

MÉTODOS OBJETIVOS PARA LA LOCALIZACIÓN DE FRENTE. APLICACIÓN DEL PARÁMETRO FRONTAL TÉRMICO (PFT)

A. García Méndez
F. Martín León
R. Riosalido Alonso

(Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción, S.T.A.P.; -INM-)

RESUMEN

La tarea de diagnosticar y predecir la posición de los sistemas frontales, su evolución, caracterización e intensificación o decaimiento, es uno de los principales problemas con los que se enfrenta el predictor operativo, principalmente en los meses invernales. En este trabajo, se presenta el Parámetro Frontal Térmico (en adelante PFT), como un método objetivo para la localización y caracterización tanto de sistemas frontales como de fronteras térmicas y de humedad a partir de modelos numéricos.

1. Introducción.

Si usamos el concepto de frente en el sentido de **zona de separación entre masas de aire con diferente temperatura y contenido de humedad, en una región baroclina a escala sinóptica**, un sistema frontal debe tener una cierta consistencia espacial y temporal. Por lo tanto, debe ser posible el seguimiento de estructuras de este tipo a partir de modelos numéricos.

El primer objetivo antes de diseñar un parámetro frontal es elegir un parámetro conservativo que dé cuenta de la separación entre masas de aire.

R. J. Renard y L. C. Clarke (1965), utilizaron la temperatura potencial a causa de los problemas que presentan los modelos numéricos en el tratamiento de la humedad. Es evidente que éste no

parece un parámetro muy apropiado, ya que aunque debe conservarse en condiciones adiabáticas, no lo hace cuando se consideran efectos diabáticos, en especial la liberación de calor latente, cuyo papel es fundamental en la evolución de un sistema frontal.

V. Zwatz-Meise (1985), utiliza los espesores 850/500, con lo que considera la temperatura virtual media de este estrato. Los resultados que obtiene son buenos en sistemas frontales intensos y poco concluyentes cuando la intensidad es menor. Esto es lógico a causa del efecto de suavizado inherente a la definición del parámetro frontal.

Nosotros hemos escogido para definir el parámetro frontal térmico, la temperatura potencial del termómetro húmedo por una serie de razones.

En primer lugar, disponemos en la actualidad de un algoritmo de cálculo rápido y eficiente para la evaluación de la temperatura potencial del termómetro húmedo. Este algoritmo trabaja tanto sobre datos de sondeos como sobre salidas de modelos numéricos (ver Nota Técnica núm. 5 del S.T.A.P.).

En segundo lugar, la temperatura potencial del húmedo, es menos sensible a la humedad que la temperatura potencial equivalente, presenta gradientes más suaves y es un campo menos ruidoso que ésta. Por último, la temperatura potencial del termómetro húmedo se conserva tanto en las evoluciones adiabáticas como en las diabáticas que consideren la liberación de calor latente.

Una vez escogida la temperatura potencial del termómetro húmedo, se aplica el operador

$$-\vec{u}_n \nabla | \nabla \cdot \quad [1]$$

a la temperatura potencial del termómetro húmedo (θ_w) para obtener las zonas donde el gradiente está cambiando más rápidamente. De este modo, el PFT queda definido como:

$$\text{PFT} = -\vec{u}_{v\theta_w} \nabla |\nabla \theta_w| \quad [2]$$

donde el unitario es

$$\vec{u}_{v\theta_w} = \frac{\nabla \theta_w}{|\nabla \theta_w|} \quad [3]$$

Su significado se muestra en las siguientes figuras y en el Apéndice puede encontrarse una justificación analítica. En la Figura 1.a se muestra una distribución de θ_w y en la 1.b el cálculo de $|\nabla \theta_w|$ de la distribución anterior.

La zona de gradientes máximos (línea B-C, Figura 1.b) refleja el área más baroclina y los mínimos de gradiente (línea D-E), el área más barotrópica. En la Figura 2.a se muestra el cálculo del PFT y en la Figura 2.b, una sección vertical del PFT entre los puntos A-B de 2.a.

De las definiciones anteriores, se deduce que el PFT es la derivada direccional del módulo del gradiente de θ_w en dirección de su gradiente. En un frente bien marcado, esta derivada direccional mide la variación máxima del gradiente, ya que en tal caso las direcciones de $\nabla \theta_w$ y de su máxima variación son idénticas. Esta matización se aclara en el Apéndice.

Las dorsales del PFT (valores máximos del parámetro) y las vaguadas (valores mínimos del

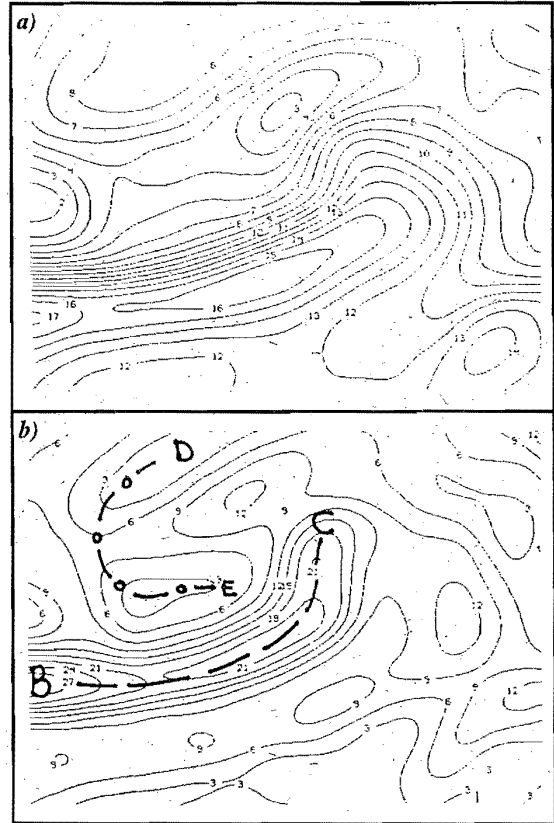


Figura 1.- a) Distribución de θ_w ($^{\circ}\text{C}$)
b) $|\nabla \theta_w|$ ($10^{-5} \text{ K km}^{-2}$)

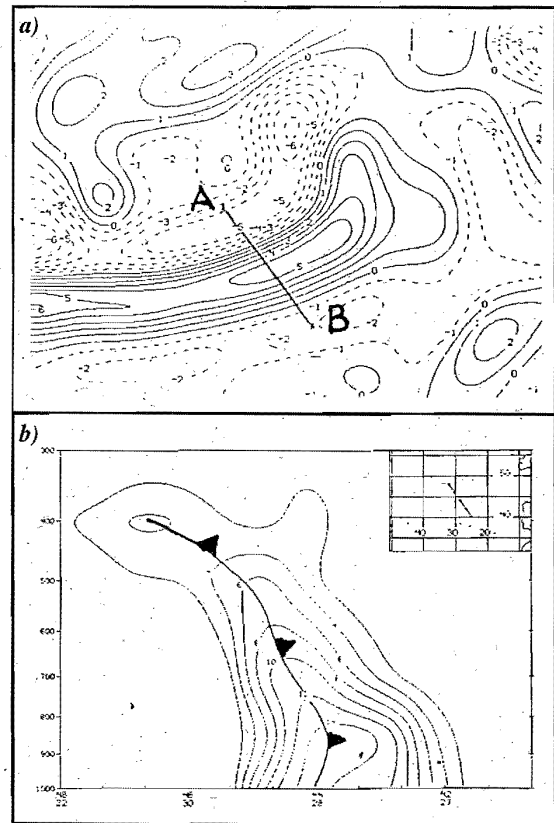


Figura 2.- a) PFT ($10^{-5} \text{ K km}^{-2}$)
b) Sección vertical A-B del PFT

PFT) localizan las fronteras del aire cálido y frío respectivamente. En el PFT que se ha implementado en SAIDAS, sólo se muestran valores del PFT > 0.

2. Aplicaciones meteorológicas.

El PFT debe utilizarse para marcar fronteras térmicas en general. En el caso de un frente frío este parámetro se localiza por delante de la línea de $(\nabla\theta_w)_{\max}$. En el caso de un frente cálido se sitúa por detrás del gradiente máximo. En las oclusiones, su posición depende de si ésta es cálida o fría. Este campo da una primera aproximación de la posición de los frentes.

Las ondulaciones incipientes en un frente no aparecen en general recogidas por el PFT. La detección de una ondulación incipiente en el sistema frontal, se detecta donde la advección de vorticidad en altura comienza a superponerse sobre el frente frío (ver Nota Técnica núm. 7 S.T.A.P.).

Existen algunas restricciones en el uso del PFT:

Cuando se utiliza el PFT en niveles medios (500 mb), hay que tener en cuenta que los máximos de viento (que están en balance térmico a escala sinóptica), ofrecen un gradiente térmico fuerte a la izquierda de este máximo y por lo tanto este parámetro dará señal a la derecha del máximo de viento donde comienza el sector cálido. La distribución del parámetro frontal térmico en el caso de las oclusiones, no presenta una estructura típica única y puede mostrar diversos aspectos en función del grado de desarrollo de la oclusión y del nivel de cálculo utilizado, aunque es normal que no aparezca una señal bien definida salvo si la oclusión está muy desarrollada. De mucha ayuda para la localización de oclusiones, es la combinación del PFT y de la humedad relativa en 700 mb, dado que la estructura de humedad en niveles medios queda muy bien marcada en este nivel y además es en este nivel donde el PFT ofrece una señal marcada en las oclusiones. En la Figura 3 se muestra una serie de secciones verticales a través de un frente frío tipo anafrente.

2.1. Caracterización de un frente frío tipo anafrente.

La estructura vertical de un frente frío tipo anafrente, con flujo relativo del *conveyor* cálido dirigido hacia el frente frío (ver imagen VIS Meteo-

sat de la Figura 3.a correspondiente al 30/10/91 a 12Z), se aprecia en las Figuras 3.b y 3.c. La Figura 3.c muestra una sección vertical de la θ_w donde resultan evidentes tanto el sector frío como el cálido, así como la existencia de estabilidad estática húmeda baja en este último sector y una capa con inestabilidad potencial poco profunda en el sector frío en la parte posterior de la zona con gradiente máximo de la θ_w . La frontera o zona de separación de los sectores frío y cálido tal como la señala el PFT, se muestra en la Figura 3.b.

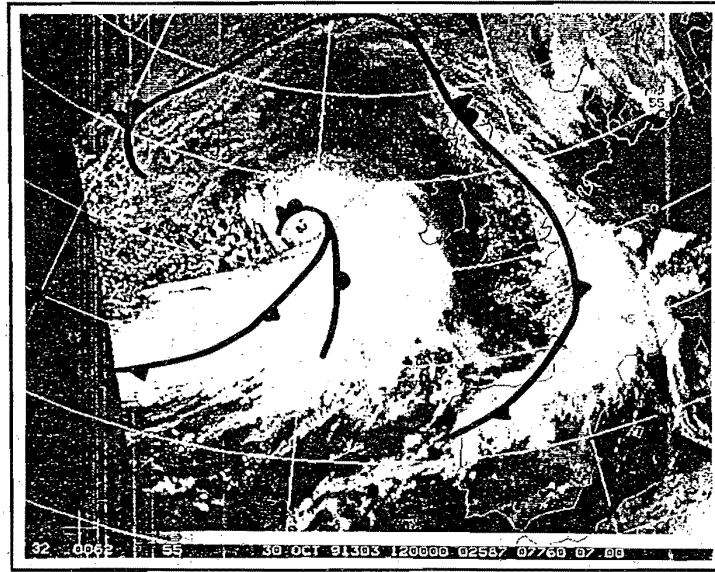
Algunas características de este tipo de frentes aparecen bien recogidas en la sección vertical. En concreto, la intrusión en forma de nariz del sector frío hacia el cálido en la capa límite y la inclinación hacia atrás con la altura de la superficie frontal son aspectos que cabe esperar en un frente de este tipo.

En la Figura 3.d se muestra una sección vertical del forzamiento adiabático seco a través de la divergencia de Q. Se aprecia convergencia de Q en el sector cálido y sobre el frente frío en altura y divergencia en una zona amplia del sector frío. Un modo de evaluar la frontogénesis cuasi-geostrófica seca es mediante la proyección del vector Q en dirección del gradiente de θ_w o lo que es igual, mediante la expresión:

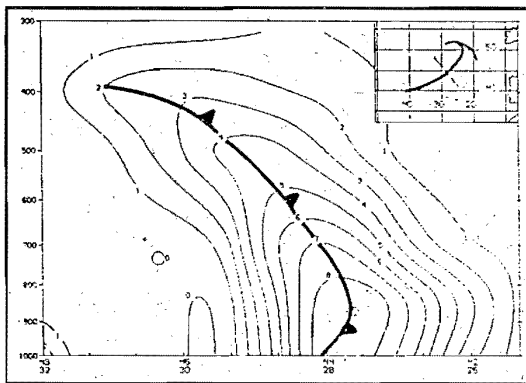
$$FCG = \vec{Q} \cdot \vec{u}_{\nabla\theta_w} \quad [4]$$

Valores positivos de la FCG indican circulación directa (ascensos en el aire cálido y subsidencia en el aire frío). Este tipo de circulación constituye un factor que ralentiza la frontogénesis mientras que la advección ageostrófica sobre el frente es un factor clave en el aumento del gradiente térmico por detrás del frente frío y por delante del frente cálido. Estas advecciones ageostróficas en los frentes sólo pueden abordarse desde la teoría semigeostrófica y será objeto de un estudio en profundidad próximamente.

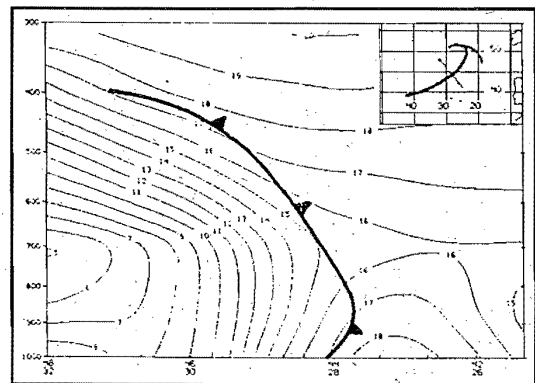
El cálculo de la expresión [4], es el que se muestra en la sección vertical de la Figura 3.e, donde prácticamente toda la superficie del frente frío está en proceso frontogenético, en el sentido de que está aumentando $\nabla\theta_w$ y por lo tanto se está acelerando la componente de viento paralela al frente. Esto es consecuencia de que la componente del viento paralela al frente está en balance térmico para escalas espaciales de hasta 100 km. Como consecuencia de lo anterior debe intensificarse la circulación en el *conveyor* cálido. Más detalles sobre este proceso pueden encontrarse en la Nota Técnica núm. 7 S.T.A.P.



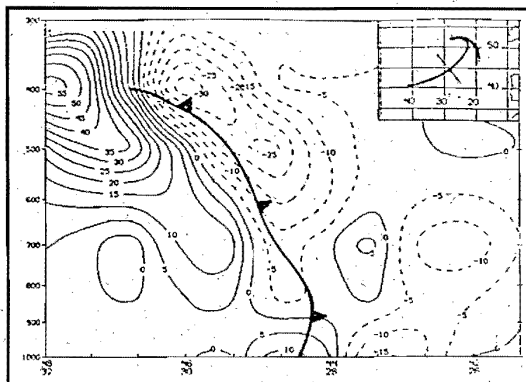
a)



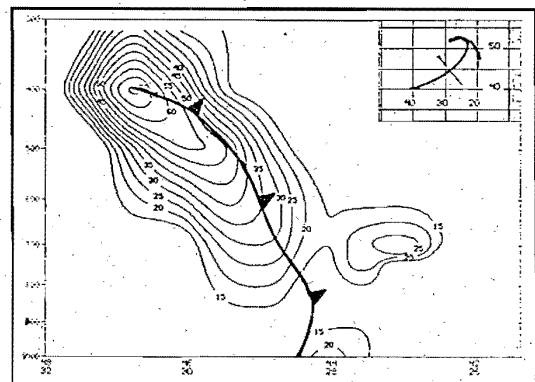
b)



c)

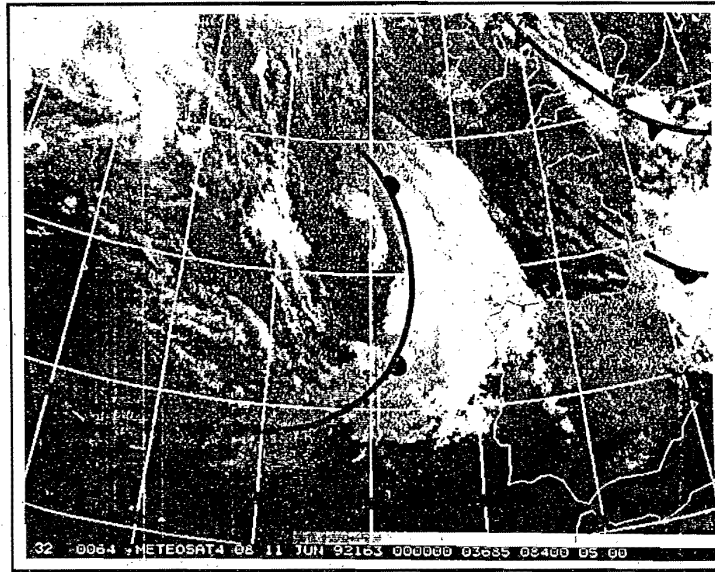


d)

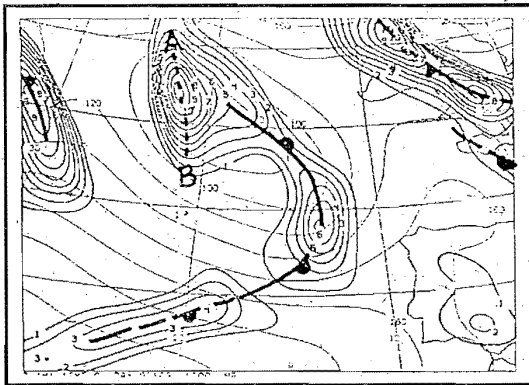


e)

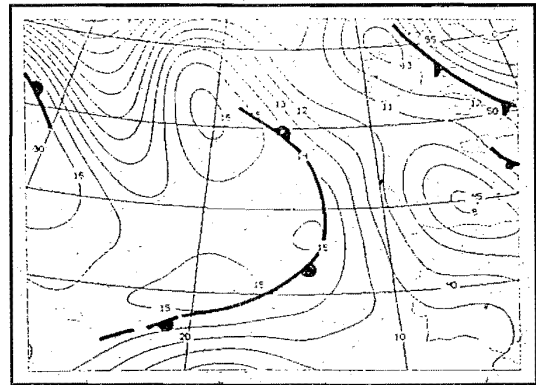
Figura 3.- a) Imagen VIS Meteosat 30/10/91 12Z
 b) Sección vertical del PFT (10^5 K km^2)
 c) Sección vertical de θ_w ($^\circ\text{C}$)
 d) Sección vertical de ∇Q ($10^{-16} \text{ mb}^{-1} \text{ s}^{-2}$)
 e) Sección vertical de la proyección de Q en dirección $\nabla\theta_w$



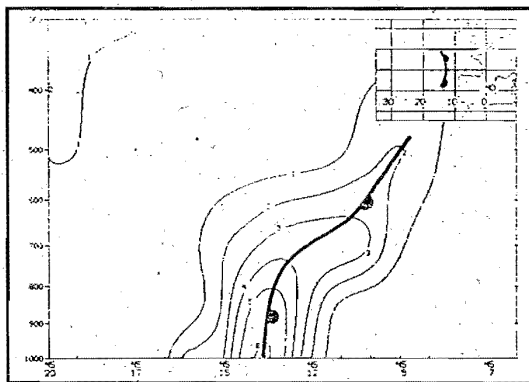
a)



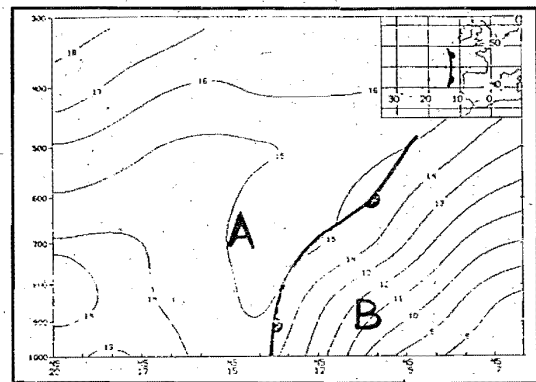
b)



c)



d)



e)

Figura 4.- a) Imagen IR Meteosat 11/06/92 00Z
 b) Z1000 mb + PFT 850 mb. ANA INM 11/06/92 00Z
 c) θ_w 850 mb
 d) Sección vertical del PFT a través del frente cálido
 e) Sección vertical de θ_w a través del frente cálido

2.2. Caracterización de un frente cálido libre.

En la Figura 4 se muestra un frente cálido sin conexión con un frente frío. Este tipo de frentes se conocen como frentes cálidos libres. Este caso corresponde al 11/06/92 a 00Z. En la Figura 4.a se muestra una imagen IR Meteosat de la fecha y hora reseñada.

La Figura 4.b muestra el geopotencial en 1.000 mb y el PFT en 850 mb. Para una interpretación del PFT conviene consultar la distribución de θ_w en 850 mb de la Figura 4.c. En concreto, la señal que marca el PFT en A (Figura 4.b) no se trata de un frente sino de una frontera causada por la intrusión desde el Norte de aire con menor θ_w al Oeste del núcleo cálido de la depresión en niveles bajos. En la Figura 4.d se muestra una sección vertical del PFT a través del frente cálido. La inclinación hacia el Este de la superficie frontal es lo que cabría esperar y es muy diferente de la configuración vertical del anafronte de la Fig. 3.b. En la Figura 4.e se muestra una sección vertical

de θ_w a través del frente cálido. La zona a la izquierda de la Figura 4.e constituye el sector cálido A con baja estabilidad estática húmeda y en B se aprecia el sector con menor θ_w y con estabilidad estática húmeda alta. En consecuencia, podemos esperar respuestas vigorosas de la atmósfera en cuanto a movimientos verticales sobre la superficie frontal en el sector cálido.

2.3. Distinción entre fronteras y frentes.

La discriminación entre un frente y una frontera, puede llevarse a cabo efectuando secciones verticales y comprobando el espesor y estructura vertical de la citada frontera. Como ejemplo, en la Figura 5 se muestran secciones verticales de un frente cálido y en la Figura 6 secciones de una frontera en θ_w .

La extensión vertical del frente cálido de la Figura 5, contrasta con las secciones de la Figura 6 para un día de verano en la Península Ibérica.

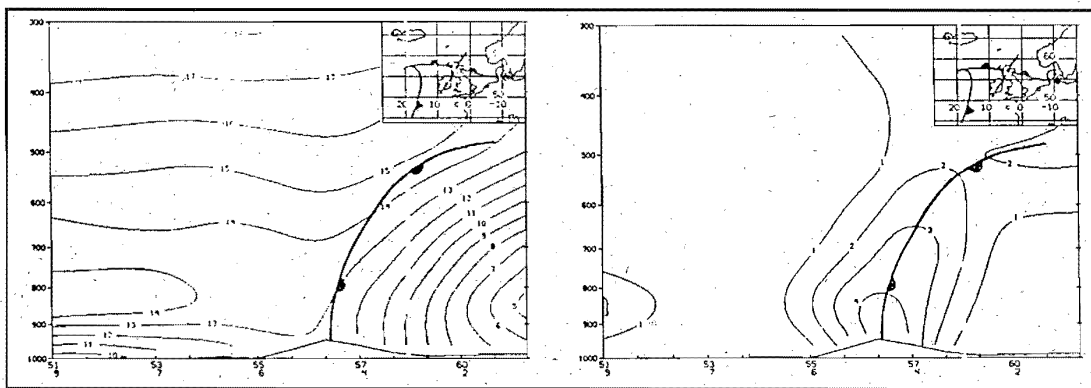


Figura 5.- a) Sección vertical de θ_w ($^{\circ}\text{C}$) a través de un frente cálido
 b) Sección vertical del PFT del mismo frente
 ANA INM 12/10/90 00Z

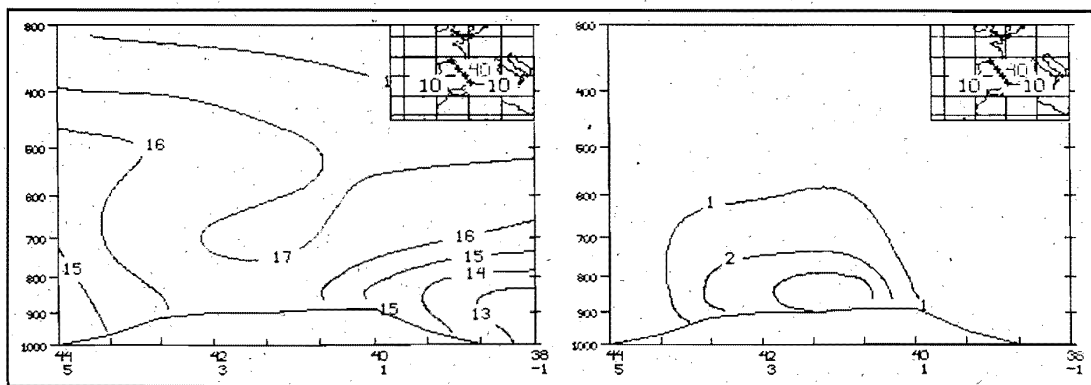


Figura 6.- a) Sección vertical de θ_w ($^{\circ}\text{C}$)
 b) Sección vertical del PFT (10^5 K km^{-2})
 ANA INM 01/07/91 12Z

Tanto la extensión vertical de la frontera, como la configuración de la θ_w quedan limitadas a una capa de poco espesor cerca de la superficie en este caso. En particular esta frontera se forma por el calentamiento típico de esta época del año.

Conclusiones.

- El PFT marca áreas donde el gradiente de la θ_w cambia más rápidamente, por lo que es una herramienta ideal para localizar de un modo objetivo tanto frentes como fronteras de temperatura y humedad.
- El PFT en combinación con la θ_w y su advección ofrece un método objetivo para la localización y caracterización de sistemas frontales.
- El PFT en combinación con la estabilidad estática húmeda σ_w delimita áreas donde es factible la convección y da idea sobre la profundidad de ésta.
- En la localización de frentes/fronteras se obtienen buenos resultados escalando el PFT a:

Otoño - Invierno $\Rightarrow 10^{-5} \text{ K km}^2$
 Primavera - Verano $\Rightarrow 10^{-6} \text{ K km}^2$

APÉNDICE.

Desarrollo analítico del PFT.

El término $\nabla |\nabla\theta_w|$ que aparece en la ecuación [2] que define el PFT puede desarrollarse según la expresión:

$$\nabla |\nabla\theta_w| = \frac{1}{|\nabla\theta_w|} [\nabla\theta_w \cdot \nabla] \nabla\theta_w \quad [A.1]$$

El vector unitario en la dirección de $\nabla\theta_w$ y el definido por [A.1], tienen la misma dirección si:

$$\vec{k} \cdot \vec{u}_{\nabla\theta_w} \times \nabla |\nabla\theta_w| = 0 \quad [A.2]$$

Desarrollando la expresión anterior se llega a:

$$\vec{k} \cdot \vec{u}_{\nabla\theta_w} \times \nabla |\nabla\theta_w| = \frac{1}{|\nabla\theta_w|^2} \left[\frac{\partial^2\theta_w}{\partial x \partial y} \{(\partial\theta_w/\partial x)^2 - (\partial\theta_w/\partial y)^2\} - \frac{\partial\theta_w}{\partial x} \frac{\partial\theta_w}{\partial y} \left(\frac{\partial^2\theta_w}{\partial x^2} - \frac{\partial^2\theta_w}{\partial y^2} \right) \right] \quad [A.3]$$

La expresión [A.3] puede simplificarse si se considera el sistema de coordenadas ligado al frente que se muestra en la Figura A1.

En este caso:

$$\nabla\theta_w = \frac{\partial\theta_w}{\partial s} \vec{s} \quad [A.4]$$

y resulta inmediato que:

$$\vec{k} \cdot \vec{u}_{\nabla\theta_w} \times \nabla |\nabla\theta_w| = \frac{\partial^2\theta_w}{\partial s \partial n} \quad [A.5]$$

Hay que hacer notar que sobre la parte central del eje de gradiente máximo de θ_w

$$\frac{\partial^2\theta_w}{\partial s \partial n} \approx 0 \Rightarrow \vec{u}_{\nabla\theta_w} \parallel \nabla |\nabla\theta_w| \quad [A.6]$$

y el PFT marcaría el cambio máximo del gradiente en su dirección. En los extremos de los lóbulos

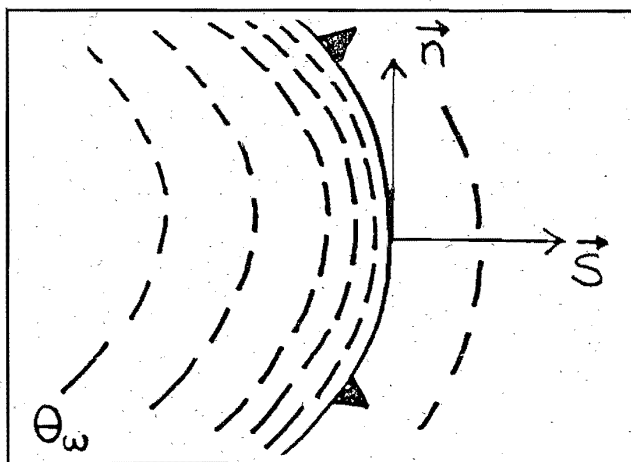


Figura A1.- Sistema de coordenadas ligado a un sistema frontal

de gradiente máximo en cambio, el PFT marcaría la derivada direccional en dirección del gradiente térmico. Estas consideraciones, son coherentes con los resultados numéricos que se presentan en este trabajo. En la Figura A2 se muestran las direcciones de $\nabla\theta_w$ y de $\nabla|\nabla\theta_w|$ en un sistema frontal.

Finalmente, usando la expresión [A.1] el PFT podría escribirse:

$$PFT = - \frac{1}{|\nabla\theta_w|^2} \nabla\theta_w \cdot [\nabla\theta_w \cdot \nabla] \nabla\theta_w \quad [A.7]$$

La definición de la dirección normal a un frente puede refinarse aún más. Si efectuamos una transformación principal de ejes en la expresión de $\nabla(\nabla\theta_w)$ que en su notación cartesiana tensorial tiene la forma:

$$\nabla(\nabla\theta_w) = \frac{\partial^2\theta_w}{\partial x_i \partial x_j} \vec{i}_i \vec{i}_j, \quad i=1,2,3; j=1,2,3 \quad [A.8]$$

la expresión [A.8] en función de los ejes principales se escribe:

$$\nabla(\nabla\theta_w) = \frac{\partial^2\theta_w}{\partial x_i^{*2}} \vec{i}_i^* \vec{i}_i^*, \quad i=1,2,3 \quad [A.9]$$

Este problema de autovalores puede resolverse tomando ventaja de la forma simétrica de la matriz $[\partial^2\theta_w/(\partial x_i \partial x_j)]$. Por fin, la dirección normal al frente se define ahora como la del autovector correspondiente al mayor autovalor.

Esta definición es idéntica a la utilizada en este trabajo para el caso de frentes fríos y cálidos,

aunque mejora la definición de las oclusiones. Una versión del PFT basada en esta definición estará disponible en SAIDAS en un futuro próximo.

Referencias.

Browning, K.A. (1986). *Conceptual models of precipitation systems. Weather and Forecasting, volumen 1, pp. 23-41.*

Browning, K.A.; Monk, G.A. (1982). *A simple model for the synoptics analysis of cold fronts. Quart. J. R. Soc., 108. pp. 435-452.*

Moore, J.T.; Smith, K.F. (1989). *Diagnosis of anafronts and katafronts. Weather and Forecasting, volumen 4, pp. 61-72.*

Renard, R.J.; Clarke, L.C. (1965). *Experiments in numerical objective frontal analysis. Monthly Weather Review, vol. 93. pp. 547-556.*

Zwatz-Meise V.; Hufnagl F. (1990). *Some results about the relation between an objective front parameter and cloud bands in satellite images and its connection to classical cold fronts models. Meteorology and Atmospheric Physics, pp. 77-89.*

Steinacker, R.A. (1992). *Dynamical aspects of frontal analysis. Meteorology and Atmospheric Physics, pp. 93-103.*

García Méndez, A. *Temperatura potencial del termómetro húmedo: cálculo y aplicaciones. Nota Técnica núm. 5 del S.T.A.P.*

García Méndez, A.; Elizaga Rodríguez, F. *Sistemas frontales: localización y caracterización a partir de modelos numéricos. Nota Técnica núm. 7 del S.T.A.P.*

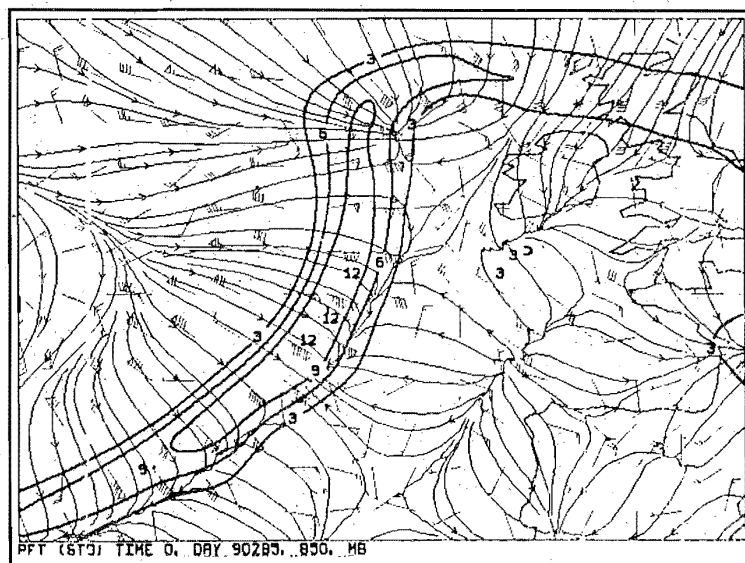


Figura A2.- $\rightarrow\rightarrow\rightarrow\rightarrow u_{\nabla\theta_w}$; $\Delta \rightarrow \nabla|\nabla\theta_w|$; ----- PFT