

PROPAGACION DE ONDAS MECANICAS (GRAVITATORIAS Y MAREAS) EN
LA ALTA ATMOSFERA TERRESTRE

Alberto E. Giráldez *
Laboratorio Ionosférico de la ARMADA (LIARA)
*Miembro de la carrera del CONICET

RESUMEN

La atmósfera terrestre, en todos sus niveles, responde a las excitaciones térmicas con mecanismos termodinámicos tendientes a disipar y propagar la energía que recibe.

En este informe se tratarán los mecanismos de conversión de energía térmica en ondas de presión que se propagan a grandes distancias en la alta atmósfera.

En la atmósfera las ondas de presión se propagan según sea su frecuencia, la que a su vez está determinada por las características de la fuente generadora.

Puede hablarse fundamentalmente de tres principales tipos de onda; Ondas Gravitatorias, de corto período (10 a 300 minutos); Mareas Atmosféricas (períodos de 8 a 24 horas) y Ondas Planetarias (períodos de días y meses).

Fisicamente el origen de los tres tipos de ondas es común, constituyendo el mismo fenómeno básico.

Sin embargo, requieren análisis independiente porque la presencia de la fuerza gravitatoria terrestre y la rotación de la tierra sobre sí misma producen efectos de diferentes escalas en la dinámica atmosférica.

ABSTRACT

The terrestrial atmosphere, at all levels, responds to the thermal excitations with thermodynamic mechanisms which produce dissipation and propagation of the received energy.

In this report the conversion mechanisms of the thermal energy into pressure waves propagating at great distances in the upper atmosphere are analyzed.

Pressure waves propagate differently in the atmosphere, depending on their frequency, which is in turn determined by the generator source characteristics.

Fundamentally, it is possible to speak of three principal wave types; Gravity Waves, with short periods (10 to 300 minutes); Atmospheric Tides with periods from 8 to 24 hours, and Planetary Waves (periods of days and months).

The three wave types have in common physical origin, being the three the same basic phenomena. Nevertheless they require an independent analysis because the earth gravity force and the earth rotation produce different scales effects in the atmospheric dynamics.

INTRODUCCION

La observación de algunas de las variables fundamentales que describen la dinámica atmosférica es de tradición mas que centenaria, por ejemplo las mediciones meteorológicas troposféricas.

Las observaciones en la alta atmósfera son en cambio mas jóvenes; se han realizado principalmente a partir de la década del '40.

En este trabajo solo nos ocuparemos de fenómenos de la alta atmósfera; pero es necesario aclarar que también ocurren en la baja atmósfera, aunque su detección es más dificultosa debido a que son de pequeña magnitud en comparación con los procesos globales. Por consiguiente, su interés meteorológico es escaso.

Tanto en la alta como en la baja atmósfera, los fenómenos se describen por el mismo sistema de ecuaciones fluidodinámicas, que será analizado más adelante. Las diferencias estriban en la importancia relativa de las fuerzas actuantes.

La atmósfera, desde el punto de vista físico, es un volumen gaseoso, esférico, limitado interiormente por una esfera rígida y abierto exteriormente; soporta dos intensas fuerzas externas: la atracción gravitatoria y la fuerza de Coriolis debida a la rotación. El análisis de los fenómenos debe incluir prioritariamente ambas fuerzas.

Los primeros estudios efectuados sobre el tema utilizaron modelos simples, asimilando el problema atmosférico al de mareas en los océanos. Por eso el primer modelo aceptable se obtiene de la llamada ecuación de mareas de Laplace, que permite analizar modos desacoplados.

Posteriormente se desarrollaron modelos atmosféricos más elaborados que, al tener en cuenta las variaciones en altura de la densidad y la temperatura, permiten una mejor comprensión de los fenómenos, al precio de aumentar tanto la complejidad matemática que no es posible obtener soluciones analíticas desacopladas.

S. Chapman y R. Linzen (1970) han expuesto claramente la evolución histórica del tema y las características de los modelos más modernos pueden ser estudiadas en S. Kato (1980). Ambas fuentes sirven también para obtener un panorama global de la dinámica de la alta atmósfera. A continuación presentare una descripción de los resultados experimentales y teóricos mas importantes del tema.

EVIDENCIA EXPERIMENTAL

El conocimiento de la alta atmósfera requiere la medición, para distintas condiciones temporales y geográficas, del perfil en altura de varios parámetros: composición química, densidad de ionización, densidad de partículas neutras, temperatura cinética, velocidades de desplazamiento de masa, presión, corrientes, etc.

Para obtener esta información se recurre a una variedad de técnicas de medición, "in situ" y desde tierra, directas e indirectas.

La experiencia indica que cualquiera sea la técnica de medición utilizada, si se eliminan las variaciones debidas a efectos fotoquímicos, la aplicación de cualquier técnica de análisis espectral, sea autorregresiva, transformadas de Fourier o de Máxima Entropía a una serie temporal o red espacial (tanto vertical como horizontal) de datos de presión, temperatura o densidad (tanto neutra como ionizada) se obtienen espectros de líneas bien definidas, con distribución de potencia $E(\omega)$ de pendiente negativa, y en algunos casos fuertemente negativa, indicando que los mismos no corresponden a procesos aleatorios.

Ademas existe una fuerte estabilidad en el espectro cuando se aplica el procedimiento a diferentes series de datos o se utiliza una ventana móvil para analizar una misma serie.

Las series temporales indican la existencia de fenómenos ondulatorios periódicos en la alta atmósfera, con períodos desde los 10 minutos a los 6 meses. Del análisis de las redes espaciales se observan longitudes de onda horizontales que van desde los 100 Km hasta escalas planetarias (10.000 Km), y la propagación vertical de ondas viajeras, con longitudes de onda de unas pocas decenas de Km como máximo.

Esta información apunta a la existencia de fenómenos armónicos estables en la atmósfera cuyos períodos y/o longitudes de onda horizontal y vertical son mensurables, y que segun las definiciones mas ortodoxas no son otra cosa que ondas.

El análisis muestra que a veces las fases son constantes (ondas que no se propagan), en otros casos se observan cambios graduales de fase, indicando la propagación de la onda.

Segun la escala de su período, las ondas se comportan en forma diferente, por lo cual reciben distintas denominaciones y son estudiadas por separado: Ondas Gravitatorias, Mareas y Ondas Planetarias.

En este trabajo examinaremos los dos primeros tipos de ondas. Las Ondas Planetarias se deben a efectos planetarios de circulación. Aparte de los gobernados por la radiación solar directa, corresponden a las Ondas de Rossby y no serán analizadas en detalle.

Ondas Gravitatorias

Las ondas gravitatorias, inicialmente denominadas Perturbaciones Ionosféricas Viajeras (TID's), son fácilmente identificables en todas las regiones ionosféricas pues presentan fuertes amplitudes durante perturbaciones solares y geomagnéticas. Vienen generalmente desde los polos hacia el ecuador, su período medible oscila entre los 10 minutos y las 3 horas y su velocidad de avance entre 300 y 700 m/seg.

Estas observaciones, anteriores al desarrollo de la teoría de perturbaciones en las ecuaciones fluidodinámicas, son aplicadas por Hines (1960) a un modelo simple de perturbaciones, para determinar la posibilidad de existencia teórica de ondas, cuyas frecuencias

resultan inferiores a una frecuencia de corte gravitatoria, por encima de la cual existe una frecuencia de corte acústica. Más allá solo es posible el desarrollo y propagación de ondas acústicas.

La ecuación de dispersión que se obtiene para un modelo de atmósfera simple es:

$$\omega^4 - \omega^2 c^2 (K_x^2 + K_z^2 - K_z'^2) + g^2 (\gamma - 1) K_x^2 + \omega^2 \gamma g K_z'^2 = 0 \quad (1)$$

$$\omega^2 K_z'^2 (2c^2 K_z'^2 + \gamma g) = 0$$

donde:

- ω = frecuencia de la onda
- c = velocidad del sonido
- g = aceleración gravitatoria
- K_x = número de onda horizontal
- K_z' = parte real del nro. de onda vertical
- $-K_z''$ = parte imaginaria del nro. de onda vertical
- γ = cociente de calores específicos (C_p/C_v)

Aquí consideramos una onda que se propaga en el plano (x, z) , atenuándose en la dirección vertical ($K'' = 0$), con frecuencia no nula y longitud de onda horizontal no nula, entonces:

$$K_z'^2 = \gamma g / 2c^2 = -1/2H \quad (2)$$

$H = kT/mg =$ altura de escala

y la ecuación de dispersión se transforma en:

$$[(1 - \omega_b^2/\omega^2) \cdot K_x^2] / (1 - \omega_b^2/\omega^2) + K_z'^2 / (1 - \omega_b^2/\omega^2) = K_0^2 = \omega^2/c^2 \quad (3)$$

$\omega_a = \gamma g / 2c =$ frecuencia de corte acústica

$\omega_b = (\gamma - 1)^{1/2} g / c =$ frecuencia de corte gravitatoria (Brunt-Vaisälä)

Por inspección de la ecuación (3) se observa que existen tres regiones de solución dependiendo del valor de la frecuencia:

- a) $\omega > \omega_a$
La ecuación de dispersión es elíptica, correspondiendo a ondas acústicas
- b) $\omega_b < \omega < \omega_a$
No existe solución real de la ecuación de dispersión, la llamaremos zona prohibida
- c) $0 < \omega < \omega_b < \omega_a$
La ecuación de dispersión es hiperbólica, existe propagación en direcciones preferenciales, y debido a la forma de la superficie de dispersión, la fase y la energía viajan en direcciones ortogonales entre sí.

Esta última región corresponde a las ondas gravitatorias internas. Debe tenerse en cuenta que la teoría no indica cuantificación o discretización del espectro de frecuencias. Modelos más elaborados, que incorporan gradientes verticales de temperatura, predicen una discretización de las frecuencias, y también la aparición de niveles críticos de resonancia por la inclusión de vientos de fondo; con lo cual se explica la propagación cuasi guiada y con baja atenuación a largas distancias. Por otro lado este modelo no modifica la estructura general discutida anteriormente.

La producción de estas ondas requiere la existencia de fuentes impulsivas de energía (auroras, tormentas magnéticas, etc). Sin embargo, en ausencia de este tipo de fuentes, también se observan ondas, si bien con menor intensidad.

En realidad se observan casi continuamente características que no tienen explicación a menos que se acepte la existencia de interacción e intercambio de energía entre ellas y el sistema de mareas, interacción que no puede ser planteada adecuadamente con un modelo teórico como el utilizado actualmente, a menos de términos empíricos.

Actualmente se está trabajando en este tema. Aparentemente la interacción se efectuaría a través de efectos no lineales con las mareas atmosféricas.

Mareas

Al igual que las ondas gravitatorias, su observación fue anterior a la existencia de modelos que explicaran adecuadamente su desarrollo. Estos últimos se demoraron por la falta de información referida a las características, magnitud, intensidad y ubicación de las fuentes térmicas principales.

La existencia de oscilaciones de presión con períodos 8, 12 y 24 hs, con gran estabilidad de frecuencia y de fase, y con fuertes variaciones latitudinales, son conocidas desde hace más de dos siglos a partir de registros meteorológicos. Los estudios de estos fenómenos en la alta atmósfera comienzan en la década del '50, obteniéndose abundante información que confirma la existencia de mareas en esa región.

Utilizando la amplitud y fase de los diferentes modos identificados, se realizaron varios intentos frustrados por desarrollar un modelo teórico aceptable, hasta que finalmente se obtuvo uno relativamente sencillo, (para los detalles ver Chapman y Lindzen, 1970).

Uno de los hechos fundamentales revelados por el modelo teórico es que los efectos observados a más de 200 Km de altura son consecuencia directa de la absorción de la radiación solar por el Ozono y el vapor de agua existentes a los 40 Km de altura aproximadamente.

El modelo resuelve el sistema de ecuaciones fluidodinámicas a través del conjunto de autofunciones de Hough, donde las variables son la latitud y la altura.

Para cada frecuencia, esta teoría predice la existencia simultánea de una variedad de modos independientes (autofunciones) tanto simétricos como antisimétricos respecto del ecuador.

A partir de la mezcla medida experimentalmente se han hecho grandes esfuerzos para separar los componentes.

Por los magros resultados se piensa que en realidad los modos no son independientes entre sí, lo cual en buen romance significa que el modelo teórico, para obtener independencia de variables y soluciones independientes, debió linealizar las ecuaciones de partida más allá de lo aceptable.

Esta es otra razón para postular un modelo más amplio, no lineal y del cual se desprendan naturalmente las relaciones no lineales entre O.G. y Mareas, y entre los modos de mareas.

En realidad, la clasificación de ondas atmosféricas en los tres tipos mencionados, por conveniente que resultara desde un punto de vista metodológico, se ha convertido en una rémora que dificulta la visión integrada del fenómeno. Como suele ocurrir, lo que es simplemente útil u oportuno para describir los hechos, se transforma luego en doctrina y es confundido con los hechos mismos. Por eso se han acumulado varios metros cúbicos de publicaciones que intentan justificar teóricamente las características diferenciales de las ondas gravitatorias, planetarias y las mareas, sin siquiera mencionar la posible interacción entre ellas.

MODELO GENERALIZADO

En este punto transcribiré las ecuaciones que permiten explicar, por ahora cualitativamente, las características de todo el espectro, a partir de una estructura fluidodinámica clásica.

Considerando a la atmósfera como un fluido de Navier-Stokes, que por encima de los 60 Km de altura constituye un plasma débil, generado por radiación solar y en parte gobernado por el campo geomagnético, el sistema de ecuaciones de continuidad, momento, energía termodinámica y energía dinámica son:

$$\partial \rho / \partial t + \text{div}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (4)$$

$$D\vec{U}/Dt + 2(\vec{\Omega} \times \vec{U}) = -(1/\rho) \text{Grad}(P) + \vec{g} + \vec{F} \quad (5)$$

$$Q = C_v (DT/Dt) + P (D(1/\rho)/Dt) \quad (6)$$

$$-\text{div}(P \vec{U})/\rho = D/Dt (U^2/2) - \vec{g} \cdot \vec{U} - \vec{F} \cdot \vec{U} + (P/\rho^2) D\rho/Dt \quad (7)$$

donde

- ρ = densidad
- \vec{U} = velocidad neutra del gas
- $\vec{\Omega}$ = velocidad angular planetaria
- P = presión
- \vec{g} = aceleración gravitatoria
- \vec{F} = fuerzas externas
- Q = calor suministrado al sistema
- C_v = calor específico a volumen constante
- T = temperatura

$$D/Dt = \partial/\partial t + (U \cdot \text{div}.)$$

debe agregarse como ecuación constitutiva la ec. de los gases ideales

$$P = \rho R T \quad (8)$$

Las ecuaciones anteriores describen adecuadamente el modelo fluidodinámico apto para analizar la alta atmósfera.

Las condiciones que deben imponerse a las mismas y al desarrollo de los diferentes términos son:

- 1) Deben resolverse en coord. esféricas. Teniendo en cuenta que la coordenada radial especifica la altura por encima de la superficie terrestre (hasta 400 Km), los términos de la forma r/a (donde a =radio terrestre) son despreciables.

- 2) El término $(\vec{\omega} \times \vec{U})$ de la ecuación (5) tiene en cuenta la aceleración de Coriolis debida a la rotación terrestre.
- 3) El término \vec{F} de la ecuación (5) tiene en cuenta todos los fenómenos de aceleraciones no debidas a Coriolis, gravitatorio o presión. En el caso mas general:

$F =$ Fuerza de frenamiento iónico + Divergencia del flujo de momento por difusión molecular y turbulenta + Fuerza de Lorentz por conductividad Hall + Fuente externa de momentos.

- 4) El término F de la ecuación (7) debe incluir los términos de divergencia de flujo de calor por difusión molecular y turbulenta + enfriamiento radiativo.

Las ecuaciones (4)-(8) contienen los elementos sustanciales de la física de los fenómenos atmosféricos. Es posible examinar la importancia relativa de cada uno de los agentes involucrados y cambiando el peso de uno a otro puede entenderse el fundamento y las limitaciones de la clasificación clásica de las ondas, basada exclusivamente en la escala de tiempos.

Los intentos de solución ensayados hasta la fecha, con modelos sencillos de los términos de \vec{F} en las ecuaciones (5) y (7) para los diferentes fenómenos, han sido llevados a cabo en forma numérica, y solo luego de efectuar las aproximaciones lineales a primer orden del sistema (considerando que las ondas son perturbaciones pequeñas de las variables estacionarias). No ha sido posible avanzar más allá de una aproximación lineal debido a la complejidad del sistema.

Aun así, con soluciones perturbativas y limitadas, se puede obtener un panorama cualitativo aceptable de cuales son los modos de onda que pueden desarrollarse en la atmósfera.

Para la discusión recurrimos a la Figura 1 donde se muestra, en forma paramétrica, las posibles soluciones oscilatorias, de acuerdo con los resultados de las ecuaciones de dispersión para cada rango de períodos (en este caso con valores numéricos correspondientes a la baja termosfera, 90-100km).

En esta Figura tridimensional se grafica la superficie de dispersión en función del período (T), la longitud de onda vertical (λ_z) y la longitud de onda horizontal (λ_H).

Como se observa en la Figura, la región acústica esta separada de la gravitatoria, no existiendo superposición entre ambas. La región de separación (Zona Prohibida) en realidad es muy pequeña, del orden del minuto, según la altura, pero ha sido ampliada en la Figura para mayor claridad.

Esta zona es la comprendida entre T_a (período de corte acústico) y T_b (período de Brunt-Vaisala).

Las líneas gruesas de trazos que definen un par de planos normales a T (H-H y C-C) indican aproximadamente el límite del rango de validez de la aproximación hidrostática (desde H-H hacia períodos superiores) y el límite del rango de validez de considerar despreciable la fuerza de Coriolis (desde C-C hacia períodos menores).

Debe hacerse notar que en la Figura la coordenada de períodos (T) ha sido calibrada en dos escalas diferentes, para simplificar la misma, ya que el rango acústico abarca solo hasta unos pocos minutos, mientras que el rango gravitatorio ocupa desde minutos hasta 24 horas.

Las regiones delimitadas por la superficie de dispersión y el eje de períodos es la región permitida, dentro de la cual se encuentran las ondas que se propagan en la alta atmósfera. Fuera de estas regiones se encuentran las ondas evanescentes, estacionarias y de superficie.

Un análisis más detallado de la Figura, según sus diferentes regiones indica:

Región Acústica: Este espacio está limitado por la superficie de dispersión correspondiente a la velocidad del sonido en el medio. La relación λ_2 / λ_H pasa de ser 1 para períodos muy pequeños, a $\lambda_2 / \lambda_H \ll 1$ para períodos cercanos al período de corte acústico, generando la conocida expresión que asigna a las ondas acústicas elipsoides en el plano λ_2, λ_H . En el límite de corte acústico el elipsoide colapsa, generando prácticamente una línea horizontal ($\lambda_2 \approx 0$) indicando que se ha alcanzado la frecuencia de oscilación propia de la atmósfera y las ondas no se propagan en el espacio.

La superficie de dispersión es cerrada y no presenta singularidades en el espacio λ, T , excepto en el límite de corte acústico.

Región Prohibida: Esta región está limitada por los valores de períodos de corte acústico (T_a) y de oscilación boyante (T_b). En esta región no existe ecuación de dispersión con soluciones reales, indicando que de existir algún tipo de onda con período en este rango será evanescente. Debido a que T_a y T_b varían con la altura en forma apreciable, puede ocurrir que ondas que se propaguen verticalmente en el rango gravitatorio en la atmósfera media, alcancen una altura en la que su período sea el de Brunt a otra altura. Estas ondas transferirán su energía al medio y desaparecerán, al ser absorbidas por resonancia.

Región Gravitatoria: En esta región se han graficado solamente las relaciones de dispersión para unos pocos casos de períodos entre 7 minutos y 24 horas, tomándose como referencia al período de Brunt de 6 minutos y una velocidad sónica de aproximadamente 600-800 m/seg. La superficie de dispersión es un hiperboloide, y las secciones con el plano (λ, T) son parábolas con vértice en $T = T_b$.

La primera característica que se observa es que son superficies abiertas en la dirección vertical, y ya que la velocidad de propagación de fase es normal a la superficie de dispersión, su fase avanza en general hacia abajo o a lo sumo casi horizontalmente.

Se observa asimismo que a mayor período, la relación λ_2 / λ_H se hace cada vez mayor, transformándose en el caso de muy altos períodos en fenómenos cuasi bidimensionales (plano horizontal).

Otra característica importante es su carácter evanescente en la dirección vertical al llegar al límite de longitud de onda horizontal. La abrupta subida de las curvas de dispersión es debida a que para valores de λ_H para los cuales ocurre la subida, λ_2 se hace infinita (ondas de superficie que no se propagan en la dirección vertical)

En esta Figura no se ha tenido en cuenta la discretización de modos a partir de las 8 horas de período, debido a que esta discretización proviene de la estructura del modelo clásico de Lindzen y a la forma empírica de la función fuente externa (Q).

Analizaremos ahora en base a los datos aportados por la Fig. las características de las ondas que es posible observar.

En el rango de períodos de unos pocos minutos (10-100 minutos), la ecuación de dispersión indica que es posible observar en ese rango ondas con propagación desde la horizontal hasta fuertemente oblicuas, y que la relación de longitudes de onda va desde 1:1 para el período más corto hasta 1:100 para el período más largo.

En la práctica esto significa que es posible observar ondas con longitud de onda horizontal de hasta 1000 Km, y vertical de 10 Km en propagación cuasi horizontal, pero solo ondas de longitud de onda vertical del mismo orden que la horizontal, con valores entre 10 y 100 Km, en propagación fuertemente oblicua.

En el rango de períodos superiores, se observa que la relación es $\lambda_H / \lambda_V \gg 1$, los fenómenos son cuasi horizontales, con longitudes de onda verticales pequeñas comparadas con las horizontales, y que el pasaje a evanescente es muy rápido.

CONCLUSIONES

Por lo expuesto, se hace evidente que el conjunto de ondas observables en la alta atmósfera puede ser analizado en forma integral. Más importante, cualquiera sea el rango de frecuencias estudiado, los resultados representan solo una parte de un fenómeno más complejo, fuertemente relacionado con lo que ocurre en otros rangos.

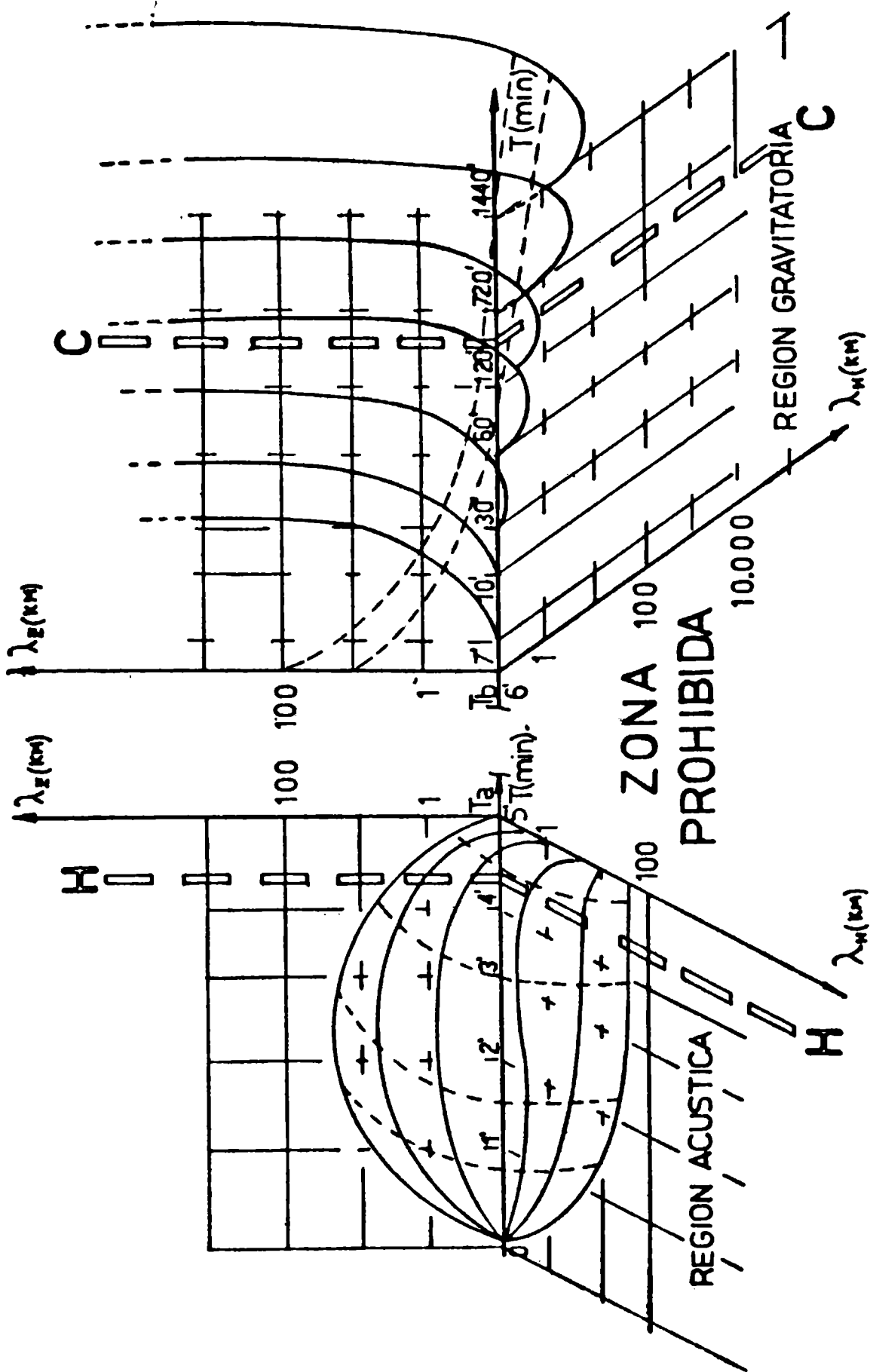
Este hecho es de gran utilidad, tanto para los estudios experimentales como para los teóricos y modelísticos, pues provee al investigador de una guía importante para proponer hipótesis de trabajo y para la interpretación de resultados.

Cuando se recurra a modelos simplificados para resolver alguno de los casos particulares, en realidad debe tenerse presente que se está restringiendo la validez del formalismo presentado con una serie (grande o pequeña) de relaciones subsidiarias que acoplan y/o simplifican las ecuaciones.

La determinación de las ecuaciones subsidiarias es, a mi juicio, la decisión más importante del estudio: una mala elección puede conducirnos a dudar de la teoría de fondo, cuando en realidad el problema es otro.

BIBLIOGRAFIA

- KATO, S. "Dynamics of the Upper Atmosphere". D.Reidel Publ. 1980
 CHAPMAN, S. y LINDZEN, R.S. "Atmospheric Tides" D.Reidel Publ. 1970
 NECCO, G. "Curso de Cinemática y Dinámica de la Atmósfera" EUDEBA, 1980



CARACTERISTICAS TERMODINAMICAS Y AEROLOGICAS
FUNDAMENTALES EN UNA SITUACION DE ZONDA INTENSO

Federico A. Norte

Instituto Argentino de Nivología y Glaciología
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

Mendoza, República Argentina

RESUMEN

El objetivo del trabajo es diagnosticar en forma espacio-temporal las condiciones sinópticas, aerológicas y termodinámicas de una situación de viento Zonda intenso.

A este efecto se analizó la situación sinoptica y de mesoescala del Zonda ocurrido el 5 de julio de 1983.

Se concluye que el momento de iniciación del Zonda así analizado se desplaza en tiempo y espacio en forma similar que el frente frío que lo sucede. La finalización del evento está más definida en las estaciones del llano y el efecto higr_o térmico no se extiende más allá de los 50 km hacia el este de la ciudad de Mendoza.

Este caso de viento Zonda se caracterizó por: Presencia simultánea de ventisca en Cristo Redentor y nubosidad lenticular observada desde el llano.

A barlovento de la cordillera: enfriamiento en la tropósfera alta, valores de cortante y de componente zonal del viento superiores al promedio y hodógrafa inversa a su forma media.

A sotavento de la cordillera: calentamiento generalizado en casi toda la tropósfera y presencia de Zonda en capas cercanas a la superficie. Presión atmosférica inferior en 15 mb al valor medio mensual en El Plumerillo y viento norte fuerte en San Luis, en superficie 48 horas antes de la aparición del Zonda en Mendoza.

ABSTRACT

This paper presents a spatial-temporal diagnosis of the prevalent synoptic, aerological and thermodynamic conditions during an intense "Zonda" event. With this purpose there were analysed the synoptic and mesoscale situation of the Zonda event occurred on July 5th 1983. We come to the conclusion that the starting point of the Zonda event so analyzed moves in time and space in a way similar to that of the cold front succeeding it. The end of the event is clearly observed in the station located in the plains; the higr_othermic effect disappears at about 50 km eastward from Mendoza city.

The Zonda was characterized by:

- The simultaneous presence of blizzard at Cristo Redentor station and lenticular clouds observed in the plains.
- Windward of the Andes: cooling of the high troposphere; wind shear and zonal wind component above the average and an inverse profile of the hodographs in respect to the monthly mean form.
- Leeward of the cordillera: generalized warming in almost all the troposphere and presence of Zonda in layers near the surface. Atmospheric pressure 15 mb below the mean monthly value at the Plumerillo; strong northern winds in San Luis 48 hs before the Zonda appears in Mendoza city.

1. INTRODUCCION

El objetivo principal del trabajo es estudiar las condiciones sinópticas, aerológicas y termodinámicas de una situación de Zonda intenso ocurrida el 5 de julio de 1983 y que alcanzó la ciudad de Mendoza.

El objetivo se alcanza mediante:

- El establecimiento de las características del evento mediante transectas longitudinales y latitudinales usando los datos de las estaciones meteorológicas disponibles en el área de estudio.
- El análisis del comportamiento termodinámico que precede al evento, de las columnas de aire situadas a barlovento y sotavento de la cordillera de Los Andes.
- La caracterización de la distribución vertical del viento a barlovento de la montaña antes de la aparición del Zonda en el llano mendocino.

El Zonda es un fenómeno de mesoescala de características singulares, no sólo por su notable variabilidad espacial y temporal y la complejidad en la marcha de parámetros tales como temperatura, humedad, presión, nubosidad, precipitación, dirección e intensidad del viento, sino también por los diferentes efectos que ocasiona.

En la alta montaña acelera la fusión y evaporación de la nieve, modifica su acumulación, favorece las avalanchas e influye en el ciclo hidrológico.

En zonas pobladas provoca voladuras de techos, caídas de cables de alta tensión y de árboles, interrumpe el servicio telefónico y eléctrico y favorece la ocurrencia de incendios.

Tanto en las ocasiones en que el Zonda sopla en el llano alcanzando las ciudades, como en aquellas en que sólo está presente en altura, (soplado solamente en la atmósfera libre y en algunas estaciones de montaña), se registran alteraciones en el estado síquico de la población (depresión, angustia, ansiedad e irritabi-

lidad) y se incrementan notablemente los accidentes de tránsito, los actos violentos y las muertes por infartos cardíacos.

En Argentina son pocos los antecedentes de investigaciones del fenómeno, Georgii W. (1952) y (1954) describió la importancia de la doble onda barométrica diaria que influye en el comienzo del Zonda y realizó posteriormente un análisis detallado del fenómeno con los medios disponibles de la época.

Rolón de los Santos y Afonso (1977) analizaron casos de Zonda ocurridos en San Juan y Mendoza durante el período 1967-1976.

Lichtenstein, E. (1980) tuvo en cuenta el efecto Zonda para dar el grado de independencia existente entre la depresión del noroeste argentino y el flujo del oeste. Norte, F. (1978), (1982) y (1980) lo menciona como fenómeno asociado a tormentas de granizo o nieve.

2. DATOS

Se utilizaron datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) tales como cartas sinópticas de superficie y altura, radiosondeos emagramas y secuencias correspondientes al período comprendido entre el 1 y 8 de julio de 1983.

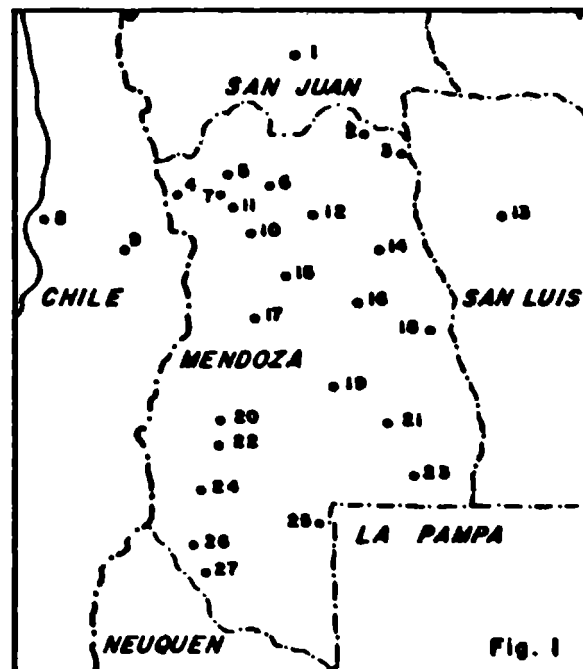
Igualmente se trabajó con datos de temperatura y humedad de estaciones meteorológicas de cordillera, precordillera y llano de la red regional perteneciente al Grupo de Información Meteorológica (GIM) del CRICYT (Centro Regional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas) de Mendoza (Fig.1) para ese mismo período.

3. METODOLOGIA Y DESARROLLO

3.1. Definición del Zonda

Se eligió la situación más notable ocurrida en la región en el año 1983, que en esta oportunidad se registró en la primera semana de julio de ese año.

En esa ocasión el Zonda alcanzó las ciudades de San Juan y Mendoza, registrándose un secamiento y calentamiento notable, con



REFERENCIAS

1. San Juan (598 m.)	11. La Aguadita (2225 m.)
2. Encon (530 m.)	12. San Martín (653 m.)
3. El Retamo (525 m.)	13. San Luis (713 m.)
4. Cristo Redentor (3800 m.)	14. La Paz (505 m.)
5. Uspallata (1900 m.)	15. San Carlos (943 m.)
6. Mendoza	16. Nacuñan (572 m.)
a.El Plumerillo (703 m.)	17. El Yaucha (1403 m.)
b.Observatorio (828 m.)	18. La Horqueta (433 m.)
c.CRICYT (838 m.)	19. San Rafael (688 m.)
7. Potrerillos	20. El Sosneado (1550 m.)
a.Vallecitos (2250 m.)	21. General Alvear (450 m.)
b.Puesto Reynoso (1770 m.)	22. Malargue (1440 m.)
8. Quintero - Chile (80 m.)	23. Bardas Blancas (1450 m.)
9. Santiago - Chile (480 m.)	24. Cochicó (440 m.)
10. San José (1220 m.)	25. Agua Escondida (1550 m.)
	26. El Alambrado (1550 m.)
	27. Ranquil Norte (1500 m.)

ráfagas intensas (de hasta 80 km/h) en la capital mendocina determinando algunos de los efectos ya mencionados en 1, tales como caídas de árboles y alteraciones nerviosas en la población.

Para las estaciones carentes de medidores de viento, la aparición del zonda se definió en base a los parámetros temperatura y humedad.

Se estableció que si se registra simultáneamente un incremento de temperatura mayor o igual que 4°C en un término de 2 horas y una disminución mayor o igual que 25% en la humedad relativa en igual lapso, se está en presencia del Zonda. Se dice que hay "Zonda en altura", cuando el efecto de calentamiento y secamiento provocado por el Zonda está ausente en las estaciones del llano pero es evidente en estaciones de montaña o en niveles por encima de la superficie (según el radiosondeo de El Plumerillo). Se denomina "anillo de Zonda" (Brinkmann, W., 1973) al área que recibe las influencias del calentamiento y secamiento provocadas por el fenómeno.

3.2. Análisis de transectas

A fin de obtener un diagnóstico espacio-temporal del evento se analizaron datos de estaciones ubicadas casi latitudinalmente, siendo en sentido oeste a este las siguientes: Uspallata, Vallecitos, Puesto Reynoso, San José, CRICYT, El Plumerillo, San Martín y La Paz (Fig. 1).

ESTACION	FECHA	HORA	ΔT °C	ΔH %	VIENTO	
					Dirección (grados)	Intensidad (nudos)
USPALLATA	3/7/83	11.00	+ 3 en 3 h.	- 10	360	5
VALLECITOS	3/7/83	17.00	+ 8 en 2 h.	- 37 en 2 h.	290	12
REYNOSO	3/7/83	22.00	+ 6 en 2 h.	- 20 en 2 h.	SA	SA
SAN JOSE	4/7/83	8.30	+ 18 en 1 h.	- 60 en 2 h.	SD	SD
MENDOZA*	4/7/83	22.30	+ 14 en 1 h.	- 53 en 1 h.	SA	SA
SAN MARTIN	5/7/83	0.00	+ 3 en 1 h.	- 30 en 1 h.	SD	SD
LA PAZ**	5/7/83	---	---	---	SD	SD
* La estación Mendoza se refiere a CRICYT SD: Sin datos - SA: Sin anemógrafo						
** Temperatura máxima 18.9°C con humedad relativa: 40 % - Datos para el 5/7/83						
ESTACION	FECHA	HORA	ΔT °C	ΔH %	VIENTO	
					Dirección (grados)	Intensidad (nudos)
SAN JUAN	4/7/83	21.00	+ 19 en 2 h.	- 70 en 2 h.	360	10
MENDOZA*	4/7/83	23.00	+ 18 en 1 h.	- 75 en 1 h.	320	10
SAN JOSE	4/7/83	8.30	+ 18 en 1 h.	- 60 en 1 h.	SD	SD
EL YAUCHA	4/7/83	2.00	+ 17 en 1 h.	- 80 en 2 h.	330	14
EL SOSNEADO	3/7/83	18.00	+ 9 en 3 h.	- 38 en 3 h.	270	15
* La estación Mendoza se refiere al Observatorio Meteorológico SD: Sin datos						

TABLA 1: A. Transecta latitudinal (arriba) - B. Transecta longitudinal (abajo)

Igualmente, en sentido casi longitudinal se analizó lo ocurrido desde San Juan hasta el Sosneado (Fig. 1).

Se consideró solamente el comienzo del Zonda y no el final (Tabla 1 A y B) ya que aún no existe un criterio definitivo de cuando termina, sobre todo en zonas de precordillera y alta montaña.

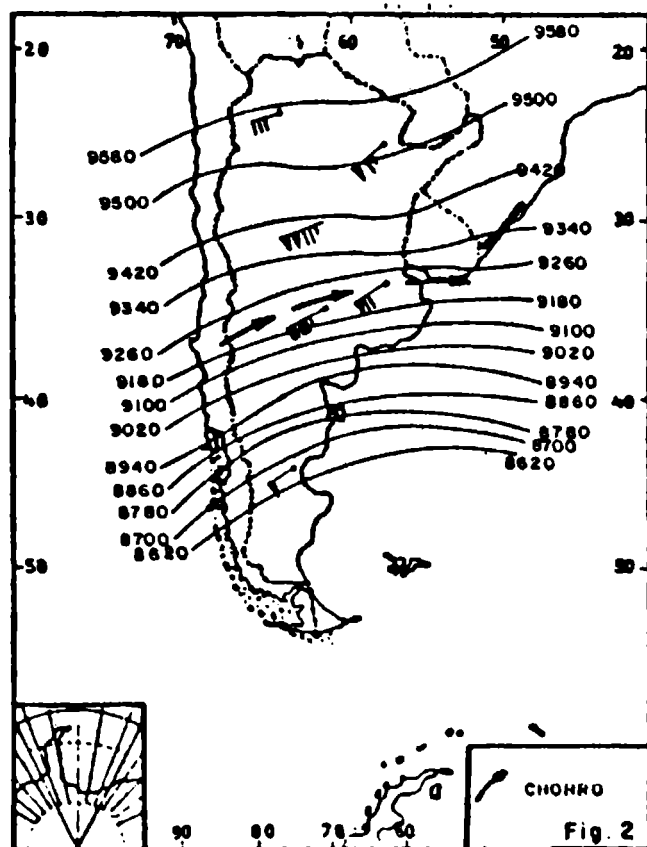
3.3. Análisis termodinámico y aerológico

Con los radiosondeos de Quintero (Chile) y El Plumerillo (Mendoza) se analizó el comportamiento de las columnas verticales de la atmósfera libre durante el período mencionado en 2 y se los comparó con los sondeos medios de julio de 1983. Con el radiosondeo de viento de Quintero se caracterizan las condiciones previas a la aparición del Zonda a sotavento de los Andes comparandolos también con los correspondientes valores medios.

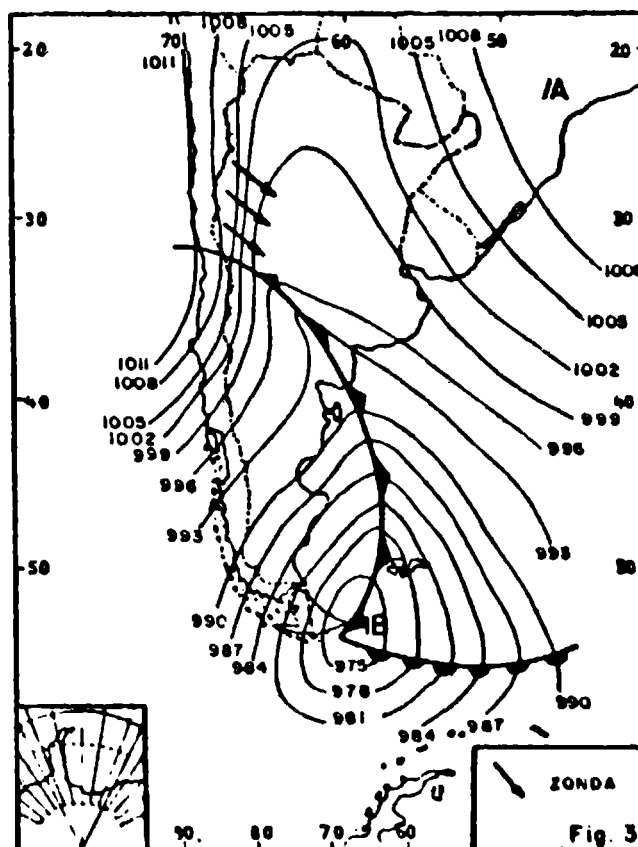
4. RESULTADOS

4.1. Aspectos sinópticos

El período de condiciones de Zonda se inicia el 30 de junio y culmina el 6 de julio. Durante esta semana hay dos oportunidades en que la situación de Zonda es casi generalizada en una extensa área comprendida entre las provincias de la Rioja y Neuquén, correspondiendo al 2 y al 5 de julio de 1983.



Carta del nivel de 300 mb del 4 de julio de 1983, 12 HMG (hora del meridiano de Greenwich).

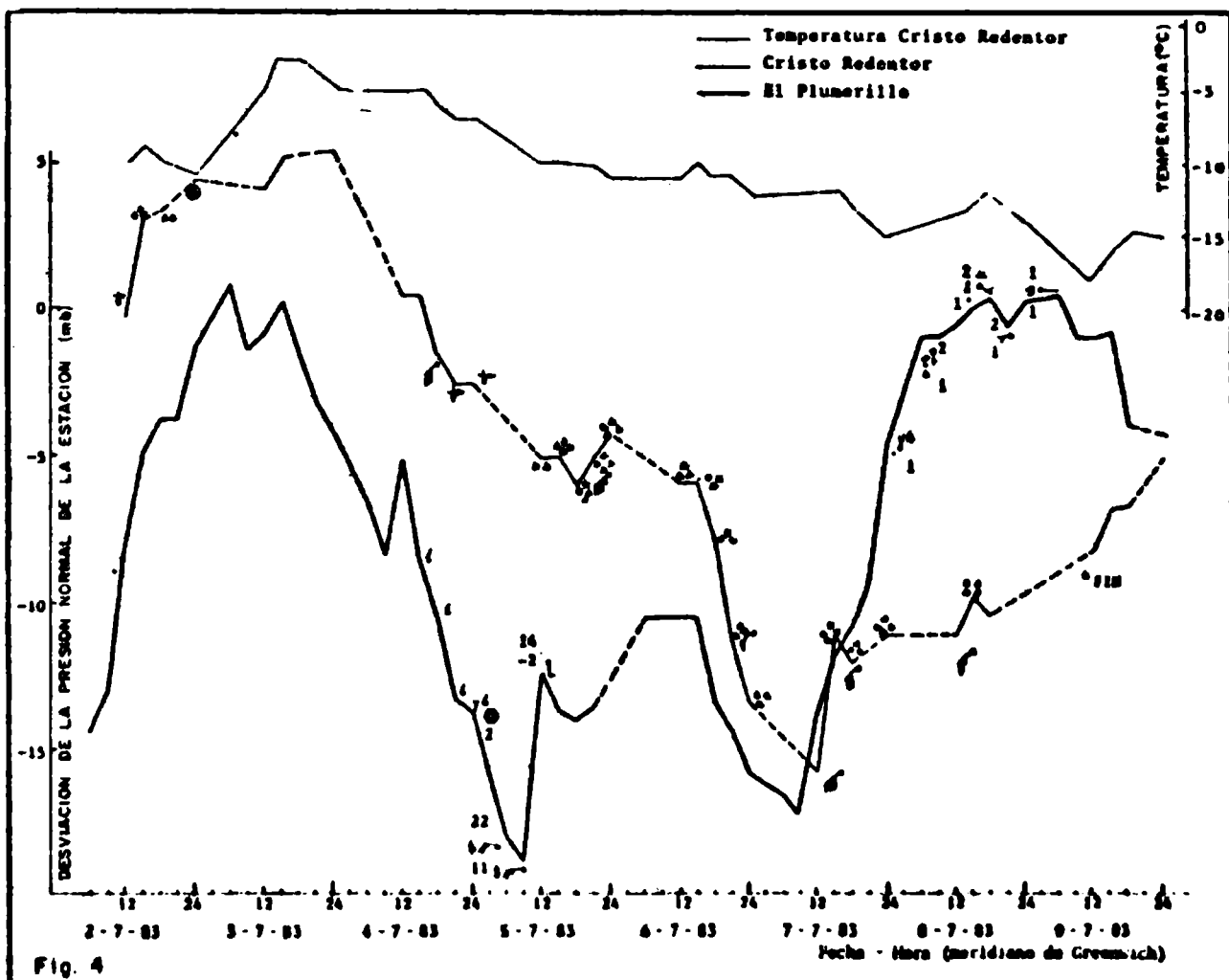


Carta de superficie del 5 de julio de 1983, 9 HMG.

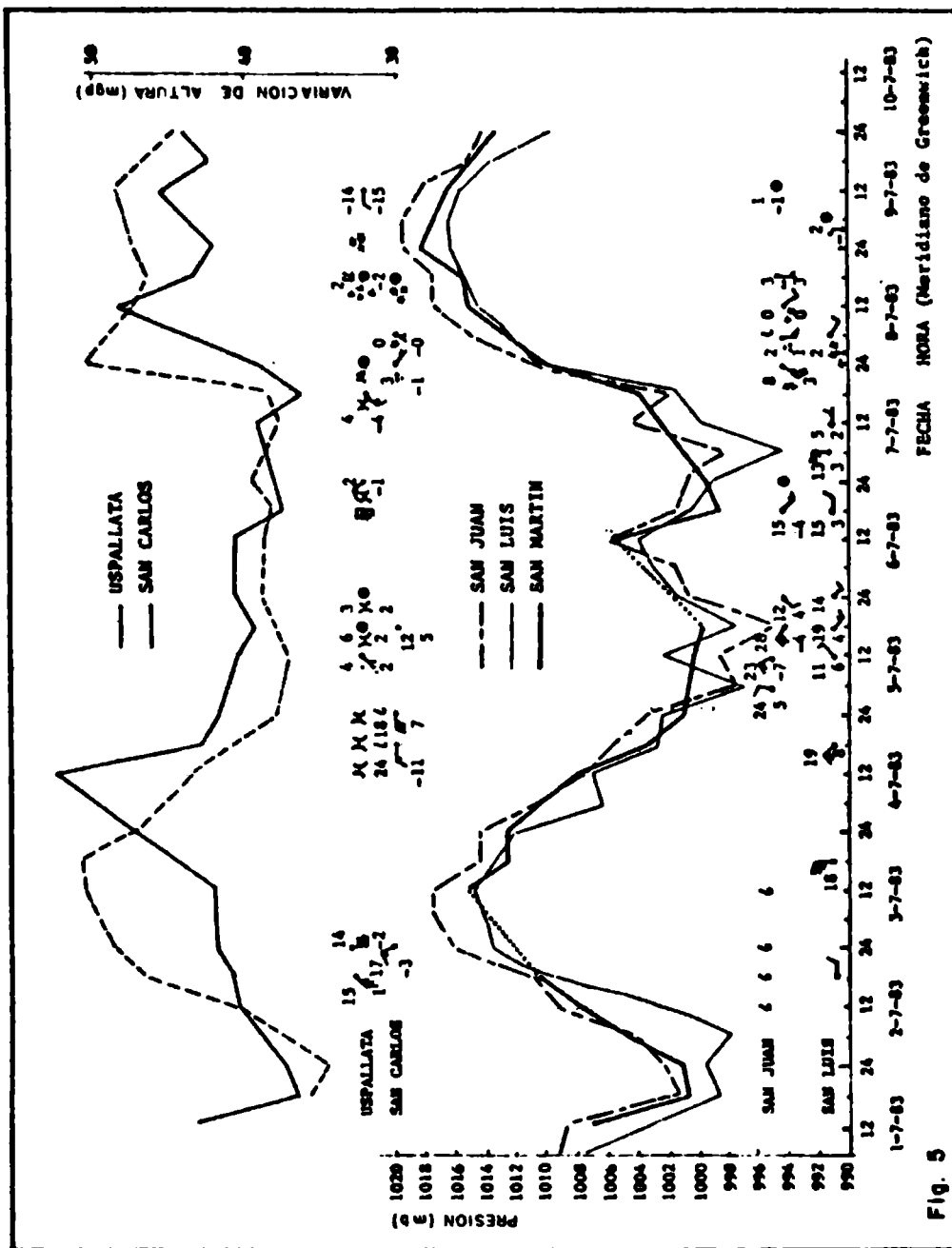
En esta última fecha, por la madrugada, recién aparece el fenómeno en la ciudad de Mendoza, presentando un incremento de temperatura de casi 14°C en menos de 1 hora. Al día siguiente se produce la situación de mesoescala conocida como "pausa" (Norte, F. 1984a) y la posterior advección de aire polar marítimo con nevadas el día 8 en las ciudades de San Juan, Jachal, San Luis, San Rafael y Gran Mendoza. La carta de 300 mb (Fig. 2) indica la zona de corriente de chorro al sur de Mendoza y la carta de superficie (Fig. 3) muestra la posición del frente frío cuando el Zonda ya alcanzó la ciudad de Mendoza.

En la Fig. 4 se indican algunos fenómenos significativos considerados relevantes tales como nubosidad, tiempo presente, temperatura del aire y punto de rocío, dirección e intensidad del viento. Se observó que el descenso de la presión en Cristo Redentor comenzó antes de haberse manifestado el Zonda en El Plumerillo. En otras estaciones tales como San Carlos y Uspallata no ocurrió lo mismo, como se observa en la Fig. 5.

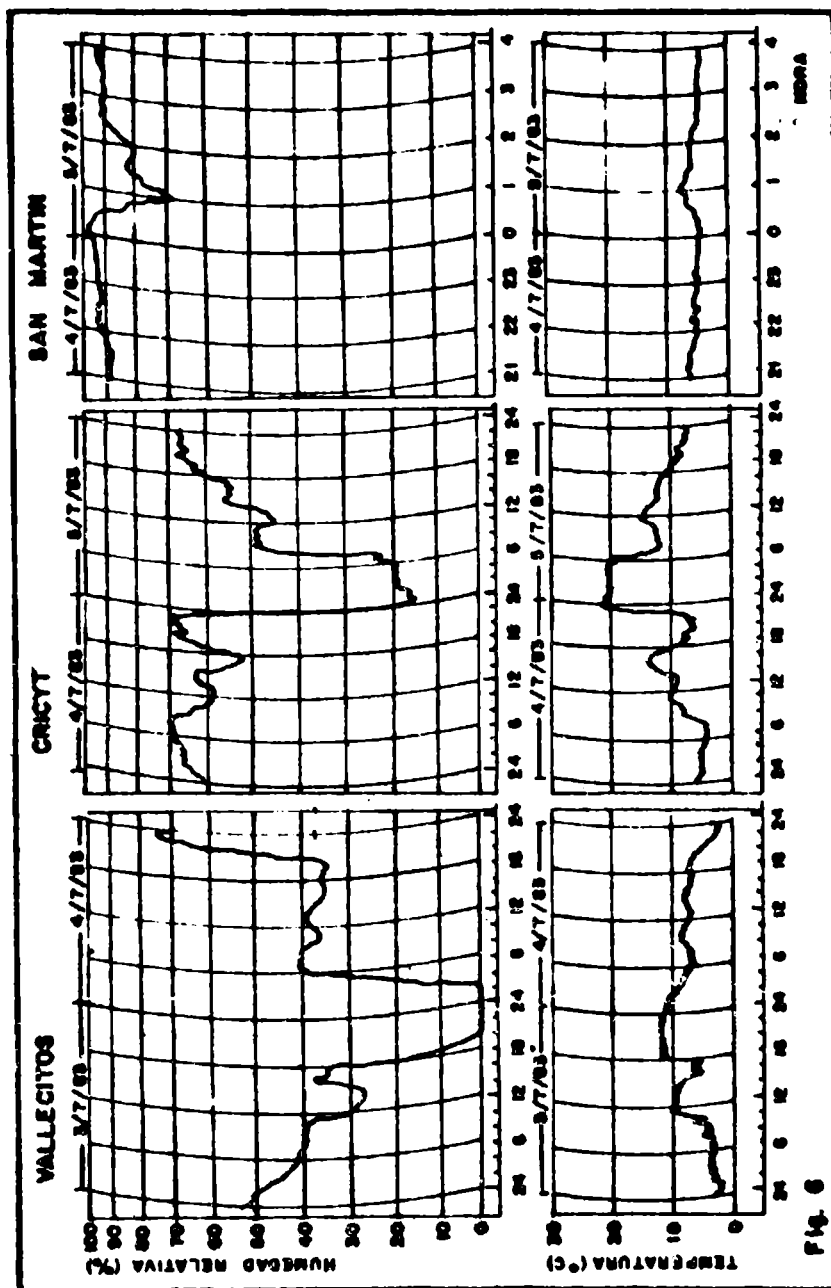
San Luis es significativa al presentar características parecidas a las demás pero sin el efecto higrótérmico.



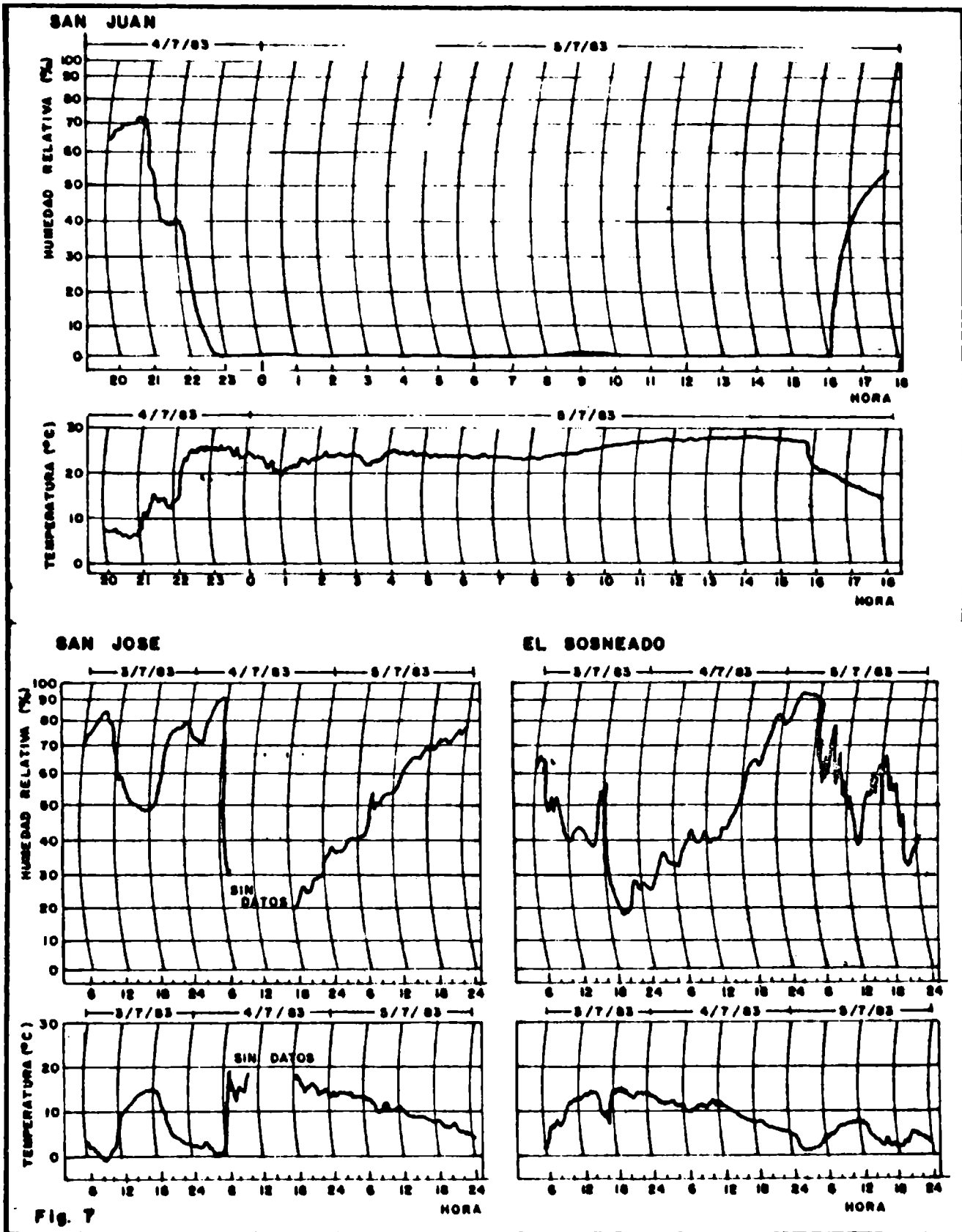
Desviación de la presión con respecto a la media de julio y fenómenos meteorológicos significativos.



Variación de la presión atmosférica a las 6, 12, 18 y 24 HMC y fenómenos meteorológicos significativos.



Termohigrograma para estaciones de la transecta latitudinal.
 (Vallecitos - CRICYT: semanal; San Martín: diario).



Termohigrograma para estaciones de la transecta longitudinal.
(San Juan: diario; San José - El Sosneado: semanal).

4.2. Análisis de transectas

Según el criterio de calentamiento y secamiento de 3.1., se indica en Tabla 1 A el momento de iniciación del Zonda de oeste a este (transecta latitudinal). Se observa que el efecto Zonda es débil o nulo en los extremos de la misma (ver Us

pallata y San Martín). En La Paz, 200 km al este de la precordillera, el efecto Zonda está ausente.

En la Tabla 1 B, de norte a sur se identifica el comienzo del Zonda con idéntico criterio (transecta longitudinal) siendo progresiva su aparición desde el sur al norte.

Las Fig. 6 y 7 indican la evolución higrótérmica en algunas estaciones de las transectas latitudinales y longitudinales respectivamente.

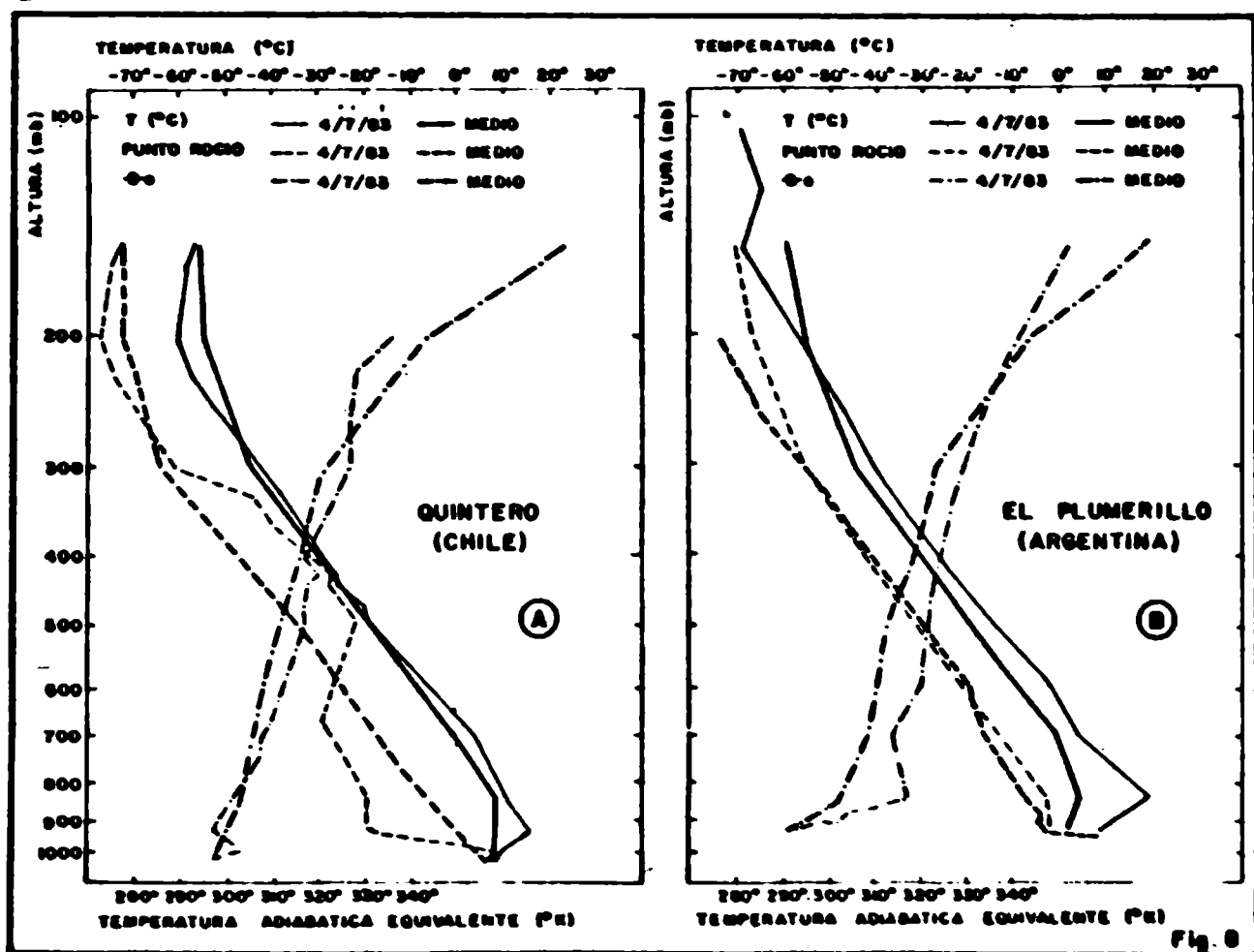
4.3. Radiosondeos a barlovento y sotavento de la cordillera

A barlovento, la Fig. 8 A, muestra lo siguiente:

- Una capa estable más pequeña que la del sondeo medio.
- Una inversión de temperatura muy marcada.
- De superficie a 300 mb, tropósfera más cálida que el promedio y aire frío en capas altas.

A sotavento la Fig. 8 B, muestra lo siguiente:

- Una capa estable de aire húmedo al ras del suelo.



Radiosondeo del 4 de julio de 1983 y medio de julio de 1983, 12 HNC.

-Por encima de una intensa inversión adyacente al suelo presencia del Zonda ("Zonda en altura") con su máximo en 850 mb.

-Una capa inestable más espesa que la de barlovento y en niveles más altos.

-El aire en general es más cálido que el promedio y que a barlovento (efecto de subsidencia).

La Fig. 8 A y B sintetiza las condiciones previas al fenómeno. Si bien no se ilustra en este trabajo se puede mencionar que a las 12 HMG del 5 de julio las condiciones a barlovento varían bruscamente y se observa: a) Desaparición de la inversión. b) Capa de aire húmedo más frío muy extensa. c) Gradientes de θ_e más inestables.

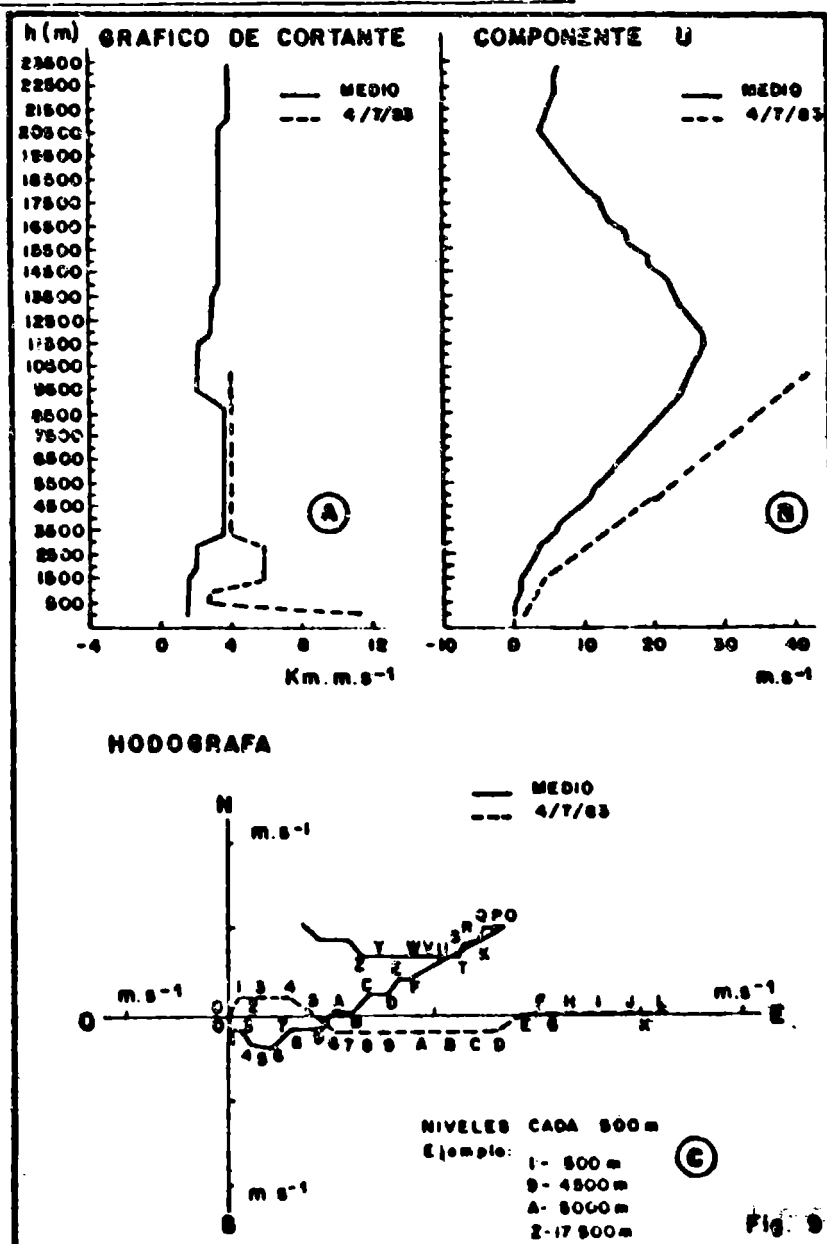
En cambio en El Plumerillo, ese mismo día a la misma hora las condiciones son similares a las del día anterior.

4.4. Distribución vertical del viento a barlovento de cordillera

4.4.1. Análisis de la cortante del viento: Tomando los valores de cortante máxima del viento en los días previos a la tormenta de Zonda en la ciudad de Mendoza, correspondientes al sondeo diario de 12 HMG de Quintero-Chile se observa una evolución hacia valores más elevados (evolución creciente) con un mínimo relativo el día 6, que corresponde a la llamada "pausa" (Norste, F., 1984a) volviendo a elevarse con el pasaje frontal.

Existen también máximos relativos de cortante que se hallan entre 3000 y 6000 m snm los días previos al evento, alcanzando una altura mínima el día inmediato anterior (4 de julio) situándose entre 1500 y 3500 m. snm (Fig.9A).

4.4.2. Análisis de las hodó-



Distribución vertical del viento a barlovento de los Andes del día 4 de julio y media de julio de 1983 a las 12 HMG, Quintero-Chile.

grafas del viento Durante los días previos al evento en la ciudad de Mendoza, las hodógrafas de Quintero a las 12 HMG presentan formas parecidas a la media mensual (Fig. 9 C).

La excepción es el día 4 a las 12 HMG cuando la forma se invierte a la media mensual insinuándose la parte delantera de una vaguada. Al día siguiente vuelve a adquirir la forma media insinuándose la parte delantera de una cuña.

4.4.3. Comparación de los valores medios de julio: Los valores de cortante superan al promedio el día previo al evento (Fig. 9 A) siendo más significativa esta diferencia en capas bajas cercanas al mar.

La componente zonal del viento (Fig. 9 B) es también superior al promedio en todos los niveles, acentuándose cerca de los 11.000 m snm indicando la cercanía del chorro.

Finalmente, la hodógrafa difiere de la forma media, solamente el día previo al evento.

4.5. Distribución vertical de θ_e

Se realiza un corte vertical de θ_e con los datos de superficie de Cristo Redentor y Uspallata y con los radiosondeos de Quintero y El Plumerillo. El aumento de los valores en la columna correspondiente al valle de Uspallata da idea de la "cascada" de aire proveniente del Pacífico pero la carencia de un radiosondeo en esa localidad disminuye la confiabilidad del corte (Fig. 10).

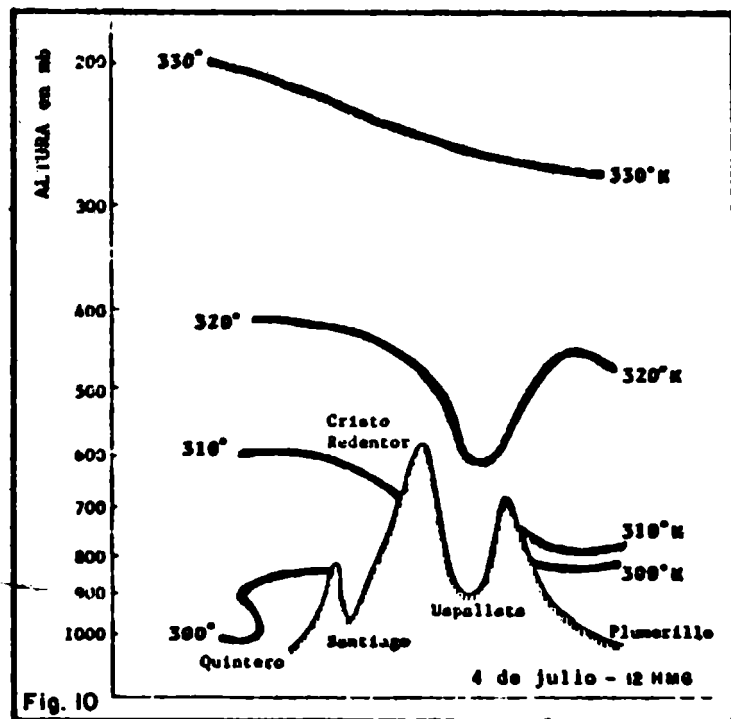


Fig. 10

Corte vertical de temperatura potencial equivalente. Barlovento y Sotavento de los Andes

5. CONCLUSIONES

5.1. Referentes a límites temporales y espaciales

De acuerdo al análisis de transectas, el comienzo del Zonda se asemeja al desplazamiento del frente frío, es decir comienza primero en estaciones del sur y del oeste y se desplaza hacia el norte y el este con el transcurso del tiempo (Tabla 1 A y B).

Asimismo su duración está más definida, pudiendo establecerse límites claros de finalización en las estaciones del llano (casos CRICYT, San Juan, Fig. 6 y 7).

Desde el punto de vista espacial, el anillo del Zonda higrotérmico no superó, según el análisis de la transecta latitudinal, a los 50 km. Este hecho se deduce de los termohigrogramas del CRICYT y San Martín (Fig. 6) siendo ya muy débil en esta última estación del efecto del Zonda.

5.2. Generales

La situación sinóptica asociada a este fenómeno se caracterizó por la presencia de una fuerte corriente en chorro a 300 mb y la proximidad de un frente frío bien definido. Las condiciones aerológicas simultáneas indican a barlovento de la cordillera: un enfriamiento en la tropósfera superior (por encima del nivel de 300 mb); aparición de nubosidad media entre 500 y 400 mb; valores de componente zonal y de cortante del viento superior al promedio y una hodógrafa de forma inversa a la forma media de julio.

A sotavento de Los Andes se destaca un calentamiento generalizado en casi toda la tropósfera, respecto del sondeo medio y la presencia de Zonda en capas inmediatas a la superficie con gradientes inestables de θ_e en ellas.

Otra característica relevante fue la disminución de la presión atmosférica en más de 15 mb respecto del valor medio mensual (Fig.2) en El Plumerillo y el viento norte intenso en San Luis con velocidad superior a 45 km/h, cuando la presión era aún elevada (más de 1025 mb al nivel del mar).

La presión atmosférica también disminuyó en forma marcada y continua en Cristo Redentor, apareciendo en forma simultánea ventisca en esa estación y nubosidad media y alta de tipo lenticular en zonas del llano inmediatas a la cordillera. El enfriamiento continuo observado desde las 15 horas del día 3 en Cristo Redentor (Fig.3) permite identificar el evento dentro de los conocidos como "genéticamente fríos" (Brinkmann, W., 1973).

En el calentamiento que acompañó a este caso no parece haber intervenido el calor latente liberado por la precipitación de nieve ya que al menos en esta oportunidad, de acuerdo a los datos disponibles de Cristo Redentor, la nevada en alta montaña se inició una vez que el Zonda había alcanzado el llano (Fig.3).

Agradecimientos: Se agradecen las sugerencias realizadas por el Dr Erich Lichtenstein con relación a la orientación de algunos aspectos del trabajo.

También al técnico Julio Cristaldo por su colaboración en la elaboración de algunos datos y a Martín Silva por sus tareas de computación.

BIBLIOGRAFIA

- Brinkmann, W.R., 1973; A climatological study of strong downslope winds in the Boulder area. Ph.D.Thesis NCAR (Natural Center for Atmosphere Research). Boulder, Colorado. USA.
- Georgif, W., 1952; Regulación del tiempo por la doble onda diaria de la presión atmosférica en Mendoza; METEOROS, año II, N°3 y N°4 Julio - Dic. 1952. p. 182-189.
- , 1954; Dinámica del viento Zonda en Mendoza. Anales del Dpto de Investigaciones Científicas de la Universidad Nacional de Cuyo. p. 109-119.
- Lichtenstein, E., 1980; La depresión del noroeste argentino. Tesis doctoral. Universidad de Buenos Aires. Dpto de Meteorología.
- Norte, F.A., 1979; Clasificación sinóptica de las tormentas convectivas y su relación con las tareas operativas en el área de defensa. PNLAG. Informe de las primeras experiencias de ajustes de defensa temporada granicera 1978-79. Tomo 2. CNIE. p. 11-113.
- , 1982; Descripción sinóptico-meteorológica de una tormenta de nieve otoñal en los Andes Centrales y sus efectos en la región de Cuyo. CONGREGMET IV. Setiembre 1982. Meteorológica
- , 1983; Enfriamiento pronunciado en la tropósfera media y baja hacia fines de otoño 1983. Anales de la Conferencia sobre fenómenos periglaciales. IANIGLA - CONICET. Mendoza, 1983. p. 145-161.
- , 1984a; Relación entre el "Zonda térmico" y una "pausa" en las situaciones sinópticas que producen nieve desde cordillera hasta el llano de la Provincia de Mendoza. III Congreso Brasileiro de Meteorología. Belo Horizonte. Brasil. Diciembre, 1984.
- Rolón de los Santos, G., Afonso, J., 1977; Aspectos estadísticos y sinópticos del viento Zonda. Meteorológica. vol. VIII/IX. 1977-78. p. 321-330.