

LA TEORIA DEL CLIMA Y LOS SATELITES*

René Carduño** y Julián Adem**

1. INTRODUCCION

La era espacial ha implicado notables ventajas para las ciencias atmosféricas. Los satélites meteorológicos registran gran cantidad de datos que contribuyen a disponer de información oportuna y completa a escala global. Particularmente valiosos son los datos de océanos remotos y zonas despobladas. Por otra parte, los satélites de comunicación permiten concentrar y distribuir en forma expedita las mediciones hechas por diversos medios en todas partes del mundo.

En 1960 se tomaron las primeras fotos de nubosidad por satélite, en 1969 se incorporaron espectrómetros infrarrojos y posteriormente radiómetros. Sin embargo, en cada caso hubieron de pasar algunos años para disponer automáticamente de información consistente y reciente, útil a las ciencias atmosféricas.

La información de satélite fue esencial para transformar la climatología, que ha devenido teoría del clima. En su sentido tradicional la climatología era (básicamente) descriptiva y (a lo más) correlativa. La comprensión científica del sistema climático sólo fue posible con el progreso tecnológico. Aunque sus fundamentos físico-matemáticos eran ya conocidos, la complejidad del problema llevaba a ecuaciones diferenciales que requerían para su solución enormes cálculos y muchísimos datos. Los satélites y las computadoras de gran capacidad y rapidez fueron dos avances indispensables para cerrar el problema de la modelación climática, formar los archivos de datos y resolver las ecuaciones.

* Ponencia presentada en el Simposio sobre Evaluación y Perspectivas de La Era Espacial en México, mayo 1986.

** Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.

El Modelo Termodinámico del Clima de Adem es pionero en la teoría del clima. Fue formulado en los años 60s y es uno de los más conocidos a nivel internacional.

Esta ponencia trata de las relaciones entre la teoría del clima y los satélites, principalmente en lo referente al Modelo Termodinámico y algunas de sus aplicaciones.

2. RELACION ENTRE SATELITES Y MODELOS

Los satélites miden las siguientes variables: nubosidad, albedo planetario, radiación solar incidente, radiación de onda larga saliente y radiación neta.

Uno de los problemas fundamentales para usar la información obtenida por satélite consiste en transformar las cantidades observadas a datos meteorológicos útiles.

Podemos considerar que el sistema climático está formado por: la troposfera -que es la capa atmosférica inferior, escenario principal del clima-, la capa superficial térmicamente activa -de 50 ó 100 m de espesor en océano y de unos centímetros en continente- y la criosfera -cubierta parcial de hielo y nieve sobre la superficie-.

Si queremos expresar la información de satélite en términos de otras variables, debemos considerar el sistema climático. Al aplicamos la ley de conservación de energía térmica y, además de usar ciertos resultados empíricos, suponemos conocida la distribución vertical de algunas variables. A continuación postulamos que, a pesar de las distribuciones verticales prescritas, las anomalías horizontales que mide el satélite son -vía balance de energía- reflejo de las temperaturas superficial y troposférica, además de otras variables, y pueden usarse para calcular anomalías de

estas variables con precisión aceptable.

Los datos de satélite pueden usarse para probar qué tan realista es el balance de radiación generado internamente en un modelo climático. La comparación de las observaciones por satélite con los cálculos del modelo puede permitir mejorar la parametrización del balance de radiación usada en el modelo; pero también tiene otro uso posible: mejorar los valores de satélite sugiriendo un ajuste en su calibración.

3. EL MODELO TERMODINAMICO DEL CLIMA

A lo largo de 5 lustros de existencia, el modelo climático de Adem ha sido ampliado y mejorado, y sus aplicaciones se han diversificado.

Su primera versión tuvo la finalidad de reproducir los perfiles latitudinales de los valores normales mensuales de temperatura y viento, incorporando únicamente la radiación y el transporte horizontal turbulento de calor.

Estos trabajos de simulación de las condiciones normales del sistema climático progresaron en varios aspectos: el modelo se volvió bidimensional en el sentido de tratar ya no sólo con perfiles en latitud sino con las dos coordenadas geográficas y una distribución realista de continentes y océanos; además se incorporaron otros mecanismos de calentamiento y transportes como la memoria térmica del océano, la evaporación, la condensación y el flujo vertical de calor sensible; asimismo las retroalimentaciones por nubes y por casquetes helados.

El siguiente paso en la evolución del modelo fue generar adicionalmente al estado normal del sistema, las condiciones de un mes y año particular; es decir, además de reproducir la climatología, predecir las anomalías del clima.

Posteriormente se incorporó el transporte de calor por vientos y formuló un submodelo para predecir temperatura de océano, el cual incluye transportes turbulento y por corrientes.

El modelo se fundamenta en la hipótesis de que a escala de tiempo climática los proce-

sos relevantes son los termodinámicos, a diferencia de la escala meteorológica en que domina la dinámica. Para el clima los procesos dinámicos están subordinados a la termodinámica, en cambio los procesos meteorológicos se consideran adiabáticos.

Estas dos hipótesis extremas son buenas; pero existe una escala intermedia, que va de unos 3 días a unas 2 semanas, en que la dinámica y la termodinámica coexisten con importancia similar. En esta escala la modelación se vuelve muy compleja.

En el Modelo Termodinámico del Clima la ecuación de pronóstico es la Primera Ley de la Termodinámica o ecuación de conservación de la energía térmica, la dinámica entra en el modelo diagnósticamente y se hace uso de parametrizaciones semiempíricas para cerrar el problema.

4. PREDICCIÓN CLIMATICA

Al hablar de pronóstico de condiciones atmosféricas hay que tener presente que el plazo de anticipo es del mismo orden que el periodo de tiempo al cual se aplica. Así, el pronóstico mensual debe entenderse como la predicción, al inicio del mes, de las condiciones medias de ese periodo; de ningún modo se refiere al pronóstico de las condiciones de un día particular con 30 días de anticipo.

Un plazo de un mes o una estación es una escala temporal que puede considerarse de meteorología extendida o también como la escala climática mínima. En estos términos podemos decir que el Modelo Termodinámico ofrece un método objetivo de pronóstico meteorológico a largo plazo, que también puede llamarse pronóstico climático a corto plazo.

El pronóstico climático se hace para anomalías, más que para valores absolutos; es decir, se refiere a las desviaciones que las condiciones del sistema climático presentan en algún mes y año particular respecto a los valores normales de ese mes calendario. Por normal se entiende el promedio en un periodo reciente de muchos años. Por ejemplo, es normal que enero sea un mes muy frío, pero una anomalía positiva en enero de un año particular significa que

ese mes es menos frío de lo normal. Naturalmente la situación real siempre es anómala, la norma es una abstracción.

A fin de cancelar errores sistemáticos en una predicción, el modelo calcula tanto la situación anormal como la situación normal, ambas teóricas, su diferencia es la anomalía que constituye la predicción y que, para evaluación, ha de compararse con la anomalía observada en la realidad.

Aparte de varias normales observadas, para calcular una predicción se requieren 3 anomalías observadas en el mes anterior a la predicción, éstas son: las temperaturas del océano y de la troposfera media, y la cubierta de hielo y nieve. Con estos ingredientes el modelo predice varias anomalías, siendo las más significativas las temperaturas de la superficie y de la troposfera, y la precipitación.

En su versión básica el modelo se aplica al Hemisferio Norte; sin embargo, puede particularizarse a áreas de interés más reducidas. Así, se ha refinado y evaluado con múltiples aplicaciones en el territorio de Estados Unidos. Recientemente hemos iniciado aplicaciones al territorio nacional, de lo cual tenemos resultados preliminares.

5. CAMBIOS CLIMATICOS

Las predicciones de que hemos hablado se refieren a fluctuaciones alrededor del promedio denominado clima actual. Estas son las variaciones climáticas a corto plazo. Hay otras a largo plazo, llamadas cambios climáticos y determinan otros climas, distintos del actual.

Los cambios climáticos pueden ser de origen natural o antropogénico. Damos enseguida algunos ejemplos ilustrativos, mencionando sus escalas temporales.

Uno de origen antropogénico es el debido a la industrialización, que altera la composición química de la atmósfera; p.ej. el CO₂ aumenta. Esto ocurre a escala de décadas,

Una causa natural de cambios climáticos es el vulcanismo; que inyecta gas y polvo a la atmósfera. Debido a que este fenómeno puede presentarse y desaparecer a corto plazo (del orden de meses), es posible incluirlo tam-

bién entre las causas de fluctuaciones climáticas.

Otros cambios climáticos de origen natural son los causados por las variaciones de la órbita de la Tierra (del orden de decenas de miles de años) y los debidos a la deriva de los continentes (escala de decenas de millones de años).

El Modelo Termodinámico del Clima también ha sido usado para el estudio de los cambios climáticos. Este problema es diferente al de predicción de fluctuaciones. El estudio de cambios climáticos consiste en hallar la nueva situación de equilibrio inducida por un forzamiento externo; es decir, perturbar al sistema y calcular su relajamiento. La predicción, en cambio, es un problema de condiciones iniciales. En estos términos, debemos entonces pensar que los valores normales también varían y que un cambio climático implica normales nuevas.

El estudio de los cambios del pasado es un diagnóstico o posdicción; es decir, se trata de explicar objetivamente por qué pasó lo que pasó (y lo que pasó lo conocemos por observaciones de la realidad); tal es el caso del paleoclima o edades glaciales.

Para los cambios climáticos hacia el futuro, la idea es diferente. Se trata más bien de estudios de sensibilidad del modelo frente a alteraciones de parámetros aislados. El planteamiento del problema es de este tipo: ¿Cómo sería el clima si el CO₂ se duplicara, permaneciendo invariable todo lo demás? El resultado de este cálculo no es una predicción del clima del año 2030 aún cuando en esa fecha se tuviera el incremento de CO₂ postulado. No lo es porque para entonces no sólo se habrá alterado el CO₂, sino también otros parámetros. Un estudio de sensibilidad no se puede asociar al tiempo real.

Por otro lado, para las condiciones futuras no se tienen observaciones y naturalmente no es posible confrontar los resultados teóricos con la realidad. Lo que se hace es comparar entre sí los resultados de diversos modelos. Sin embargo, estas comparaciones pueden eventualmente ser más concluyentes sobre la certeza de los resultados. De allí que se hagan también estudios de sensibilidad por parámetros básicos con el fin expreso de calibrar los modelos. Para esto se

usa mucho el incremento de 1% en la luminosidad del sol como forzamiento de referencia.

6. DATOS DE SATELITE

Para calcular una predicción mensual el Modelo Termodinámico se inicializa con las siguientes variables:

- a) El albedo de superficie basado en la distribución de hielo y nieve en la última semana del mes previo.
- b) La temperatura de la superficie del mar en el mes previo.
- c) La temperatura de la troposfera media en el mes previo.

Actualmente esta información procede de diversas agencias estadounidenses.

Para las temperaturas de océano y troposfera usamos los datos preparados por NMD-NOAA y para la configuración de la cubierta congelada los datos de NESS-NOAA, basados en observaciones de satélite. Sin embargo, esto sólo ha sido posible en años recientes; la razón es que tuvimos que esperar a que se acumularan observaciones de varios años para determinar los valores normales a partir de los cuales se evalúen las anomalías.

El método de predicción requiere calcular teóricamente tanto el caso anormal como el normal y su diferencia es la anomalía pronosticada. Para este fin necesitamos calcular el caso normal con valores iniciales normales que sean consistentes con los valores iniciales anómalos. De otra manera podemos introducir errores en las anomalías iniciales mismas.

Por lo tanto, para usar datos de satélite en pronóstico climático es necesaria una larga serie de observaciones con las mismas características y calibraciones, de manera que se puedan establecer promedios a largo plazo, los cuales constituyen la climatología básica, que servirá de referencia para las anomalías. Cualquier cambio que afectara la uniformidad de las observaciones introduciría errores en las anomalías. Esta uniformidad implica que cualquier sesgo o error sistemático aparecerá también en las normales, de modo que se cancela al determinar las anomalías. Por consiguiente, es permisible a las observaciones tener

errores de este tipo, aún de tamaño similar o mayor que las anomalías.

Los datos de distribución de hielo y nieve de NESS-NOAA están disponibles por semanas y con resolución de 3 categorías de reflectividad. Esta información es confiable desde 1974 ó 1976.

En años recientes hemos usado la información de la temperatura superficial del mar preparada por NMC-NOAA a partir de observaciones de barcos, boyas y satélites. Dado que las anomalías de esta temperatura son pequeñas comparadas con sus normales, es particularmente importante tener para ella normales consistentes.

7. ILUSTRACIONES

Para terminar, mostramos algunos resultados ilustrativos del Modelo Termodinámico del Clima. Ver figuras en las hojas siguientes.

8. REFERENCIAS

- Adem, J., 1964. On the physical basis for the numerical prediction of monthly and seasonal temperatures in the troposphere-ocean-continent system. *Mon. Weather Rev.*, 92, 91-104.
- Adem, J., 1970. On the prediction of mean ocean temperatures. *Tellus*, 22: 410-430.
- Adem, J. and W.L. Donn, 1981a. Comparison of the earth-atmosphere radiation budget and albedo determined by a climate model and by satellite observations. *Proceedings of the Fifth Annual Climate and Diagnostic Workshop*, PB81-222200, CAC, NOAA. Washington D.C. p. 319.
- Adem, J. and W.L. Donn, 1981b. Progress in climate forecasting with a physical model. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 62: 1666-1675.
- Adem, J., R. Garduño y M. Giral. 1985. Aplicación del Modelo Termodinámico a la predicción climática sobre el territorio nacional. *Memorias de la Reunión UGM en Oaxaca, Oax.*

* * * * *

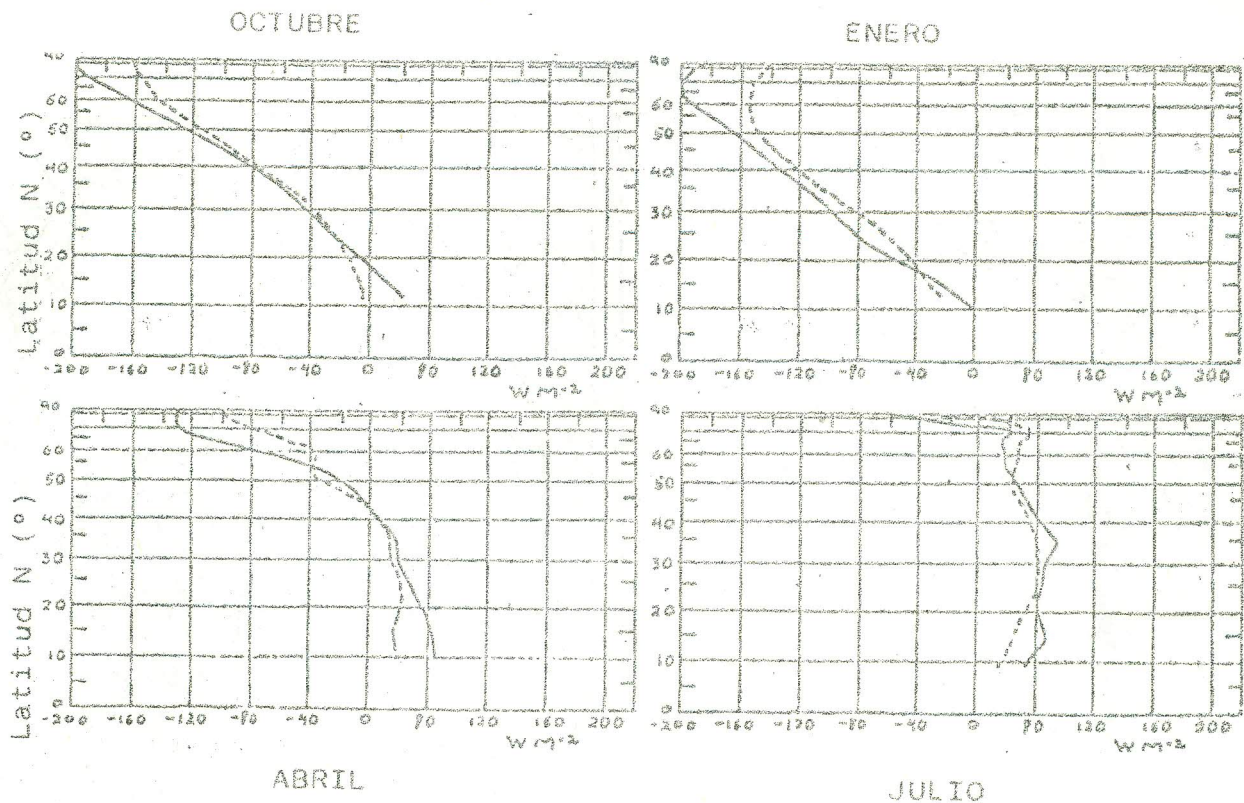


FIG. 1. Perfil latitudinal en el Hemisferio Norte de la radiación neta normal determinada por observaciones de satélite (línea continua) y calculada por el modelo (línea cortada). (Adem y Donn, 1981a).

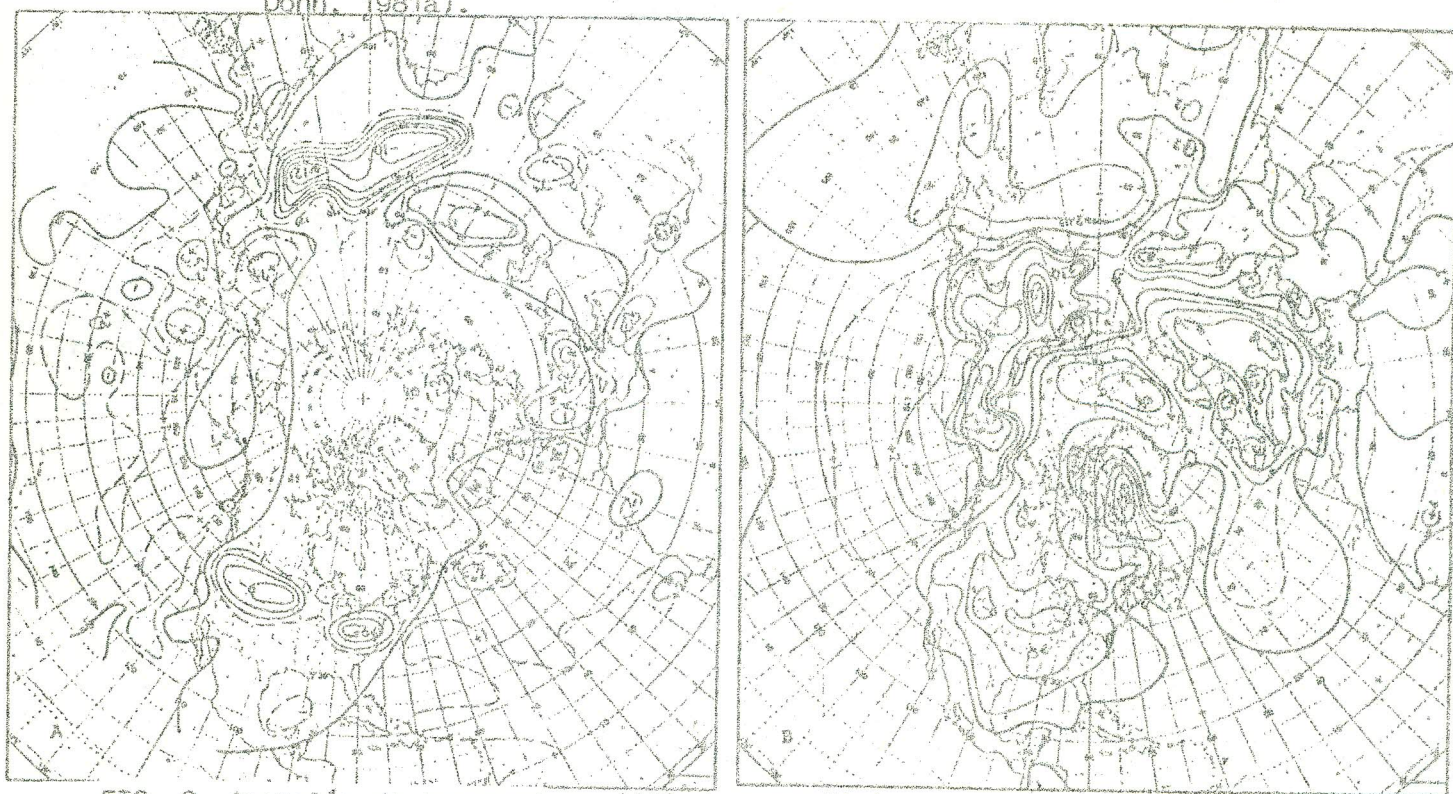


FIG. 2. Anomalia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de superficie en enero de 1963. (A) predicha por el modelo, (B) observada. (Adem, 1964).

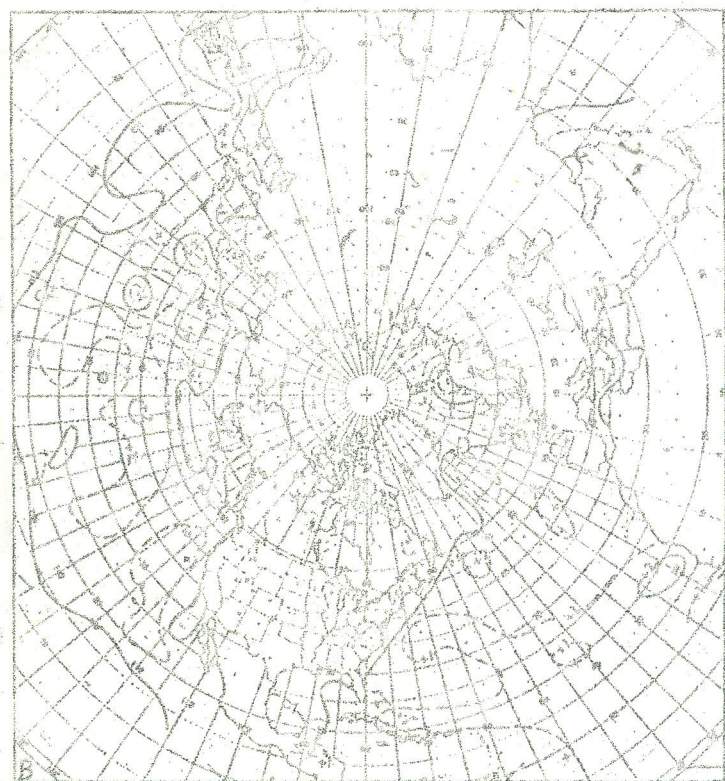
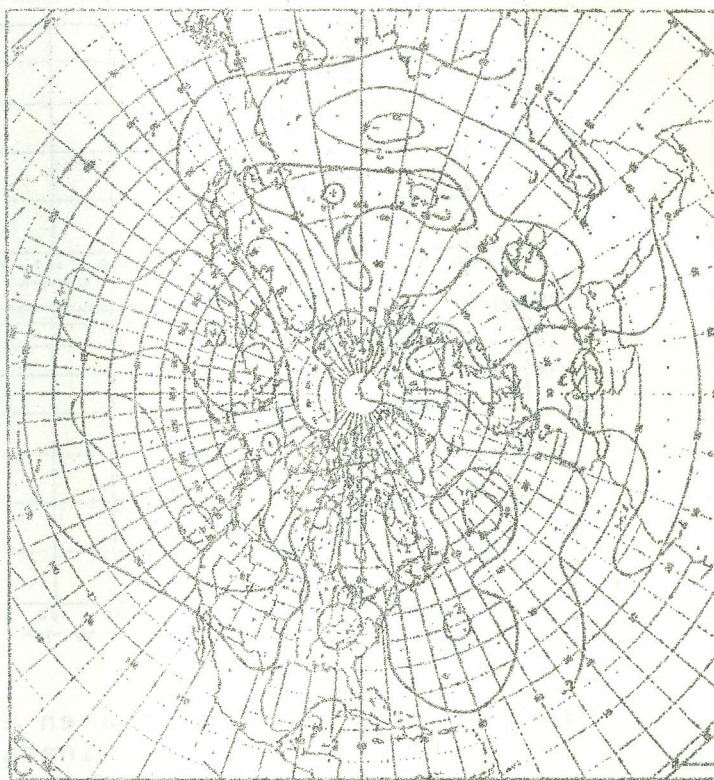
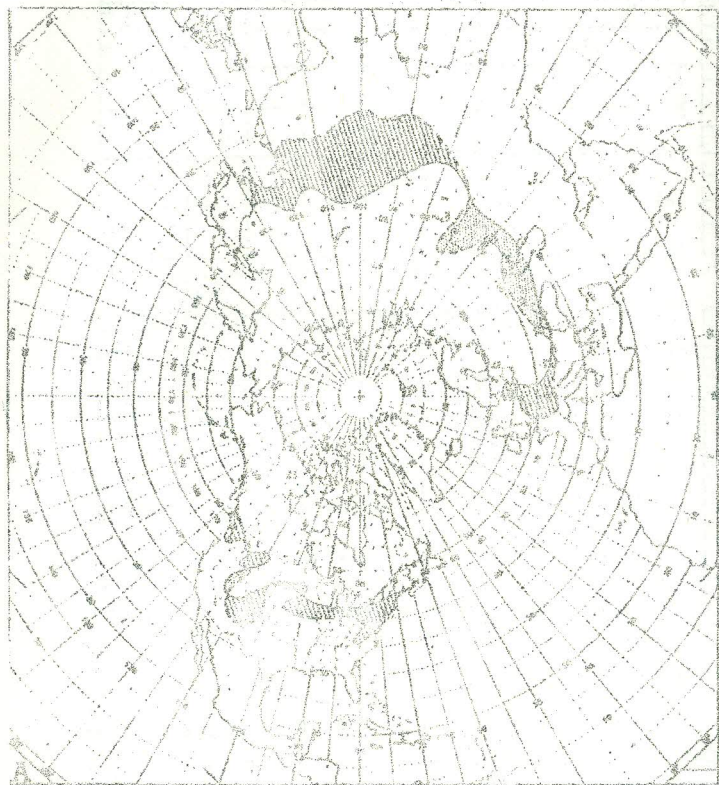
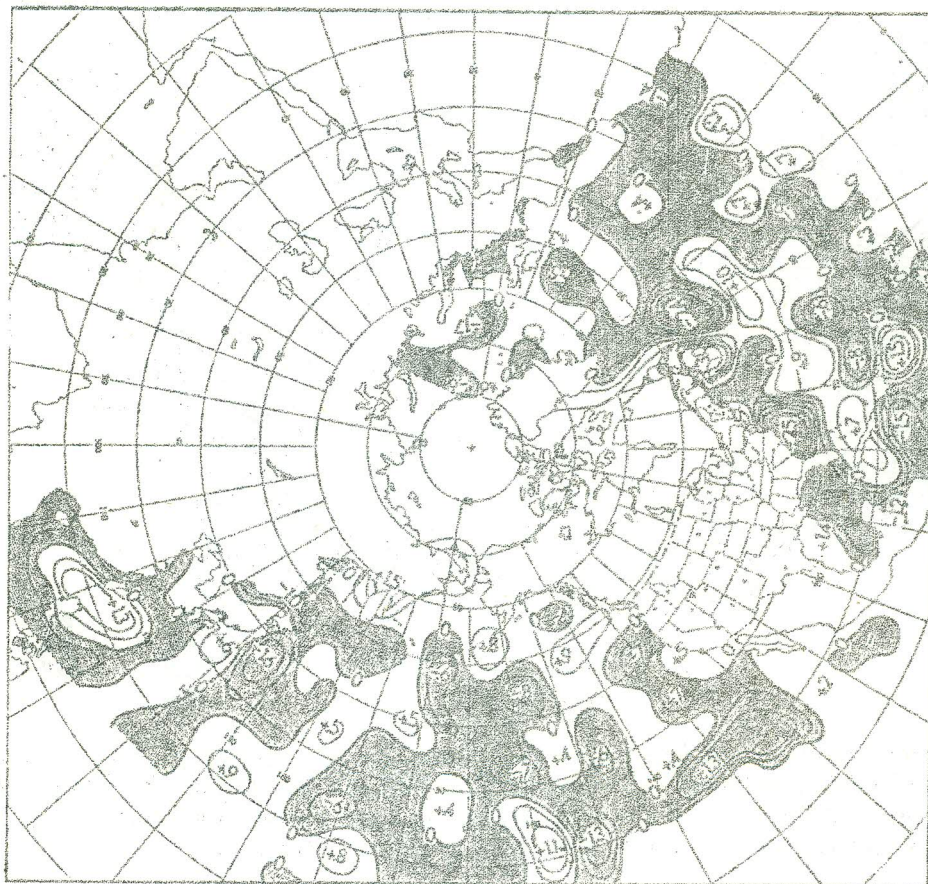
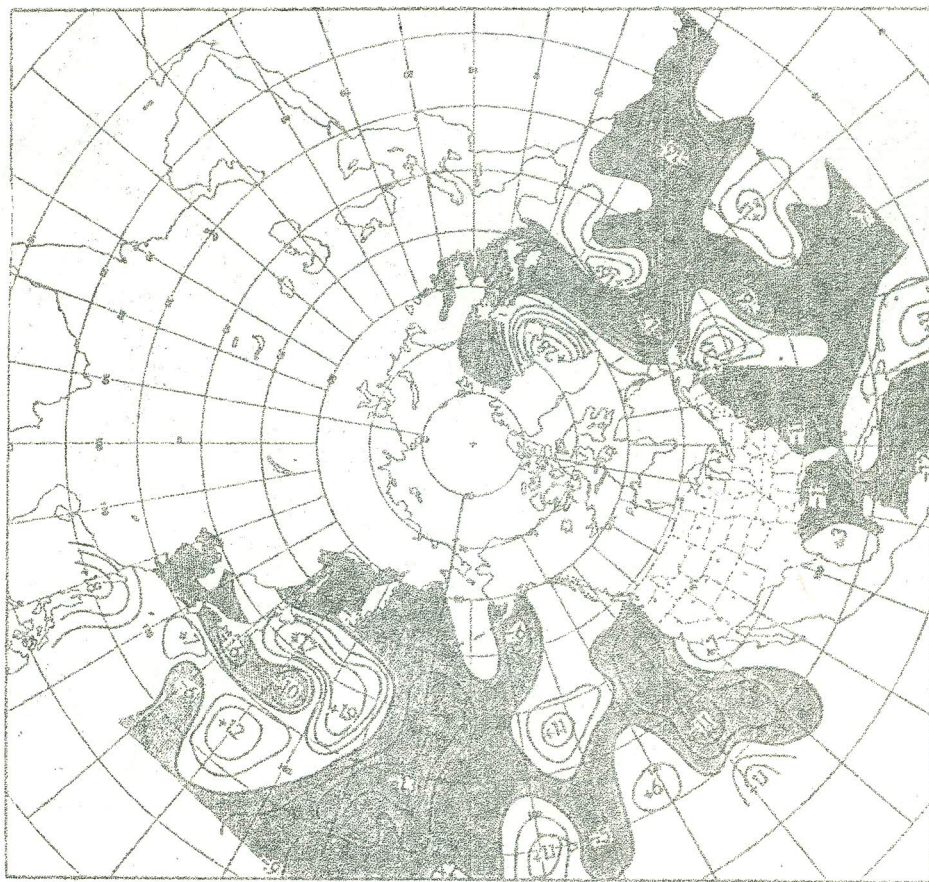


FIG. 3. Datos usados en la predicción de enero de 1963 (Fig.2). (A) muestra la frontera (línea cortada) de la cubierta de hielo y nieve en la última semana de diciembre de 1962 y la frontera (línea continua) normal en enero; entonces el sombreado rayado es superavit y el punteado déficit. (B) y (C) muestran, respectivamente, la anomalía ($^{\circ}\text{C}$) de las temperaturas del océano y de la troposfera media en diciembre de 1962. (Adem, 1964).



A



B

FIG. 4. Cambio de la anomalía de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) superficial del océano de diciembre de 1967 a enero de 1968. (A) predicha por el modelo, (B) observada. El sombreado indica que la anomalía en diciembre era mayor que en enero. (Adem, 1970).

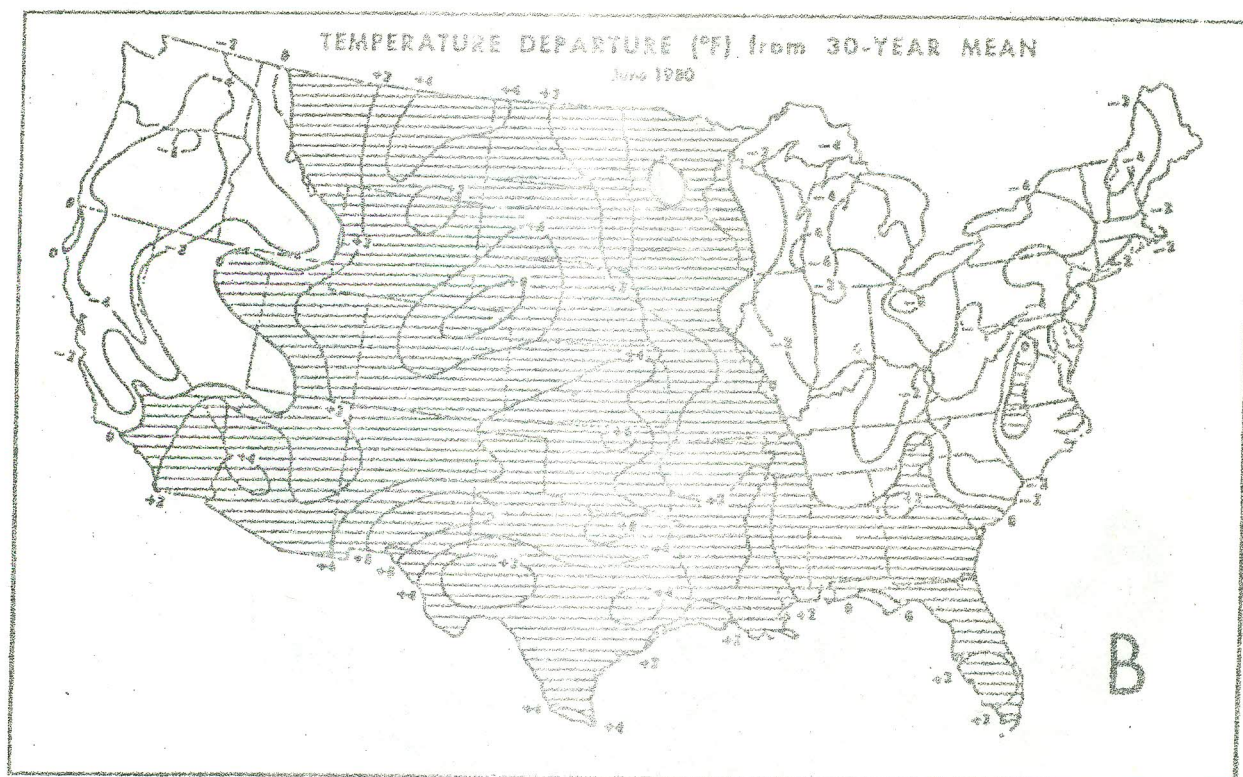
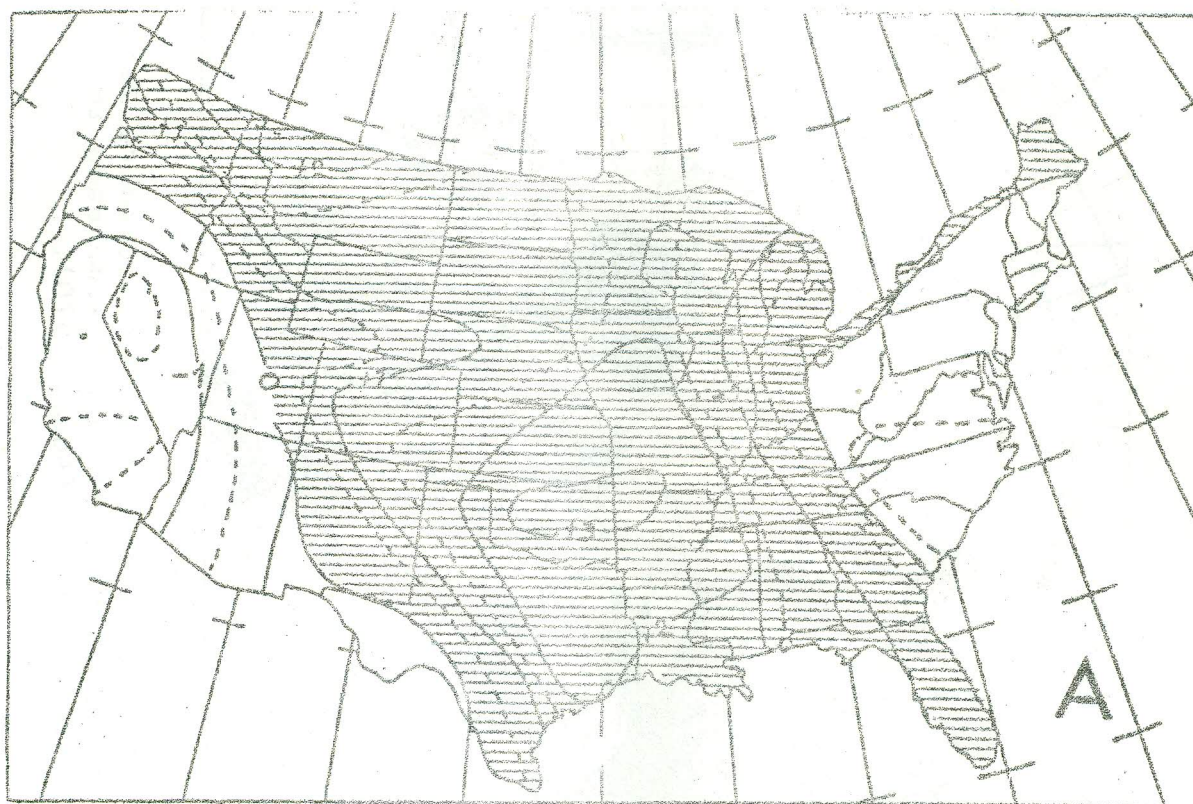


FIG. 5. Anomalia de temperatura ($^{\circ}\text{F}$) de superficie en junio de 1980. (A) predicha por el modelo, (B) observada. El sombreado indica condiciones arriba de lo normal. (Adem y Donn, 1981b).

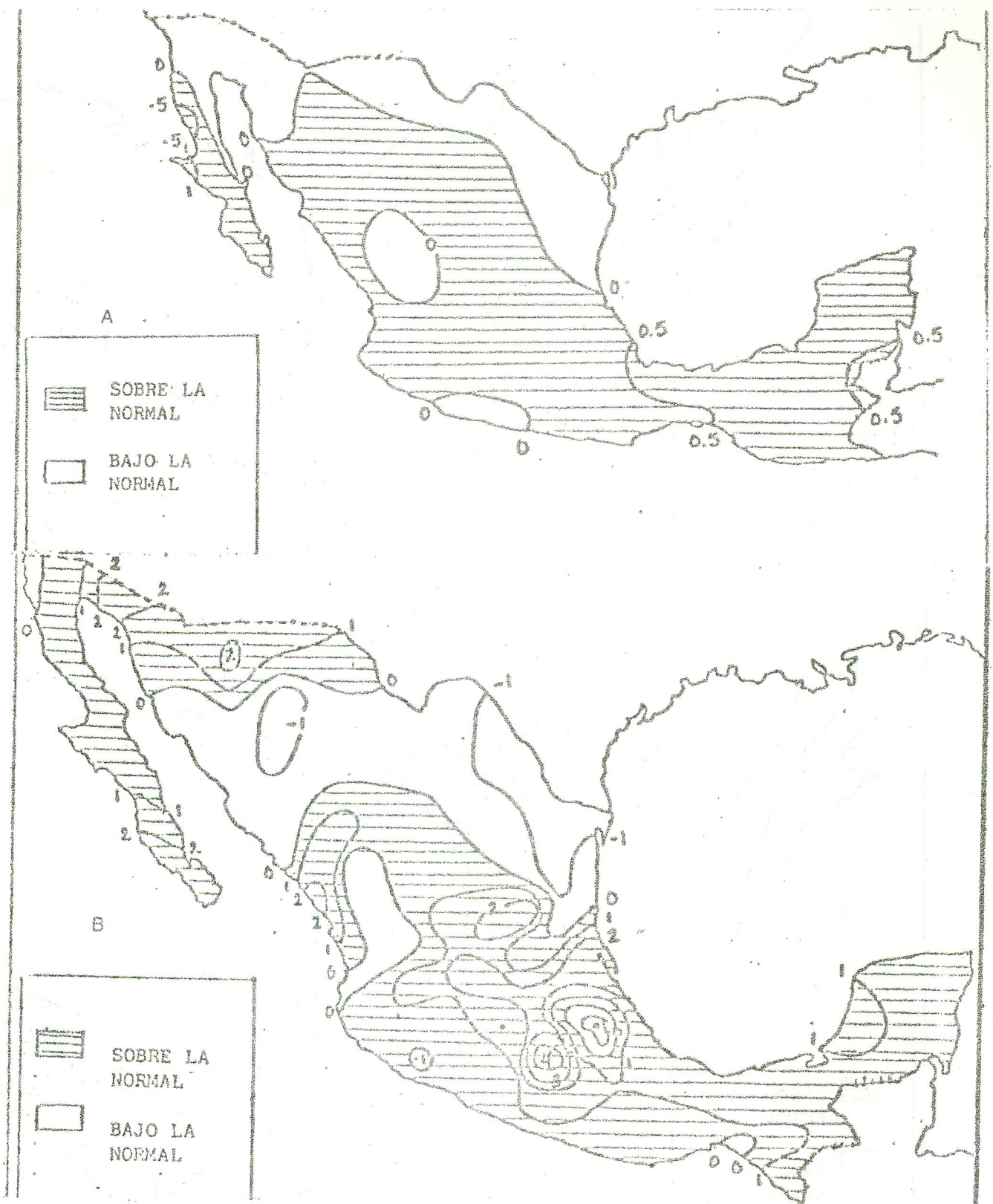


FIG. 6. Anomalia de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de superficie en junio de 1983. (A) predicha por el modelo, (B) observada (por el Servicio Meteorológico Nacional). (Adem, Garduño y Giral, 1985).

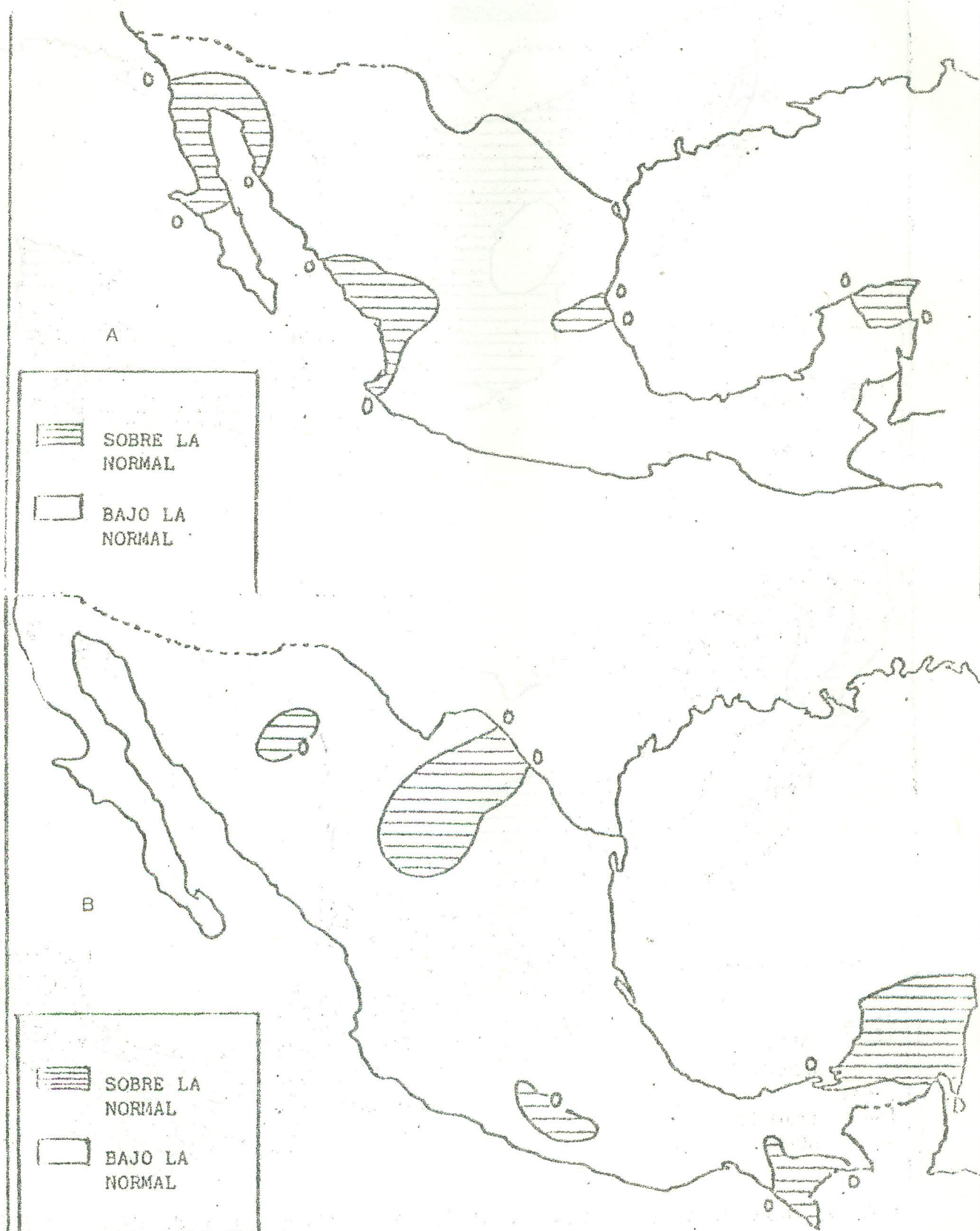


FIG. 7. Signo de la anomalía de precipitación en junio de 1983. (A) predicho por el modelo, (B) observado (por el SMN). (Adem, Garduño y Giral, 1985).