

SIRS-UN GRAN AVANCE EN LA OBSERVACION METEOROLOGICA

El éxito obtenido con el espectrómetro infrarrojo de satélite (SIRS), instalado en el Nimbus III, lanzado el 14 de abril de 1969, ha abierto una nueva era en la aplicación de los satélites a la meteorología. El SIRS mide las radiancias del infrarrojo en el espectro, lo cual permite el cálculo directamente desde debajo del satélite, de la distribución vertical de la temperatura en la atmósfera. El primer SIRS, un ensayo sobre un satélite experimental, ha demostrado que el sondeo atmosférico constituye una de las posibilidades de aplicación de los satélites meteorológicos, que viene a añadirse a las ya bien conocidas en el campo de la fotografía atmosférica con longitudes de onda visibles e infrarrojas. Se necesitan muchos más estudios y desarrollos para mejorar las técnicas que permitan deducir las temperaturas partiendo de las medidas de radiancias espectrales y para perfeccionar los métodos e incorporar estas informaciones de modo efectivo y en un tiempo conveniente, a la rutina del análisis numérico y a la previsión. Pero los primeros ensayos han tenido un éxito brillante.

J. I. F. King en 1958 y L. D. Kaplan en 1959, fueron los primeros en señalar que la estructura térmica de la atmósfera se puede deducir de las medidas de la radiancia de la banda telúrica espectral de absorción del anhídrido carbónico centrada en la longitud de onda de 15 micras. Durante los diez años siguientes, el «National Environmental Satellite Center» (NESC), con la cooperación y apoyo de la Agencia Nacional de investigación aeroespacial (NASA), ha desarrollado el instrumento SIRS y las técnicas para el trazado del perfil vertical de la temperatura a partir de las radiancias espectrales. Los señores David Q. Wark y Don T. Hilleary del NESC, han dirigido la ejecución del SIRS desde sus comienzos en 1959.

El NIMBUS III lleva también otro instrumento, el espectrómetro interferencial infrarrojo (IRIS) desarrollado por Rudolph A. Hanel en el Centro de Vuelo espacial Goddard de la NASA. El IRIS obtiene el sondeo atmosférico de la temperatura a partir de medidas de radiancia en el infrarrojo, pero aplicando una técnica ligeramente distinta. Los resultados obtenidos con el IRIS y con el SIRS concuerdan muy estrechamente.

Elaboración del sondeo de temperatura del SIRS

Las medidas de radiación de la atmósfera obtenidas por el SIRS se reducen a siete estrechos intervalos espectrales en la banda del anhídrido car-

NOTA DEL EDITOR: En un artículo anterior firmado por J. Nordberg, titulado *Desarrollo de los satélites meteorológicos en los Estados Unidos* (Véase *Boletín*, Vol. XVIII, N.º 1, págs. 1-11), se describen algunos de los experimentos meteorológicos realizados con los satélites NIMBUS. El presente artículo, en el que se exponen los resultados obtenidos en uno de dichos experimentos con el NIMBUS III, ha sido preparado por la dirección del «National Environmental Satellite Center», «Environmental Science Services Administration», EE. UU., Departamento de Comercio.

bónico y en un intervalo dentro de la ventana espectral del vapor acuoso en la región 11,1 micras. La elaboración de un sondeo de temperatura a partir de las ocho medidas discretas de radiancia se efectúa apoyándose en la resolución de complicadas ecuaciones que exigen el uso de un calculador numérico de alta velocidad. La inversión directa de la ecuación del intercambio radiactivo para obtener la temperatura en función de la presión no es una solución recomendable en la práctica. Se obtiene una solución, matemáticamente más firme, relacionando estadísticamente las medidas de radiancia del SIRS con las temperaturas atmosféricas obtenidas de una extensa muestra de sondeos realizados con globos y cohetes.

La ecuación para el cálculo de las temperaturas a partir de las medidas de radiancia del SIRS se suele aplicar en dos formas distintas según el método de desarrollo seguido. En el método directo se usa una muestra media climatológica a base de datos convencionales de radiosondeo y de cohetes sonda, y depende de un exacto conocimiento *a priori* de las características de transmisibilidad del anhídrido carbónico. En el otro método se acude a la regresión por mínimos cuadrados, tratando las observaciones del SIRS, coincidentes en espacio y tiempo con datos convencionales, como son radiancias *observadas*, en la elaboración estadística y evitando así la necesidad de especificar explícitamente las características de transmisibilidad del anhídrido carbónico. En cualquiera de los dos métodos deben asignarse valores de temperatura a un número arbitrario de niveles de presión, desde la superficie del suelo hasta el *limite superior* de la atmósfera, aunque los resultados por encima del nivel de 3 mb no son significativos. En las referencias 1, 2 y 3 (*) se encontrarán estudios exhaustivos sobre ambos métodos de elaboración y sobre su desarrollo.

Las medidas de radiancia del SIRS cubren un campo visual de unos 225 kilómetros cuadrados, de modo que los perfiles de temperatura obtenidos representan un promedio sobre dicha área. Los ocho canales son explorados simultáneamente cada 8 segundos, durante los cuales el satélite avanza unos 50 km. La exploración global se verifica dos veces al día —a mediodía y a media noche de tiempo local. Se obtienen con la misma precisión las observaciones diurnas que las nocturnas.

La presencia de nubes en el campo visual crea un serio problema para la obtención de un verdadero sondeo por debajo de las cimas de las nubes. Cuando existe una nube densa, el sondeo entre el suelo y la cima de la nube se puede suplir por interpolación entre la temperatura deducida del satélite y una temperatura conocida junto al suelo. Con nubosidad parcial las medidas de radiancia resultan afectadas por las cantidades y alturas de las capas de nubes. En este caso se acude a una técnica estadística para deducir un sondeo ficticio con el cielo despejado que se supone habría obtenido el satélite si la nube no se hubiese encontrado en el campo visual. Para obtener una primera aproximación del sondeo en aire despejado por debajo de las nubes, se acude a los datos procedentes de los canales más oscuros del SIRS (que miden radiancias procedentes de los niveles más elevados de la atmósfera y no son afectadas por lo tanto por la nubosidad troposférica) y a la

(*) Véase pág. 12.

temperatura del aire junto al suelo. Los datos procedentes de los restantes canales son comparados con los valores de la radiancia por medio de esta primera aproximación. Las desviaciones se emplean, con varios pasos reiterados, para mejorar la aproximación del sondeo en los niveles inferiores y para estimar la altura y cantidad de una o dos capas nubosas, reveladas por las desviaciones observadas.

Más del 90 por 100 de los sondeos del SIRS requieren ajuste por la presencia de nubes. Los instrumentos que se están preparando para futuras operaciones tendrán un campo visual más estrecho, del orden de los 50 km. cuadrados, y barrerán un sector más amplio perpendicular a la proyección de la trayectoria. Estas mejoras harán que aumente el número de sondeos obtenidos en regiones de cielo despejado entre masas nubosas.

Comparación de los sondeos SIRS con datos de radiosonda

En las figuras 1 a 4 se presentan ejemplos típicos en diferentes regímenes climáticos de los resultados de distribución de temperaturas del SIRS en comparación con lanzamientos próximos de radiosondas. Los sondeos SIRS (línea llena) de las figuras 1, 2 y 3, fueron obtenidos por método directo; el de la figura 4 por el método de regresión. La figura 1 muestra el histórico primer sondeo realizado a base de medidas desde satélite y como comparación el sondeo de Kingston, Jamaica, efectuado cuatro horas antes y a unos 400 km. de distancia hacia el noroeste. La estrecha concordancia entre ambos es evidente. La mayor discrepancia se observa en la troposfera media, donde el sondeo del SIRS es más cálido.

En la figura 2 el sondeo SIRS es comparado con el de Omaha, Nebraska, a unos 160 km. al sur. Este es particularmente significativo porque la mayor parte del cielo estaba cubierto por una delgada capa de cirrostratus. Aunque fue tratado como sondeo con cielo despejado, la concordancia es buena, indicando que las nubes altas y delgadas influyen poco sobre las radiancias medidas por el SIRS, o sobre las temperaturas deducidas de ellas. De todos modos también ahora el sondeo del SIRS resulta más cálido en la troposfera.

La figura 3 muestra una comparación análoga, realizada en una atmósfera ártica en el norte del Canadá.

De estas y otras comparaciones resulta claro que las temperaturas por el método directo a partir de los datos SIRS para la troposfera media y superior resultan sistemáticamente demasiado altas en 2° a 3° C. También se ha comprobado que se introducen errores bastante mayores cerca del suelo en áreas continentales recalentadas durante el día. Estos efectos son debidos a errores en las funciones de transmisión del anhídrido carbónico y del vapor de agua. Actualmente está en estudio un perfeccionamiento destinado a corregir empíricamente las leyes de transmisión teóricas con objeto de reducir al mínimo las diferencias entre los sondeos SIRS y los obtenidos por medio de radiosondas. Los resultados preliminares muestran que las temperaturas troposféricas pueden hacerse coincidir con los resultados de radiosondas y que el problema de las tierras recalentadas ha sido eliminado. En cambio en la

Figura 1. — Comparación de un sondeo SIRS con uno efectuado con radiosonda en Kingston, Jamaica, el 14 de abril de 1969

... Kingston, a 12.00 TMG
 — SIRS, 16° N 73° W, a 16.12 TMG
 Despejado

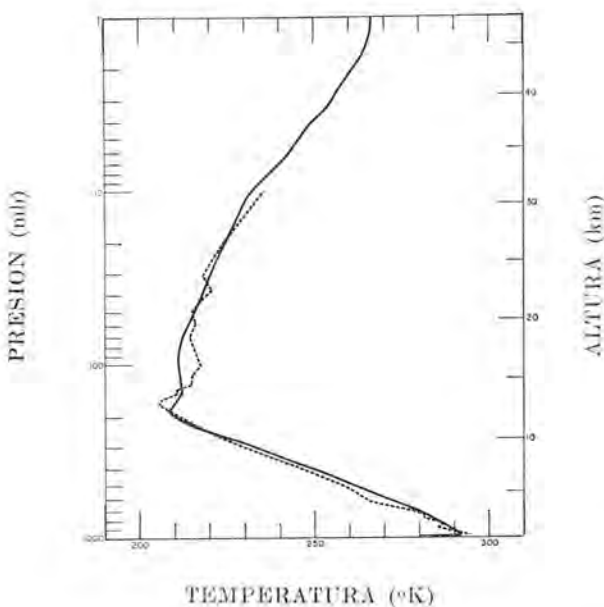
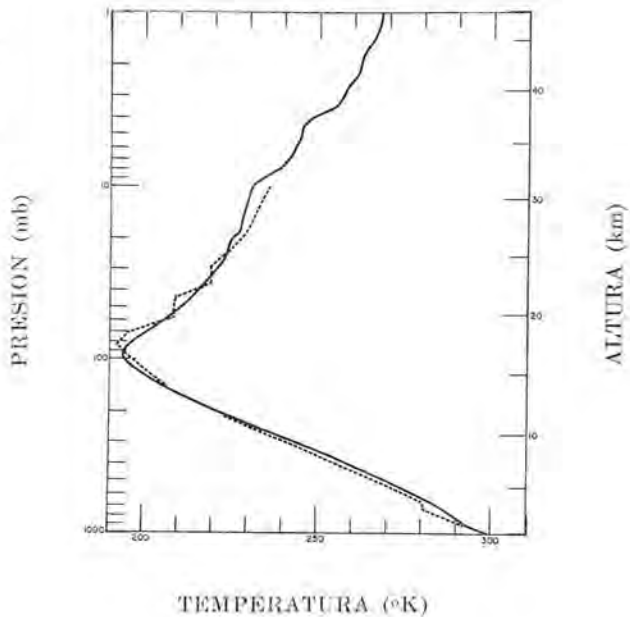


Figura 2. — Comparación de un sondeo SIRS con uno efectuado con radiosonda en Omaha, Nebraska, el 25 de abril de 1969

... Omaha, a 18.00 TMG
 — SIRS, 42° N 96° W, a 17.15 TMG
 8/10 de Cs

estratosfera es el sondeo SIRS el que resulta rebajado, debido posiblemente a la mala calidad de los datos del radiosonda en esta región, como consecuencia de la acción de la radiación solar y térmica sobre los instrumentos de medida.

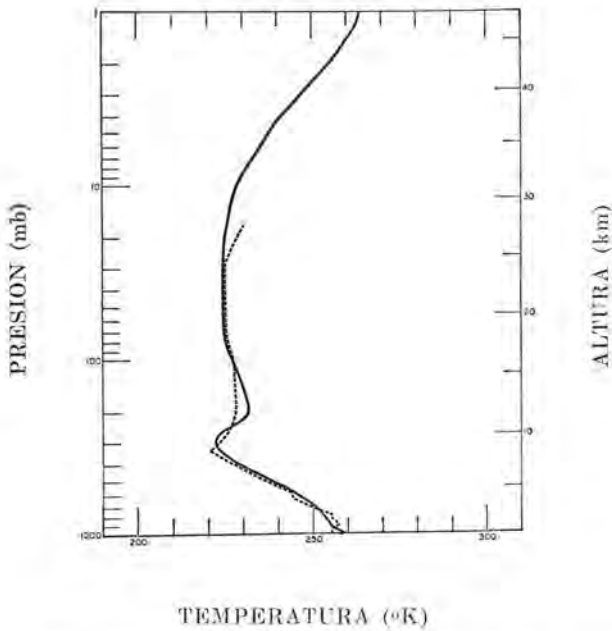


Figura 3. — Comparación de un sondeo SIRS con uno efectuado con radio-sonda en Resolute,, N. W. T., el 18 de abril de 1969
 ... Resolute, a 12.00 TMG
 — SIRS, 75° N 98° W, a 15.23 TMG
 Despejado

El problema de comparación y valorización continúa activamente, pero las indicaciones actuales sugieren que los datos SIRS son notablemente mejores que las temperaturas estratosféricas determinadas con nuestras observaciones convencionales según nuestros conocimientos habituales de la absorción de la radiación por los gases atmosféricos.

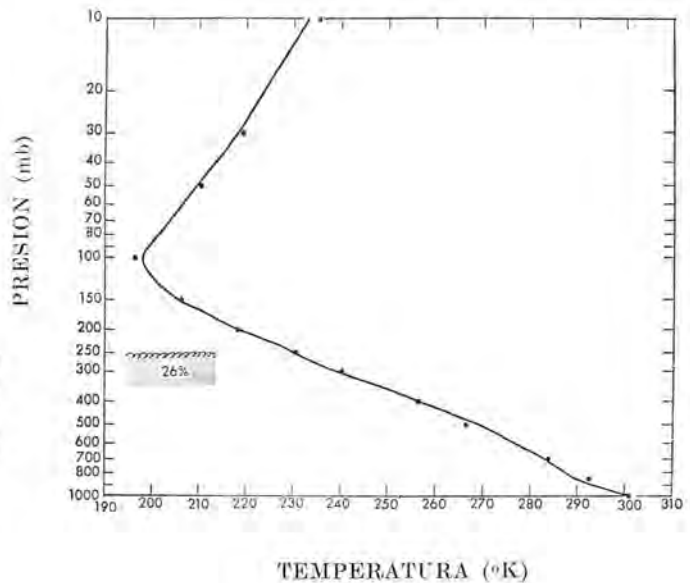


Figura 4. — Comparación de un sondeo SIRS con uno efectuado con radio-sonda a 18.1° N 71.5° W, el 26 de mayo de 1969, a 16 TMG
 — SIRS
 ... análisis convencional

Uso operativo de los datos SIRS

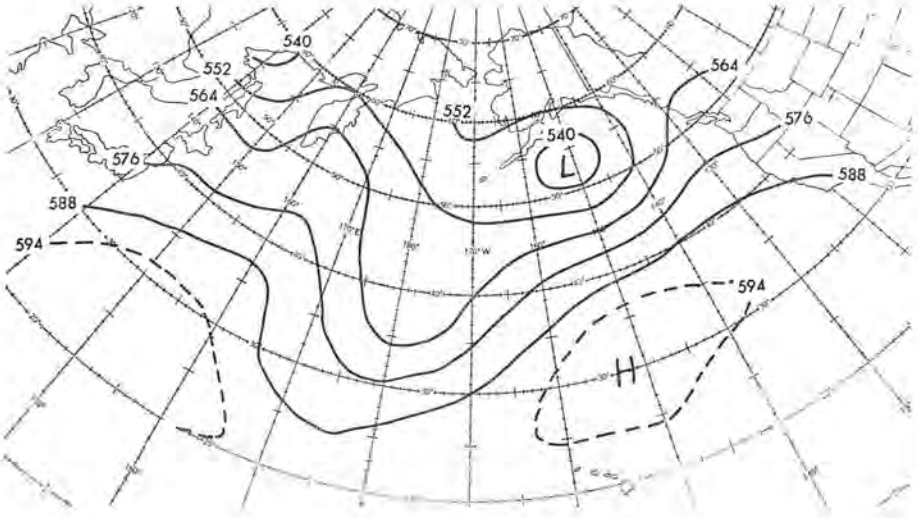
Aunque el SIRS fue concebido y desarrollado en plan experimental, los datos son actualmente utilizados con cautela pero rutinariamente en el Servicio Meteorológico Norteamericano en sus programas de análisis numérico y predicción. Con este fin W. L. Smith y H. M. Woolf han desarrollado su método de regresión por mínimos cuadrados para explotar las temperaturas SIRS en la estimación de temperaturas y alturas geopotenciales para su incorporación, con tiempo oportuno, al análisis operativo. En regiones con densa red de radiosondas se pueden interpolar los valores correspondientes a los nudos de la red desde el punto de vista del espacio y del tiempo por análisis objetivo, y conseguir así un sondeo *observado* coincidente con cada sondeo SIRS. Fundándose en una amplia muestra de tales pares de sondeos, tal vez unos 700 en un período de algunas semanas, han sido calculados los coeficientes de regresión que enlazan las medidas de radiancia de los 8 canales del SIRS con la temperatura y la altura geopotencial en 13 niveles de presión tipo desde el suelo hasta los 10 mb. Entonces estos coeficientes se aplican a las radiancias SIRS ordinarias para obtener los valores de temperatura y altura geopotencial en los niveles tipo con destino al análisis operativo. Los niveles intermedios son interpolados hidrostáticamente para conseguir un sondeo de 25 niveles.

Las relaciones de regresión son fechadas a intervalos de pocos días, terminando ordinariamente el período de muestreo algunos días antes de la fecha del sondeo SIRS al cual se va a aplicar la regresión. Se calculan independientemente series distintas de coeficientes para cinco zonas de latitud entre el polo Norte y el polo Sur. Sin embargo en el hemisferio sur las muestras estadísticas necesarias para el cálculo de los coeficientes de regresión distan mucho de ser satisfactorias debido a la escasez de estaciones de radiosondas y a su desigual distribución.

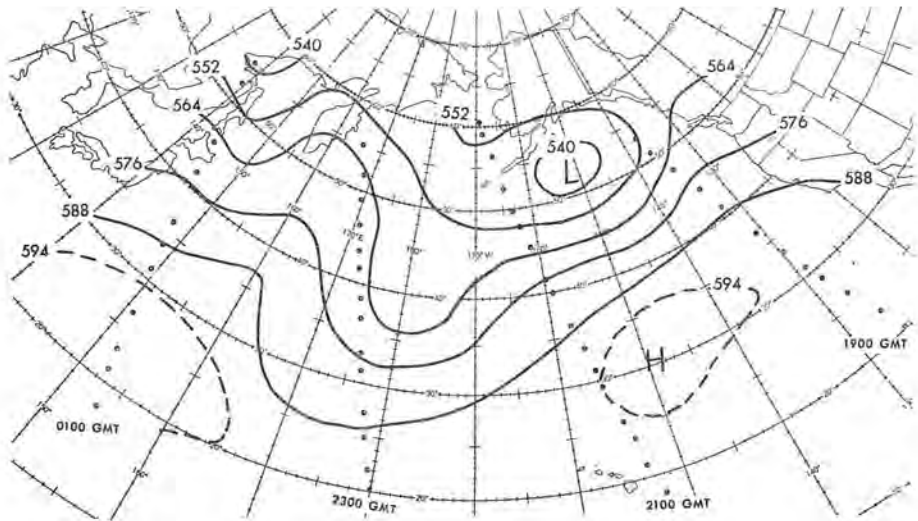
La figura 4 representa un ejemplo de sondeo SIRS obtenido por el método de regresión para uso operativo. Un cuarto de cielo aproximadamente estaba cubierto por una capa de nubes hacia el nivel de 300 mb. La parte del sondeo por debajo de la nube fue obtenida con la técnica antes descrita. La concordancia es satisfactoria a todos los niveles, incluso en la troposfera. Las deficiencias ordinarias del método directo de elaboración del sondeo, debidas a la falta de exactitud de las funciones de transmisión, son ampliamente superadas con el método de regresión.

Los resultados provisionales obtenidos con los programas de control indican que el 50 por 100 de las discrepancias entre los valores de la temperatura y de la altura geopotencial deducidas del SIRS y de los sondeos convencionales, quedan entre 1,0° y 1,5° C y entre 20 y 30 m., respectivamente. Menos del 1 por 100 de estas diferencias superan los 6° C o los 100 metros. Las mayores discrepancias ocurren en la baja troposfera, debido al influjo de las nubes. Errores menores aparecen en la región de la tropopausa, donde el SIRS encuentra dificultades para reproducir las pequeñas y bruscas oscilaciones del perfil, y por encima del nivel de 30 mb, donde las medidas del radiosonda están influidas por efectos de radiación.

Los datos SIRS son utilizados, en primer lugar, como base para el análisis objetivo preliminar preparado por el Centro Meteorológico Nacional

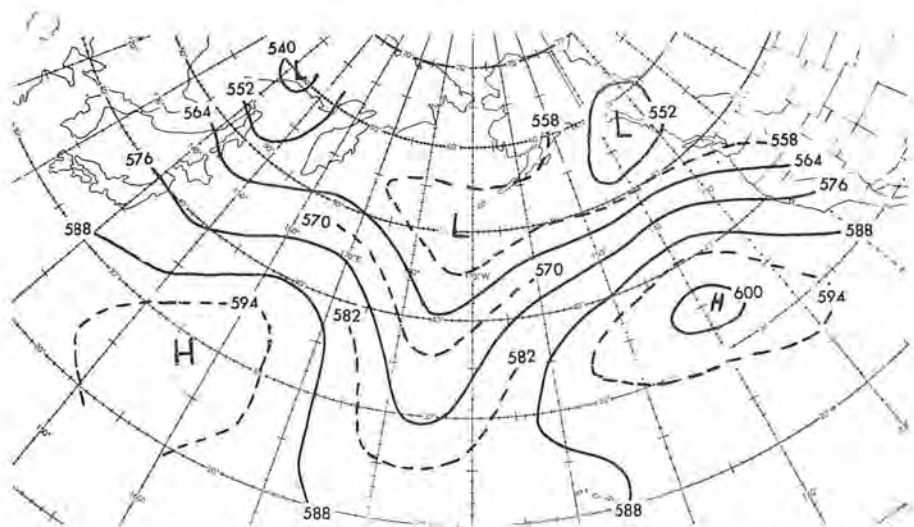


(a)

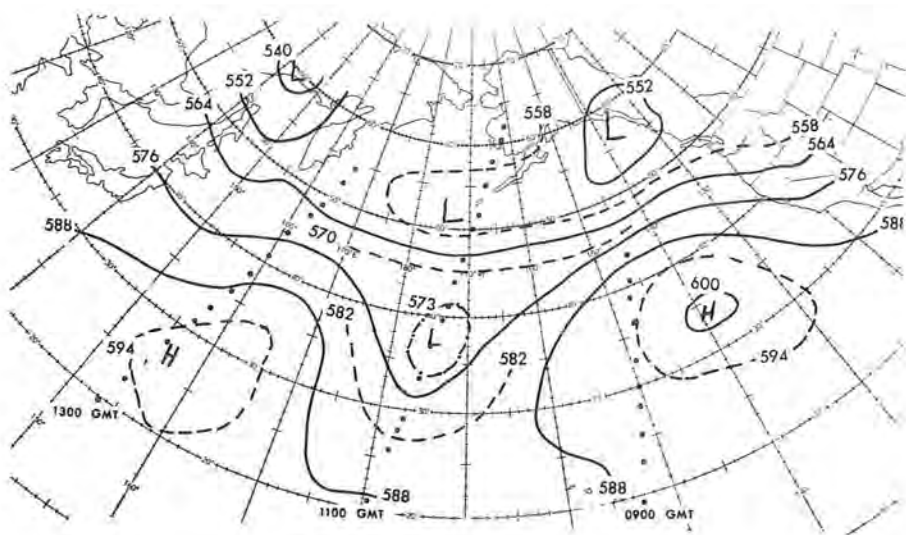


(b)

Figura 5.—Análisis de 500 mb efectuados (a) sin y (b) con datos del SIRS, a 00.00 TMG, el 23 de junio de 1969

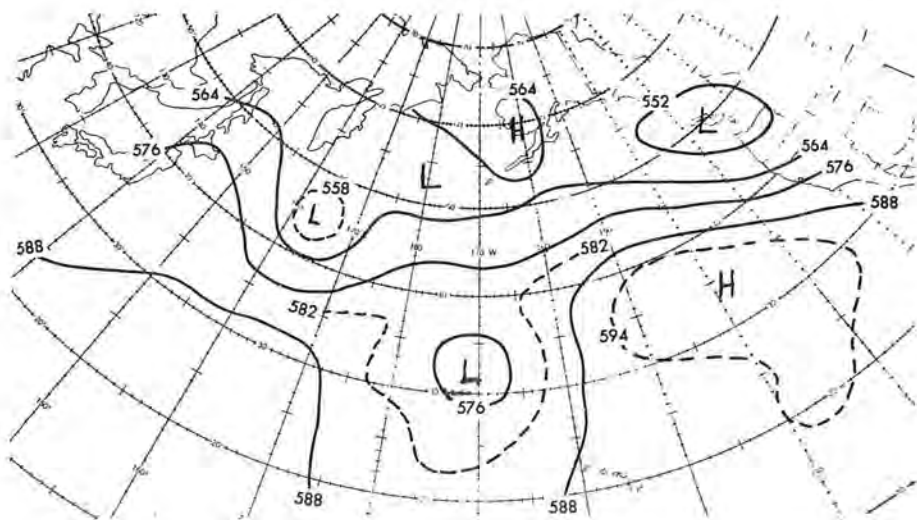


(a)

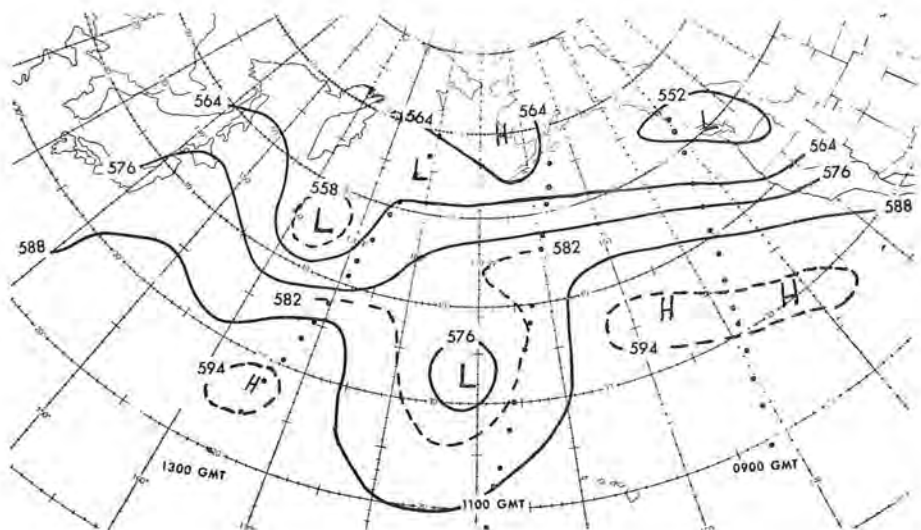


(b)

Figura 6.—Análisis de 500 mb efectuados (a) sin y (b) con datos del SIRS, a 00.00 TMG, el 24 de junio de 1969



(a)



(b)

Figura 7.—Análisis de 500 mb efectuados (a) sin y (b) con datos del SIRS, a 00.00 TMG, el 25 de junio de 1969

(CMN) partiendo de observaciones convencionales. Esto resulta particularmente efectivo en regiones donde los datos convencionales son escasos. Las figuras 5, 6 y 7 son un buen ejemplo de esto.

El 23 de junio de 1969 (fig. 5) la adición de los datos SIRS apenas introdujo cambios en el análisis de 500 mb sobre el Océano Pacífico septentrional. El 24 de junio de 1969 (fig. 6) el paso del SIRS a las 1100 TMG indicaba que la profunda vaguada sobre el Pacífico central contenía una depresión desprendida, con una fuerte corriente en chorro zonal en la región de 45° a 50° N. El día siguiente (fig. 7) el análisis del CMN reconoció este centro depresionario, fundándose en gran parte en los datos SIRS del día anterior.

Comparación de los dos métodos de elaboración del sondeo SIRS

Los dos métodos para la elaboración de los datos SIRS son fundamentalmente semejantes y darían idénticos resultados si las muestras estadísticas de los sondeos observados fuesen completamente insesgados y si las funciones de transmisión fuesen conocidas con exactitud. A falta de estas condiciones ideales los dos métodos ofrecen distintas ventajas e inconvenientes prácticos. En el método de regresión la muestra estadística está limitada a las regiones y momentos para los que se dispone de observaciones simultáneas por satélites y convencionales. El método directo no requiere tal simultaneidad para obtener relaciones estadísticas y puede aprovechar cualquier dato histórico disponible. En cambio, es necesario conocer con precisión las propiedades de transmisión de la atmósfera y la distribución de temperatura en las muestras elegidas debe ser especificada adecuadamente, sin ningún sesgo hasta los más altos niveles, incluso por encima de los alcanzados actualmente por los cohetes sonda.

Cuando las funciones de transmisión de la atmósfera sean mejor conocidas, tal vez el método directo llegue a ser preferible en la elaboración rutinaria de los sondeos de temperatura a partir de las medidas de radiancia SIRS, puesto que no exige disponer de datos convencionales ordinarios para obtener soluciones.

Perfeccionamiento de los instrumentos de sondeo en estudio

Actualmente se procede a preparar una versión perfeccionada del SIRS, conocida por SIRS B, para acoplar al próximo satélite NIMBUS, cuyo lanzamiento se prepara para la primavera de 1970. El SIRS B contiene seis nuevos canales sensibles en la banda de rotación del vapor de agua para medir perfiles de humedad. Además se proyecta extender el campo visual a derecha e izquierda de la trayectoria orbital, con objeto de conseguir una más amplia área de barrido. También se encuentran en vías de desarrollo varias versiones operativas de las sondas SIRS, entre otras el radiómetro infrarrojo de perfil de temperatura (ITPR) y el radiómetro de perfil vertical de temperatura (VTPR). Sondeos en el infrarrojo con un instrumento de esta clase se están proyectando como componentes permanentes del Sistema de Satélites Meteorológicos operativos de los EE. UU. a partir de 1972, aproximadamente

Conclusión

El experimento SIRS con el NIMBUS III ha demostrado de modo convincente que el sondeo atmosférico por satélites es factible y que con el tiempo puede proporcionar tantos datos de observación, por lo menos, como las observaciones convencionales, con destino al análisis objetivo en gran escala. Para los altos niveles en la estratosfera hay ya incluso alguna razón para creer que los datos SIRS son más rigurosos que los de radiosonda normal a causa de los efectos de la radiación luminosa y térmica sobre los últimos. Por otra parte los satélites son capaces de conseguir la cobertura completa de regiones del globo relativamente inaccesibles y de poner directamente estos datos, procedentes del mundo entero, a disposición de los centros meteorológicos y a un coste no muy elevado, con mucha mayor velocidad y eficiencia de la que podría esperarse de cualquier red de comunicaciones a nivel del suelo. Las ventajas de usar un solo instrumento para conseguir sondeos de todo el mundo son evidentes.

La predicción numérica del tiempo a escala mundial encuentra enormes dificultades, sobre todo por las severas limitaciones que impone la insuficiencia de observaciones en las regiones tropicales y del hemisferio sur. La Vigilancia Meteorológica Mundial y el Programa de Investigación Global de la Atmósfera (GARP) dependerá considerablemente de los datos cuantitativos procedentes de sondas transportadas por satélites, tan distintos de las imágenes de nubes obtenidas diariamente por los satélites fotográficos. El uso de satélites geoestacionarios, que potencialmente pueden proporcionar estimaciones del viento a base de fotografías tomadas con intervalos de pocos minutos, podrá llenar en grado considerable, uno de los mayores huecos de información con que tropieza el análisis numérico global, cometido que queda fuera de las posibilidades del SIRS.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. WARK, D. O. y FLEMING, H. (1966): *Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites* (Medidas indirectas de perfiles de temperatura en la atmósfera desde satélites). *Monthly Weather Review*, 94, 6, 1966.
2. WESTWATER, E. R. y STRAND, O. H. (1968): *Statistical information content of radiation measurements used in indirect sensing* (Información estadística contenida en las medidas de radiación usadas en el sondeo indirecto). *Journal of the Atmospheric Sci.* 25, 750.
3. SMITH, W. L. (1969): *Statistical estimation of the atmosphere's geopotential height distribution from satellite radiation measurements* (Estimación estadística de la distribución de la altura geopotencial en la atmósfera a partir de medidas de radiación desde satélites). ESSA Technical Report NES-48 (1969), cat. no. PB 183, 297. (Se puede obtener en Clearinghouse for Federal Scientific and Technical Information, U. S. Department of Commerce, 5285 Port Royal Road, Springfield, Va. 22151, U. S. A.)