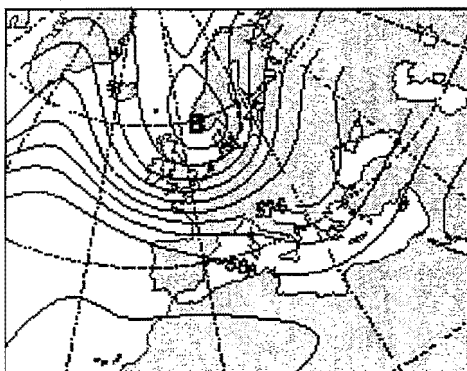
Grupo 1 (15 miembros)



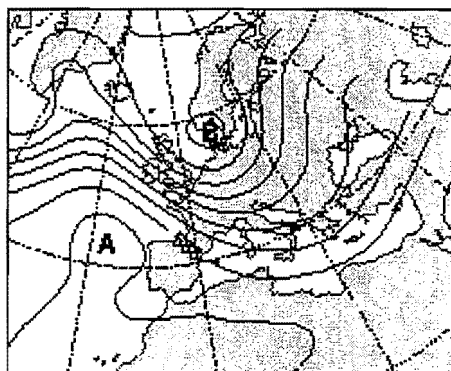
Grupo 2 (10 m)



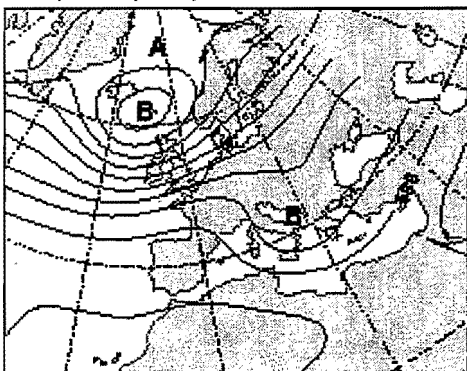
Grupo 3 (9 m)



Grupo 4 (9 m)



Grupo 5 (6 m)



Grupo 6 (2 m)

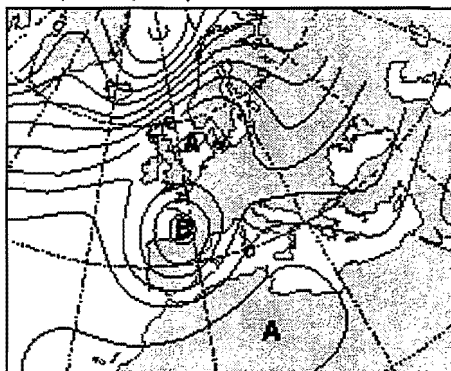
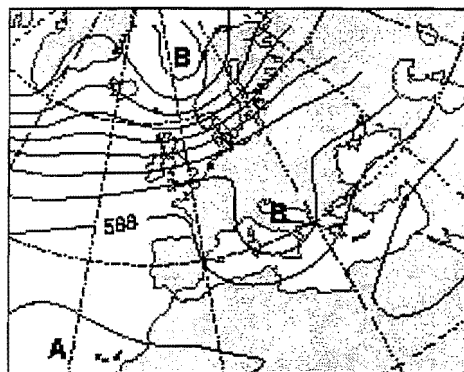


Fig.4.7.a.- Agrupamiento (Ward) para el área C, para D+5.

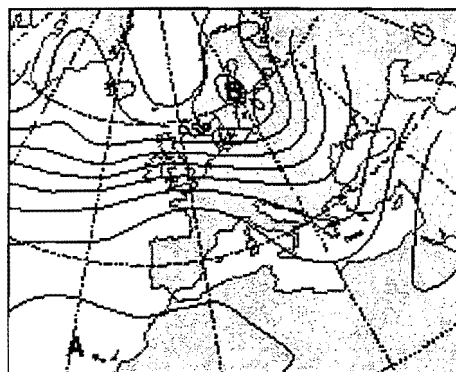
Grupos del CEP / Area C (SW de Europa)

17 Aug 98 / D + 6 valido para 23 Aug 98

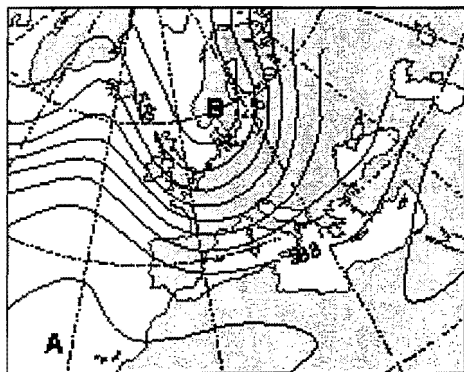
Grupo 1 (15 miembros)



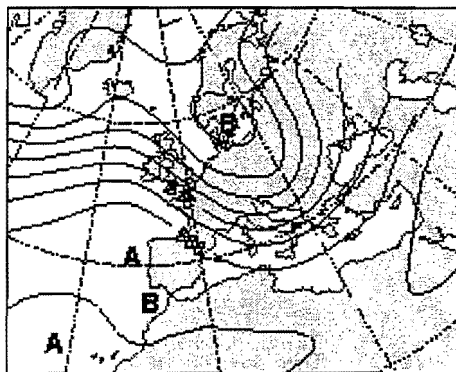
Grupo 2 (10 m)



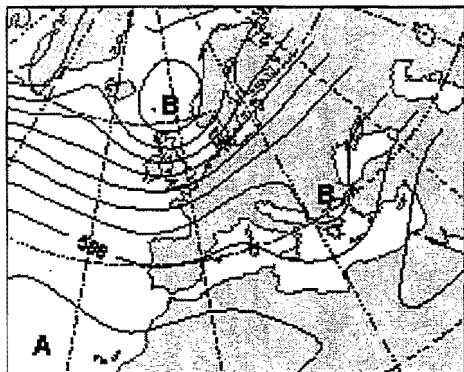
Grupo 3 (9 m)



Grupo 4 (9 m)



Grupo 5 (6 m)



Grupo 6 (2 m)

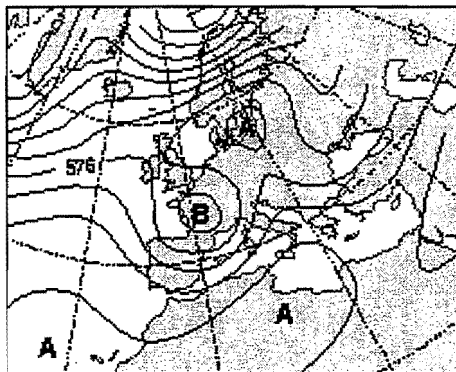
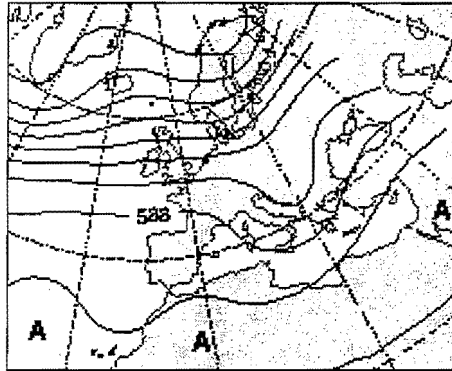


Fig.4.7.b.- Agrupamiento (Ward) para el área C, para D+6.

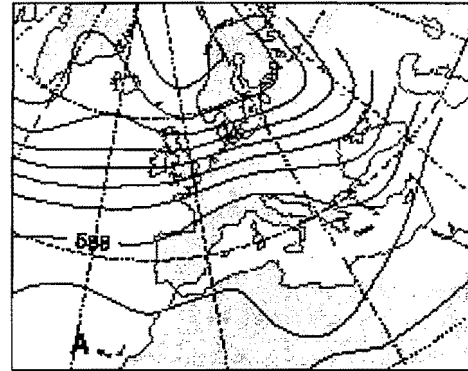
Grupos del CEP / Area C (SW de Europa)

17 Aug 98 / D + 7 valido para 24 Aug 98

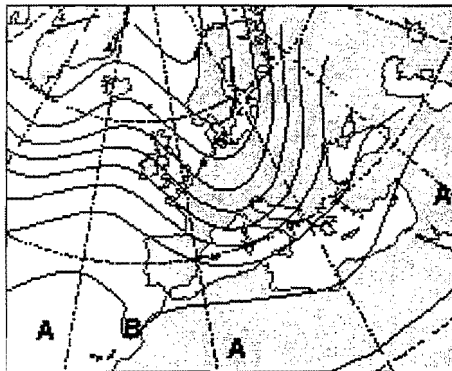
Grupo 1 (15 miembros)



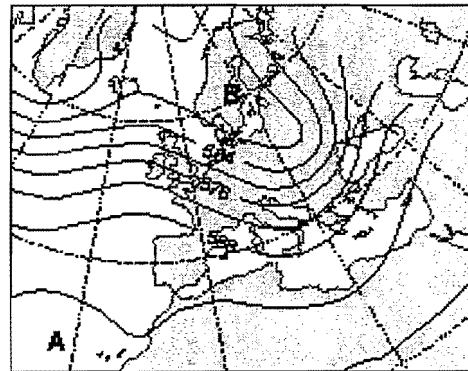
Grupo 2 (10 m)



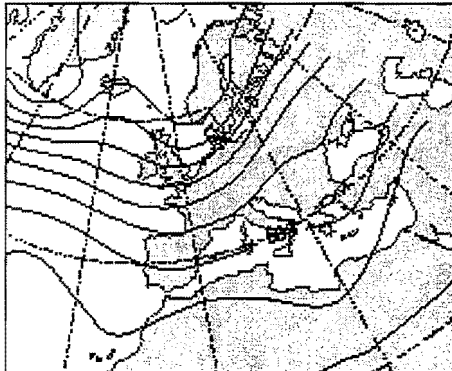
Grupo 3 (9 m)



Grupo 4 (9 m)



Grupo 5 (6 m)



Grupo 6 (2 m)

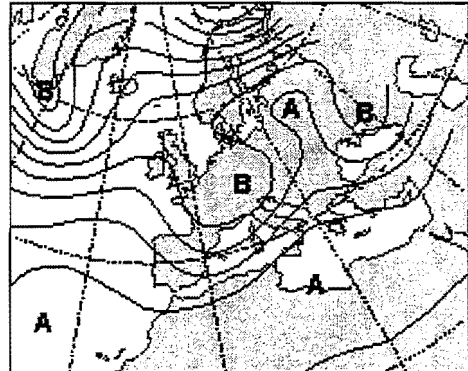


Fig.4.7.c.- Agrupamiento (Ward) para el área C, para D+7.

Agrupamiento experimental en el INM

Al igual que el CEPPM, utiliza el algoritmo de Ward, pero con tres características diferentes:

- realiza un agrupamiento para cada rango de predicción.
- considera áreas diferentes a las ya mencionada del CEPPM. Las áreas seleccionadas son:
 - C1, para la Península y Baleares; ver ejemplos en **figura 4.3** (D+5) y **figura 4.10** (D+7).
 - C3, específica para Canarias (ejemplo en **figura 4.11.**)
- el agrupamiento se realiza en dos fases:
 - **agrupamiento objetivo:** el número final de grupos es fijo e igual a 6. La razón de considerar un número fijo ha sido la dificultad de encontrar un parámetro estadístico para ajustar el número final de grupos. Se ha fijado en 6 y no en otro número debido a que después de probar varias opciones nos parece una buena solución de compromiso entre conseguir la menor pérdida de información y el que el número de grupos fuese manejable. Por otra parte el número máximo de grupos en el CEPPM es 6. Se ha comprobado subjetivamente que el agrupamiento objetivo no era muy adecuado para obtener un número inferior a 6 grupos. Es decir, se perdía mucha información al pasar de 6 grupos a un número inferior. Esto NO significa que siempre tengamos 6 escenarios diferentes. En la **figura 4.12.** se representa un ejemplo de la salida del agrupamiento objetivo, donde aparecen además los campos medios de otras variables que no han intervenido en la generación de los grupos (T en 500, Presión en SFC, T en 850, precipitación).
 - **agrupamiento subjetivo** (ver más adelante apartado 6.1.3): se utiliza cuando exista similitud entre algunos de los 6 grupos. Entonces, se **reagrupan** de forma subjetiva, formando **supergrupos**.

Comparación del agrupamiento del INM frente al del CEPPM:

Ventajas:

La principal ventaja es que capta más información:

Al realizar un agrupamiento para cada periodo de predicción, se tiene más en cuenta el comportamiento real del EPS. Miembros que en un determinado alcance, p. e. D+5, son similares, no tienen por que serlo también en otros alcances anteriores o posteriores. Por lo tanto, en el CEPPM, es bastante frecuente que un grupo incluya, para un determinado alcance, miembros bastante diferentes, y que están ahí, debido a que son muy próximos en el paso anterior y/o posterior.

Por otra parte, es intrínseco al EPS que, en general, la dispersión aumenta conforme avanza el periodo de predicción (aunque NO necesariamente). Esto significa que el

número final de grupos también será, en general, mayor cuanto mayor sea el periodo de predicción. Por lo tanto, NO tiene mucho sentido mantener constante el número de grupos para cada rango temporal, como hace el CEPPM. Al considerar áreas más adecuadas para España, la información de los grupos resultantes también es mayor.

Comparando las áreas del CEPPM, C y E con C1, se observa cómo esta última es más adecuada que C y E, especialmente para situaciones de DANA sobre el SW peninsular; el área C está demasiado desplazada hacia el NE para los intereses del INM, con lo que no "ve" lo que está al W del meridiano de 15 grados W (**figura 4.8** y **figura 4.9**). Por otra parte, en el área E, el peso de la circulación de latitudes altas es muy fuerte, siendo esta en la mayoría de los casos el origen de la diferenciación entre grupos.

Inconvenientes:

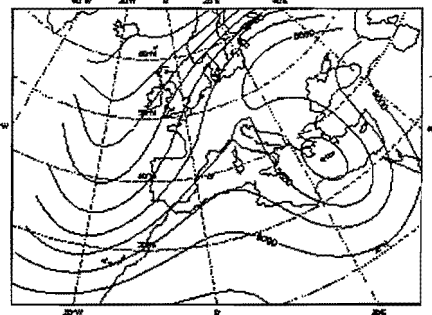
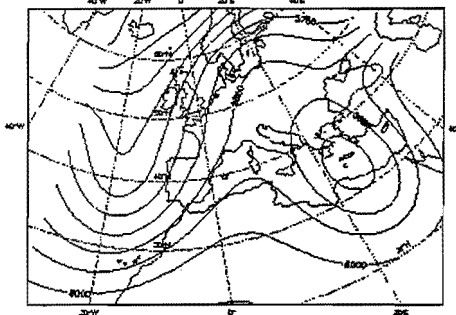
Puesto que el número de grupos y la composición de los mismos varía con el periodo de predicción, la continuidad temporal de las situaciones meteorológicas previstas en los grupos no está garantizada. Sin embargo, los grupos del CEPPM son más fáciles de interpretar; se trata de una o varias evoluciones con la misma probabilidad asociada para cada uno de los rangos de predicción.

Interpretación de los grupos:

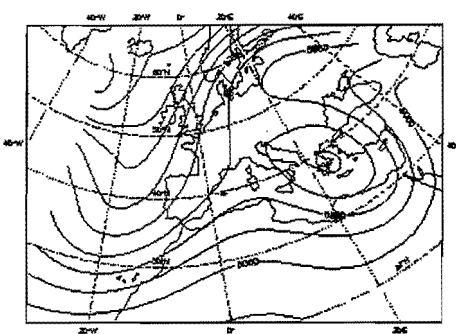
- Cada grupo final representa un **escenario** o **alternativa**, con una probabilidad asociada que es función de la población.
- El número final de grupos está relacionado con la dispersión del EPS, de forma que, en general, este número aumente con el periodo de predicción.

GRUPOS DEL EPS / FECHA: 980503 D+7 / AREA: C / 4 Grupos, Control en 2

GRUPO 1, 20 miembros: 3, 40, 18, 38, 9, 42, 21, 30, 45, 15, 24, 31, 11, 37, 41, 28, 48, 50, 23



GRUPO 3, 11 miembros: 13, 43, 33, 17, 39, 16, 2, 22, 6, 4, 46



GRUPO 4, 5 miembros: 20, 36, 8, 10, 26

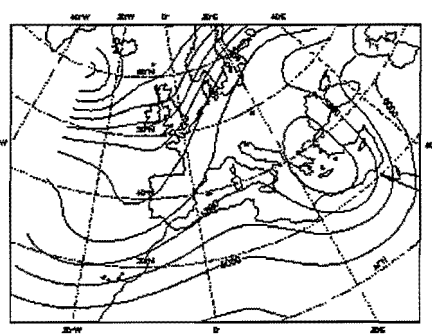
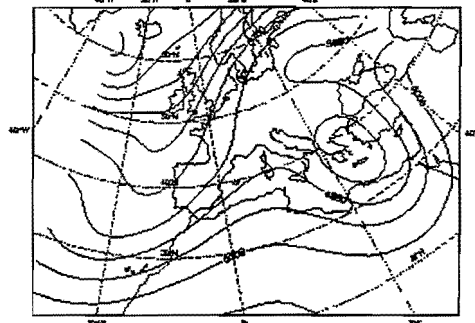
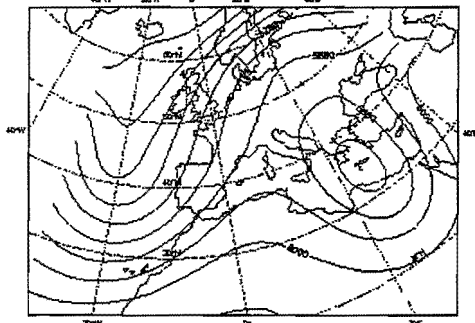


Fig.4.8.- Grupos para el área C y el rango D+7.

GRUPOS DEL EPS / FECHA: 980503 D+7 / AREA: C1 / 4 Grupos, Control en 1

Grupo 1, 34 miembros: 5, 21, 0, 19, 27, 42, 48, 23, 40, 29, 29, 38, Grupo 2, 14 miembros: 32, 36, 2, 22, 6, 20, 24, 8, 18, 14, 41, 47, 28, 45
34, 1, 17, 16, 11, 27, 30, 7, 19, 3, 7, 44



Grupo 3, 11 miembros: 13, 43, 35, 33, 24, 39, 4, 16, 12, 49.

Grupo 4, 2 miembros: 15, 31

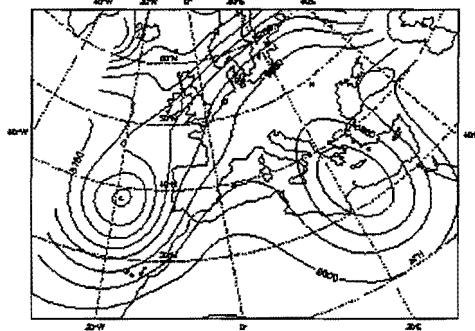
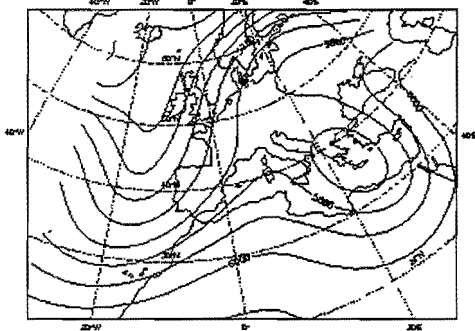
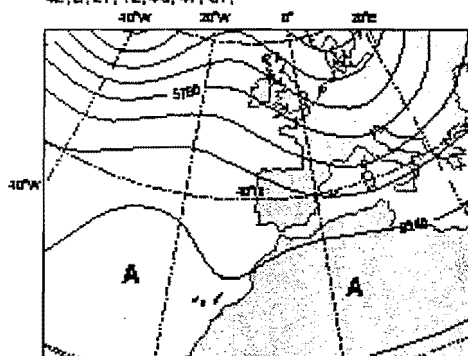


Fig.4.9.- Grupos para el área C1 y el rango D+7.

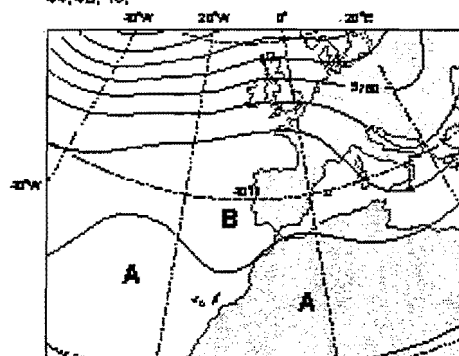
Grupos (metodo de Ward) / Z 500

17 Ago. 98 / D + 7 valido para: 24 Ago. 98

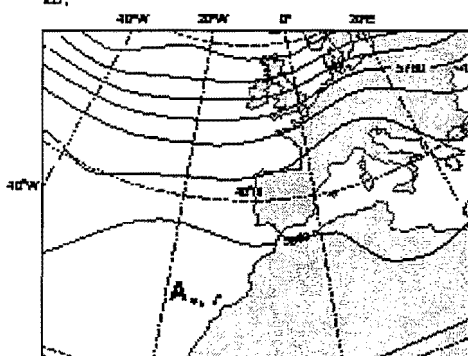
Grupo 1: 15 m.
1, 25, 35, 23, 34, 39, 11, 16,
42, 8, 21, 12, 46, 47, 31,



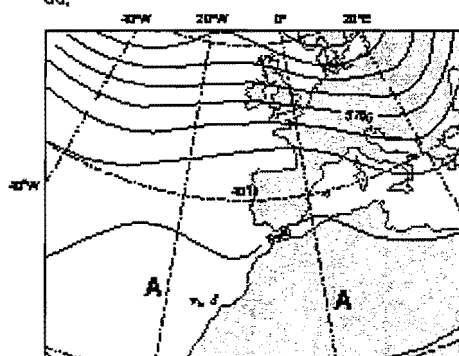
Grupo 2: 11 m.
16, 22, 17, 38, 45, 6, 19, 33,
44, 48, 10,



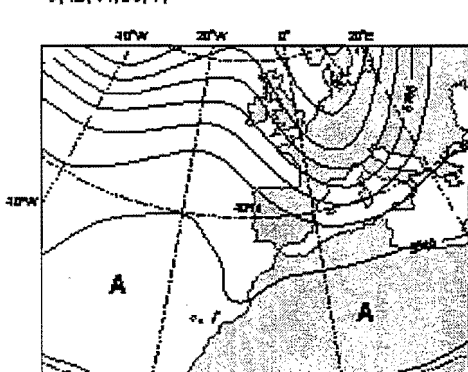
Grupo 3: 9 m.
13, 40, 20, 0, 32, 3, 30, 14,
28,



Grupo 4: 9 m.
2, 26, 6, 29, 4, 49, 24, 37,
36,



Grupo 5: 5 m.
9, 18, 41, 60, 7,



Grupo 6: 2 m.
27, 43,

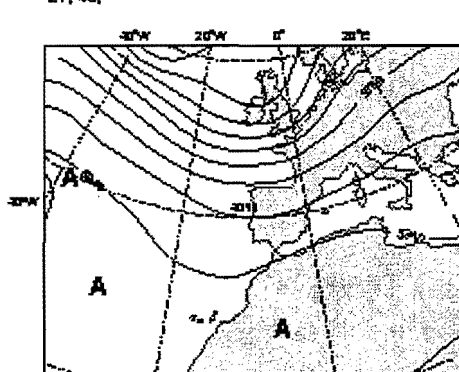
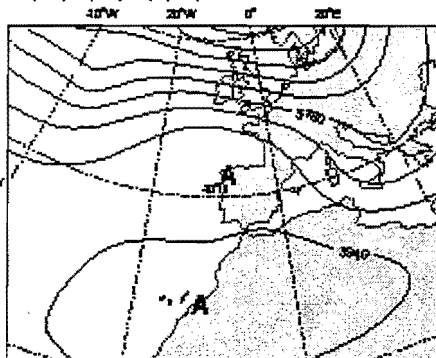


Fig.4.10.- Agrupamiento (Ward) para el área C1 y el rango D+7.

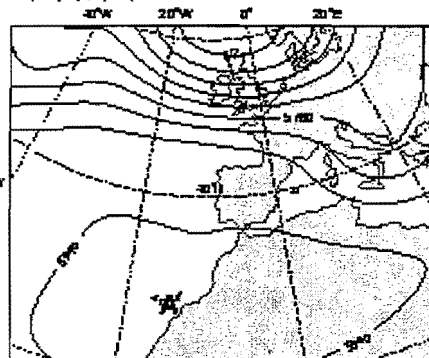
Grupos (metodo de Ward) / Z 500

Area C3 / 17 Ago. 98 / D + 5 valido para: 22 Ago. 98

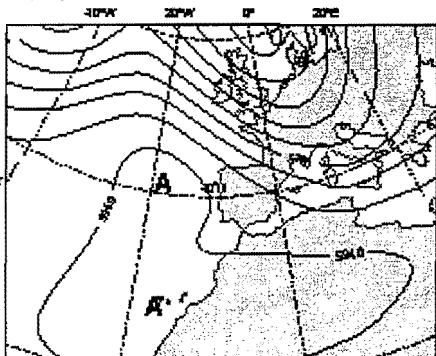
Grupo 1: 15 m.
3, 27, 46, 14, 30, 13, 0, 22,
22, 38, 40, 10, 31, 6, 36,



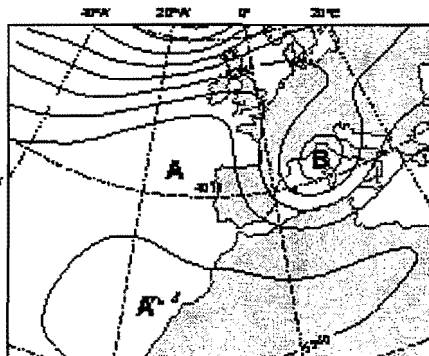
Grupo 2: 13 m.
9, 32, 60, 39, 44, 24, 37, 36,
23, 43, 1, 47, 26,



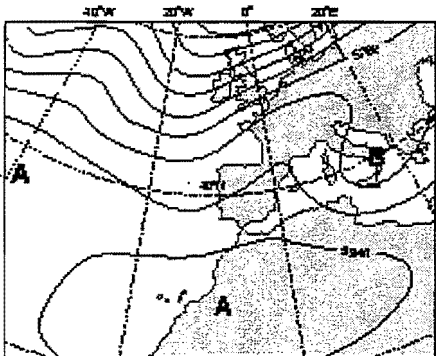
Grupo 3: 10 m.
4, 46, 19, 21, 7, 26, 18, 29,
34, 11,



Grupo 4: 8 m.
6, 17, 2, 48, 33, 8, 49, 16,



Grupo 5: 3 m.
20, 41, 16,



Grupo 6: 2 m.
12, 42,

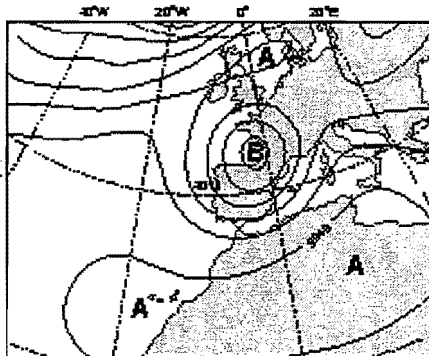


Fig.4.11.- Agrupamiento (Ward) para el área C3 y el rango D+5.

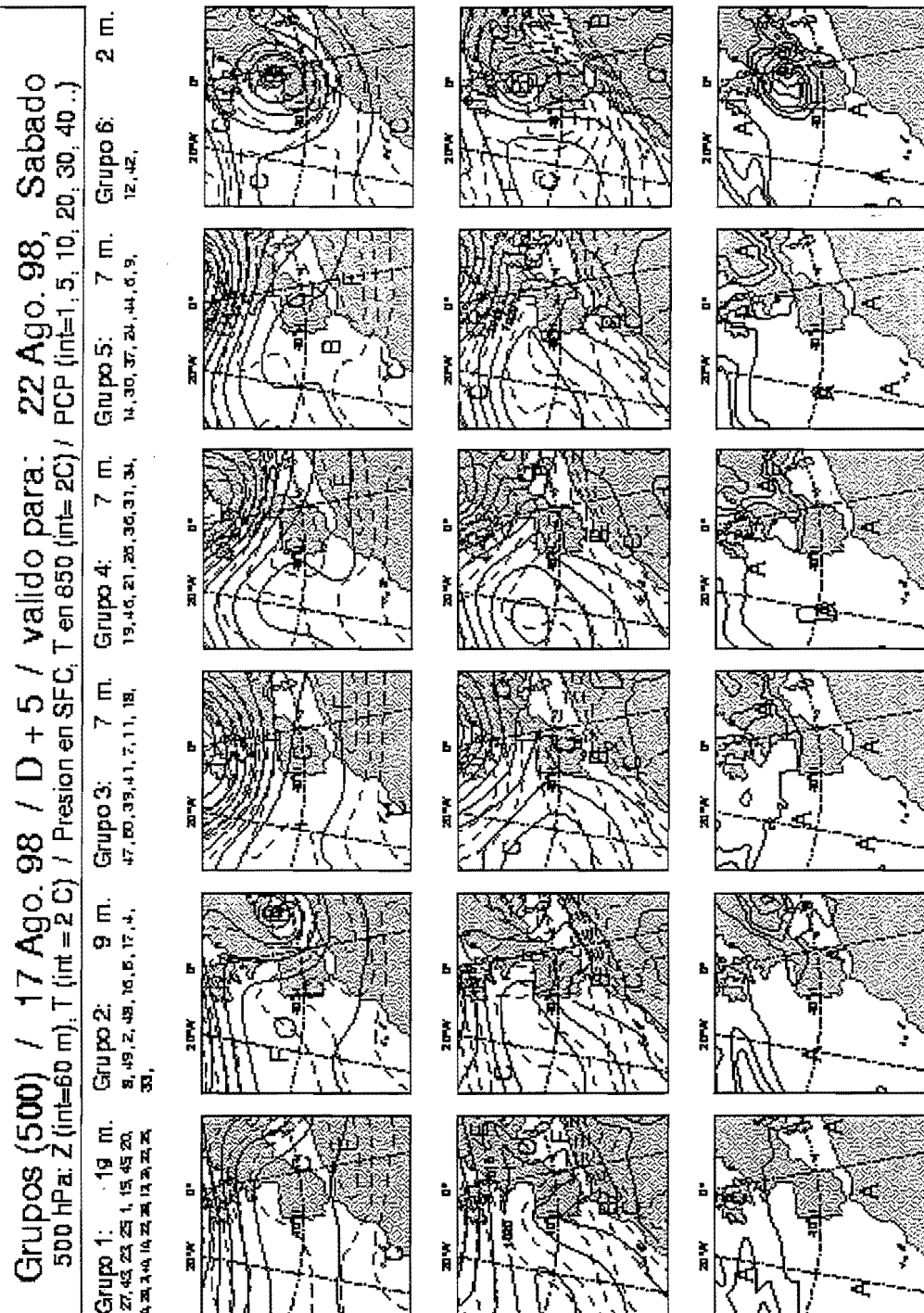
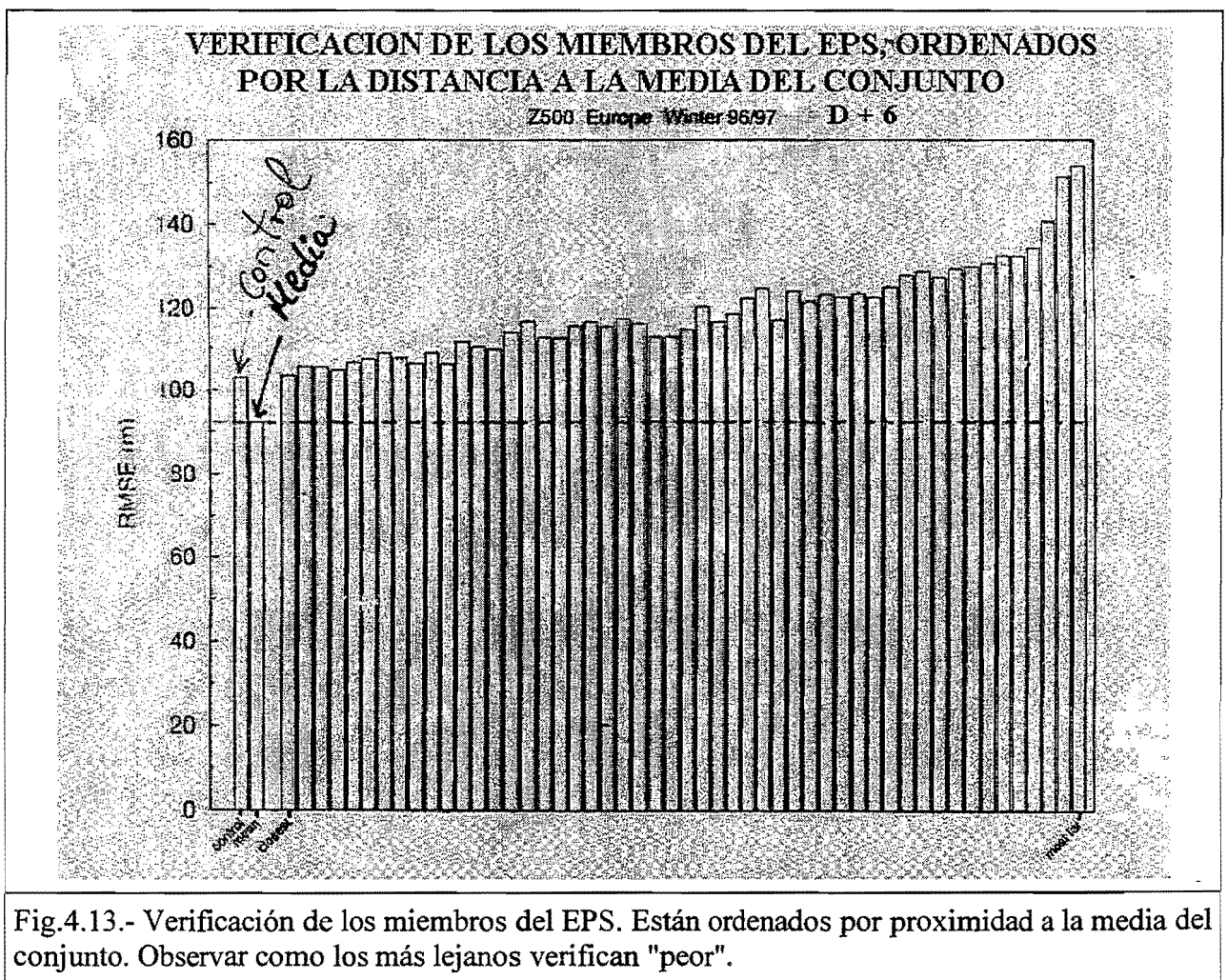


Fig.4.12.- Ejemplo del agrupamiento del INM, para el área C1 y el rango D+5

4.2. METODO DE LOS TUBOS (tubing)

El "tubing" es otro método objetivo de clasificación de los 51 miembros del EPS. Se basa en las siguientes tres suposiciones (Atger, 1996, 1997):

- La distribución del conjunto de predicciones es, generalmente, monomodal
- El análisis verificante se encuentra con mayor probabilidad en las proximidades de la media del conjunto. En la **figura 4.13** se puede observar como los errores, en términos de RMS (*Root Mean Square* = raíz cuadrática media), de las predicciones aumenta conforme estas se encuentran más alejadas de la media del conjunto.
- La suposición previa es cierta incluso en el caso de multimodalidad



De estas suposiciones se deriva la principal característica del *tubing*. Se trata de una clasificación de miembros adecuada para distribuciones monomodales, dando más importancia a la parte central de la distribución e ignorando posibles modalidades. A diferencia de los métodos de agrupamiento, el *tubing* no intenta agrupar todos los miembros en torno a centroides hipotéticos sino que trata de distribuirlos alrededor de ejes que parten de la media del conjunto y alcanzan los miembros extremos de la distribución.

Antes de entrar a describir el método, consideremos un ejemplo muy simple que nos permita entender mejor lo que se hacía en el agrupamiento y lo que se pretende hacer con el *tubing*. Supongamos que tenemos un conjunto bidimensional de 51 puntos extraídos aleatoriamente de una distribución gaussiana (**figura 4.14**). En la representación gráfica se observa que, aunque la distribución es **monomodal**, aparecen zonas con acumulación local de puntos. Se ha aplicado el método de agrupamiento de Ward a este conjunto de puntos; en la **figura 4.15** se puede observar una deficiencia del método de agrupamiento en el caso de distribución monomodal: los límites entre los grupos son arbitrarios, separando, a menudo, miembros que son muy próximos en diferentes grupos. El resultado del *tubing* para este ejemplo aparece en **figura 4.16**.

El algoritmo es bastante simple:

- Tomando como punto de partida la media del conjunto, se agrupan en torno a este punto un cierto número de miembros hasta que se alcanza una determinada condición (ver más abajo, configuraciones del *tubing*). De esta forma se obtiene el Grupo Central, que queda caracterizado por su radio: distancia de la media del conjunto al último miembro aceptado.
- Se busca el miembro más distante de la media. Este se convierte, automáticamente, en el primer extremo y define un tubo agrupando todos aquellos miembros que se encuentran en el cilindro que procede de la frontera del grupo central y termina en el extremo. El radio de este cilindro es el mismo que el radio del grupo central.
- Se procede de la misma forma con el resto de los miembros, teniendo en cuenta que un miembro perteneciente ya a un tubo puede todavía pertenecer a otro pero no puede ser un extremo.
- El método finaliza cuando todos los miembros quedan clasificados.

Nota:

El **método del grupo central** es similar al *tubing*, hasta la obtención del Grupo Central. A partir de este punto el *tubing* no agrupa, mientras que el método del **grupo central** sí lo hace, mediante el algoritmo de Ward.

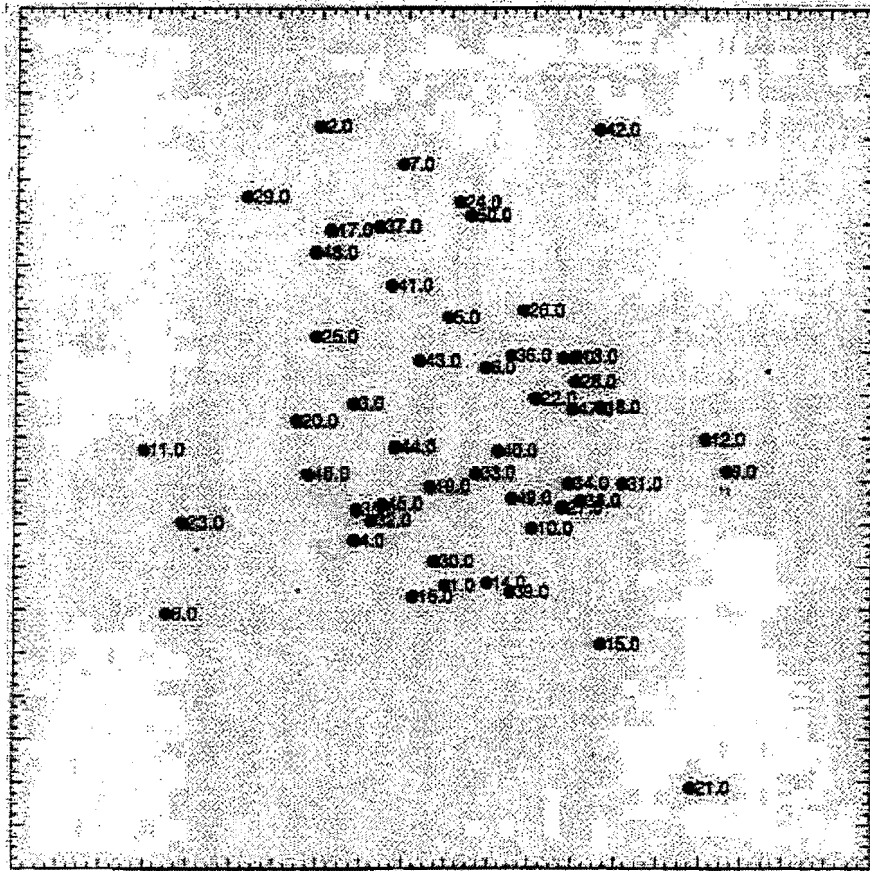


Fig.4.14.- Representación bidimensional de 51 puntos extraídos aleatoriamente a partir de una distribución gaussiana.

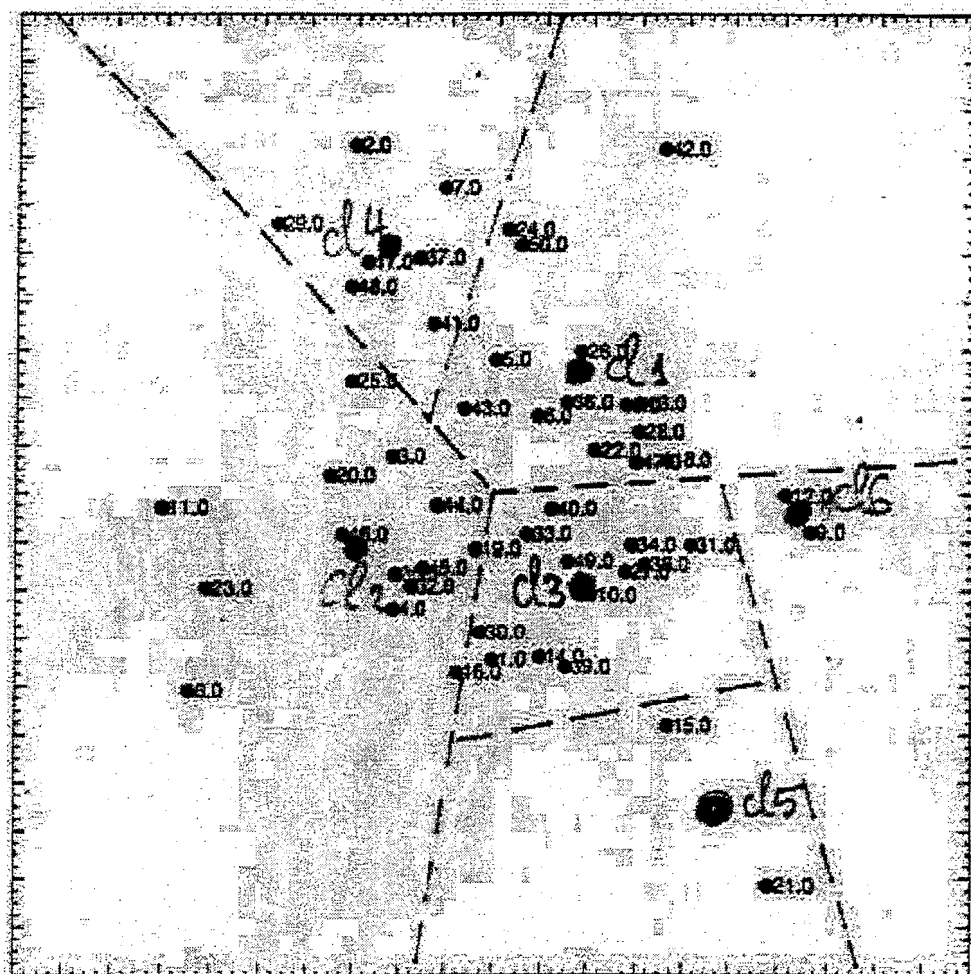


Fig.4.15.- Aplicación del algoritmo de Ward a la distribución teórica de los 51 puntos. Observar que aparecen puntos próximos que pertenecen a grupos diferentes.

METODO DE LOS TUBOS TUBING

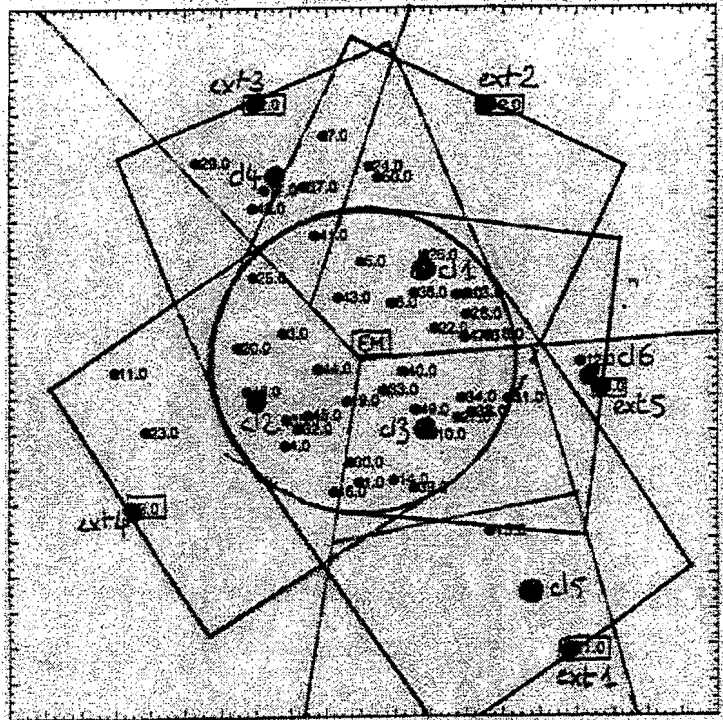


Fig.4.16.- Representación esquemática de los tubos para una distribución teórica (monomodal). Grupo Central: circunferencia. Tubos: rectángulos. EM: Media del conjunto (de F. Atger, 1996,1997).

4.2.1. Configuraciones del *tubing*

El radio del grupo central es el parámetro fundamental del *tubing*. La condición que determina el radio puede consistir en la población del grupo central, dispersión, .. Se han considerado dos configuraciones posibles para determinar el tamaño del grupo central:

- la dispersión del día; esto es, la varianza del grupo central es un porcentaje (usualmente 50%) de la varianza total del EPS. El número de tubos varía poco de un día a otro y NO depende de la incertidumbre del Conjunto.
- unos umbrales obtenidos de una adaptación estacional de la dispersión (esta varía mucho a lo largo del año). De esta forma, independientemente de la dispersión del conjunto, el radio varía muy poco de un día a otro; lo cual no significa que el número de tubos no varíe. En este caso, el número de tubos varía de un día a otro en función de la dispersión del día.

Según Atger (1997), parece que esta segunda opción es más adecuada para fines operativos, puesto que permite asociar directamente el número de tubos a la incertidumbre del EPS (dada por la dispersión). Sin embargo, la primera opción es muy apta para extraer de una forma rápida la mayor parte de la información del EPS.

4.2.2. Resultado del *tubing*

En la **figura 4.17** aparece un ejemplo con los productos del *tubing*:

Grupo Central, representado por su campo medio; este será parecido al de la media del conjunto.

Extremos de los tubos. No tiene sentido calcular el campo medio de un tubo pues los miembros no han sido agrupados en torno a un centroide.

4.2.3. Interpretación de los productos del *tubing*

- El Grupo Central, constituye la principal opción en una aproximación determinista. La predicción basada en esta opción principal puede considerarse como la que más probablemente verificará.
- Las diferencias entre las configuraciones meteorológicas del grupo central y los extremos de los tubos, indican las posibles desviaciones de la opción principal. Podemos considerar a los extremos como caricaturas de los tubos que nos permiten visualizar mejor las tendencias presentes en el conjunto. Las predicciones basadas en estas desviaciones pueden ser mencionadas como posibilidades en una predicción determinista o bien con una probabilidad estimada.

El número de tubos es un indicador de la incertidumbre de la predicción determinista basada en el grupo central. Se puede entonces establecer un índice de confianza: alto (si no hay tubos o los que hay no son muy diferentes de la media), medio (si hay uno o dos) y bajo (si hay más).

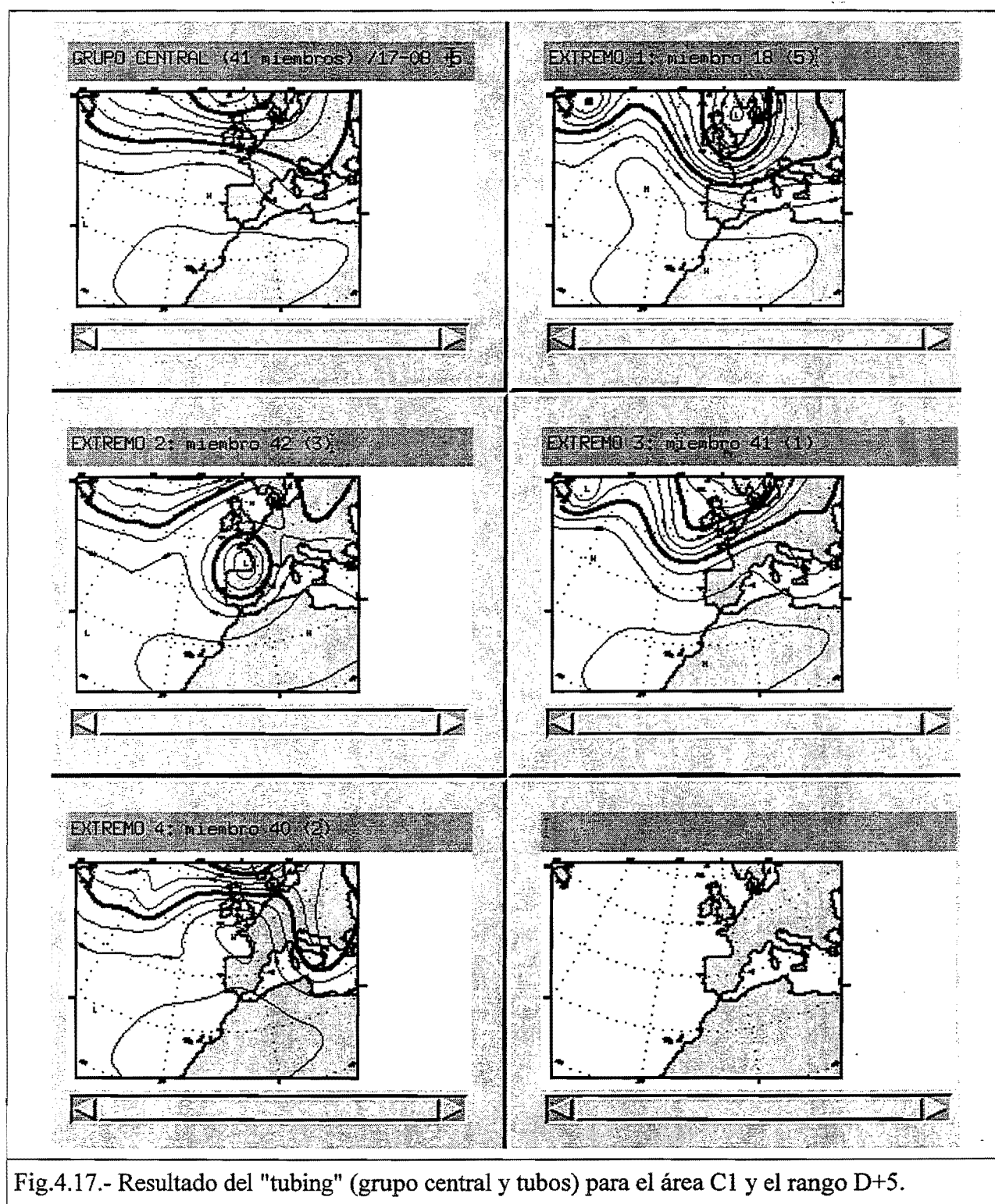


Fig.4.17.- Resultado del "tubing" (grupo central y tubos) para el área C1 y el rango D+5.

4.2.4. Los tubos en el CEPPM y en el INM

Los tubos en el CEPPM

Se generan diariamente los tubos basados en varios periodos de tiempo de referencia: D+4, D+6, D+7, D+8 y D+10. Para cada uno de estos, se obtienen los tubos para varios pasos de tiempo anteriores a cada periodo de referencia. Así por ejemplo, para el periodo de referencia D+6, se obtienen tubos para: D+4, D+5 y D+6.

Se consideran las mismas áreas que para el agrupamiento: E, A, B, C y D. El campo meteorológico de referencia es, al igual que para los grupos, el geopotencial en 500 hPa; posteriormente se trasladan los resultados del *tubing* a otros campos: Z en 1000 hPa, T en 500 y 850 hPa. En las **figura 4.18a** y **figura 4.18b** se muestran ejemplos de tubos, para D+5, generados con el periodo de referencia D+7, para las áreas C y E, respectivamente. Para un área más pequeña, como la C, aparecen mas situaciones extremas o tubos.

Los tubos en el INM

Se han realizado las mismas adaptaciones que para los grupos: único paso de tiempo en la generación de los tubos y áreas específicas para España.

En la **figura 4.19** (tubos para el área C1) se puede observar como el resultado los extremos NO difieren demasiado de los grupos (**figura 4.9**).

Comparación: AGRUPAMIENTO-TUBING

El agrupamiento busca similitudes entre los miembros del conjunto; el *tubing* realza sus diferencias.

Del agrupamiento se obtienen varios grupos asociados a diferentes modalidades, mientras que el resultado del *tubing* se plasma en el centro y bordes de la distribución.

La interpretación del los grupos se basa en el concepto de alternativa: cada grupo representa una alternativa con una probabilidad asociada; los tubos se interpretan de forma diferente.

Los grupos minoritarios, tienden a recoger las tendencias mostradas por los tubos, si bien los extremos de estos siempre serán (a no ser que se obtengan grupos con un miembro) más *radicales*.

TUBOS DEL CEP (Area C) / Z 500hPa / Ref= 168 / D+ 120 / 7 tubos / Oper.

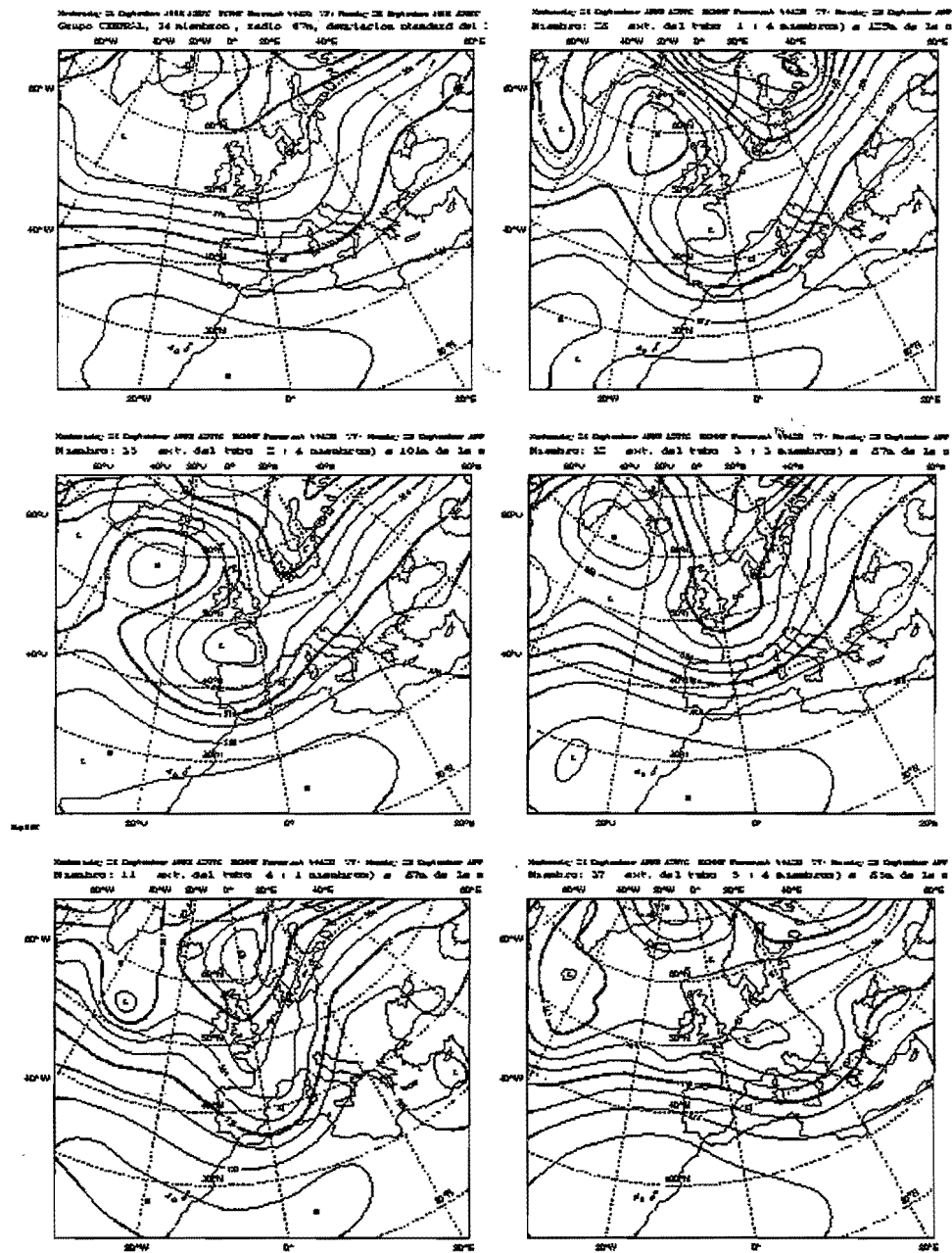


Fig.4.18.a.- Tubos del CEPPM, para el área C y el rango D+5

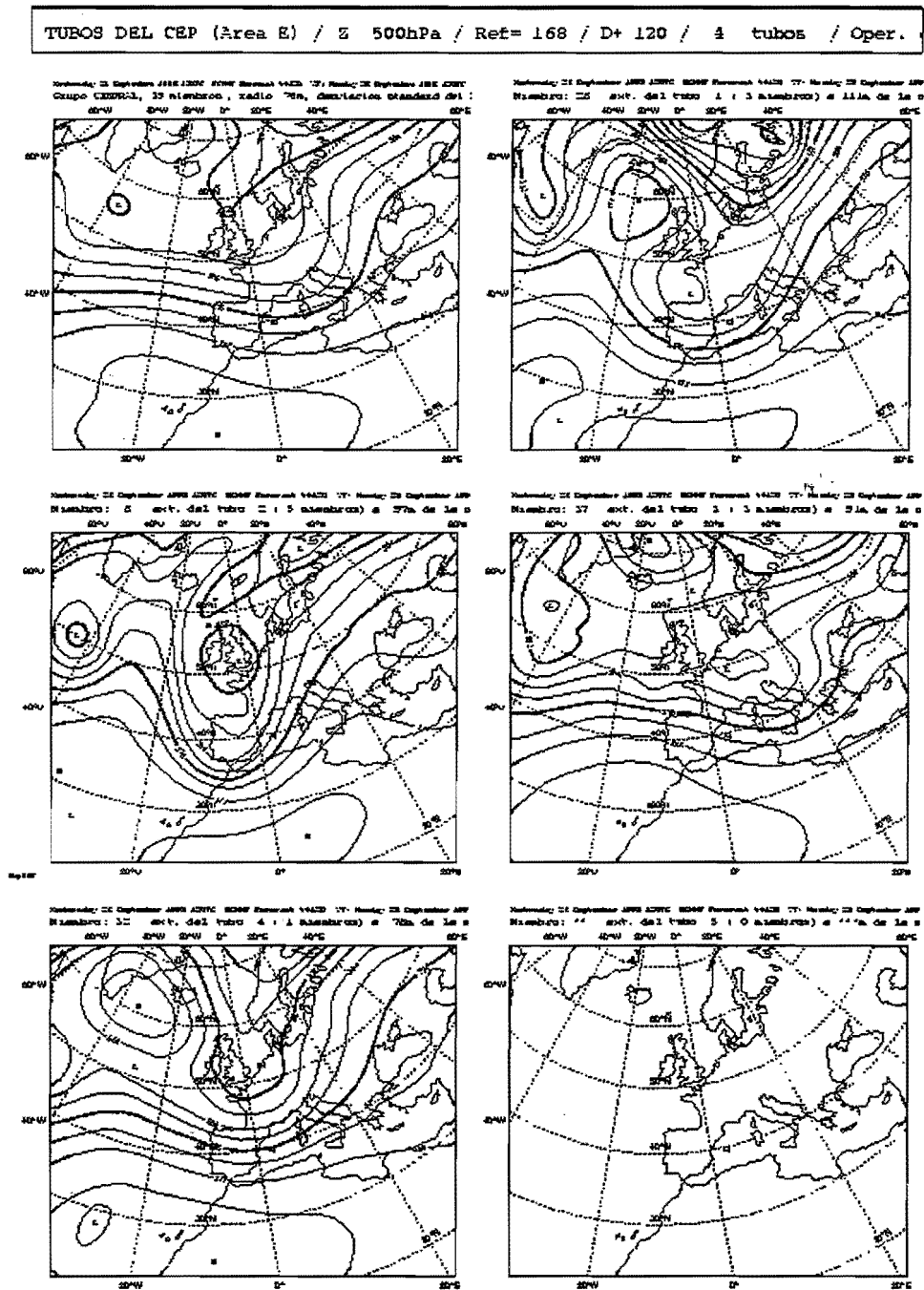


Fig.4.18.b.- Tubos del CEPPM para el área E y el rango D+5 (generados con referencia al D+7).

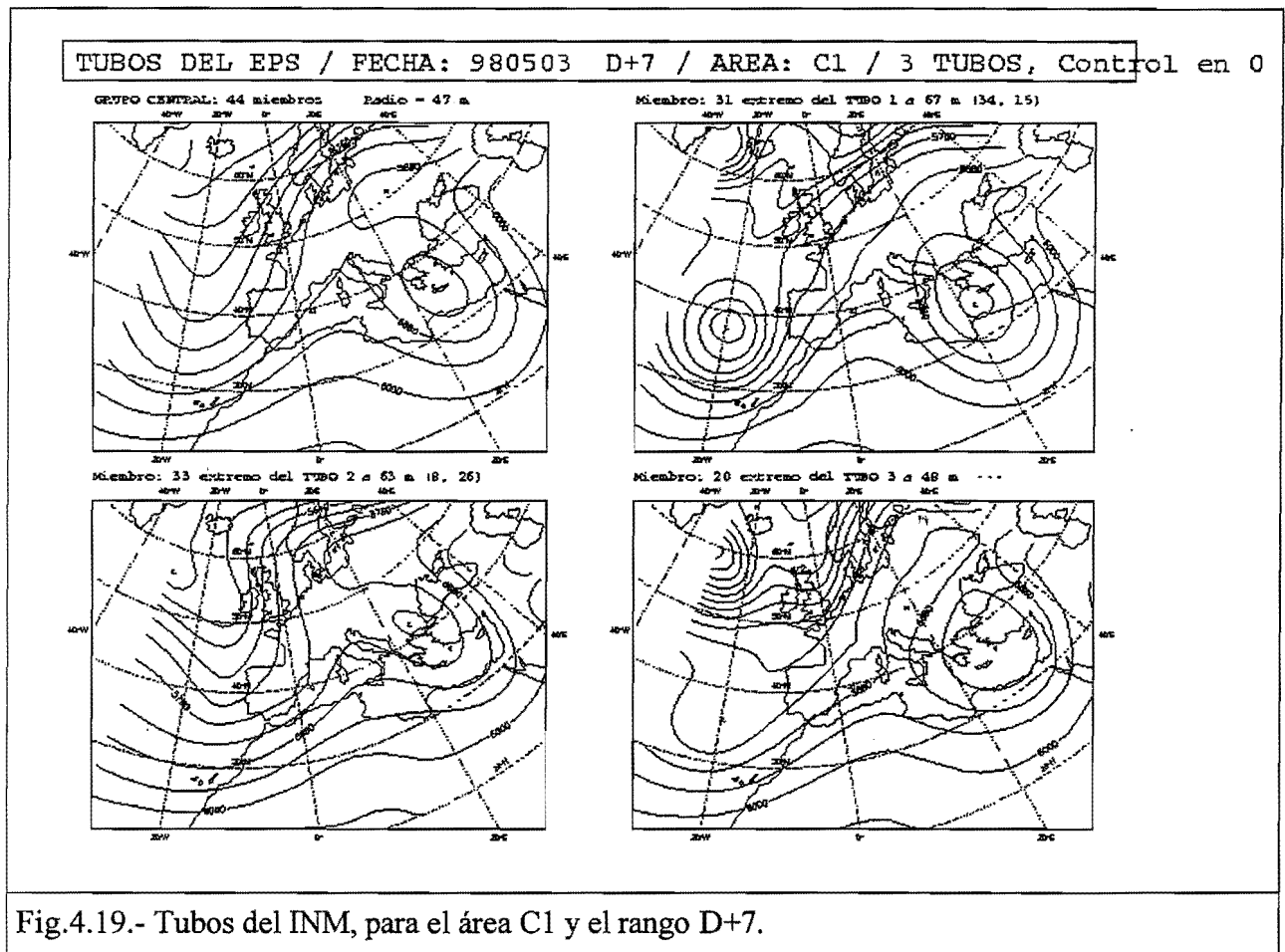


Fig.4.19.- Tubos del INM, para el área C1 y el rango D+7.

4.3. RED NEURONAL

El Instituto Meteorológico Suizo (SMI), utiliza una red neuronal para clasificar las predicciones del EPS. Concretamente, hace uso del llamado *mapa topológico de Khonen*.

La clasificación se efectúa en dos fases:

a) Fase de aprendizaje de la red

A partir de las situaciones meteorológicas diarias (definidas por los análisis de Z-500 y T-850) de un largo periodo de tiempo (periodo: 1981-1995), la red nos proporciona un determinado número (definido por el usuario, actualmente 144) de situaciones meteorológicas que caracterizan a Suiza (situaciones climatológicas). En la **figura 4.20** se representa un subconjunto de ellas. Estas 144 situaciones se representan en el mapa topológico mediante una matriz de 12x12 celdas cumpliendo el criterio de vecindad, de forma que celdas próximas representan configuraciones sinópticas similares.

Este paso se realiza solamente una vez.

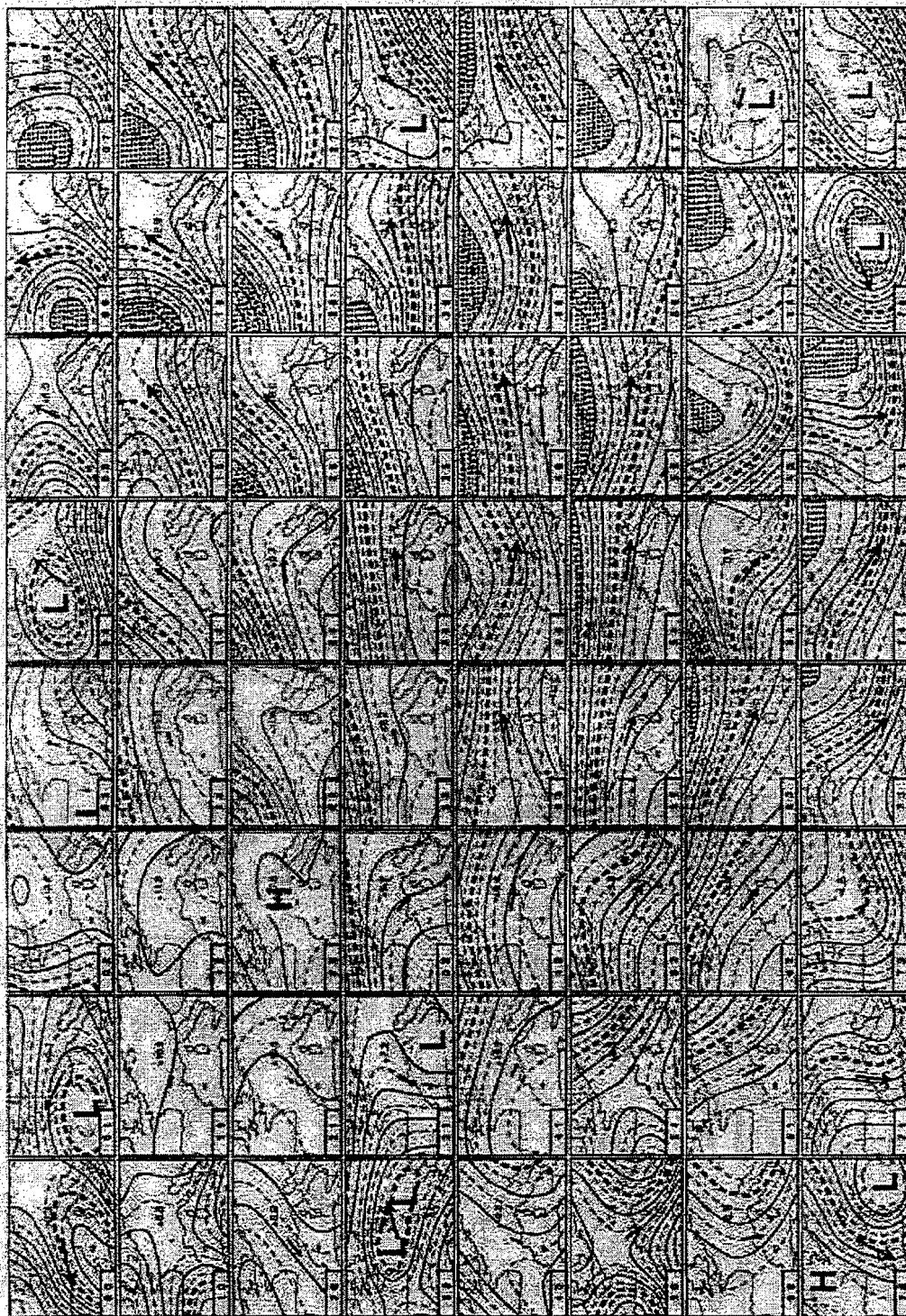


Fig.4.20.- Configuraciones sinópticas clasificadas por la red neuronal en la fase de aprendizaje.

b) Fase de clasificación de las predicciones del EPS

La red asigna cada una de las 51 predicciones a una de las 144 configuraciones fijas. El resultado gráfico resulta de marcar las celdas asignadas o *premiadas* (con alguna predicción) en el mapa topológico de las 12x12 celdas. Se utilizan colores para indicar el número de predicciones asociadas con las diferentes celdas (y que por tanto, apoyan la correspondiente configuración sinóptica). También se clasifica la predicción operativa (T319) (se marca con un determinado símbolo) para comprobar el grado de apoyo por parte del EPS.

Esta fase se realiza diariamente, para cada periodo de predicción. En la **figura 4.21** aparecen los resultados de la clasificación operativa; se hace para los periodos: D+4 a D+10, por separado.

Interpretación:

- A partir del gráfico se obtiene una idea rápida de la dispersión, así como del apoyo que tiene el modelo operativo o Control.
- Generan una curva de dispersión (parte inferior derecha de la **figura 4.21**) en función del rango temporal a través del concepto de entropía. Está en función de la distribución geográfica de las *celdas premiadas* con miembros del EPS.
- La verificación se hace de forma similar, adjudicando el análisis verificador a una casilla y comprobando si esta estaba *premiada* o si es muy próxima a las *premiadas*.

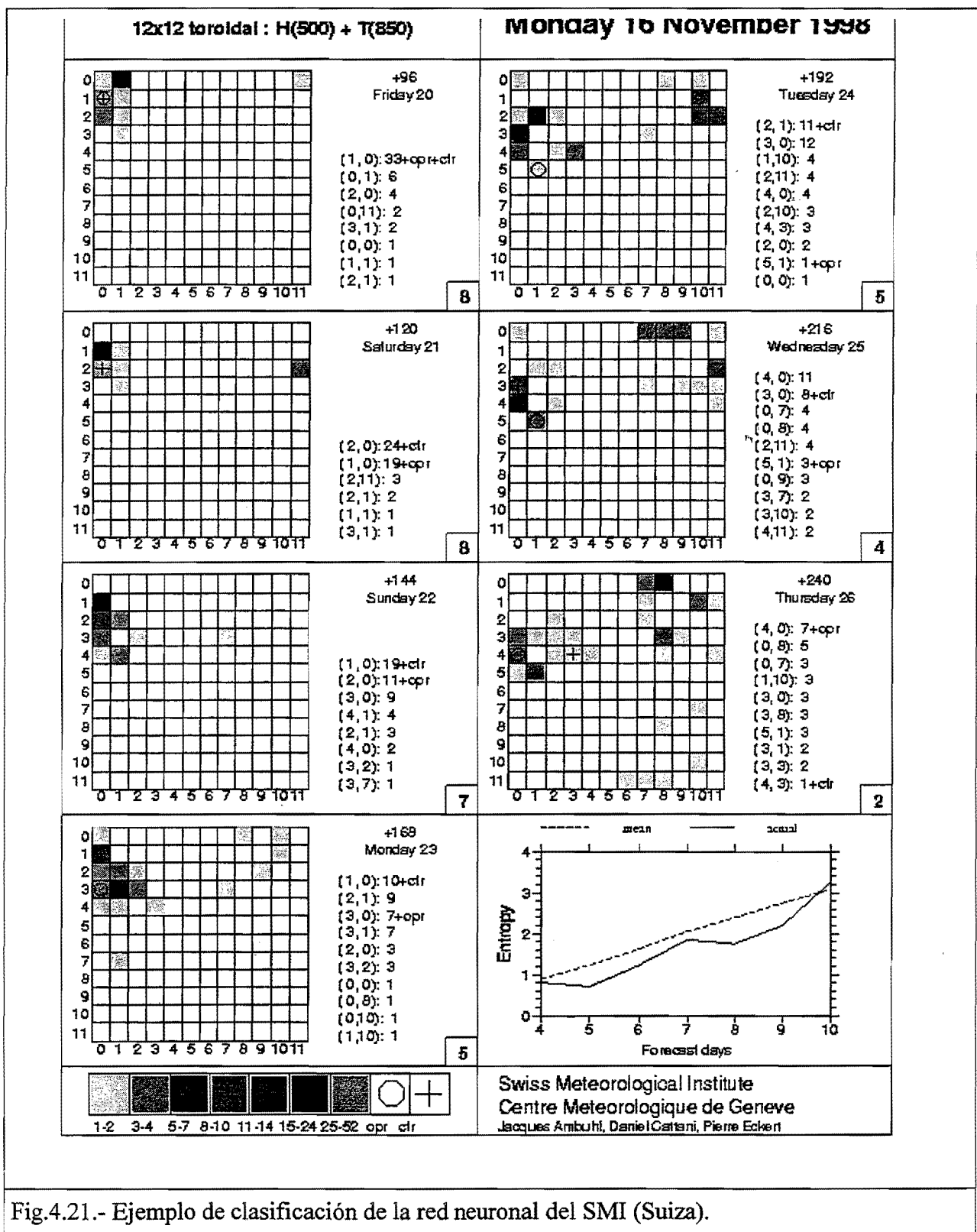


Fig.4.21.- Ejemplo de clasificación de la red neuronal del SMI (Suiza).

5. VERIFICACION DEL EPS

5.1. Evaluación de la dispersión y de los miembros del EPS

5.2. Verificación de grupos y tubos

5.3. Verificación de la predicción probabilística: diagramas de fiabilidad, curvas

ROC

Los modelos numéricos de predicción se verifican contra el análisis y/u observaciones de forma sistemática, con la intención de evaluar la calidad y utilidad del modelo y, a la vez, identificar las causas de su mal comportamiento. Puesto que, actualmente, el EPS constituye la herramienta fundamental para la elaboración de la predicción de plazo medio, también es necesario conocer su utilidad. Los estudios de verificación realizados en el CEPPM son numerosos, la mayoría están referidos al área europea y algunos al SW de Europa. En el INM, tan solo se disponen de verificaciones de la media del EPS referida a parámetros de superficie frente a observaciones (Servicio de Aplicaciones Meteorológicas). Esta pendiente una evaluación del EPS adaptada a España.

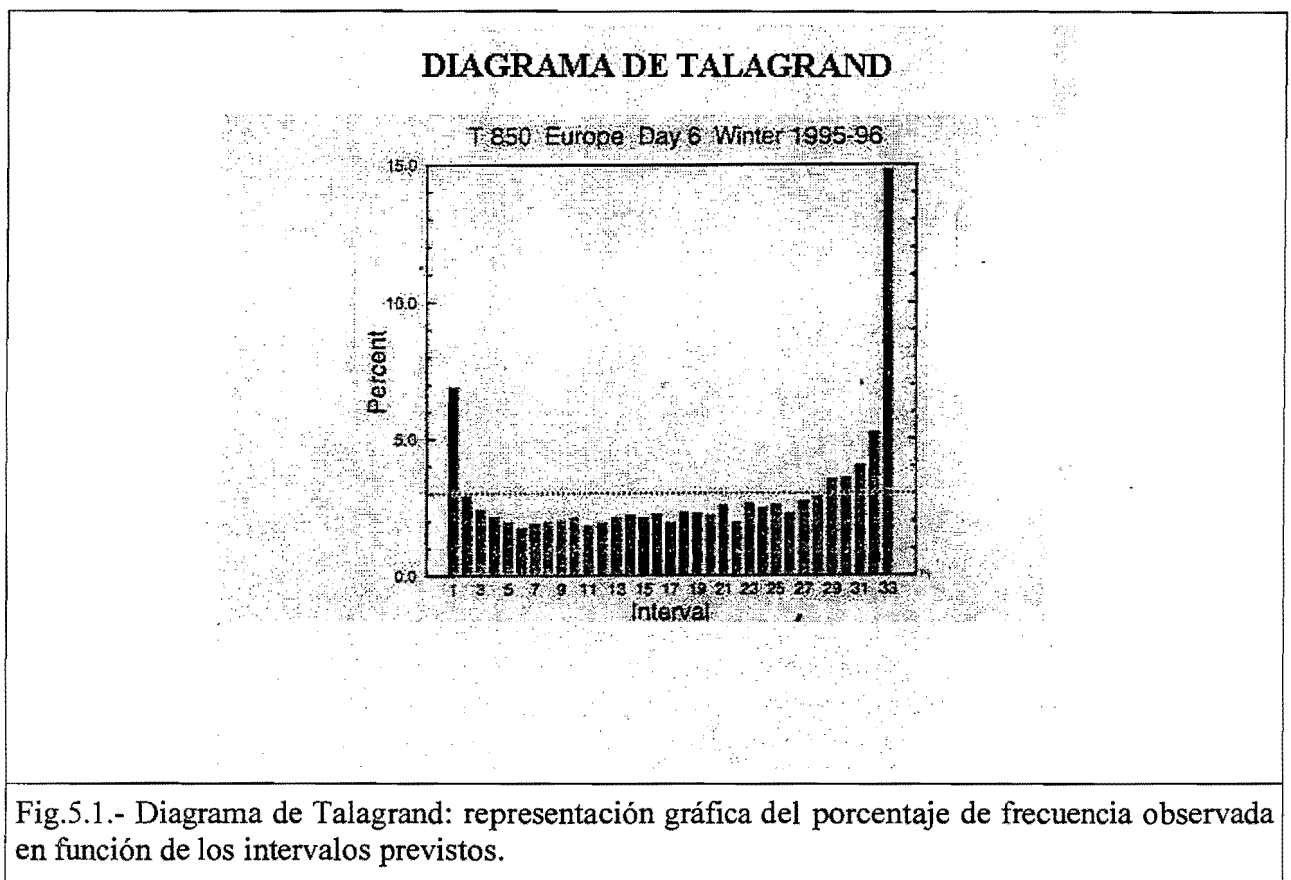
En este apartado se describen varios aspectos de la verificación del EPS. En primer lugar se evalúa la dispersión del EPS y su relación con la predicción de Control. A continuación se presentan resultados de verificación de grupos y tubos. La última sección trata de la verificación de productos probabilísticos.

5.1. EVALUACION DE LA DISPERSION Y DE LOS MIEMBROS DEL EPS

5.1.1. Evaluación de la dispersión: diagrama de Talagrand

Uno de los requerimientos más importantes de un sistema de predicción por conjuntos es que la dispersión del conjunto sea lo suficientemente grande para cubrir las incertidumbres de la predicción. Es deseable que los análisis y/u observaciones estén dentro del abanico de posibilidades que ofrece el EPS. Una forma de evaluar la dispersión es hacer uso del llamado diagrama de Talagrand.

Consiste en la representación gráfica de frecuencias observadas (número de veces que el valor observado o analizado cae dentro del intervalo previsto de una variable) en función de los intervalos previstos (tantos como número de miembros del EPS más 1; en la **figura 5.1** hay 33 intervalos, pues se trata de un ejemplo de la configuración antigua del EPS, anterior a diciembre de 1996).



Se utiliza para detectar posibles sesgos. En esa **figura** se puede observar la alta frecuencia para los intervalos extremos, indicando que había un importante número de veces en que el análisis o los valores observados caían fuera del rango de valores previstos.

5.1.2. Relación entre dispersión (*spread*) del EPS y pericia (*skill*) de Control

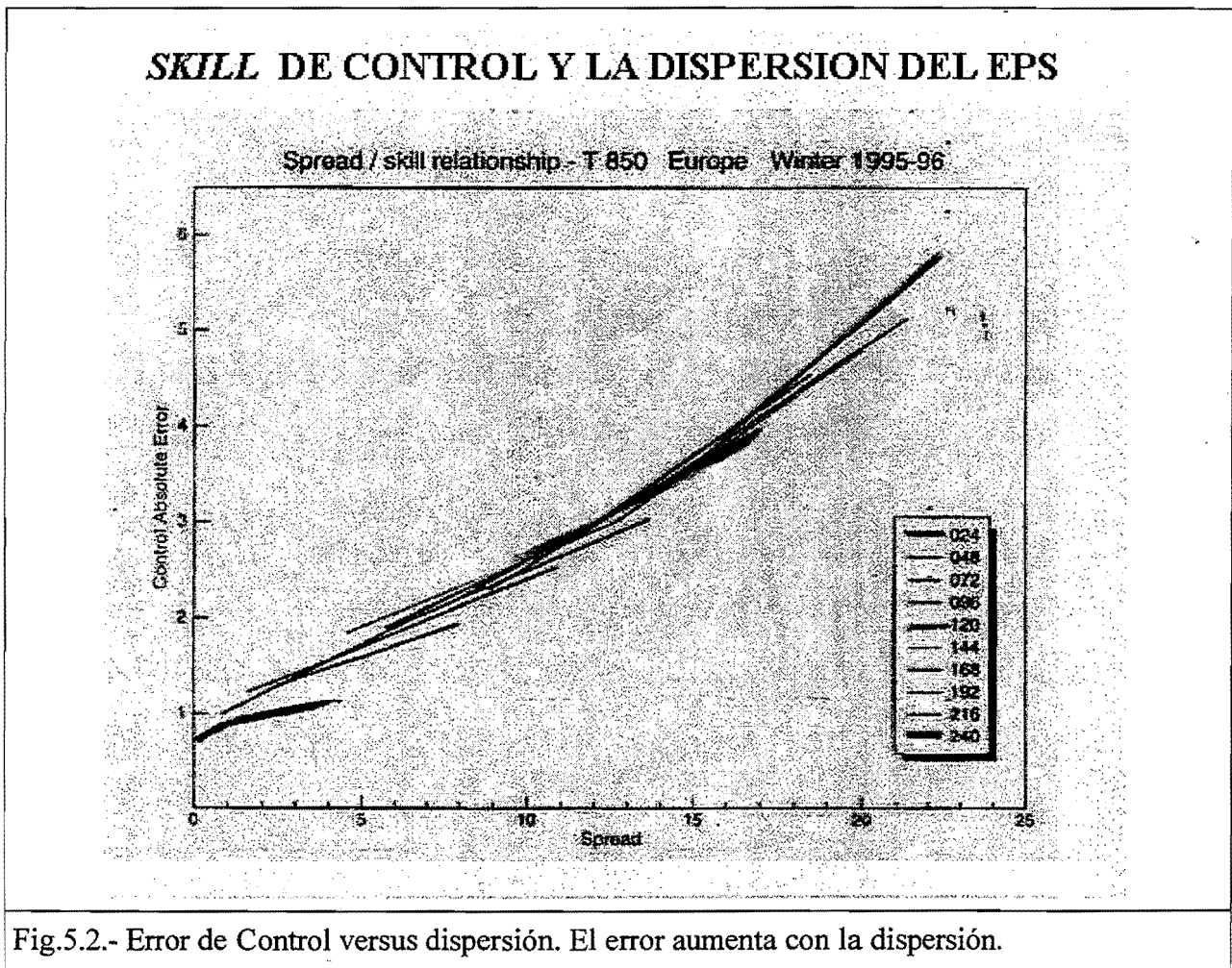
Para el uso operativo del EPS es esencial que exista una correlación entre la dispersión del EPS y la pericia de cada una de las predicciones individuales, especialmente de la predicción de Control. Cuando la dispersión sea pequeña y por tanto, la mayoría de las predicciones sean similares, la pericia de estas predicciones debería ser mayor que cuando la dispersión es grande.

En la **figura 5.2** se muestra un ejemplo de la relación entre el error de la predicción y la dispersión. Se puede observar como a valores de dispersión grandes, asociados a largos alcances de predicción, se corresponden grandes errores de la predicción de Control y viceversa.

La dispersión no solamente varía con el rango de predicción, sino que para un determinado rango varía también en el espacio. Con los datos del ejemplo anterior se ha representado en la **figura 5.3** el error de la predicción de Control considerando por una parte, todos los puntos de rejilla del área considerada y, por otra, seleccionando los puntos en los que el EPS presenta pequeña dispersión, concretamente el 10% con menor dispersión. Como es de esperar en un EPS que se

precie, la pericia de Control es mayor en el ultimo caso.

En la **figura 5.4** se muestra la dispersión del EPS procedente de 3 días consecutivos, para los 10 días de predicción. Se puede observar como además de depender del periodo de predicción también depende de la fecha de partida.



SKILL DE CONTROL Y LA DISPERSION DEL EPS

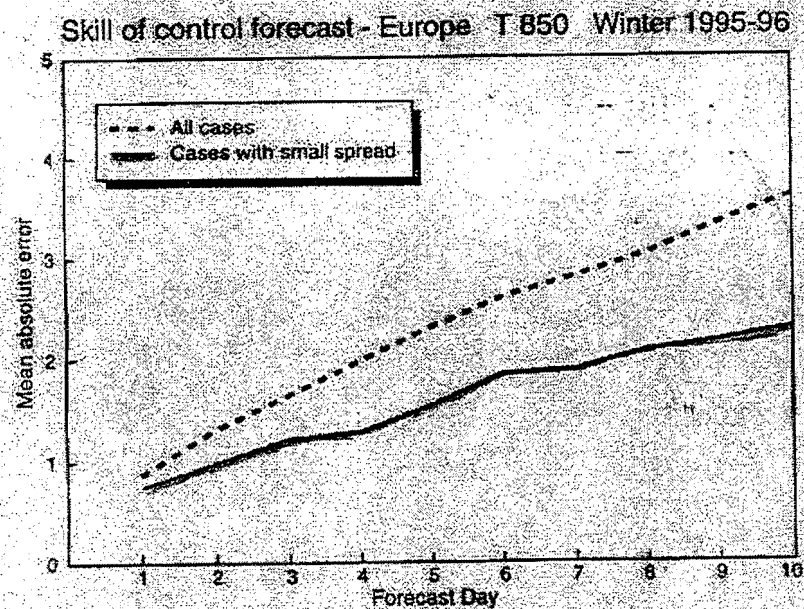


Fig.5.3.- Relación entre el error de Control y la dispersión. Línea a trazos: error absoluto medio de Control sobre todos los puntos de grid. Línea continua: lo mismo, pero considerando el 10% de los puntos con menor dispersión.

VERIFICACION DE PREDICCIONES DEL EPS

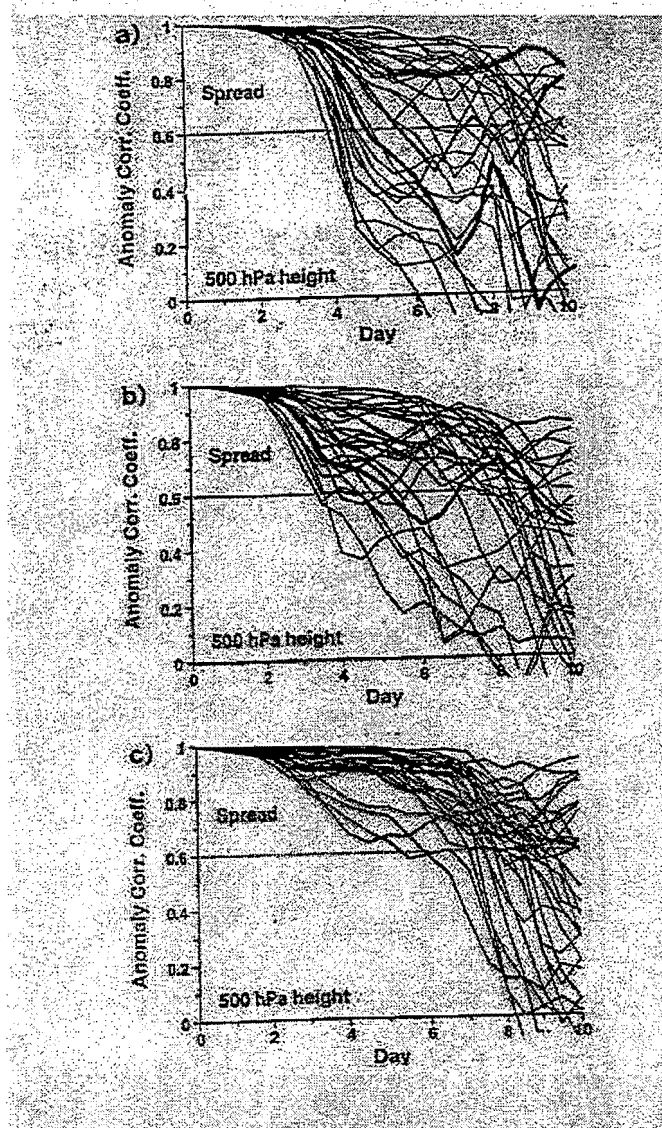


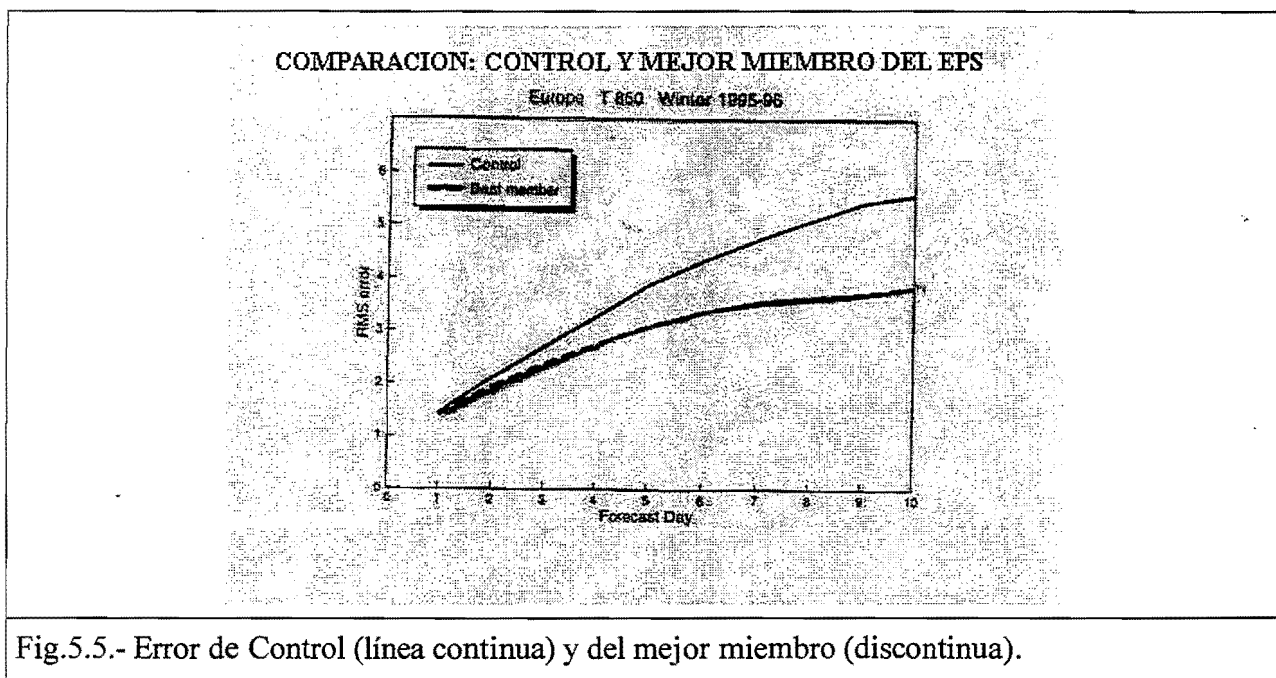
Fig.5.4.- Ejemplos de dispersión del EPS. Se representa el coeficiente de correlación de anomalías con respecto a Control. a) y b) días con dispersión grande. c) dispersión pequeña.

5.1.3. Comportamiento del mejor miembro del EPS frente a Control

Es razonable pensar que algún/os miembro/s del EPS sean mejores que la predicción de Control. Es necesario especificar que lo anterior tiene sentido para un área de referencia determinada y suficientemente pequeña. Para un uso sinóptico del EPS, este área debería corresponderse con el tamaño de las estructuras sinópticas. Esto es lógico sobre un área de referencia determinada. Cuanto menor sea el área mayor es la diferencia que se encuentra entre la predicción de Control

y el mejor miembro del EPS. En la **figura 5.5** se representan el RMS del error de Control y del mejor miembro para una zona muy reducida alrededor de Reading, únicamente 4x4 puntos de rejilla.

De cara al uso operativo del EPS, es importante destacar que **No** tiene sentido, aunque fuera posible, buscar el mejor miembro para una zona amplia y para todos los periodos de predicción.



5.1.4. Penachos que incluyen el análisis

Se trata de incluir, en los penachos de probabilidad, el análisis verificante. En el ejemplo de la **figura 5.6** se observa como el análisis (línea discontinua de trazos gruesos y cortos) está en algún momento fuera del abanico del EPS.

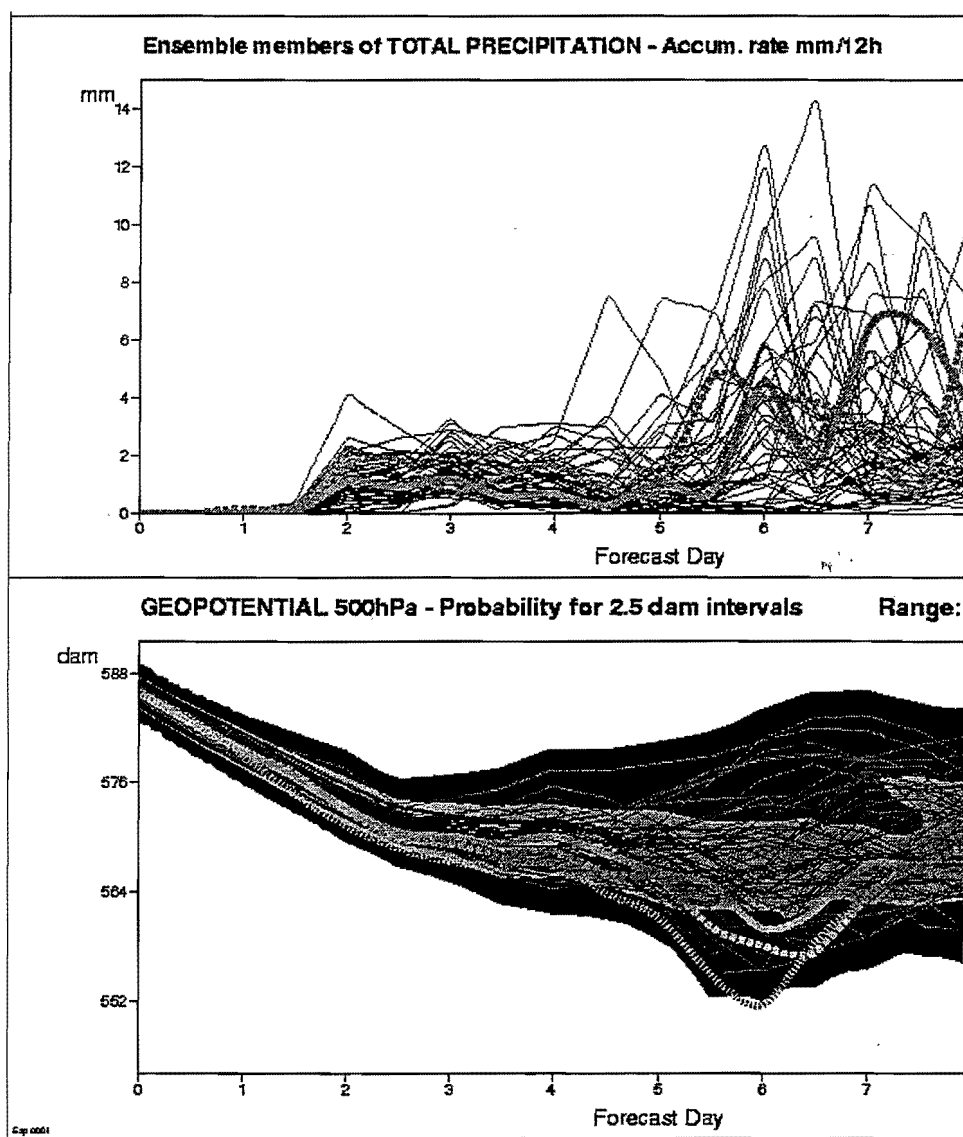


Fig.5.6.- Penachos que incluyen el análisis verificante.

5.2. VERIFICACION DE GRUPOS Y TUBOS

De los métodos de clasificación descritos en el apartado 4, vamos a presentar resultados de verificación de grupos y tubos. El periodo de referencia es el invierno de 1996-1997, con la ya nueva configuración del EPS. El área de referencia es Europa y los rangos de predicción son D+5, D+6 y D+7.

5.2.1. Grupos

A la hora de relacionar el análisis verificador con los grupos, es de esperar que sea más fácil encontrar a este análisis más cerca de los grupos muy poblados que de los minoritarios. En otras palabras, los grupos con muchos miembros verificarán mejor que aquellos que tienen pocos miembros (**figura 5.7**). El concepto de probabilidad de un grupo está ligado al número de miembros que pertenecen a un grupo. La probabilidad asociada a cada miembro es, con el esquema actual de 51 miembros y la suposición de equiprobabilidad, del $(100/51)\%$.

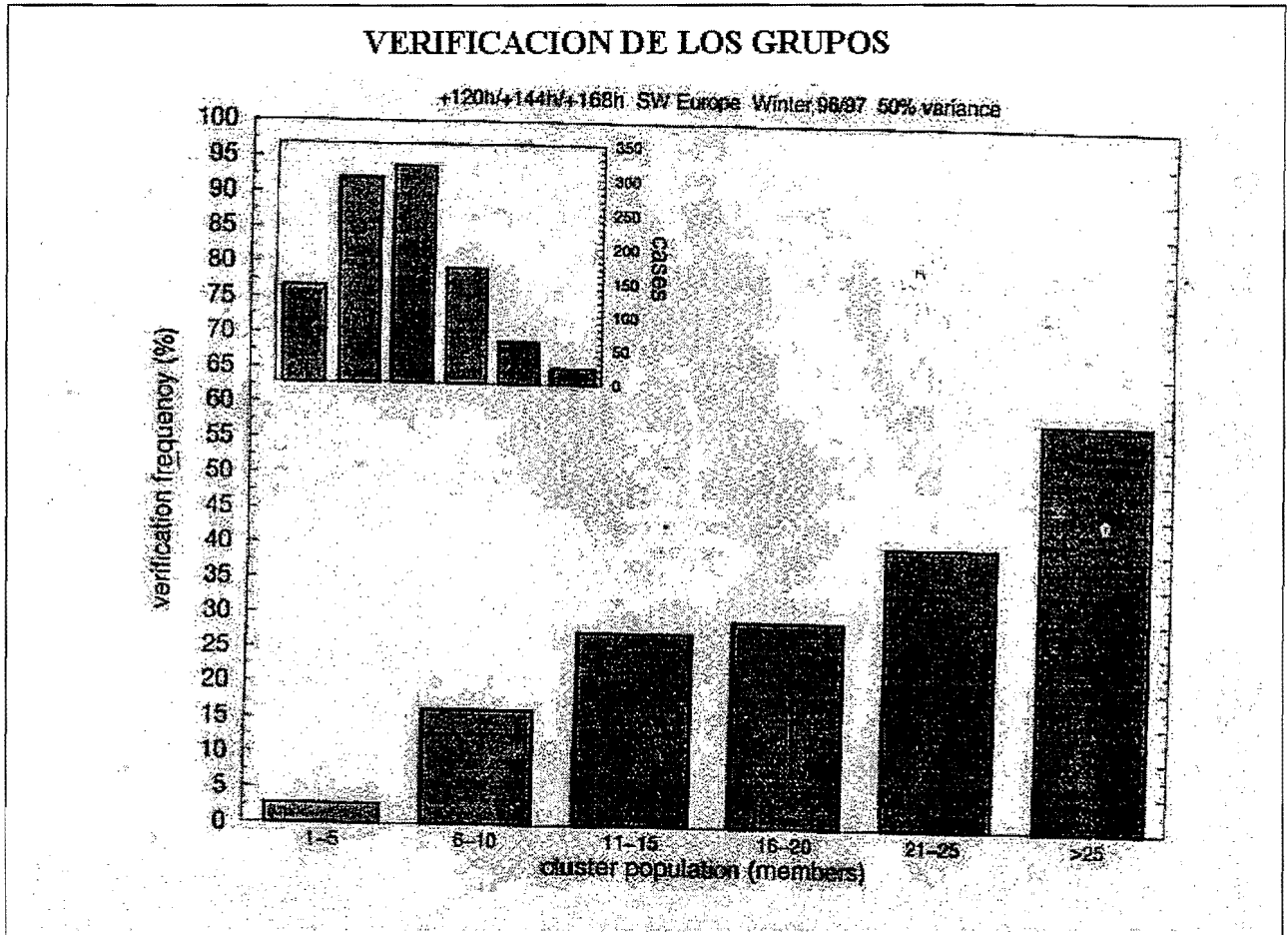


Fig.5.7.- Frecuencia de verificación de los grupos en función de la población.

5.2.2. Tubos

Los resultados obtenidos para los tubos se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Al igual que los grupos, el Grupo Central presenta frecuencias de verificación mayores para poblaciones crecientes; ver en **figura 5.8**. La probabilidad de que verifique es generalmente superior al 50%.

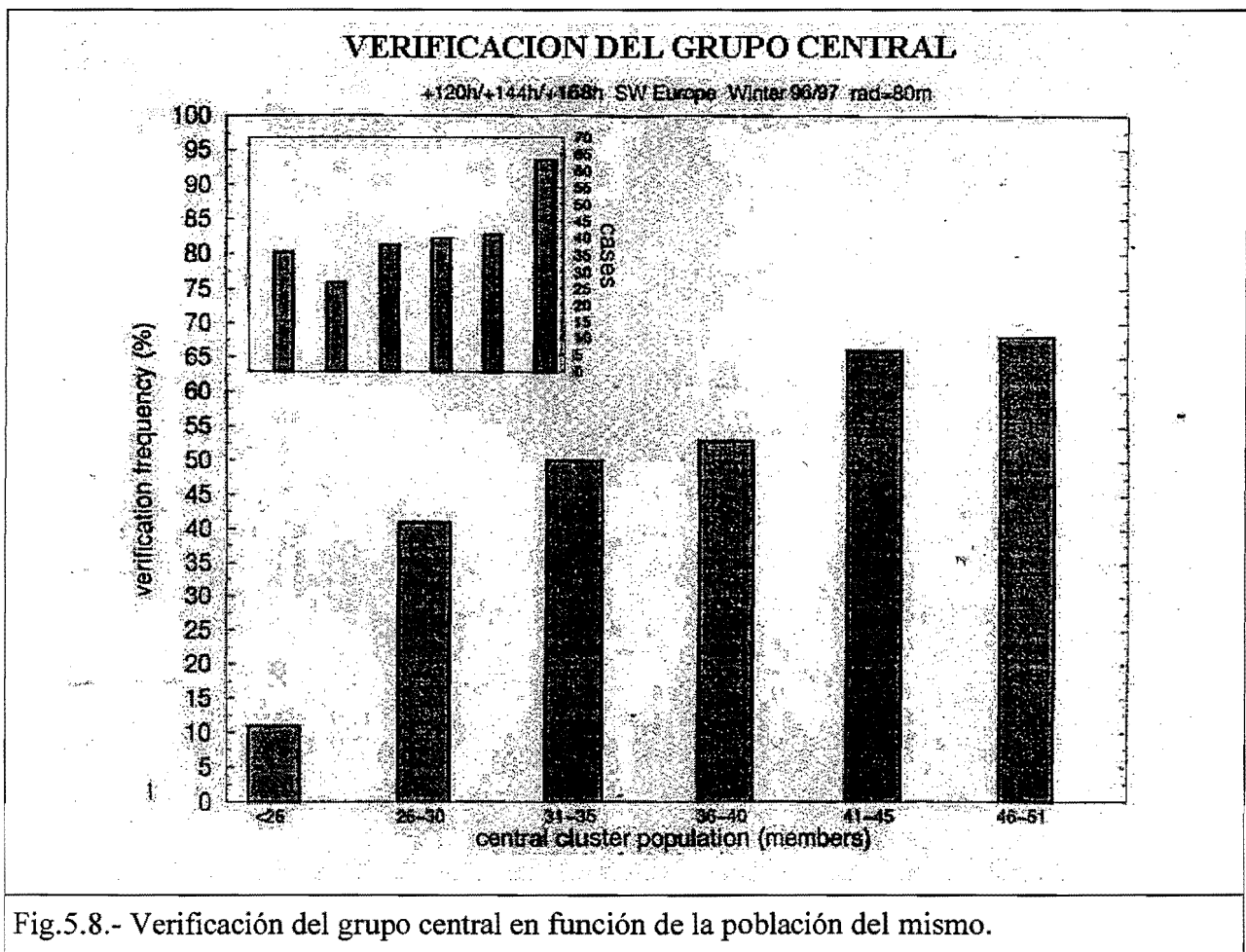
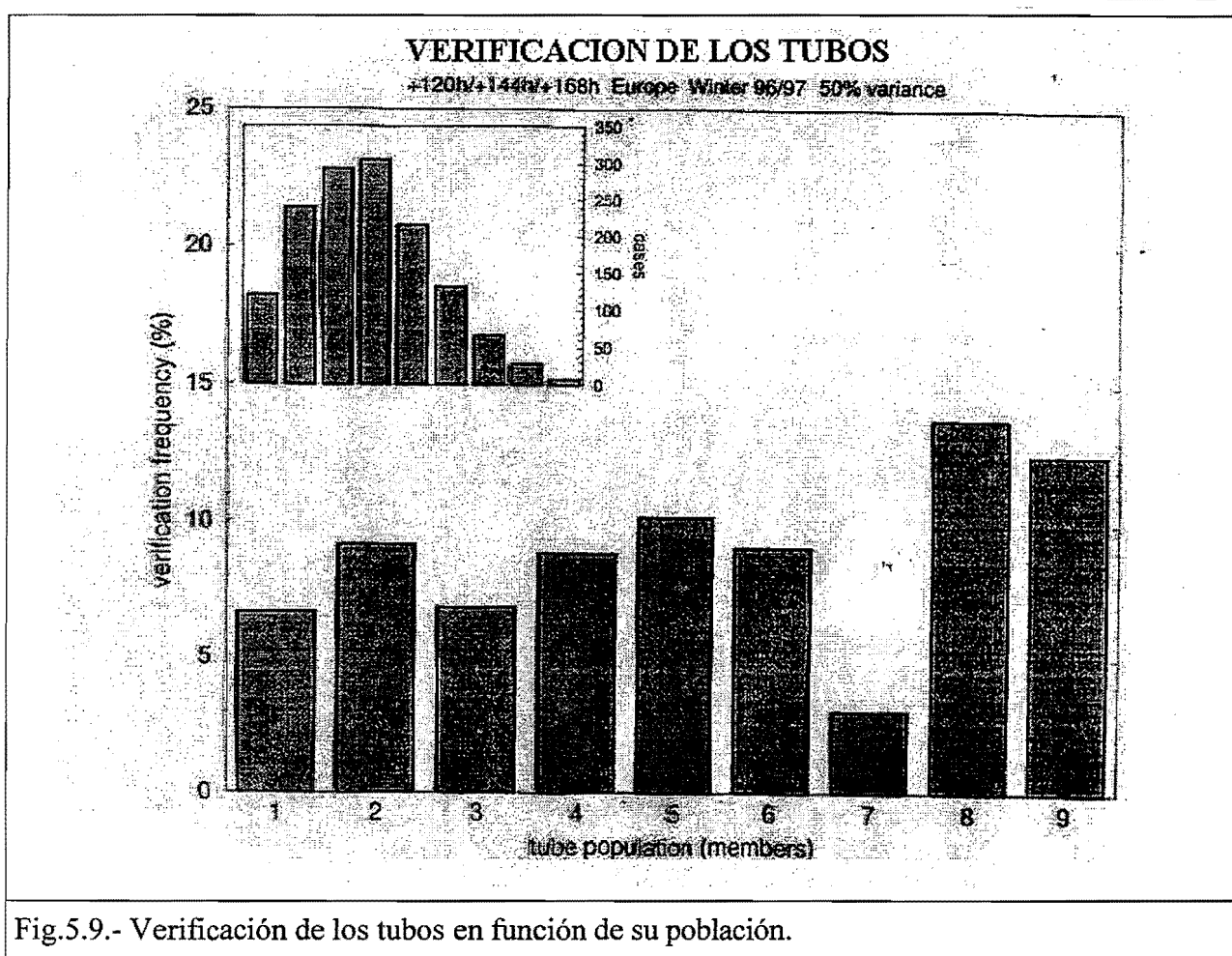


Fig.5.8.- Verificación del grupo central en función de la población del mismo.

- En cuanto a los tubos, NO se da la relación directa verificación - población. La **figura 5.9** muestra una independencia de verificación con la población; un tubo verifica aproximadamente un 10% por las veces. Sin embargo, sí que se encontró una relación con la longitud de los tubos; de manera que, independientemente de la población, los tubos largos verifican mejor que los cortos (**figura 5.10**).
- Del 10 al 20% de los casos el análisis verificador está fuera del rango del EPS (esto es, no se encuentra en el grupo central ni en el interior de los tubos).



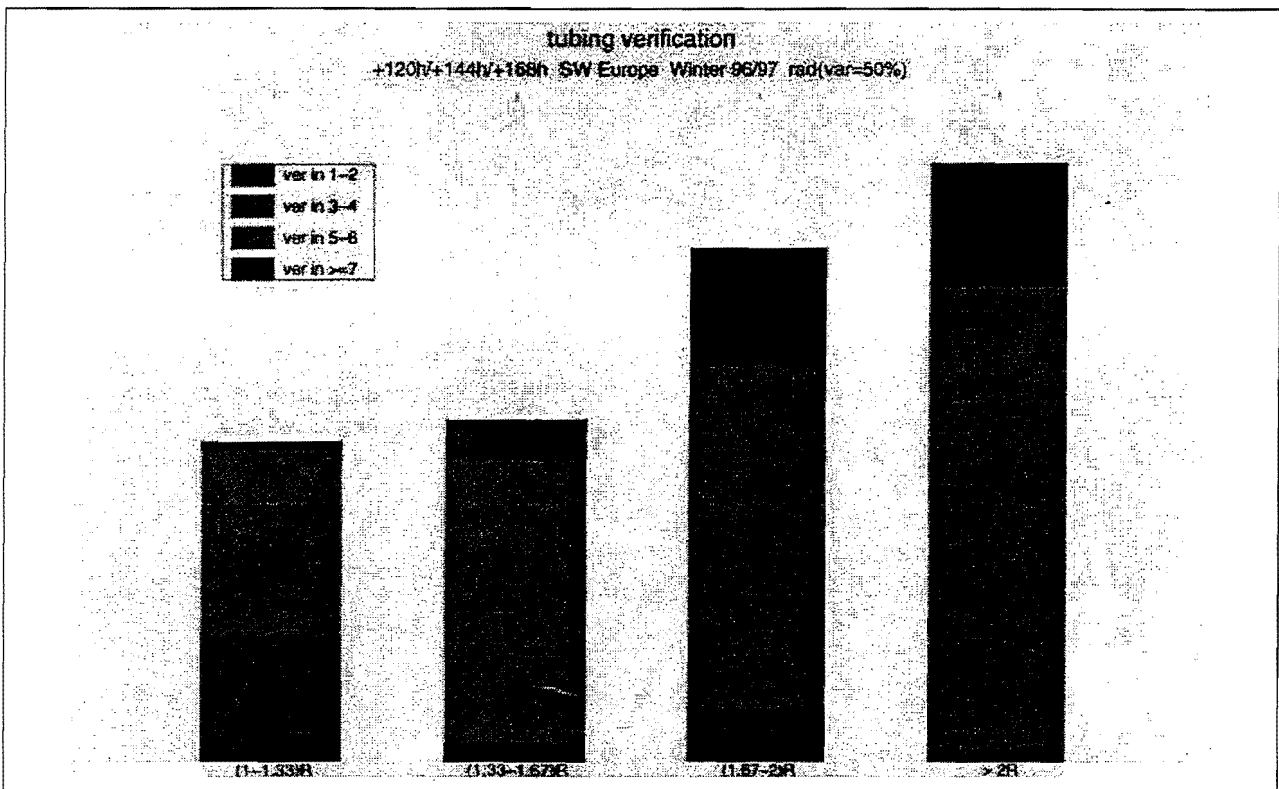


Fig.5.10.- Verificación de los tubos en función de la longitud de estos. R=Radio del grupo central. Observar como los tubos largos verifican mejor que los cortos.

5.3. VERIFICACION DE LA PREDICCION PROBABILISTICA: DIAGRAMAS DE FIABILIDAD, CURVAS ROC

Un aspecto importante del EPS es la predicción de probabilidades de sucesos meteorológicos, p.e., los sucesos correspondientes a los mapas de probabilidad descritos en el apartado 3. Predicciones a medio plazo con cierta pericia de la probabilidad asociada a determinados sucesos pueden jugar un importante papel en la toma de decisiones de un usuario determinado.

Una predicción probabilística tiene, principalmente, dos propiedades: fiabilidad (*reliability*) y agudeza (*sharpness*). La fiabilidad indica la correspondencia entre la predicción de probabilidad de un suceso y la frecuencia observada de aparición de dicho suceso. Una predicción probabilística es aguda si prevé, con frecuencia, probabilidades próximas a 0% o 100%.

5.3.1. Indice de Brier (BS: Brier Score)

Una medida de la precisión de una predicción probabilística, que tiene en cuenta la fiabilidad y la agudeza, es el índice de Brier.

Sea P_i la predicción de probabilidad de que ocurra un determinado suceso para un punto i y O_i la

observación correspondiente. El índice de Brier se define como el **error cuadrático medio de la predicción probabilística**:

$$BS = 1/N [\text{suma } (Pi - Oi)^2]$$

siendo N el numero de casos o puntos que se consideran.

Las observaciones O_i solo pueden tener los valores 0 (si el suceso NO ocurre) y 1 en caso contrario.

El BS solo puede tener valores positivos e indicará que la predicción es tanto mejor cuanto menor sea su valor. Los valores 0 y 1 solo pueden obtenerse para predicciones categóricas o deterministas y se corresponden a una predicción perfecta y nefasta, respectivamente.

5.3.2. Índice de pericia de Brier (*BSS: Brier Skill Score*)

Este índice evalúa en que medida la predicción probabilística mejora la climatología. Definimos en primer lugar, un índice de Brier para la climatología de un suceso (consideramos como predicción la frecuencia observada climatológica Om de dicho suceso):

$$BScl = 1/N [\text{suma } (Om - Oi)^2] = [(1 - Om) * (Om)^2] + [Om * (1 - Om)^2]$$

$$BScl = Om * (1 - Om)$$

El índice de pericia de Brier combina los dos índices previos:

$$BSS = (BScl - BS) / BS$$

$BSS = 1$ para predicción perfecta (solo obtenible para predicción determinista)

$BSS = 0$ para predicción probabilística que NO mejora la climatología

$BSS < 0$ para predicciones AUN peores

5.3.3. Diagrama de fiabilidad

Para evaluar la fiabilidad de una predicción probabilística se utiliza el llamado diagrama de fiabilidad. Se construye de la siguiente forma:

- se divide el rango total de probabilidad $[0,1]$ en varios intervalos, p.e. 10.
- se cuenta el número de veces en que la probabilidad prevista está dentro de cada intervalo.
- se calcula la frecuencia relativa de ocurrencias del suceso para cada intervalo de probabilidad y se representa en el eje de ordenadas frente al centro del intervalo.

Interpretación:

La recta diagonal indica predicción perfecta; los puntos que se encuentran por debajo de dicha recta indican sobre-predicción de la probabilidad prevista y los puntos que están por encima se asocian a infra-predicción.

Sobre el diagrama aparecen representadas isolíneas del índice de Brier, presentando valores próximos a 0 en las zonas inferior izquierda y superior derecha y próximos a 1 en las zonas opuestas. En dos diagramas que presenten la misma fiabilidad, el índice de Brier será mejor (menor) en aquel en que la predicción probabilística sea más aguda.

Este gráfico se utiliza, normalmente, para parámetros meteorológicos frente a observación. También puede utilizarse para configuraciones sinópticas (*versus* análisis).

Ejemplos:

Figura 5.11: Se observa como la nueva configuración implantada en Diciembre de 1996, mejora la predicción; para probabilidades previstas altas, la frecuencia observada aumenta claramente de uno a otro.

Figura 5.12: Tendencia a *infrapredicción* para probabilidades bajas y *sobrepredicción* para probabilidades altas.

Figura 5.13: Aplicación a los grupos; en el eje de abscisas se considera el número de miembros de los grupos, que es el equivalente a la probabilidad (una vez, calculado el % de los miembros).

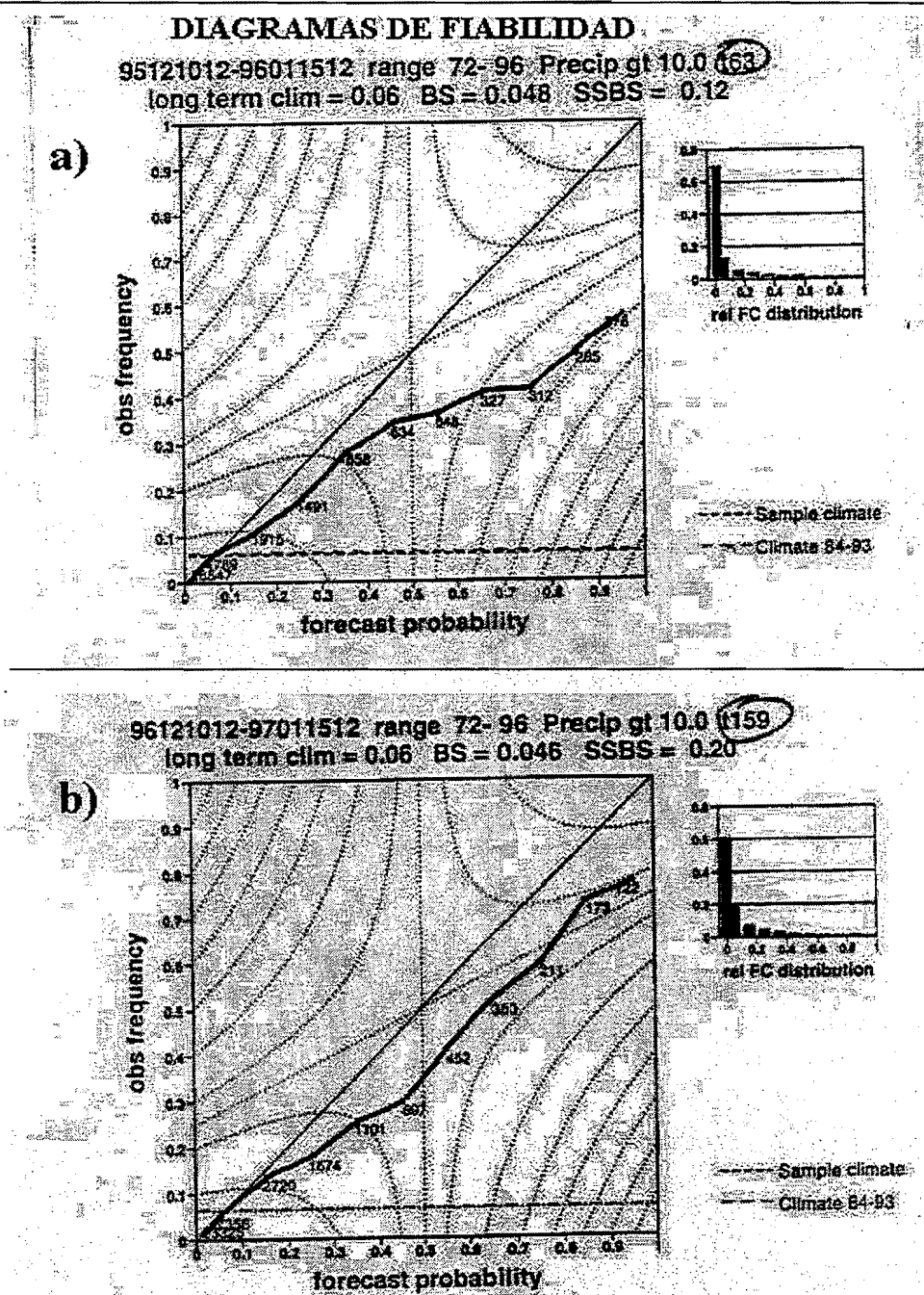


Fig.5.11.- Diagramas de fiabilidad. Comparación entre el comportamiento de las dos últimas configuraciones del EPS, antes (a) y después (b) de diciembre de 1996.

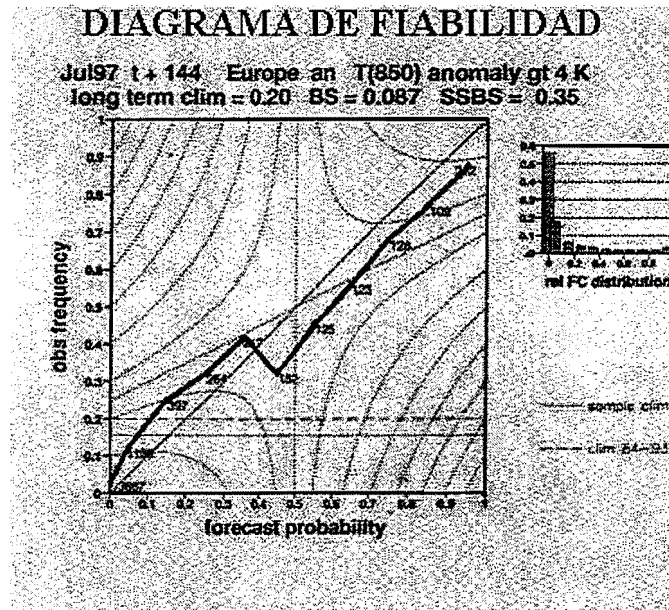


Fig.5.12.- Diagrama de fiabilidad típico.

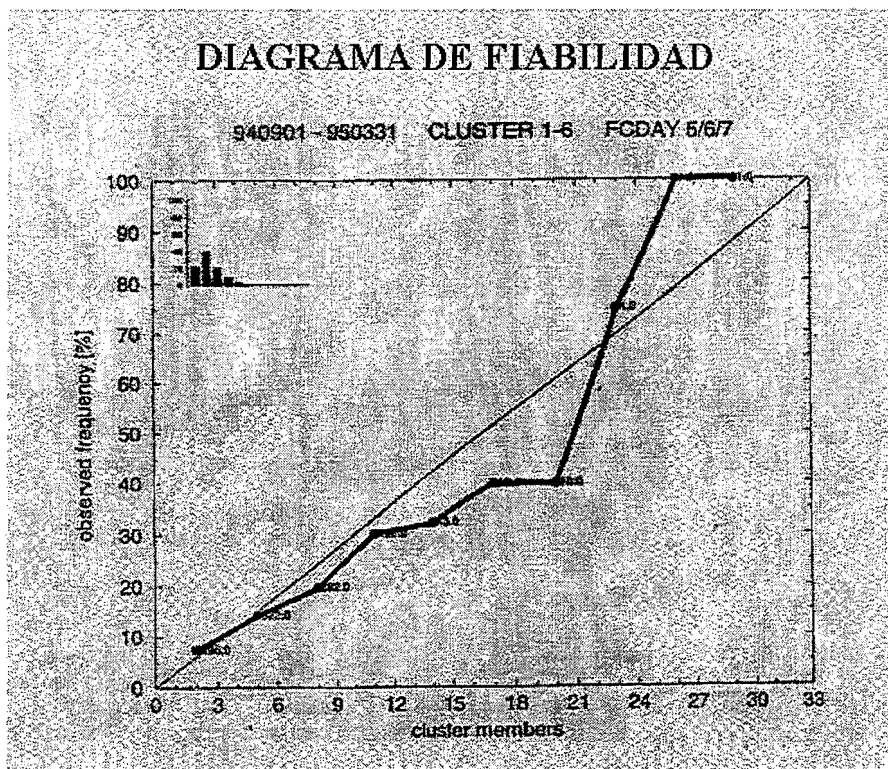


Fig.5.13.- Diagrama de fiabilidad para grupos. Se observa similitud con los anteriores.

5.3.4. Curvas Relativas (ROC: *Relative Operating Curves*)

Se generan mediante la representación gráfica de aciertos (*HIR: Hit Rate*) frente falsas alarmas (*FAR: False Alarm Rate*).

Cada punto del gráfico procede de una tabla de contingencia diferente. Esta tabla que contiene ocurrencias y no ocurrencias de un suceso para los casos en que se haya y no previsto, se obtiene variando el umbral de probabilidad; de forma que para valores de probabilidad por debajo del umbral se considera no previsto y para valores por encima, se considera si previsto. Estamos construyendo, por tanto, un conjunto de predicciones deterministas con valores de aciertos y falsas alarmas para cada uno de ellos.

Cuanto mayor sea el área, mejor es la predicción probabilística. Se trata de que la curva esté próxima a la esquina superior izquierda ($FAR = 0$, $HIR = 1$).

En la **figura 5.14**, se presenta un ejemplo, para el suceso: temperatura en 850 hPa superior a 4°C.

Desde muy recientemente se están utilizando para determinar el umbral de probabilidad *interesante* para determinados usuarios. Se trata de evaluar a partir de que umbral de probabilidad el usuario toma una decisión de prevención de un suceso. No es trivial el que dicha acción se tome únicamente para probabilidades altas. En dicha evaluación intervienen varias variables: relación Coste de prevención / Perdidas debidas al suceso, frecuencia observada del fenómeno y características de la predicción probabilística: Índice de aciertos y Falsas Alarmas, que aparecen representados en las curvas ROC.

CURVAS R.O.C.

96121012-97011512 FC step 144h T850an > 4 K t159

CONSTRUCCION DE LA TABLA DE CONTINGENCIA

N ocurr = 6130 N tot = 38184 BS = 0.099

Prob. de pred.	Ocurr.	No- ocurr
0.00	367	14858
0.05	952	9384
0.15	753	3050
0.25	647	1736
0.35	598	1094
0.45	466	713
0.55	468	458
0.65	601	362
0.75	524	202
0.85	432	140
0.95	322	57

Tabla de contingencia:

C	D
A	B

$$HIR = A / (A + C)$$

$$FAR = B / (B + D)$$

CURVAS ROC

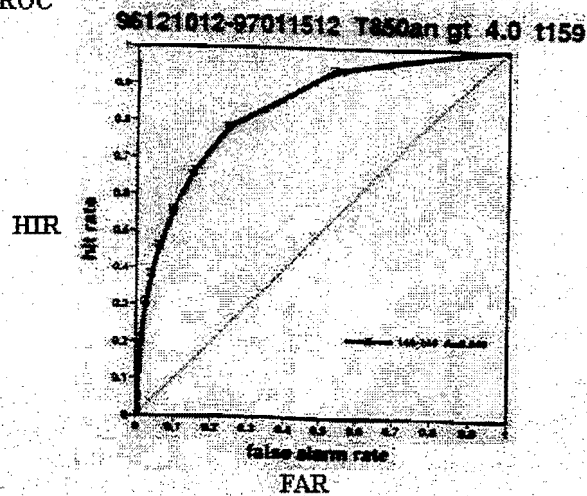


Fig.5.14.- Curvas R.O.C. Cada punto de la curva se origina a partir de la tabla de contingencia correspondiente a cada umbral de probabilidad.

6. PREDICCIÓN DE MEDIO PLAZO EN ESPAÑA

6.1 Antes del EPS (hasta diciembre de 1992)

6.2. Primeros pasos con el EPS (desde diciembre de 1992 hasta 1998)

6.3. Futuro inmediato. Uso operativo del EPS en el INM

6.1. ANTES DEL EPS (hasta diciembre de 1992)

El uso de los distintos modelos de predicción, o de diferentes pasadas de un mismo modelo, o de un mismo modelo con diferentes análisis, le hace comprender rápidamente al predictor que la predicción no es categórica sino probabilística.

Cuando se creó el grupo de medio plazo en el CNP, los predictores que componían dicho grupo entre los años 1989 y 1992 diseñaron un procedimiento automático de combinación de varios modelos. Realizaban por tanto una aproximación probabilística en la predicción de medio plazo.

Pero en general los predictores han venido utilizando el **modelo operativo del ECMWF** como guía básica para las predicciones de medio plazo, de una forma casi determinista.

En el ECMWF, durante algún tiempo se recomendó el uso de la consistencia del modelo operativo como una medida de su fiabilidad. En esta época, los predictores de medio plazo del CNP comparaban la última pasada del modelo operativo con las dos pasadas anteriores. Más tarde, el ECMWF verificó que esto no era totalmente válido. **La consistencia no es una medida de la fiabilidad.**

Posteriormente se utilizó la **comparación con otros modelos**, fundamentalmente con el modelo alemán (DWD) e inglés (UKMO) para **valorar de forma subjetiva la fiabilidad del modelo del ECMWF**. Cuando los distintos modelos presentaban configuraciones diferentes para un día determinado, la confianza en el modelo operativo disminuía y la expresión de esto era una predicción más imprecisa y que a veces modificaba de forma subjetiva los valores de los parámetros meteorológicos que preveía el modelo operativo (por ejemplo, suavizando los cambios de temperatura o disminuyendo la cantidad de precipitación prevista).

Esto supuso un cambio en cuanto a que la incertidumbre que reflejaba la comparación de modelos le indicaba al predictor la **incertidumbre en la predicción**, pero la predicción se seguía expresando de forma determinista, aunque introduciendo en el lenguaje de los boletines de predicción términos de probabilidad para indicar ese grado de incertidumbre.

6.2. PRIMEROS PASOS CON EL EPS (desde diciembre de 1992 hasta 1998)

Al principio, en el CNP se recibían por fax los "sellos" para el D+7 y los diagramas de "penachos" para tres ciudades de la Península Ibérica (La Coruña, Madrid y Barcelona). Estos productos daban una **idea de la dispersión del EPS**. El grupo del CNP hacía un uso subjetivo de los diagramas de penachos.

En mayo de 1995, comenzamos a recibir los **gráficos de probabilidad** (desde el D+1 al D+10) de anomalías cálidas y frías en 850 hPa, precipitación y velocidad del viento a 10 m. Los predictores hacían uso de estos campos en sí mismos y como **indicadores de la fiabilidad del modelo operativo**. La probabilidad de anomalías de temperatura en 850 hPa resultaron ser muy útiles en la predicción de olas de calor y de frío.

En abril de 1996 comenzamos a recibir los "cluster" medios de Z500 y Z1000. Desde entonces los predictores de medio plazo del CNP evalúan diariamente **la dispersión del EPS** como **una medida de la predecibilidad de la atmósfera** y comparan los **distintos escenarios** que presenta el EPS, con el modelo operativo del ECMWF y otros modelos, tratando de decidir de forma subjetiva cual es el escenario más probable, si el dado por el modelo operativo o por otro escenario del EPS.

Pero **esta decisión** que el predictor del CNP tomaba después de un estudio de los productos del EPS y de los modelos operativos, **no se trasladaba a los predictores de los GPV's de manera sistemática**; de forma tal, que en la coordinación telefónica que se hace diariamente, los días en que el predictor del CNP optaba por otro escenario que no era el operativo, **existían verdaderos problemas de coordinación**.

Durante estos años el EPS se ha utilizado de forma incompleta. La razón principal ha sido que no se ha formado a los predictores en la predicción probabilística y por tanto no se ha implantado operativamente el uso del EPS en la predicción de medio plazo.

6.3 FUTURO INMEDIATO. USO OPERATIVO DEL EPS EN EL INM

Con el curso de explotación de modelos numéricos, impartido en el INM, y dirigido a todos los predictores operativos creemos que se ha cubierto, al menos en una primera fase, el objetivo de la formación de los predictores en el EPS. Ahora se trata de introducir el uso operativo del EPS en la predicción de medio plazo. Con este objetivo, hemos estado trabajando desde los primeros meses de 1998 en la elección de un sistema de clasificación del EPS.

ELECCION DE UN METODO DE CLASIFICACION DEL EPS

De los tres métodos descritos en el apartado 4, se ha estado ensayando con los dos primeros: agrupamiento o “*clustering*”, mediante el algoritmo de Ward y “*tubing*”. Se han introducido algunas modificaciones (único periodo temporal y diferentes áreas) ya comentadas en los apartados 4.1 y 4.2. Estos dos cambios suponen una menor pérdida de información con respecto a la clasificación del CEPPM. Se ha considerado que para el INM, en estos momentos, el método de agrupamiento es el más idóneo.

Una vez elegido el método de los grupos, estuvimos ensayando la obtención de un número variable de grupos en función de la dispersión del día. Después de diversas pruebas, nos decidimos por un agrupamiento que consta de dos fases:

- **Primera fase: Agrupamiento objetivo**

Esta fase ya ha sido descrita en el apartado 4.1.3. La **figura 4.12** es un ejemplo de salida gráfica de los grupos.

- **Segunda fase: Reagrupamiento subjetivo**

Los 6 grupos que se obtienen en la primera fase, serán bastante similares cuando la dispersión sea pequeña, lo cual ocurrirá normalmente durante los primeros rangos de predicción. Mediante el reagrupamiento subjetivo se juntarán aquellos grupos que sean parecidos en todas las regiones de España. De esta forma se obtienen los **supergrupos**.

Consideramos que el reagrupamiento subjetivo palía algunos de los inconvenientes del agrupamiento objetivo de tal forma que:

1. El número de supergrupos si está relacionado con la dispersión.
2. La similitud entre las predicciones se cuantifica en los grupos en términos de una distancia para una variable y nivel de referencia (normalmente, el geopotencial de 500 hPa). Mediante el reagrupamiento subjetivo se tiene más en cuenta, por una parte, la forma de las configuraciones meteorológicas y, por otra parte, varios campos y niveles.

El número de supergrupos varía de 1 a 5 y representa el número de escenarios diferentes previstos para un determinado rango de predicción.

Para realizar el reagrupamiento, el predictor encargado de este trabajo, recibirá para cada rango de predicción, y para cada grupo, los siguientes campos y niveles: geopotencial y temperatura en 500 hPa, presión en superficie y temperatura en 850 hPa (todos ellos son campos medios para las 12 Z) y el campo medio de la precipitación acumulada de 00 a 24 h.

En el paso del reagrupamiento subjetivo, el predictor, en base a su formación y experiencia, debe reagrupar aquellos grupos que producen un tipo de tiempo similar en las distintas zonas de España.

Una vez que el predictor ha elegido los grupos que formarán cada supergrupo, se realiza el agrupamiento automáticamente, mediante un proceso interactivo con METVIEW. De esta forma se obtienen los **supergrupos o "escenarios"**, en número variable para cada rango de predicción.

El resultado del reagrupamiento del ejemplo de la figura 4.12 se muestra en la **figura 6.1**. En este caso únicamente se han reagrupado los grupos 3 y 4.

El grupo de predictores de medio plazo del CNP es el encargado de generar los supergrupos y enviarlos a los GPV's. Los supergrupos serán en una primera fase la herramienta básica para elaborar la predicción de medio plazo en el INM.

Se enviarán además otros productos complementarios. En una primera fase los GPV's recibirán mapas de probabilidad de precipitación y viento.

PRODUCTOS OBJETIVOS A PARTIR DEL EPS

- Actualmente el Servicio de Aplicaciones Meteorológicas tiene operativo un procedimiento que permite realizar predicciones locales de temperaturas extremas desde el D+1 hasta el D+10 para un conjunto de 100 localidades del territorio nacional, estando prevista en breve su ampliación a otras 120 localidades más.

Para ello se procede de la siguiente forma: se interpolan los valores previstos de la temperatura a 2 m. a 00Z y 12Z, para cada uno de los 50 miembros del EPS más el Control, desde el D+1 hasta el D+10, para las localidades donde se desea disponer de predicciones. Se **calcula la media de los valores interpolados de los 51 miembros, y se aplica una corrección de sesgo en tiempo real** a partir de los valores de las observaciones de temperaturas extremas y de las predicciones de T a 00Z y 12Z, obtenidas siguiendo los pasos descritos, utilizándose una ventana temporal de 40 días.

Este producto de predicción local de temperaturas a partir de la media del EPS estará a disposición de los predictores.

- En estado de verificación y puesta a punto, previa a su entrada en operatividad, existen otros dos productos de tipo probabilista:

El primero consiste en una predicción de la **probabilidad de que durante los próximos siete días la precipitación acumulada en un observatorio determinado supere un umbral predefinido (desde 10 hasta 100 mm.)**. El producto final será un conjunto de mapas de probabilidad para cada uno de los umbrales de precipitación.

El segundo contendrá predicciones desde el D+2 hasta el D+10 de la **probabilidad de que las temperaturas extremas en un observatorio rebasen determinados umbrales (prefijados en función de la época del año).**

- En el futuro se irán diseñando otros productos probabilistas que se consideren útiles para el predictor.

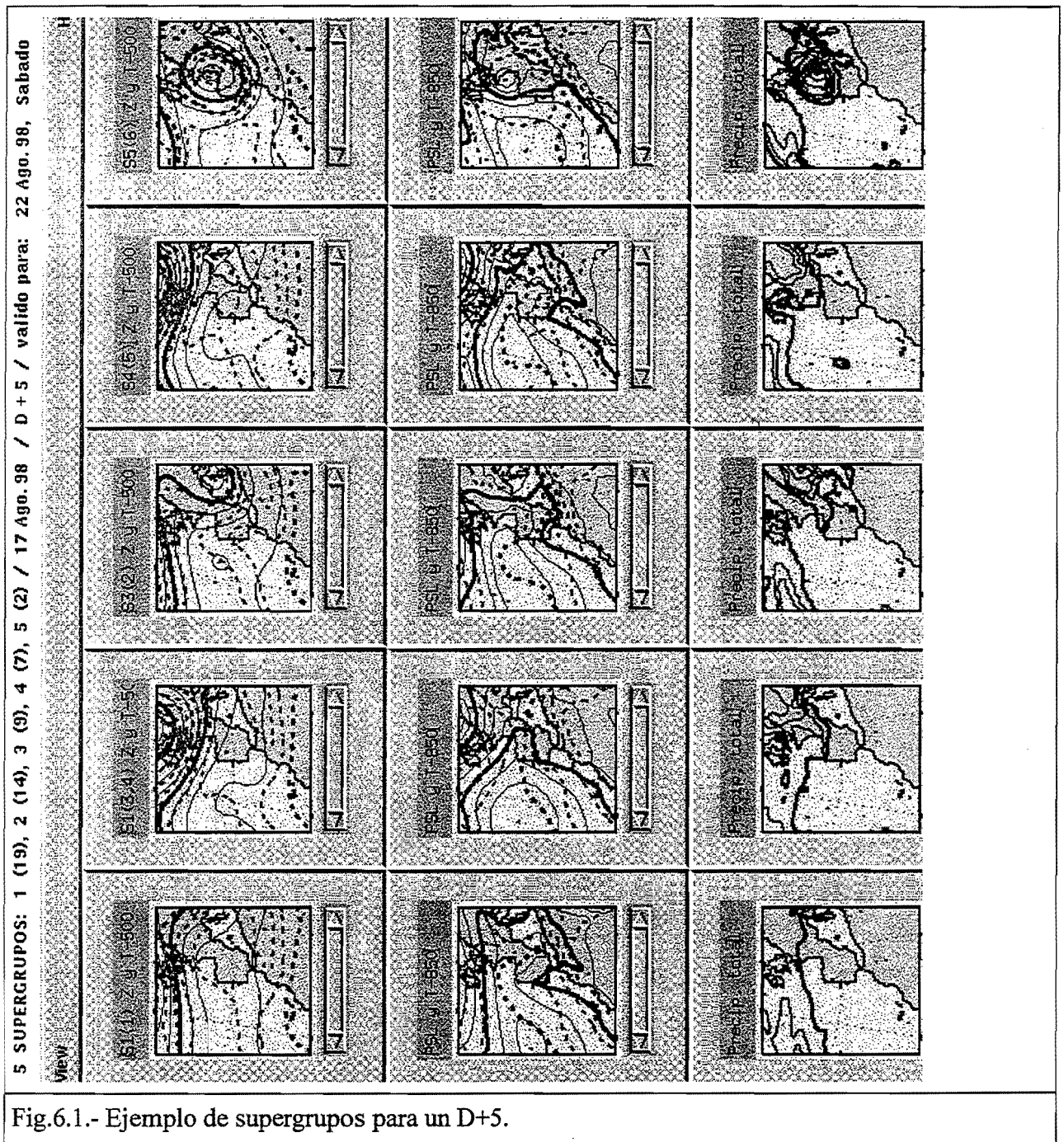


Fig.6.1.- Ejemplo de supergrupos para un D+5.

7. USO DEL EPS EN OTROS PAISES

7.1 Alemania

7.2 Francia

7.3 Reino Unido

7.4 Italia

7.5 Noruega

7.6 Suiza

7.1 ALEMANIA

En el año 1997 abrieron varias líneas de investigación:

- Uno de los proyectos consistió en ensayar **la combinación de varios modelos operativos** para la **predicción de medio plazo de parámetros meteorológicos locales**.

Primeramente calcularon diversos parámetros meteorológicos locales para cuatro modelos (ECMWF, UKMO, ENCEP y GM) por medio del esquema de interpretación estadística AFREG (los resultados fueron promediados por medio del AFREG MIX).

El resultado de la verificación realizada fue que la simple media de los distintos modelos, proporcionaba una mejora del skill o pericia.

- Otro proyecto consistió en **verificar de forma subjetiva los dos "cluster" más poblados así como los modelos operativos T213 y GM**. Esta verificación se llevó a cabo para los cinco primeros meses de 1997 y obtuvieron los siguientes resultados:

	Media del EPS	"Cluster" 1	"Cluster" 2	T213	GM
Pred. buena	53,79 %	55,30 %	53,03 %	58,33 %	50,83 %
Pred. normal	24,24 %	21,97 %	24,24 %	20,83 %	32,50 %
Pred. mala	21,97 %	22,73 %	22,73 %	20,83 %	16,67 %
TOTAL	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

El porcentaje de buenas predicciones varía de 50,83% para el GM (modelo alemán) a 58,33% para el T213 (modelo del CEP). En este trabajo no obtuvieron un criterio claro acerca de cual es la mejor guía de predicción.

Actividades proyectadas para el año 1998:

Continuar evaluando las ventajas o desventajas de la utilización de un sistema multimodelo comparado con el EPS.

Realizar estudios para un agrupamiento con áreas más pequeñas y diferentes pasos de tiempo.

Intentar mejorar la predicción de parámetros meteorológicos locales obtenidos del EPS mediante la aplicación de filtros de Kalman.

7.2 FRANCIA

Están utilizando el EPS de forma operativa desde el año 1997.

Dividen el medio plazo en varios subrangos:

D+3 y D+4 (cada día por separado):

En el **medio plazo próximo**, hacen un **uso determinista** del modelo de alta resolución **ARPEGE** aunque advierten que es importante tener en cuenta que para este subrango, el EPS a veces muestra una dispersión no despreciable y que este hecho, debería tenerse en cuenta para **desechar la costumbre de elaborar predicciones en este rango con un grado de detalle excesivo.**

Debido a la **incertidumbre en este subrango** se plantean dos preguntas:

- ¿ La predicción del ARPEGE tiene más pericia que la predicción del EPS?
- ¿ La dispersión del EPS indica la incertidumbre de la predicción del ARPEGE?

Por ahora no tienen respuesta a estas preguntas, por lo que **no contemplan una predicción probabilística en este rango.**

A partir del D+5:

No hacen uso del modelo operativo del ECMWF. **Utilizan el EPS.**

Realizan un agrupamiento de los 51 miembros del EPS del ECMWF por el **método de los tubos**. Para el D+5/D+6 y D+7/D+8 han establecido una metodología de trabajo basada en los puntos siguientes:

La situación más probable se basa en la **media del grupo central** de los tubos (muy próxima a la media del EPS) y constituye **el núcleo determinista de la predicción**.

Los extremos de los tubos no son "alternativas" sino "**variantes**". Es decir, aquellos miembros del EPS que más se alejan del grupo central en una dirección determinada.

Calculan un **índice de confianza** objetivo (bajo, medio y alto) basado en la dispersión del EPS en una zona determinada.

Representan las **probabilidades cifradas de los elementos de tiempo significativo**.

En estos dos subrangos de predicción (D+5/D+6 y D+7/D+8) **el predictor de medio plazo del SCEM, elabora cada día una información técnica dirigida a los predictores regionales** y que resume el trabajo de elaboración realizado por el predictor del SCEM. Esta información técnica va acompañada de una selección de los productos que han servido de base para la elaboración de dicha información.

Las predicciones dirigidas al público para el D+5/D+6 y D+6/D+7 **también contienen elementos probabilísticos**.

D+5/D+6 (los dos días juntos):

En general tratan de **resaltar los rangos a gran escala**, aunque ocasionalmente cuando la dispersión es pequeña establecen un marco sinóptico. Es decir, **el grado de precisión de la predicción depende más de la incertidumbre que del rango**.

La **INFORMACION TECNICA** dirigida a los predictores regionales **consta de dos partes, TEXTO Y GRAFICO:**

El TEXTO se compone de cuatro partes:

- Un comentario acerca del EPS y de los modelos operativos.
- Una descripción de la **situación a gran escala más probable**, y el tiempo significativo asociado sobre Francia (con matices geográficos) y una caracterización de las precipitaciones, el viento y las temperaturas extremas.
- Un **índice de confianza** que expresa la incertidumbre.
- Una descripción de **todas las variantes** y del tipo de tiempo asociado sobre Francia.

GRAFICO:

- La escala representa **Europa**.
- El gráfico es un resumen de los rasgos de la dinámica a gran escala de la situación más probable: **centros de presión en superficie, chorro en niveles altos, isotermas en 850 hPa., sistemas nubosos a gran escala, etc.**

La **PREDICCIÓN** dirigida al público consta igualmente de **TEXTO Y GRAFICO**:

EL TEXTO se compone de cuatro partes:

- El tipo de **tiempo más probable** sobre Francia.
- Una estimación **probabilística** de las precipitaciones, el viento y la temperatura.
- Un **índice de confianza**.
- **Variantes significativas con referencia al tipo de tiempo más probable.**

GRAFICO:

- La escala representa Europa occidental.
- Los símbolos utilizados son poco numerosos a propósito y hacen referencia al **tipo de tiempo** sobre Francia **asociado con la situación a gran escala más probable**. Pueden aparecer estimaciones probabilísticas cifradas de parámetros meteorológicos.

D+7/D+8 (los dos días juntos)

En este rango debido a que la fiabilidad de las predicciones decae bastante, la información se limita a una **tendencia** de la situación a gran escala y del tipo de tiempo, **en relación** a la predicción elaborada para el **D+5/D+6**.

La **INFORMACION TECNICA** consta igual que en el plazo anterior, de un **TEXTO** y un **GRAFICO** complementarios:

El TEXTO consta de:

- Un comentario del EPS y de los modelos deterministas
- Una descripción de la **evolución más probable** de la situación a gran escala, **con referencia** a la situación descrita en el **D+5/D+6** y la evolución del tipo de tiempo asociado. Las precipitaciones, temperaturas y el viento **no se cuantifican**, marcando solo la **evolución respecto a días anteriores**.

- Un **índice de confianza**
- Dada la alta incertidumbre en este rango, se destacan las **evoluciones a excluir**.

La **PREDICCION dirigida al público** consta igualmente de **TEXTO y GRAFICO**:

El **TEXTO** se compone de cuatro partes:

- La **tendencia más probable** del tipo de tiempo sobre Francia.
- La **tendencia** de las precipitaciones, viento y temperatura.
- Un **índice de confianza**.
- Una o más **tendencias a excluir** en términos de tipo de tiempo.

GRAFICO:

- La escala representa Europa occidental.
- El **simbolismo es muy reducido, marca la evolución** de los fenómenos, no su caracterización.

D+9/D+10 (los dos días juntos)

El desarrollo actual de los modelos numéricos de predicción es tal que la incertidumbre en este rango se aproxima muy a menudo a la variabilidad climatológica. Por **ello excluyen emitir a diario** y de forma sistemática **las predicciones dirigidas al público en general**.

Cuando la dispersión es pequeña y la situación meteorológica es altamente predecible **realizan predicciones** probabilísticas operativas pero **con un contenido informativo muy limitado**.

Difunden estimaciones probabilísticas cifradas en situaciones meteorológicas críticas (sequía, olas de calor y de frío...) o para atender a usuarios específicos que demandan predicciones con un bajo contenido informativo en este rango (ej. Hidroeléctricas).

Para la elaboración de predicciones **a partir del D+5, los predictores regionales deben recibir** los siguientes **productos de predicción** para cada uno de los subrangos anteriormente establecidos (D+5/D+6, D+7/D+8 y D+9/D+10):

- **Los tubos.**
- La **información técnica** elaborada por el grupo nacional de medio plazo.
- Además deben poseer **una herramienta** que les permita **obtener estimaciones probabilísticas de parámetros meteorológicos** para localidades de su región.

7.3 REINO UNIDO

Contemplan el uso operativo del EPS desde dos puntos de vista:

- Que los predictores del Centro-coordinador, elaboren a partir del EPS una información dirigida a los predictores regionales.
- Que el UKMO ofrezca un mejor servicio a los usuarios de predicciones de este rango.

Productos de uso interno elaborados a partir del EPS:

Elaboran **tablas de probabilidad** previstas para diversos **parámetros meteorológicos** en 10 puntos de su área, desde el D+2 al D+5. En la siguiente tabla podemos ver un ejemplo (para las **Temperaturas extremas**: se presenta el valor más probable (MP), el valor superior (UB) y el inferior (LB) para un intervalo de confianza del 95%. Para la **Precipitación y Viento**: se presentan las probabilidades previstas de superar determinados umbrales en un periodo de 24 h. Los umbrales para la precipitación son 0.4, 4.9 y 11.9 mm. El umbral para la velocidad del viento se define como un viento medio de 21 kts o rachas de 33 kts. **Insolación**: se indica la probabilidad prevista de que la insolación exceda el 70% del valor máximo para ese día.)

FMUK

EGRR

142000

PROBABILITY FORECASTS FOR WED 16TH JUL 1997

ST	TEMPERATURE						PROBABILITIES						
	MIN			:	MAX			PPN (MM) : WIND: SUN					
	LB:	MP:	UB	:	LB:	MP:	UB	0.4:	4.9:	11.9			
026	08	10	13		14	16	20	60	10	00	20	10	
091	08	12	14		15	18	23	20	00	00	10	20	
140	09	12	14		18	20	24	70	20	00	20	10	
257	09	12	14		18	22	26	40	00	00	00	10	
334	10	13	15		18	21	25	50	10	00	10	00	
534	10	13	16		20	23	27	30	00	00	00	20	
590	10	13	16		19	22	26	20	00	00	00	20	
715	11	14	17		18	21	25	40	10	00	00	00	
772	12	14	17		20	24	28	20	00	00	00	20	
917	09	12	15		17	19	24	80	20	00	20	00	

Como **productos gráficos** se muestran dos ejemplos elaborados por el Centro- coordinador y dirigidos a otros predictores locales y que acompañarían a los campos del modelo determinista que se difunden habitualmente.

En la **figura 7.1** se muestra la **gran dispersión** que se observa en el EPS en un día de invierno respecto a la trayectoria que seguirá el centro de una baja a partir del D+3. Las líneas se etiquetan con probabilidades que indican niveles de confianza. Es decir habría un 60% de probabilidad de que el centro de la baja se encontrara entre las dos líneas etiquetadas con este valor.

En la **figura 7.2** se muestra otro tipo de producto gráfico que se emite en días de **poca dispersión** del EPS. Por ejemplo, cuando existen dos "cluster". En el ejemplo observamos dos mapas esquemáticos de SFC (centros de presión, frentes y movimiento previsto de los centros de baja) para la evolución más probable y la solución alternativa y sus probabilidades asociadas.

El predictor a turno del Centro-coordinador debe decidir cada día, que tipo de productos son los más adecuados para resumir la información del EPS. Estos productos se añadirán a la información del modelo determinista que habitualmente se envía.

En el campo de la investigación, están trabajando en el uso de "ensembles" multimodelos como vía de incorporar al EPS no sólo las incertidumbres debidas al análisis inicial sino también las incertidumbres debidas al modelo.

Para ello están produciendo junto al ensemble ECMWF T159L31 EPS, un ensemble del UKMO. Las condiciones iniciales para el UKMO son las perturbaciones generadas en el ECMWF añadidas al análisis del UKMO. El ensemble del UKMO tiene la misma resolución que el UKMO (equivalente al ECMWFT106 en resolución horizontal, pero con 19 niveles). A continuación, resumimos la verificación realizada del uso de "ensemble" multimodelos:

- En cuanto a la **pericia de la media del "ensemble"**, han verificado que, para todos los rangos de predicción, el **"ensemble" conjunto es, cuando menos, tan bueno como el "ensemble" individual que mejor verifica** (medida la pericia de cada ensemble individual y del conjunto, mediante el error cuadrático medio).
- En la verificación realizada **para el Brier Score de las probabilidades previstas de la anomalía de geopotencial en 500 hPa**, obtuvieron el mismo resultado que en el caso del error cuadrático medio.
- En cuanto al **método de los tubos**, con el uso de **"ensembles" multimodelos obtuvieron mayor información sinóptica que la obtenida con el "ensemble" de un solo modelo**. En la verificación realizada, el 40% de los tubos generados con el ensemble conjunto de 33+33 predicciones para el geopotencial de 500 hPa sobre Europa (T+156 a T+228) contiene miembros de un solo modelo, lo cual es una clara indicación de que "ensembles" procedentes de dos modelos diferentes producen a veces configuraciones sinópticas diferentes.

- Actualmente siguen trabajando en la verificación del "ensemble" multimodelos, comparándolo con el "ensemble" de un único modelo, con vistas a tomar una decisión acerca de que "ensemble" debe utilizarse operativamente.

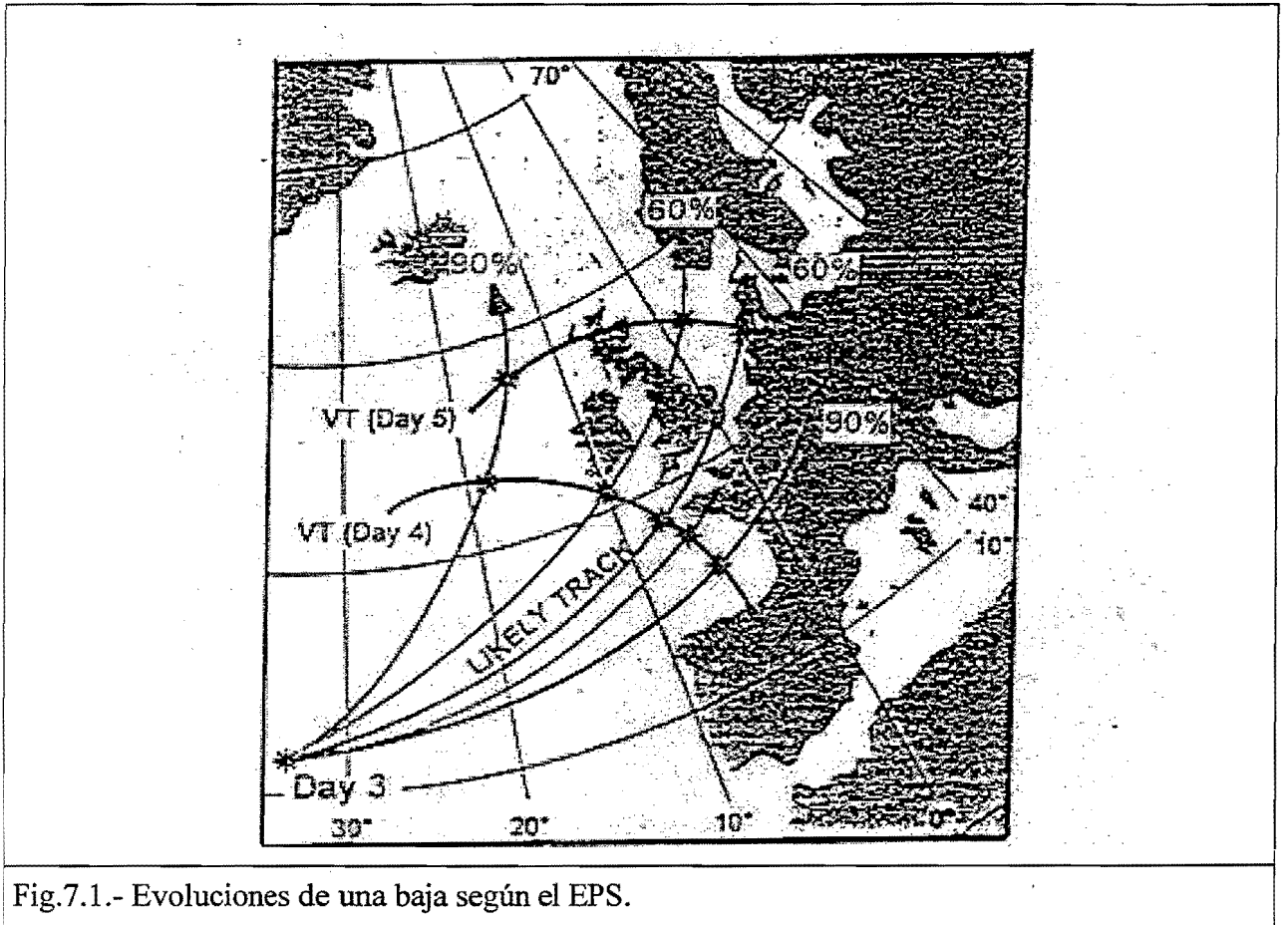


Fig.7.1.- Evoluciones de una baja según el EPS.

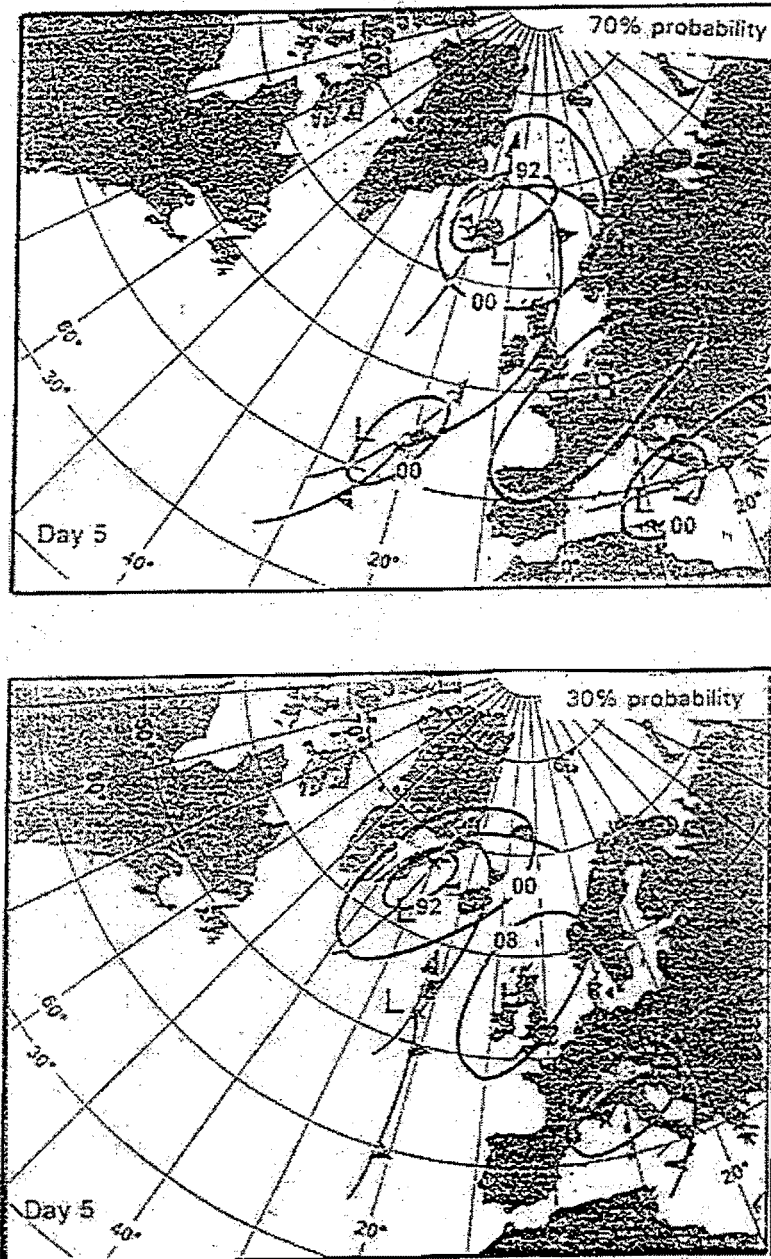


Fig.7.2.- Mapas esquemáticos de superficie que representan dos evoluciones: la más probable (arriba) y la menos probable (abajo).

7.4 ITALIA

En el CNMCA se ha usado el EPS con un doble objetivo:

- **Evaluar la confianza del modelo operativo T213.**
- **En caso de baja confianza, encontrar posibles alternativas al T213.**

En la actualidad, el uso operativo del EPS en Italia se resume en los siguientes puntos:

- **En el "briefing" diario, los predictores a turno comentan brevemente los productos del EPS.**
- **Los productos del EPS que más se usan son: los sellos para el (D+7), los "cluster" medios para diferentes áreas, la media del EPS, los "penachos" y los diagramas de probabilidad de precipitación.**
- **Se comparan los "cluster" medios con el escenario previsto por el modelo de alta resolución ; los predictores intentan evaluar, de forma cualitativa la confianza en el T319.**
- **Los diagramas de probabilidad de precipitación se tienen en cuenta para predicciones de corto plazo ya que su uso les ha demostrado su utilidad para emitir avisos en el D+2 con más confianza.**

Actualmente están investigando un agrupamiento más adecuado del EPS. Los objetivos del nuevo agrupamiento serían:

- **Cambiar el área para realizar un agrupamiento más adecuado para Italia.**
- **Cambiar la técnica de agrupamiento de modo que agrupe en función de la configuración sinóptica.** Para ello, primero se fijan algunas configuraciones en 500 hPa que han sido consideradas por los predictores como "prototipos". El parámetro elegido para el agrupamiento es la dirección del viento geostrófico . Después se comparan los miembros del EPS con los "prototipos" y mediante un proceso iterativo de recolocación se forman los "cluster" finales.

Los planes que se plantean realizar a corto plazo son:

- **Finalizar la nueva técnica de agrupamiento y realizar una verificación de la misma durante un período suficientemente largo.**
- **Evaluar la posibilidad de extender el agrupamiento a los niveles bajos (850 hPa o SFC).**
- **Introducir el Metview de forma operativa.**

- **Evaluar la posibilidad de producir predicciones probabilísticas que puedan trasladar la información del EPS.**

7.5 NORUEGA

Hasta diciembre de 1996 utilizaban los "sellos" para el D+7 y los "penachos" (temperatura en 850 hPa, precipitación total y geopotencial en 500 hPa) para tres ciudades noruegas. En 1997 comenzaron a recibir los "cluster" medios para geopotenciales de 500 y 1000 hPa y temperaturas en 850 y 500 hPa (desde el D+3 al D+7) y las probabilidades previstas para anomalías de temperatura en 850 hPa, precipitación total en 24 h. y velocidad del viento a 10 m. (desde el D+3 al D+10).

Los predictores usan estos productos para la elaboración de predicciones de medio plazo.

Del uso y verificación de las probabilidades previstas concluyen que han obtenido buenos resultados para las anomalías de temperatura y la precipitación total, pero que la velocidad del viento es subestimada en 10 m/s en las estaciones terrestres, aunque observan que este problema no es sólo del EPS sino también del modelo operativo.

7.6 SUIZA

Actualmente usan el EPS como guía para la predicción de medio plazo.

- **Los centros regionales reciben (junto a los productos habituales distribuidos por el Centro Europeo) los productos postprocesados de una clasificación propia de los miembros del EPS, mediante una red neuronal en 144 situaciones fijas (ver apartado 4.3).**

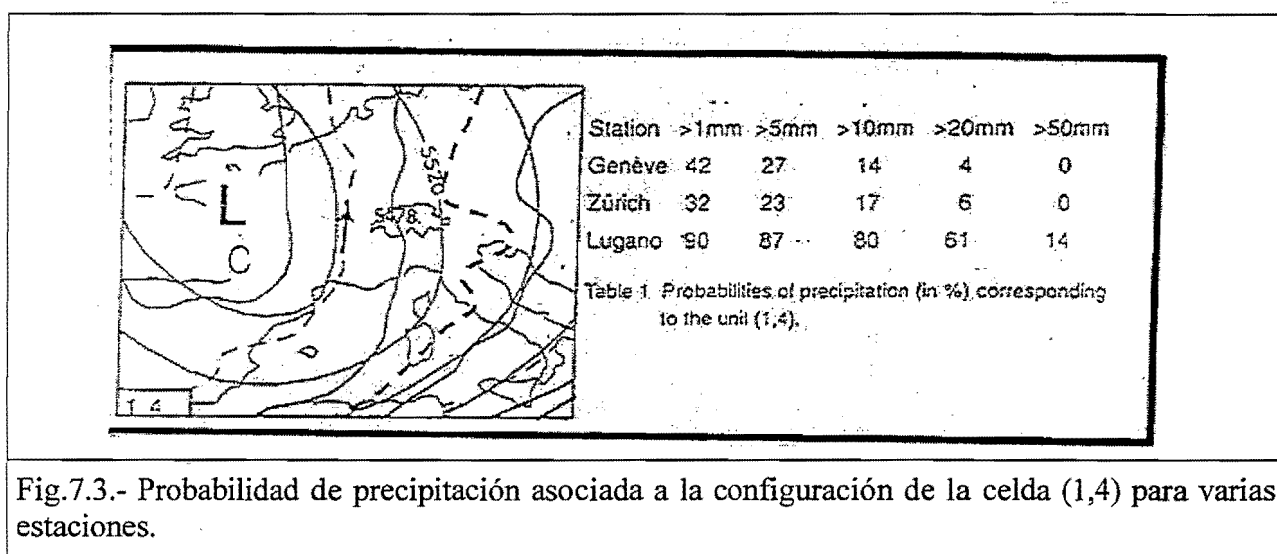
Día a día se clasifican los 51 miembros del EPS dentro de esta matriz, desde el D+4 al D+10.

A partir de los análisis de 1981 hasta 1995, han realizado una clasificación estadística de las probabilidades de precipitación (con diferentes umbrales) para cada una de las 144 situaciones de la matriz y para más de 20 estaciones suizas.

A la matriz de situaciones le hacen corresponder las matrices de precipitación, donde cada elemento refleja la probabilidad de precipitación para un determinado umbral y localidad, que produciría la situación correspondiente.

La **figura 7.3** muestra como ejemplo el elemento (1,4) de la matriz junto a las probabilidades de precipitación para tres localidades de Suiza.

De acuerdo con lo anterior, cada día elaboran un conjunto de tablas de probabilidad de precipitación (con diferentes umbrales) para diversas localidades suizas. La siguiente tabla muestra un ejemplo de probabilidades de precipitación para determinados umbrales en la ciudad de Ginebra.



“Probability of precipitation (%) in quantity in mm/24h run: Wed.11.Jun “

GENEVE	1 mm	5 mm	10 mm	20 mm
Thu 12 Jun	40	29	20	11
Fri 13 Jun	40	29	20	11
Sat 14 Jun	40	29	20	11
Jun 15 Jun	41	28	16	9
Mon 16 Jun	39	24	11	7
Tue 17 Jun	32	19	12	5
Wed 18 Jun	39	26	17	8
Thu 19 Jun	46	31	18	8
Fri 20 Jun	40	26	15	6
Sat 21 Jun	34	21	12	5

Aplican un filtro de Kalman para corregir los valores de la T a 2m obtenida del EPS.

- La mejora que han obtenido en la predicción de parámetros meteorológicos es muy alta; sin embargo, son conscientes de que la técnica utilizada limita las predicciones arriesgadas y esto puede interpretarse como una reducción del potencial del EPS.

8. BIBLIOGRAFIA

8.1 Artículos, libros, ..

8.2 Publicaciones del CEPPM

8.1 ARTICULOS, LIBROS, ...

- Atger, Frederic; 1997: *The tubing: an alternative for clustering for EPS classification*. ECMWF Newsletter, N. 79 (Spring 1998). (*1)
- Atger, Frederic; 1997: *Report on operational use of EPS products at METEO-FRANCE*. (*1)
- Atger, Frederic; 1996: *Combined use of ECMWF EPS and high resolution model guidance in operational medium range forecasting*. (*1)
- Bjerknes, V.; 1904: *Das problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunte der Mechanick und der Physick*. Meteorol. Z. 21, 1-7.
- Brier, G. W; 1950: *Verification of forecasts expressed in terms of probability*. Montly Weather Review; N. 78, Pag. 1-3. (*1)
- Buizza, Roberto; 1996: *Potential forecast skill of ensemble prediction and spread and skill distributions of the ECMWF Ensemble Prediction System*. American Meteorological Society, Vol. 125, pag: 99-126.(*1)
- Buizza, R. et all; 1998: *Impact of Model resolution and ensemble size of the performance of an ensemble prediction system*. (aparecerá en la Quaterly J. Royal Met. Society); (*1)
- Buizza, R. et all; 1998: *Impact of ensemble size on ensemble prediction*. (aparecera en la Monthly Weather Review); (*1)
- Eckert, P et all; 1996: *Classification of ensemble forecasts by means of an neural network*. Meteorological Applications; N. 3. Pag. 169-178. (*1)
- Epstein, E; S; 1969: *Stochastic dynamic prediction*. Tellus, 21, 739-759.

- Gibson, J. et al; 1996: *Current status of the ECMWF re-analysis (ERA) project*. ECMWF Workshop Proceedings, Fifth Workshop on Meteorological Operational Systems, 283-290.
- Houtemaker, P.L; 1996: *The RPN ensemble prediction system*. - Proceedings 1995 ECMWF Seminar on Predictability, Vol II, 121-146.
- Lorenz, E. N; 1963: *Deterministic nonperiodic flow*. J. Atmospheric Science. 20, 130-141. (*1)
- Lorenz, E. N; 1965: *A study of predictability of 28-variable atmospheric model*. Tellus 17, 321-333.
- Lorenz, E. N; 1969: *The predictability of flow which possesses many scales of motion*. Tellus 21, 289-307.
- Lorenz, E.N; *The essence of the chaos*. University of Washington Press, 1993.
- Martin Ehrendorfer; 1997: *Predicting the uncertainty of numerical weather forecasts: a review*. University of Vienna. (* 1) .
- Molteni, F; Buizza, R; Palmer, T and Petroliaigis, T; 1996: *The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation*. Q. J. R. Meteorological Society; N. 122. Pag. 73-120. (* 1) (éste es el documento más específico y "oficial" del EPS del ECMWF).
- Palmer, T. N; 1996: *Predictability of the atmosphere and oceans: from days to decades*. (* 1)
- Palmer, T.N. and Tibaldi, S. 1988: *On the prediction of forecast skill*. Monthly Weather Review; N. 116, Pag: 2453-2483. (* 1)
- Persson, A; Strauss, B; 1995: *Skill and consistency in medium range weather forecasting*. ECMWF Newsletter, N. 70 (Summer 1995). (* 1)
- Petroliaigis, T; Buizza, .. 1996: *Extreme rainfall prediction using the ECMWF EPS*. ECMWF Newsletter, N. 73 (Autumn 1996).
- Richardson, D.S. et al; 1996: *Joint medium-range ensembles using UKMO, ECMWF and*
- *NCEP ensemble systems*. Preprint Volume, 11 Conference on NWP, Norfolk, Virginia, J26-J27.
- Sivillo, J.; Toth, Z; 1997: *An ensemble forecasting primer*. American Meteorological Society; Vol. 12. Pag. 809-818. (* 1)

- Strauss, B; Lanzinger, A; 1996: *EPS verification*. ECMWF Newsletter, N. 72 (Spring/Summer 1996) (* 1)
- Toth, Z; Kalnay, E; 1993: *Ensemble forecasting at NCEP (anteriormente NMC): The generation of perturbations*. American Meteorological Society; N. 74. Pag: 2317-2330. (* 1)
- Toth, Z; Kalnay, E; 1997: *Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method*. Monthly Weather Review; N. 125. (* 1) (este es el documento "oficial" que describe el EPS americano).
- Traction, M.S.; Kalnay, E; 1993: *Ensemble forecasting at NCEP : Operation implementation*. Weather and forecasting; N. 8. Pag: 379-398. (* 1)

8.2 PUBLICACIONES DEL CEPPM

- *ECMWF newsletter* (cada tres meses, aproximadamente).(* 1)

(*1) Indica los artículos más usados por nosotros en la redacción de los apuntes.

