

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNION GEOFISICA MEXICANA. AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE
GEOFISICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

Vol. 16

México, D. F., 1o. de Octubre de 1976

Núm. 4

CAUSAS, EFECTOS Y POSIBILIDADES DE PREDICCION DE LAS FLUCTUACIONES Y LOS CAMBIOS CLIMATICOS¹

JULIAN ADEM*

RESUMEN

Se presenta un análisis comparativo y una evaluación de los cambios y fluctuaciones climáticos debidos a las siguientes causas: Variación de los parámetros orbitales de la Tierra, variabilidad solar, variaciones del contenido de polvo, bióxido de carbono y ozono, variaciones en las condiciones de la superficie (continentes y océanos); y mecanismos de retroalimentación que existen entre la atmósfera, la superficie de la Tierra (océanos y continentes) y la cubierta de hielo y nieve.

ABSTRACT

A comparative analysis and an evaluation are presented of the changes climatic and fluctuations due to the following possible causes: variations of the orbital parameters of the earth, solar variability, variations in the content of dust, carbon dioxide and ozone, variations in the surface conditions (continents and oceans); and feedback mechanisms that exist among the atmosphere, the surface of the earth (ocean and continents) and the ice and snow cover.

¹ Conferencia presentada en la Reunión sobre Fluctuaciones Climáticas y su Impacto en las Actividades Humanas, 11-13 de mayo de 1976 en México, D.F.

* Colegio Nacional e Instituto de Geofísica, UNAM.

INTRODUCCION

El clima ha sufrido innumerables y constantes cambios en el pasado, y es razonable suponer que también cambiará en el futuro. A través de los tiempos, ha ayudado a moldear civilizaciones que en épocas recientes han tenido que ajustar sus características al clima existente durante los últimos tiempos. Esta adaptación ha sido particularmente importante en relación a la agricultura y a la producción de alimentos.

En México, en el período 1937 a 1944 hubo una sequía que ocasionó escasez de alimentos. Hubo restricciones para exportar productos agrícolas, control de precios y cierre de los sistemas de procesamiento de alimentos.

Las sequías en Norte América durante los años treinta causaron cosechas relativamente bajas de granos durante varios años y las fallas de las cosechas en la Unión Soviética en 1972 fueron producidas por condiciones de sequía muy similares. En estos casos, reservas de alimentos y un comercio internacional razonablemente bien desarrollado evitaron una severa escasez y sufrimiento humano.

El impacto de las variaciones climáticas sobre las actividades humanas en los países en desarrollo es mucho más severo, y frecuentemente catastrófico, cuando los márgenes para sobrevivir son escasos. La reciente sucesión de años secos en el área del Sahel ha resultado en hambre y migraciones humanas, en una escala mucho más grande de lo que se tenía noticias antes, a pesar de que varias sequías ya han ocurrido en este siglo.

Estos ejemplos ilustran cómo las variaciones del clima pueden afectar las actividades humanas. Esto también será cierto en el futuro, aun cuando se trate únicamente de variaciones asociadas con causas naturales; es decir, no debidas a la presencia del hombre y su civilización. Además, el hombre puede contribuir en forma acumulativa a la producción de posibles cambios climáticos.

Es evidente que aun una modesta habilidad para predecir el clima sería valiosísima. Algunos investigadores aseguran que tal habilidad existe, y predicen que el clima terrestre se calentará; sin embargo, otro grupo afirma que la tendencia al enfriamiento que empezó en los años

cuarenta continuará por varias décadas. Un punto de vista más ampliamente aceptado por los especialistas, y en el que yo estoy enteramente de acuerdo, es que nuestro conocimiento del clima y de su variabilidad no es todavía suficiente para garantizar pronunciamiento sobre predicción climática, para períodos mayores de un mes o una estación.

Recientemente se han publicado noticias alarmistas en las que se anuncia que se avecina un cambio climático catastrófico. Este tipo de noticias carece de una base científica adecuada, ya que en el estado actual de los conocimientos, es posible hacer cuando más estimaciones de las fluctuaciones para un mes o una estación de las condiciones medias de temperatura, precipitación y otras variables climáticas, con habilidad suficiente para que estas predicciones sean muy útiles para la planificación de la agricultura, la industria y otras actividades humanas.

Sin embargo, la información histórica reciente indica que fluctuaciones del clima han ocurrido y que con toda seguridad ocurrirán algunas similares en el futuro inmediato.

Los registros históricos indican que ha habido cambios de diversas escalas de tiempo, asociados con diversas causas. La figura 1 muestra las tendencias generales en el clima global en el último millón de años, publicado por la Academia de Ciencias de los Estados Unidos (U.S. National Academy of Sciences, 1974).

Se muestran de arriba para abajo, en la parte A, los cambios en los promedios de 5 años de la temperatura en la superficie sobre la región 0–80° N desde principios de este siglo hasta 1970; la máxima temperatura se tiene alrededor de 1940 y a partir de entonces ha habido una disminución de temperatura que a la fecha es de 0.4° C; en la parte B se tienen las variaciones del índice de severidad de invierno para Europa Oriental desde el año 800 hasta 1900; en este intervalo las fluctuaciones equivalentes de temperatura tienen un máximo valor de 1.5° C. En la parte C se tienen las tendencias generalizadas de la temperatura del aire en el hemisferio norte desde hace 30,000 años a la época presente, basadas en las fluctuaciones de los glaciares alpinos, cambios en las líneas de los árboles, fluctuaciones marginales en glaciares continentales y cambios en configuraciones de vegetación registrados en el espectro de polen; en este caso la oscilación máxima es del

orden de 10° C.

En la parte D se tienen las tendencias generalizadas de la temperatura del aire en el hemisferio norte, desde hace 150,000 años a nuestros días, basadas en temperatura de la superficie del mar en latitudes medias, en registros de polen y en registros del nivel del mar en todo el mundo. La oscilación máxima de temperatura es del orden de 10° C.

Finalmente, en la parte E se presentan los cambios del volumen global del hielo de hace un millón de años a la fecha, registradas como cambios en la composición isotrópica de plancton fósil en una muestra profunda del fondo del mar. La máxima oscilación de la temperatura equivalente del aire es del orden de 10° C.

De esta figura se sigue que los grandes cambios ocurren a escalas de tiempo muy grandes de miles y millones de años.

Las fluctuaciones climáticas recientemente ocurridas de escalas de décadas y siglos son la información más valiosa que se tiene para determinar cuáles son los extremos climáticos que se esperan en el futuro próximo en esta misma escala. Además, hay que añadir los efectos resultantes de la actividad humana que cada vez más influyen en ciertas variaciones locales del clima.

POSIBLES CAUSAS DE LOS CAMBIOS CLIMATICOS

Como posibles causas de los cambios climáticos pueden mencionarse las siguientes:

1. Variación de los parámetros orbitales de la tierra.
2. Variabilidad solar.
3. Variaciones del contenido de polvo, bióxido de carbono, ozono y otros componentes de la atmósfera.
4. Variaciones en las condiciones de la superficie de la tierra (continentes y océanos).
5. Mecanismos de retroalimentación que existen entre la atmósfera, la superficie de la tierra (océanos y continentes) y la cubierta de hielo y nieve.

Todas estas posibles causas están asociadas con cambios y fluctuaciones climáticas en diversas escalas; por lo tanto, es necesario tomar en cuenta el concepto de variabilidad climática para poder evaluar el efecto de las diversas causas postuladas, considerando el amplio espectro de fluctuaciones climáticas que incluye variaciones del orden de estaciones, años, décadas, siglos, milenios y millones de años.

TEORIA ASTRONOMICA DEL CLIMA

Es evidente que una de las posibles causas de los cambios y fluctuaciones climáticos puede ser la variación de la fuente primaria de energía que llega al planeta, que es la radiación solar.

La radiación solar recibida puede variar al cambiar la cantidad de energía emitida por el Sol. Dicha energía también varía aun cuando la energía emitida por el Sol se mantenga constante. Esta variación es debida a las fluctuaciones que la órbita terrestre sufre a través de los tiempos.

La oblicuidad, la excentricidad y la longitud del perihelio de la órbita terrestre han sufrido cambios a través de los tiempos; y sus variaciones se han calculado conforme a la mecánica celeste, y dependen de las perturbaciones que los otros ocho planetas principales (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter, Saturno, Uranio, Neptuno y Plutón) ejercen sobre la órbita de la tierra.

El primer intento de dar una explicación astronómica de las épocas glaciares fue el de Adhémar en 1842. Sin embargo, sus estimaciones de los efectos que se producen por los cambios en la órbita de la Tierra fueron completamente erróneos.

En 1875, James Croll presentó una discusión más apropiada de la influencia de los cambios orbitales en el clima. De acuerdo con su teoría, cuando el perihelio de la órbita terrestre coincide con el solsticio de verano, el hemisferio norte tendrá veranos cortos y calurosos y largos inviernos fríos. En el perihelio, la velocidad de la Tierra en su órbita es máxima y la distancia al Sol mínima. En tales épocas de coincidencia del paso del perihelio con el solsticio de verano, la tierra se mueve en un tiempo considerablemente más corto del equinoccio primaveral al equi-

noccio otoñal. Entre más grande es la excentricidad, mayor es el efecto. Las condiciones se invierten cuando la tierra está en el afelio de su órbita en el solsticio de verano.

Croll arguyó que durante los largos y fríos inviernos las capas de hielo aumentan en tal extensión que el calor de los veranos no es capaz de regresarlas de nuevo a su posición normal. Además, por la extensión de las capas de hielo, el calor del verano se reduce por reflexión, formación de nubes y cambios en el sistema de corrientes oceánicas. En 1876, Simon Newcomb criticó la hipótesis de Croll sobre la base de carencia de estimaciones cuantitativas. Una crítica más profunda de Van Woerkom (1953) es que durante los largos y fríos inviernos la precipitación disminuye y, por tal razón, la formación de hielo en las regiones glaciares decrece. Según Van Woerkom, veranos de temperatura baja son quizá de mayor importancia que las temperaturas bajas de invierno para el avance de las capas de hielo.

En 1924 Köffen y Wegener adelantaron la teoría según la cual el movimiento de los continentes es causa originadora de los glaciares, mientras que los detalles de los repetidos avances y retrocesos durante un período de glaciación se deben a las causas astronómicas.

Posteriormente, Milankovitch en 1920 revive la teoría de Croll, introduciendo, por primera vez, una discusión cuantitativa de la influencia de la oblicuidad.

La oblicuidad en la actualidad es de 23.45° , y en los últimos dos millones de años ha variado únicamente de un máximo valor de 24.51° a un mínimo de 22.10° , lo cual se ve en la figura 2. El período de sus variaciones ha sido de 41,000 años.

Los cambios en la oblicuidad causan cambios en la cantidad de calor recibida por la Tierra en invierno y en verano. Milankovitch demostró que la insolación durante el verano aumenta para casi todas las latitudes al aumentar la oblicuidad, mientras que en invierno disminuye para todas las latitudes. La insolación total anual disminuye para latitudes abajo de 43° y aumenta para latitudes arriba de 43° . El efecto sobre ambos hemisferios es el mismo.

La influencia de la oblicuidad en la insolación es insignificante en el Ecuador y aumenta lentamente con la latitud. Por esta razón, cambios

en la excentricidad y la longitud del perihelio son predominantes en las latitudes bajas, mientras que cambios en la oblicuidad son muy importantes en latitudes altas.

Milankovitch y otros autores correlacionaron la curva de insolación con los cambios climáticos en el Pleistoceno, encontrando similitud entre la curva de insolación y la de registros geológicos.

Simpson (1940) ha criticado la teoría de Milankovitch, haciendo notar que los cambios de temperatura causados por los cambios de radiación han sido sobreestimados.

Van Woerkom (1953) también considera que los cambios en la órbita de la Tierra son insuficientes para explicar las eras glaciares, pero cree que deben tener su efecto sobre ellas.

Recientemente se ha tratado de probar la teoría astronómica del clima de Milankovitch en base a ciertos modelos del clima.

Shaw y Donn del Observatorio Lamont de la Universidad de Columbia en 1968 aplicaron una versión preliminar de mi modelo termodinámico del clima para determinar cuantitativamente cambios en la temperatura de la superficie debidos a variaciones en la insolación calculadas por Milankovitch.

Encontraron que las temperaturas obtenidas no son suficientemente frías para cambiar la cubierta de hielo actualmente existente.

Igualmente, Sellers (1969), Budyko (1969) y Saltzman y Vernekar (1971) aplicaron sus modelos, también para probar la teoría de Milankovitch, obteniendo la misma conclusión de Simpson, Woerkom y Shaw y Donn de que las variaciones de la órbita de la Tierra son insuficientes para producir los cambios glaciares.

Aunque las conclusiones de estos autores aparentemente desechan la teoría de Milankovitch, al menos como causa única de las variaciones en las glaciaciones, sus argumentos también están sujetos a crítica y sus resultados son discutibles, ya que los modelos del clima usados son muy simplificados. Por lo tanto, la teoría astronómica del clima de Milankovitch debe estudiarse seriamente en base a modelos del clima más realistas que los hasta ahora usados, utilizando datos cada vez más completos.

En el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de

México estamos utilizando una nueva versión del modelo termodinámico mucho más realista que la preliminar usada por Shaw y Donn, para calcular las variaciones de temperatura de la cubierta de nieve, de la precipitación y de otras variables climáticas debidas a los cambios en los elementos orbitales de la Tierra.

Utilizando valores de radiación de Vernekar (1972), correspondientes al máximo valor de la oblicuidad, se calcularon las anomalías de temperatura respecto a las condiciones presentes.

La figura 3 muestra las anomalías de temperatura para julio, en décimas de grados centígrados. Los máximos valores son de 8.8°C en América en la latitud 30°N ; de 10.0°C en África en la latitud 20°N y de 10.0°C en Asia entre las latitudes 20°N y 30°N . Estas anomalías indican que el verano correspondiente a la máxima oblicuidad fue mucho más caliente que el actual; en cambio, el invierno fue más frío, como se ve en la figura 4 en la que se muestran los valores para enero. Los valores de las anomalías son negativos, y su valor absoluto es aproximadamente la mitad del de julio.

En la figura 5 se muestra la cubierta de hielo para enero calculada para la época presente, y los incrementos respecto a ésta que se obtienen cuando la oblicuidad tiene el máximo valor de 24.51° . Los incrementos son relativamente pequeños, obteniéndose prácticamente la misma cubierta de nieve que en la actualidad.

Estos resultados son preliminares, y corresponden a la máxima oblicuidad de la Tierra; es interesante hacer los cálculos para el valor mínimo de oblicuidad, así como para las combinaciones de oblicuidad, excentricidad y longitud del perihelio, que producen extremos en la radiación recibida. Estos cálculos se están llevando a cabo en el Instituto de Geofísica, y esperamos que contribuyan a aclarar el papel de las variaciones de la órbita terrestre en la formación de las épocas glaciares.

EFFECTO DE LAS VARIACIONES SOLARES EN LOS CAMBIOS CLIMATICOS

Las relaciones solares—climáticas se han estudiado siguiendo dos enfoques: el primero y más antiguo es el de establecer posibles rela-

ciones empíricas entre la variabilidad solar y la variabilidad climática, el segundo es el relativo a la aplicación de modelos del clima para estudiar las relaciones solares-climáticas.

CICLOS DE ACTIVIDAD SOLAR-CLIMATICA

Según Willett (1974) hay tres ciclos de actividad solar que se deben considerar en relación a las fluctuaciones climáticas recientes: el ciclo de 11 años de manchas solares, el ciclo doble de manchas solares y el más largo ciclo secular.

El ciclo de manchas solares de 11 años (que en realidad oscila entre 9 y 14 años) es el de menos interés para el estudio de las fluctuaciones climáticas, ya que únicamente en las regiones ecuatoriales hay una correlación significativa entre el ciclo de 11 años y los elementos climáticos, especialmente la temperatura (Willett, 1974).

Willett ha demostrado que para las latitudes arriba de las ecuatoriales, desde las subtropicales hasta las polares, el ciclo doble de manchas solares completamente oscurece en significación climática al ciclo sencillo de 11 años, debido a que los máximos de las manchas solares alternados tienen efectos opuestos sobre la circulación atmosférica y el estado del tiempo. Por lo tanto, en la discusión siguiente nos referiremos a los ciclos de 11 años únicamente como la mitad positiva (mayor) o negativa (menor) del ciclo doble.

EL CICLO LARGO SECULAR-SOLAR-CLIMATICO

El ciclo secular-solar-climático estudiado desde 1951 por Willett, ha sido investigado por Sleeper (1970), en base a las configuraciones planetarias y la actividad solar magnética y de manchas solares. Tiene duración alternada de aproximadamente 100 y 80 años. En la figura 6 se muestran los tres ciclos seculares más recientes. Las siguientes características de las manchas solares de los 3 ciclos representados en la figura deben mencionarse (Willett, 1974).

- 1) La baja actividad de manchas solares y espaciamiento amplio (pro-

- medio de 12 años) de los máximos de los ciclos de 11 años, durante los primeros 25 a 30 años de cada ciclo secular.
- 2) Alta actividad de manchas solares y espaciamiento corto (promedio de 10 años) de los máximos de los ciclos de 11 años, durante la última mitad de cada ciclo largo.
 - 3) Al final de cada ciclo largo, la falla de la inversión del campo magnético solar (negativo o positivo) como es usual de un ciclo de 11 años al siguiente.
 - 4) El ciclo de 80 años difiere de los dos de 100 años en que el mayor máximo de 11 años, con la mayor rapidez de aumento de los valores máximos ocurre a la mitad del ciclo, en lugar de al final.

Willett ha correlacionado los ciclos seculares con las condiciones climáticas del planeta.

Ejemplos de dichas correlaciones se muestran en la figura 6, donde en la escala de tiempo se han indicado probables fechas de máximo calor y frío en latitudes medias del hemisferio norte. Los casos más y menos extremosos se indican con + y - respectivamente.

EL CICLO DOBLE DE MANCHAS SOLARES

Los aspectos climáticos del ciclo doble de las manchas solares se han estudiado en los registros de los últimos 100 años, para los que, indudablemente, los datos solares y climáticos son los mejores y más completos.

La característica solar-climática básica del ciclo doble de manchas solares, como se observó durante el período 1870-1970, es la diferencia de la circulación atmosférica existente al pasar del mínimo de manchas solares al máximo positivo, con la existente al pasar del mínimo de manchas solares al máximo negativo; es decir, en la figura 7 el paso de Min^- a Max^+ comparado con el paso de Min^+ a Max^- . La designación positiva y negativa se refiere a la polaridad del campo magnético solar, que en un ciclo secular se invierte de un máximo de 11 años al siguiente (Willett, 1975).

Willett (1975) ha demostrado que existen cambios básicos de la circulación atmosférica y características asociadas con el ciclo doble de manchas solares.

Durante muchos años, Willett ha utilizado las relaciones solares—climáticas mencionadas para hacer predicciones del tiempo a largo plazo, logrando, en algunos casos, cierto éxito en sus numerosas predicciones. Sin embargo, muchos expertos manifiestan cierta reserva respecto a este enfoque, ya que, hasta ahora, carece de una base física adecuada para fundamentar las relaciones solares climáticas que se cree que existen.

APLICACION DE MODELOS FISICOMATEMATICOS PARA EVALUAR EL EFECTO DE LAS VARIACIONES SOLARES EN LOS CAMBIOS CLIMATICOS

Recientemente ha recibido gran impulso el desarrollo de modelos físico-matemáticos y su aplicación al estudio de las fluctuaciones climáticas. Algunos modelos muy simplificados se han aplicado al estudio del efecto de las variaciones de la irradiación solar en el clima terrestre.

Entre los cálculos más conocidos del efecto de la variación de la irradiación solar en el clima, especial mención merecen los de Budyko (1969) quien, utilizando un modelo zonalmente promediado y altamente simplificado, encontró que pequeños cambios en la radiación de sólo 1.0 a 1.5% son suficientes para inducir una cubierta de hielo, que se extiende a las latitudes medias. Además demostró que, cuando la radiación decrece en 1.6%, la cubierta de hielo llega a latitudes medias hasta 50°N. Después empieza a moverse hacia las latitudes bajas hasta el ecuador como resultado de auto—desarrollo. Al mismo tiempo, la temperatura planetaria baja drásticamente y alcanza un valor de varios grados abajo de cero.

Por otro lado, Sellers (1969), usando un modelo similar al de Budyko, encontró que una disminución de 2 a 5% es suficiente para iniciar otra edad glacial.

Wetherald y Manabe (1975) también han llevado a cabo cálculos para evaluar el efecto de cambiar la irradiación solar, usando un modelo simplificado de circulación general. Encontraron que, contrariamente a

los resultados de Budyko, una disminución del 4% es aún insuficiente para inducir la inestabilidad de la capa de hielo.

La aplicación del modelo termodinámico (Adem, 1976) para determinar el efecto en el clima de una disminución en la irradiación solar, se muestra en las figuras 8, 9, 10 y 11.

La figura 8 muestra las anomalías respecto a los valores normales presentes de la temperatura en la superficie para enero y julio, en décimas de grados Celsius. En ambos casos, las anomalías son negativas, siendo mayores en julio.

El efecto de la distribución de continentes y océanos aparece en la solución, especialmente en julio, en que las mayores anomalías están sobre los continentes, donde alcanzan valores de -5.1 grados Celsius en la latitud de 30°N sobre América y de -6.0 grados en la latitud de 20°N sobre Asia.

La figura 9 muestra los promedios zonales de las anomalías de la temperatura en la superficie, para enero y julio, correspondientes a aumentos de la constante solar de 2%, -2% , -4% y -10% . Esta figura muestra que las anomalías de la temperatura en la superficie, con respecto a los valores actuales, tienen el mismo signo que el cambio en la constante solar, y los valores absolutos de las anomalías son sustancialmente mayores en verano que en invierno y aumentan hacia las latitudes bajas.

La figura 10 muestra las anomalías en la cubierta de nieve y hielo para octubre. La región cerrada alrededor del polo es la frontera normal de nieve y hielo calculada por el modelo para las condiciones actuales. Los cuadros marcados con II representan el aumento de nieve y hielo debido a la disminución de 2% en la constante solar; las regiones marcadas con IV son los aumentos adicionales en nieve y hielo, que aparecen cuando se disminuye la constante solar hasta 4%; finalmente, las regiones marcadas con X son los aumentos adicionales en nieve y hielo que aparecen cuando se disminuye la constante solar hasta 10%.

Utilizando la misma notación para las áreas cubiertas de hielo y nieve, la figura 11 muestra la evolución de la frontera de la nieve y el hielo para enero.

Los resultados de nuestros cálculos no están de acuerdo con los de

Budyko y Sellers; en cambio, concuerdan con los de Wetherald y Manabe. Hemos demostrado que una disminución de 2 a 4% en la irradiación solar no produce aumentos sustanciales en la posición de la frontera de nieve y hielo, y que aun una disminución tan grande como 10%, que produce importantes anomalías de hielo y nieve no produce una tierra totalmente cubierta de hielo como ocurre en los cálculos de Budyko con una disminución de sólo 1.5% en la irradiación solar.

Los experimentos numéricos continúan en la actualidad para aclarar el papel de las variaciones solares en los cambios climáticos. Es evidente que las discrepancias en los resultados de los varios autores se deben a los modelos usados. Es, por lo tanto, fundamental mejorar dichos modelos.

POLVO VOLCANICO

La influencia en el clima del polvo suspendido en la atmósfera se reconoció por primera vez en relación a las erupciones volcánicas. Las observaciones de radiación solar en la superficie de la Tierra que se llevaron a cabo después de la erupción espectacular del Krakatoa en 1883, mostraron una atenuación considerable. Las partículas permanecieron en la atmósfera por cerca de 5 años y hubo indicios de que los veranos después de la erupción fueron más fríos.

El principal proponente de la hipótesis de que el polvo volcánico controla las fluctuaciones climáticas terrestres fue Humphreys (1940). El efecto se manifiesta en dos formas: el polvo dispersa parte de la radiación solar y la refleja al espacio exterior, aumentando el albedo terrestre; y además, absorbe parte de la radiación antes de que llegue a la superficie, redistribuyendo la energía disponible en la atmósfera. En las erupciones volcánicas mayores, el polvo llega hasta la estratosfera donde puede permanecer varios años. Una reevaluación de algunos de los primeros registros de radiación para las primeras décadas del siglo XX muestra el efecto de la gran erupción del Katmai en 1912. Las décadas subsiguientes fueron volcánicamente quietas.

El interés en el polvo volcánico fue repentinamente revivido por la erupción del Monte Agung en marzo de 1963, que inyectó una gran

cantidad de partículas en la estratosfera. Después de la erupción, hubo no solamente puestas de sol espectaculares, sino que también, desde entonces, se observó una tendencia al enfriamiento de la temperatura en la superficie de la Tierra. Sin embargo, en contraste con este enfriamiento, la estratosfera ha mostrado un calentamiento en las latitudes tropicales, que algunos investigadores también han asociado con la misma erupción volcánica.

A la erupción del monte Agung le siguieron otras en los años sesenta.

También hay que hacer notar que las erupciones volcánicas no sólo emiten polvo, sino también gases, incluyendo bióxido de azufre y bióxido de carbono. También pueden inyectar en la atmósfera gran cantidad de vapor de agua, que puede penetrar en la estratosfera. Interacción química entre estos componentes y otros aerosoles explica la capa de sulfato de amonio, descubierta por primera vez por Junge.

Recientemente, Oliver (1975) ha intentado cuantificar la relación de temperatura media global a inyecciones de polvo volcánico, utilizando un enfoque empírico. Una solución representativa del análisis de Oliver se muestra en la figura 12, junto con sus hipótesis respecto a la cantidad de polvo volcánico inyectado en la estratosfera por varias erupciones desde la de Krakatoa en 1883 (ver Mitchell, 1975).

La línea continua es la desviación de la temperatura observada, respecto al valor promedio del período considerado. La curva discontinua representa los cambios de temperatura basados en el modelo de Oliver. La altura de las flechas para cada erupción en la parte de abajo indica el total de la inyección de polvo volcánico en el Hemisferio Norte, en 10^6 toneladas. Este resultado apoya la idea de que una parte significativa de las variaciones de la temperatura atmosférica media desde 1880 es atribuible a eventos volcánicos, y que el relativo calor del Hemisferio Norte entre aproximadamente 1920 y 1945 puede haber resultado de la casi total carencia de eventos volcánicos mayores en las tres décadas siguientes a la erupción del Katmai en 1912.

POLVO NO-VOLCANICO

A escala global, el polvo introducido por el hombre en la atmósfera es

en orden de magnitud menor que el introducido por erupciones volcánicas. Otra diferencia principal que se debe indicar, es el hecho de que la mayoría de las partículas sólidas introducidas por la actividad humana permanecen cerca de la superficie terrestre. En las capas bajas de la atmósfera, son interceptadas por la vegetación. Las partículas mayores tienen un promedio de permanencia de cerca de 10 días.

La naturaleza produce ocasionalmente una gran cantidad de polvo, al acarrear los vientos las arenas de los desiertos. Estas masas de polvo se han seguido con fotografías de satélites a través de grandes distancias. Voltz (1970) ha demostrado la existencia de polvo del Sahara en el mar Caribe; y durante el experimento GATE, se detectó la existencia de nubes de polvo del Sahara en medio del Atlántico.

BIOXIDO DE CARBONO

La posibilidad de que el bióxido de carbono producido por la actividad humana fuera un importante factor en el balance térmico de la Tierra no se consideró seriamente sino hasta que Callendar, en 1938, mostró evidencia de un aumento gradual de la concentración del bióxido de carbono en la atmósfera terrestre. Una cuestión importante es ¿cuánto ha aumentado el bióxido de carbono como resultado del consumo de los combustibles fósiles?

Según Landsberg (1974), parece razonable suponer los siguientes valores: Bióxido de carbono producido por la actividad humana promediado para toda la atmósfera 1.6 partes por millón, por año; actual razón de aumento en la atmósfera 0.7 partes por millón, por año; aumento desde 1860 a la fecha cerca de 10%. Ninguno de estos valores es alto; sin embargo, se han hecho varias extrapolaciones para el siglo XXI que son impresionantes. La estimación actual del valor de bióxido de carbono en la atmósfera para el año 2,000 es de 340 a 400 partes por millón, que equivale aproximadamente a un aumento de 10 a 50% sobre valores actuales. Las estimaciones de los valores futuros dependen de los resumideros existentes para el bióxido de carbono, de los cuales el principal son los océanos. El equilibrio con los bicarbonatos disueltos en las aguas del mar determina la cantidad de bióxido de carbono en la

atmósfera. En este intercambio de bióxido de carbono entre atmósfera y océano, la temperatura de las aguas superficiales entra como factor, ya que más bióxido de carbono es absorbido a temperaturas bajas que a altas.

Según Bacastow y Keeling (1973), en el año 2040 se tendrá el doble de bióxido de carbono actual, mientras que Hoffert estima que esto ocurrirá en el año 2025.

Utilizando una variedad de modelos, se han hecho determinaciones del aumento de temperatura debido a un aumento del doble en el bióxido de carbono. Los resultados varían según los autores y los modelos usados. Schneider (1975) ha hecho un análisis de dichos cálculos, y ha estimado que el efecto de duplicar el bióxido de carbono es aumentar .7 a 1.5 grados centígrados la temperatura media de la atmósfera.

En el supuesto de que el aumento hipotético de 100% en el bióxido de carbono se alcanzara, existen mecanismos de compensación que reducirían su efecto en el sistema climático y que no se han incluido adecuadamente en los cálculos. Por ejemplo, hay que considerar el efecto del vapor de agua y la nubosidad. Debido a los mecanismos de retroalimentación hay compensaciones continuas entre cambios de temperatura y estos elementos a través de los procesos de evaporación y condensación. Además, es interesante hacer notar que los aumentos de bióxido de carbono y los de polvo tienen efectos contrarios sobre la temperatura, y por lo tanto se cancelan.

EFFECTOS DE LA CONTAMINACION DEL AIRE

La influencia más espectacular de las ciudades sobre el ambiente atmosférico es la de la contaminación del aire. El inventario de contaminantes que existen en el aire por la actividad humana es muy grande, con efectos nocivos para la salud y el bienestar humanos. Nuestra atención se concentrará únicamente en los efectos de los contaminantes sobre el clima.

Entre estos efectos, se encuentran la atenuación de radiación solar por las partículas suspendidas que aunque afecta todo el espectro, es más pronunciado en longitudes de onda corta. Así, la radiación total

directa sobre las ciudades mayores se debilita en cerca de 15% en promedio, usualmente más en el invierno y menos en el verano. En particular, la radiación ultravioleta es, en promedio, reducida en 30%.

Debido a la gran cantidad de vapor de agua en el verano, hay interacciones fotoquímicas que producen partículas de diámetros mayores que los núcleos higroscópicos, y que permanecen en la atmósfera cuando los vientos son débiles para dispersar dichos contaminantes.

Dichas partículas producen una niebla que interfiere con el rango visual en las ciudades. Cuando existen inversiones bajas de temperatura, la acumulación de aerosoles puede causar 80 ó 90% de reducción del rango visual comparado con el ambiente no contaminado.

Afortunadamente, este efecto es reversible. Por ejemplo, en Londres, con cambios en prácticas de calentamiento, la insolación de invierno se ha aumentado en 70% en la última década y la visibilidad en invierno ha mejorado por un factor de 3, con el cambio de combustibles.

La nubosidad aumenta sobre las ciudades. Esto se debe probablemente al enorme número de núcleos de condensación producidos por la actividad humana.

Todo proceso de combustión, doméstico, industrial y, principalmente de los vehículos, contribuye a esto. Respecto a los procesos de condensación, el bióxido sulfúrico y los productos derivados de éste, juegan el papel principal. Este efluente de la actividad humana se ha duplicado en los 25 años 1940–1965, y ahora forma una parte sustancial de la contaminación. Hay evidencia de que la lluvia sobre las ciudades ha aumentado, pero el papel de los contaminantes en este aumento no es claramente entendido. Sin lugar a duda, la convección inducida por la isla de calor que hay en las ciudades, puede iniciar o intensificar aguaceros. Observaciones en varios intervalos de tiempo y en varias localidades indican un aumento de la precipitación para los días de lunes a viernes, comparados con los fines de semana. Estos aumentos usualmente van en paralelo con los aumentos en industrialización.

Aunque se han descubierto núcleos de hielo en efluentes industriales, una fuente particularmente efectiva de éstos existe en la combustión de automóviles. Muchas gasolinas contienen componentes de plomo, los

cuales al combinarse con iodina o bromina pueden actuar como núcleos congelantes, los cuales, según Schaefer (1966), pueden tener efectos sobre la precipitación.

Finalmente, mencionaremos la contaminación causada por los aviones. Debido al hecho de que operan en la troposfera alta y en la baja estratosfera, sus productos no son rápidamente eliminados. El tiempo promedio de residencia de las partículas en la baja troposfera es de aproximadamente 10 días; en cambio, en la estratosfera es próximo a 1 ó 2 años. El efecto más conspicuo de los aviones con motores de propulsión a chorro son las fajas de condensación que su paso provoca, las cuales ocasionalmente persisten. Según algunos investigadores, estas nubes artificiales pueden aumentar el albedo de la Tierra y causar enfriamiento.

Otros investigadores creen que los cristales de hielo que caen de esas nubes artificiales pueden nuclear sistemas de nubes más bajas y causar precipitación.

Mucha alarma ha habido con respecto a cambios estratosféricos con motivo de la introducción de transportes supersónicos comerciales.

Sus posibles efectos en el clima incluyen los siguientes aspectos:

La formación de nubes por la inyección de vapor de agua.

La interacción del vapor de agua producido por los aviones supersónicos con el ozono atmosférico.

Los efectos químicos o fotoquímicos sobre la capa de ozono, a los que nos referiremos a continuación.

OZONO ATMOSFERICO

El ozono existe en la troposfera en pequeñas cantidades y su mayor concentración está en una capa en la estratosfera a una altura de 20 a 25 km. Dicha capa juega un papel muy importante, protegiendo nuestro ambiente de las radiaciones ultravioleta.

Los rayos ultravioleta disocian el oxígeno molecular (O_2) en oxígeno atómico. Así, el oxígeno atómico se combina con el molecular para formar ozono (O_3).

Los óxidos nítricos que se encuentran en forma natural en la estra-

tosfera actúan como catalizadores para destruir el ozono, evitando un excedente del gas en los procesos de su formación.

Los óxidos nítricos son introducidos en la estratosfera por los aviones supersónicos, contribuyendo artificialmente a la destrucción de la capa de ozono.

Otra causa de formación de óxido nítrico son las explosiones termonucleares.

Otros componentes que destruyen la capa de ozono son los fluorocarburos utilizados en pulverizadores de insecticidas, desodorantes y pinturas, así como en refrigerantes de aire acondicionado.

Al disminuir la capa de ozono aumenta la cantidad de rayos ultravioleta que recibimos, lo cual puede producir efectos dañinos y aun mortales. Por ejemplo, se sabe que el exceso de rayos ultravioleta produce cáncer de la piel.

Esta información respecto al peligro de destrucción de la capa protectora de ozono ha sido publicada por varios investigadores. Para comprobar con mayor certeza dichos efectos, hay que llevar a cabo un estudio cuantitativo más riguroso, utilizando modelos matemáticos del clima que sean los más realistas posible, así como realizar observaciones adecuadas de las variaciones de ozono y de otros parámetros y variables pertinentes al problema.

EFFECTO DE LA DISTRIBUCION DE LOS OCEANOS Y LOS CONTINENTES

La distribución de continentes y océanos juega un papel importante en el establecimiento del clima y sus fluctuaciones.

La atmósfera tiene relativamente poca memoria, su capacidad de recordar se obtiene a través de la interacción con los océanos que tienen gran capacidad para almacenar energía y que evolucionan lentamente, guardan energía en el verano y después la utilizan en el invierno, regulando así la variación de temperatura durante el año.

En cambio, los continentes relativamente no almacenan energía, existiendo en ellos un balance casi instantáneo entre la energía absorbida por radiación y la energía perdida por evaporación y por transporte

vertical turbulento de calor sensible. Esta diferencia básica en el almacenamiento de energía en los océanos y en los continentes hace que las diferencias entre día y noche y entre las estaciones sean mayores en el interior de los continentes que en los océanos.

Donn y Shaw del Observatorio Geológico Lamont, de la Universidad de Columbia, han aplicado recientemente (1975) mi modelo, haciendo variar la distribución de continentes y océanos, de acuerdo con la deriva de los continentes en el pasado, para determinar las temperaturas existentes en la superficie de la tierra en diversas épocas geológicas.

Escogieron 5 épocas para hacer dichos cálculos:

| | |
|-------------------------------|----------------------------|
| Período triásico inicial: | hace 200 millones de años. |
| Período jurásico medio: | hace 150 millones de años. |
| Período mesozoico--cenozoico: | hace 65 millones de años. |
| Época oligocena: | hace 35 millones de años. |

y la época presente.

Empezaron con el triásico inicial con el objeto de preceder la separación de América del Norte y del sur de Europa y Africa y también para empezar a simular con el modelo la evolución del clima cuando la mayor parte del hemisferio norte estaba cubierto por agua.

Las reconstrucciones paleogeográficas utilizadas en los cálculos se muestran en las figuras 13, 14, 15 y 16 donde aparecen las posiciones de los continentes correspondientes a las 4 épocas mencionadas, junto con la posición actual.

Los resultados de los cálculos se presentan en la figura 17, que muestra la temperatura media en el hemisferio norte para dichas épocas en los últimos 200 millones de años, así como el promedio anual y el de invierno para la zona 60° – 70° norte. También se muestra el porcentaje de continente en esta zona de 60° a 70° de latitud norte.

El promedio hemisférico muestra un pequeño decrecimiento de temperatura al cambiar la distribución de los continentes y océanos.

En vista de que se sabe que las temperaturas tropicales no han cambiado significativamente durante los tiempos geológicos, se escogió para este estudio la zona ártica, donde hay indicios de que la temperatura ha tenido un rango de variación grande. Esta zona muestra un paleo-

cambio calculado con el modelo termodinámico de 8.2°C . De gran significación climática es el clima de invierno en esta zona sensitiva. Las soluciones de Donn y Shaw muestran que las temperaturas de invierno empezaron a estar abajo del punto de congelación hace 75 millones de años y continuaron reduciéndose hasta el presente. Esto está de acuerdo con la evidencia fósil de una disminución de temperatura en las latitudes altas.

Los cálculos muestran que la disminución más rápida de temperatura ocurrió hace 30 ó 40 millones de años, estableciéndose entonces las condiciones para el inicio de las glaciaciones.

En la figura 17 la curva en la parte inferior muestra el porcentaje de continentes en la zona ártica. La relación entre el aumento de la continentalidad en latitudes altas y el enfriamiento polar en el invierno es evidente y sugiere que el enfriamiento polar ha resultado de este cambio en continentalidad.

Estos cálculos muestran que la deriva de los continentes es una causa que afecta al clima en una escala de decenas de millones de años.

En una escala de tiempo mucho menor, la distribución de continentes y océanos puede considerarse en la época presente constante, pero hay aún variaciones tanto en los océanos como en los continentes que pueden afectar el clima, a través de las interacciones con la atmósfera.

EFECTO DE LAS VARIACIONES DE LAS CONDICIONES DE LA SUPERFICIE DE LOS CONTINENTES EN EL CLIMA

El efecto más obvio de las variaciones en la superficie es el debido a la variación de la cubierta de nieve y hielo que introduce cambios fuertes en el albedo de la superficie terrestre, que afectan profundamente el balance de energía del sistema.

Para estimar su importancia en el clima se ha aplicado el modelo termodinámico para calcular el efecto de aumentar el 10% el albedo de la superficie durante un mes (Adem, 1974).

La disminución en la temperatura en la superficie para enero y julio se muestra en la figura 18. En enero, el efecto en los océanos es pe-

queño, con valores máximos de 0.25°C . Sobre los continentes en latitudes medias y bajas, el efecto es importante, con los valores máximos de temperatura en la superficie de cerca de 2.5 a 3.5° en latitudes abajo de 30°N . En julio, la disminución en la temperatura superficial sobre los océanos es de cerca de 0.4 a 0.5°C , mientras que en los continentes es mucho mayor, alcanzando valores de 6° a 7°C en el cinturón comprendido de 20°N a 40°N .

El cambio de bosques a campos cultivables altera localmente el balance de calor. El albedo de la superficie generalmente aumenta en este proceso y la rugosidad aerodinámica decrece.

La irrigación de vastas áreas puede aumentar la precipitación debido a la reevaporación de humedad de tierras irrigadas.

Los efectos más pronunciados de las actividades humanas sobre el micro-clima han ocurrido en las ciudades. Sin embargo, muchos de estos efectos han llegado más allá de los confines urbanos y pueden muy bien clasificarse como meso-climáticos.

Numerosos investigadores han trabajado sobre este problema, y están a punto de obtener un modelo físico satisfactorio del efecto de las ciudades en el clima. Dicho modelo combina los dos principales efectos: uno es el efecto de las ciudades en los balances de calor y agua, y el otro es el que afecta la configuración del flujo y la turbulencia.

LA INTERACCION DE LOS OCEANOS Y LA ATMOSFERA

El importante papel de la interacción entre los océanos y la atmósfera ha sido indicado por varios autores en numerosas investigaciones (Monin, 1972).

La influencia de las anomalías de la temperatura superficial oceánica en el carácter de la circulación atmosférica y la importancia de los mecanismos de retroalimentación de la interacción entre el océano y la atmósfera han sido demostradas para varios casos particulares por Namias (1975) y Bjerknes (1964).

Para demostrar la importancia de los efectos de las anomalías de temperatura de los océanos en el estado del tiempo y el clima, mostraré los resultados de un experimento utilizando el modelo termodinámico

en el que se supone que durante los meses de diciembre y junio la temperatura superficial oceánica es 2°C más caliente que los valores normales, y se han calculado las anomalías que se generan con esta anomalía inicial, en los meses subsecuentes de enero y julio respectivamente.

La figura 19 muestra las anomalías en la temperatura en la superficie, en décimos de grados centígrados.

En los océanos, la anomalía inicial de 2°C ha disminuido hasta valores de cerca de 1.5°C en julio y de 1.25°C a 1.5°C en enero, estando los valores mayores en las latitudes bajas. También se generan anomalías sobre los continentes que decrecen de las costas a las regiones centrales de los continentes, en julio, de 1.5°C a 0.5°C y en enero de 1.25°C a 0.7°C en América; y de 1.0°C a 0.25°C en Eurasia.

La figura 20 muestra las correspondientes anomalías de temperatura a una altura de 5.5 Kms. sobre el nivel del mar. Sobre los océanos, en enero los valores son de cerca de 1°C y en julio varían de 1.25°C a 1.6°C en el Pacífico y de 1.0°C a 1.8°C en el Atlántico.

Sobre los continentes, en enero, las anomalías varían de 1°C a $.75^{\circ}\text{C}$ en América y de 1.0°C a 0.25°C en Afro-Eurasia y en julio de 1.25°C a 0.6°C en América y de 1.0°C a 0.25°C en Afro-Eurasia.

Las anomalías de temperatura se generan simultáneamente con anomalías de las funciones de calentamiento y otros campos meteorológicos (Adem, 1973).

El modelo termodinámico se ha utilizado para hacer predicciones mensuales de las anomalías de temperatura y precipitación utilizando como datos iniciales las temperaturas de los océanos, así como las anomalías de la cubierta de nieve y las temperaturas a los 700 mb (Adem, 1964, 1970).

El relativo éxito de las predicciones confirma en cierta medida que las anomalías de la temperatura de los océanos influyen en las fluctuaciones del estado del tiempo y el clima.

CONCLUSIONES GENERALES

El clima terrestre ha cambiado al evolucionar la Tierra, y al modificarse

las condiciones naturales de su sistema climático.

La variabilidad solar afecta al clima evidentemente en todas las escalas de tiempo. Aunque las relaciones solares--climáticas carecen aún de una explicación física adecuada han sido utilizadas por Willett para hacer predicciones del tiempo a largo plazo.

El polvo inyectado en la atmósfera por las erupciones volcánicas es una causa de las fluctuaciones climáticas firmemente establecida, y que como la actividad solar, afecta al clima en todas las escalas del tiempo.

Si nos restringimos a escalas de tiempo que incluyen fluctuaciones relativamente recientes, las fluctuaciones climáticas asociadas con las variaciones de la órbita terrestre, así como con la deriva de los continentes, son pequeñas; por consiguiente, se pueden despreciar. Sin embargo, para un estudio básico sobre las épocas glaciares y sus fluctuaciones, es esencial incorporar dichas causas.

Otra posible causa de las variaciones climáticas es la variación de la masa y composición de la atmósfera que, en épocas recientes, pueden considerarse constantes, excepto principalmente por las variaciones de bióxido de carbono, agua, ozono y polvo, cuyos efectos hay que tomar en cuenta.

La actividad del hombre introduce en la atmósfera energía calorífica, polvo, bióxido de carbono, ozono y otros componentes cuyos efectos en el clima en la actualidad aún son de un orden de magnitud menor que las fluctuaciones asociadas con procesos naturales, pero que localmente pueden crear variaciones climáticas sobre todo en la vecindad de las grandes ciudades, y que de continuar el ritmo actual de su producción, pueden llegar a tener consecuencias mayores sobre el clima a escala global, en un futuro no muy lejano (50 a 100 años).

El hombre introduce también cambios en la superficie de los continentes al crear ciudades, campos de cultivo y depósitos de agua, que tienen efectos locales, pero que al aumentar su área pueden llegar a influir sobre el clima a una escala más amplia.

La creciente utilización de transportes aéreos, especialmente los supersónicos, crea anomalías en el balance energético, así como en el equilibrio de la capa protectora de ozono, que hasta ahora han tenido efectos insignificantes pero que, según algunos investigadores, en el

futuro pueden llegar a ser significativos.

Los océanos son los reguladores del clima. Producen, además, fluctuaciones de gran escala a través de la circulación de las aguas profundas, introduciendo anomalías de temperatura en la superficie mediante las surgencias de agua fría procedente de las capas profundas del océano.

También hay fluctuaciones en las temperaturas de los océanos, que representan anomalías en el almacenamiento de energía del sistema climático y que constituyen la única memoria de dicho sistema, y gracias a lo cual es factible hacer predicciones fisicomatemáticas de fluctuaciones climáticas de período corto y predicciones mensuales y estacionales de las anomalías de la temperatura, de la precipitación y de otras variables climáticas.

En el estado actual de la climatología y la meteorología, se pueden efectuar predicciones de las condiciones medias y mensuales y estacionales con cierto éxito, utilizando métodos termodinámicos y empíricos.

Para períodos mayores no es posible hacer una predicción propiamente dicha, sin embargo, se pueden usar los registros climáticos existentes para planificar óptimamente las diversas actividades en que una posible fluctuación tiene efectos importantes.

De los registros históricos y el análisis de las causas y los efectos de los cambios climáticos se obtienen las siguientes conclusiones:

- 1) Los cambios climáticos mayores ocurren a escalas de tiempo de miles y millones de años.
- 2) En el futuro inmediato (correspondiente a escala de tiempo de décadas y siglos) los cambios climáticos que se esperan son del tipo de los ocurridos en el pasado inmediato.
- 3) En ciertas áreas, pequeñas fluctuaciones climáticas pueden tener un impacto grande en las actividades humanas; y llegar a tener desastrosas consecuencias. Sin embargo, en base a una utilización de la información histórica, suplementada con el análisis de las posibles causas de las fluctuaciones, es posible planificar las actividades tomando en cuenta la posibilidad de ocurrencia de las fluctuaciones climáticas aminorando sus efectos sociales y económicos desastrosos y utilizando óptimamente sus efectos benéficos.

RECONOCIMIENTOS

En la preparación de esta conferencia, además de los trabajos del autor, se utilizaron algunos excelentes artículos de otros autores. A continuación se mencionan los principalmente usados:

Para la introducción se utilizó la publicación No. 16 de GARP sobre la base física del clima y del modelado del clima (varios autores, 1974): Para la sección de teoría astronómica del clima, un artículo de Van Woerkom (1953); para los ciclos de actividad solar-climática uno de Willett (1974); para las secciones de polvo volcánico, bióxido de carbono y efectos de la contaminación del aire un artículo de Landsberg (1974); para la sección de polvo volcánico uno de Mitchell (1975); para la de bióxido de carbono uno de Schneider (1975) y para la sección del efecto de la distribución de los océanos y los continentes, uno de Donn y Shaw (1975).

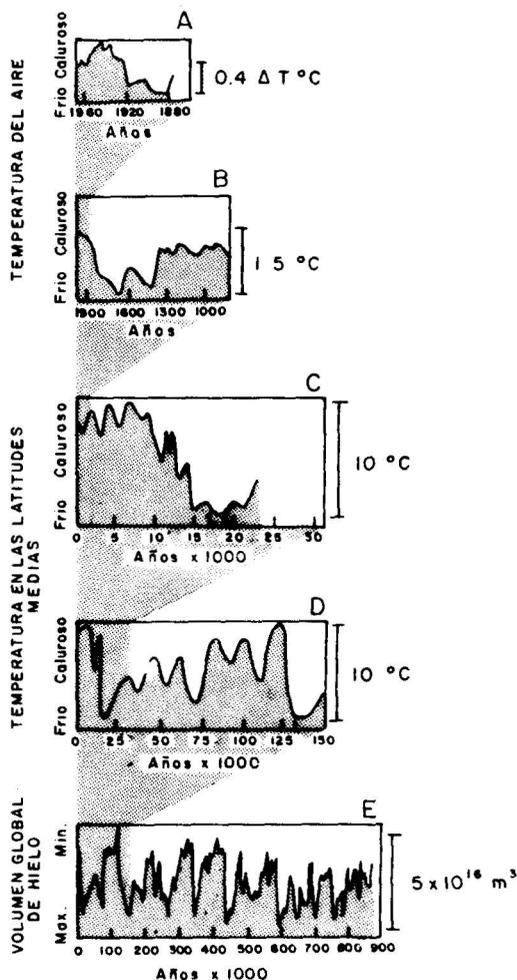


Figura 1. Tendencias generales en el clima global en el último millón de años: (A) Cambios en los promedios de 5 años de la temperatura en la superficie sobre la región 0-80°N. (B) Índice de severidad de invierno para Europa Oriental. (C) Tendencias generalizadas de la temperatura del aire en el Hemisferio Norte, basadas en las fluctuaciones de los glaciares alpinos, cambios en las líneas de árboles, fluctuaciones marginales en glaciares continentales y cambios en configuraciones de vegetación registrados en el espectro de polen. (D) Tendencias generalizadas de la temperatura de la superficie del mar en latitudes medias, en registros de polen y en registros del nivel del mar de todo el mundo. (E) Fluctuaciones de volumen global de hielo registradas como cambios en la composición isotrópica de plancton fósil en una muestra profunda del fondo del mar (según U. S. National Academy of Sciences, 1974).

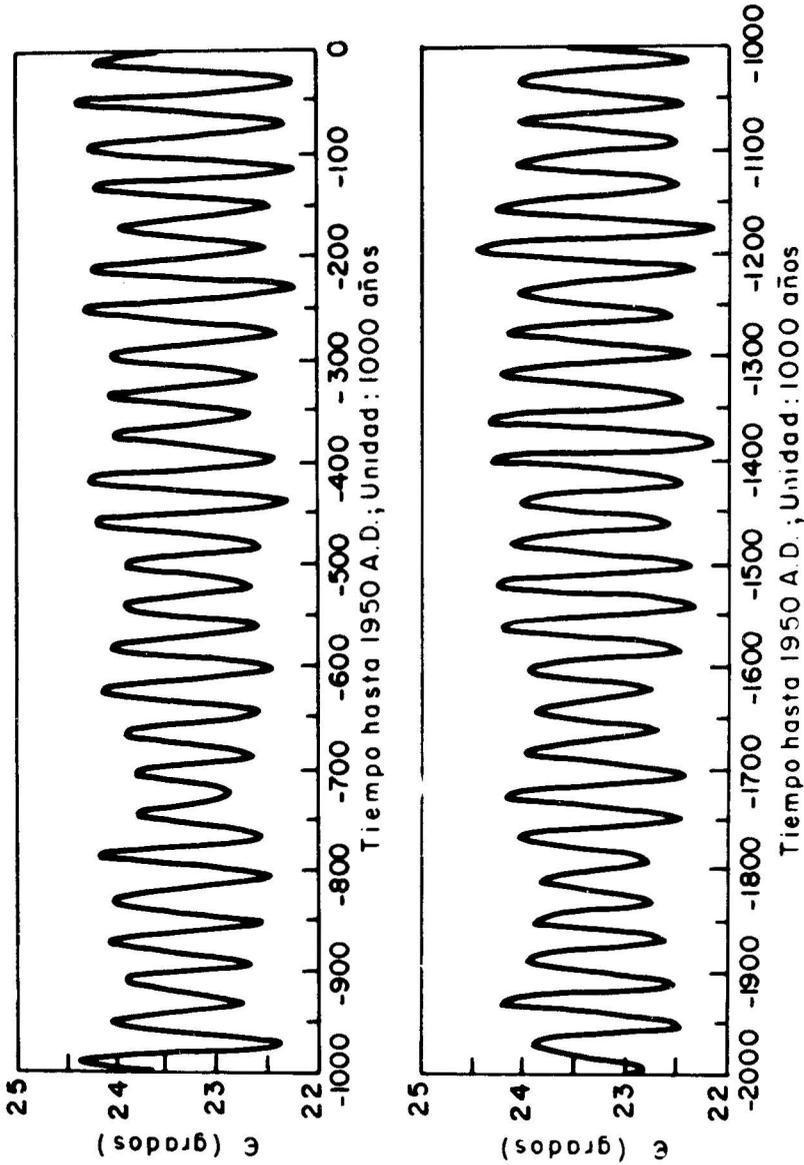


Figura 2. Valores calculados de la oblicuidad de la eclíptica. La abscisa es el tiempo antes de 1950, en miles de años (según Vernekar, 1972).

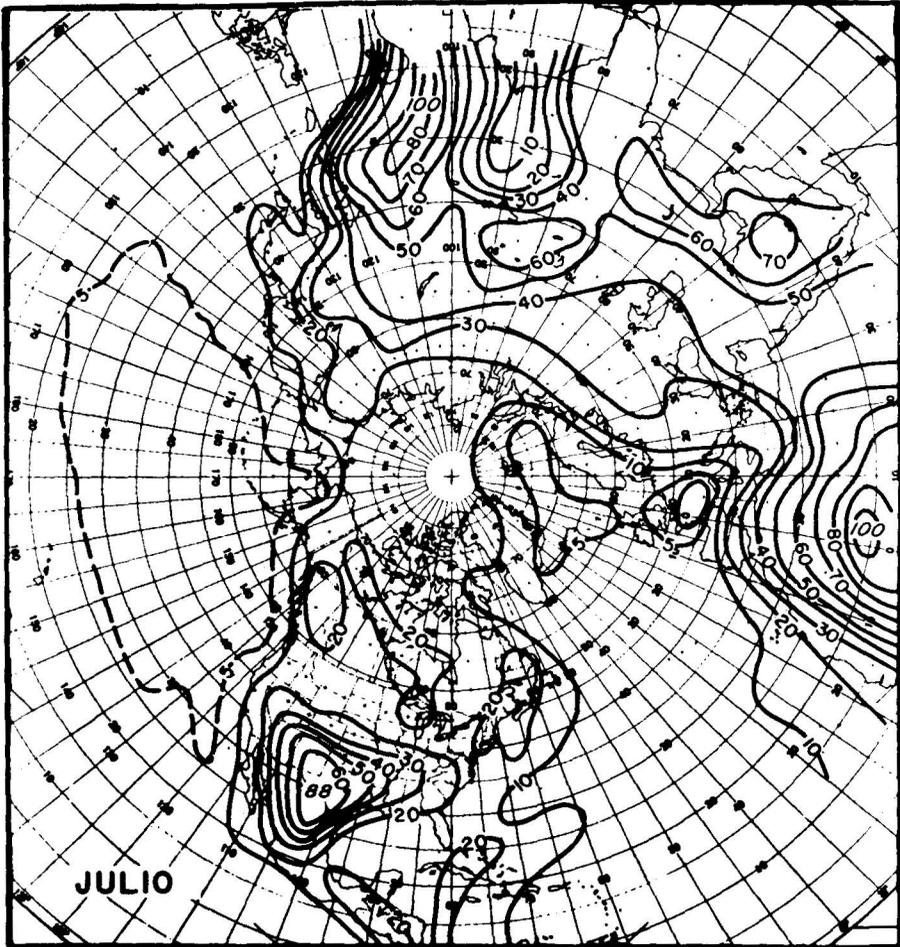


Figura 3. Anomalías para julio, respecto a los valores actuales de la temperatura en la superficie de la Tierra, calculadas con el modelo termodinámico para el máximo valor de la oblicuidad de la órbita terrestre ocurrido en los últimos 2 millones de años, en décimas de grados centígrados.

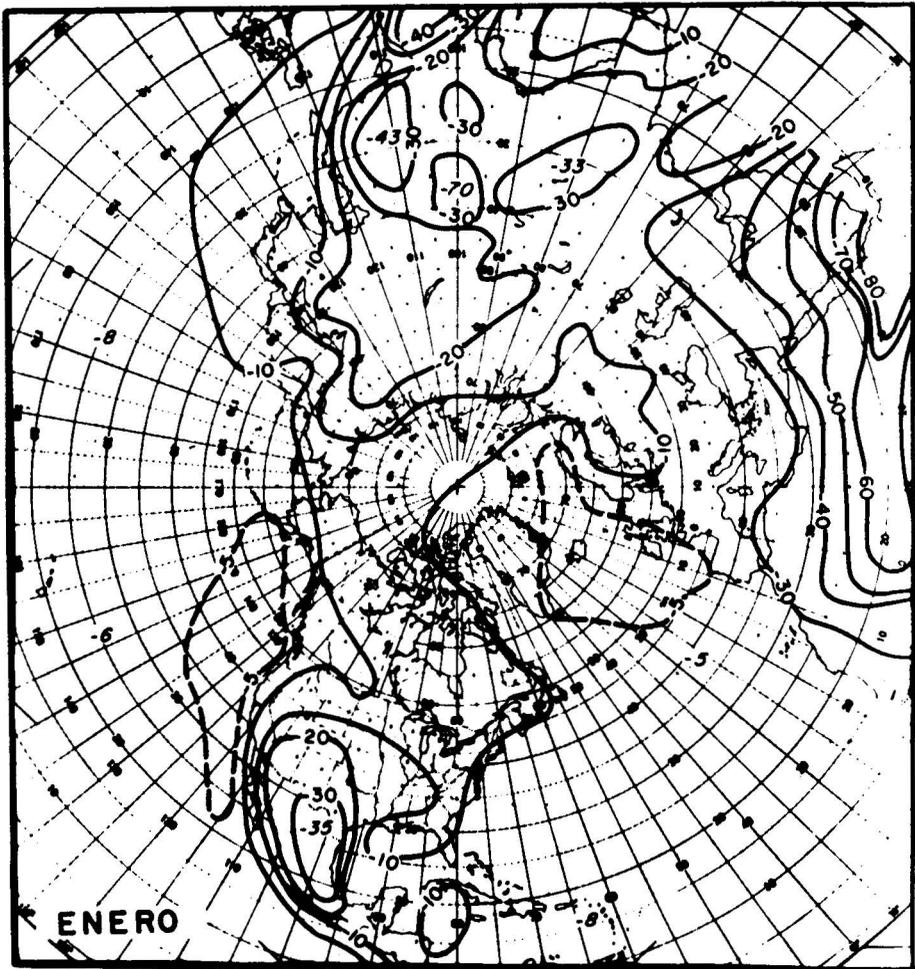


Figura 4. Anomalías, para enero, respecto a los valores actuales de la temperatura en la superficie de la Tierra calculadas con el modelo termodinámico para el máximo valor de la oblicuidad de la órbita terrestre ocurrido en los últimos 2 millones de años, en décimas de grados centígrados.

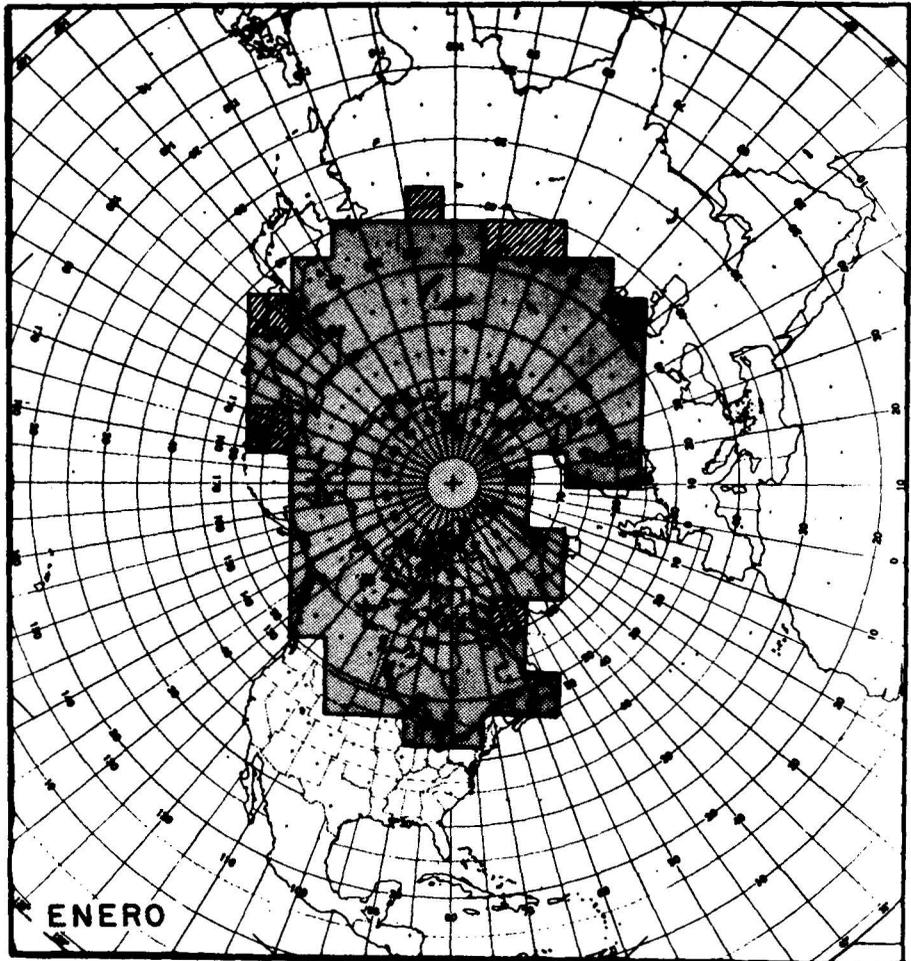


Figura 5. Cubierta de hielo y nieve, calculada con el modelo termodinámico, para enero para la época presente y los incrementos respecto a ésta que se obtienen cuando la oblicuidad de la órbita terrestre tiene el máximo valor ocurrido en los últimos dos millones de años.

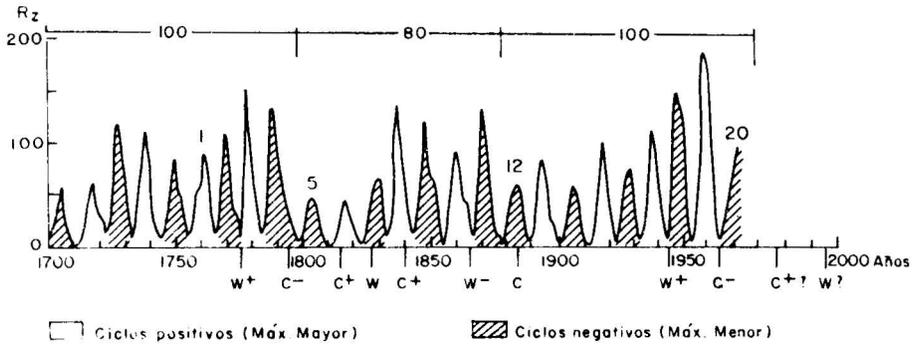


Figura 6. Números anuales alisados de manchas solares y extremos de temperatura (según Willett, 1974).

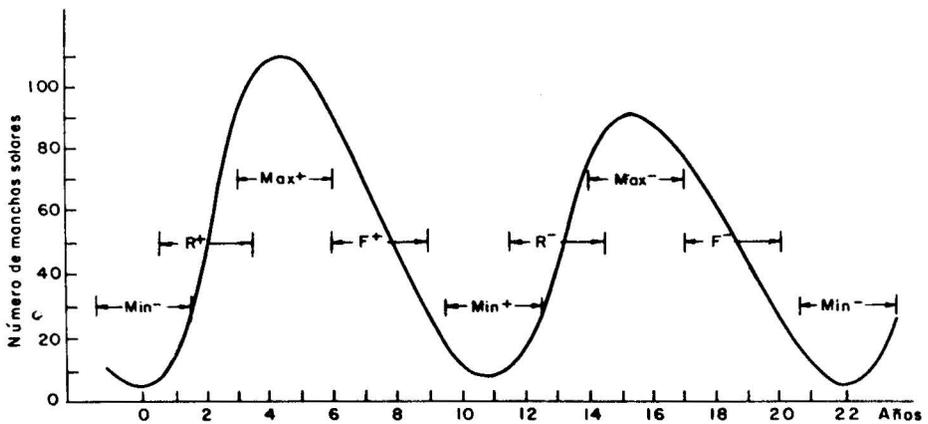


Figura 7. El ciclo doble de manchas solares obtenido del promedio 1870-1970 (según Willett, 1974).

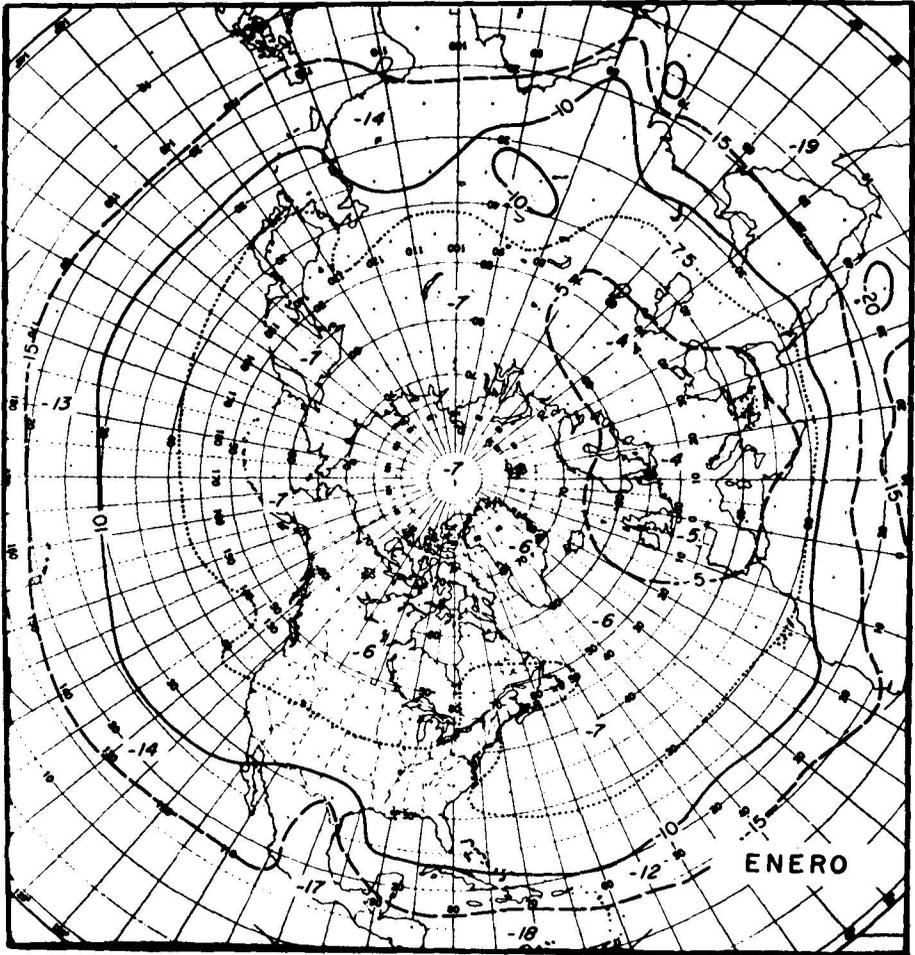


Figura 8. Incremento en la temperatura de la superficie de la Tierra, en décimas de grados centígrados, para enero y julio, debido a una disminución de dos por ciento en la constante solar.



Figura 8. Incremento en la temperatura de la superficie de la Tierra, en décimas de grados centígrados, para enero y julio, debido a una disminución de dos por ciento en la constante solar.

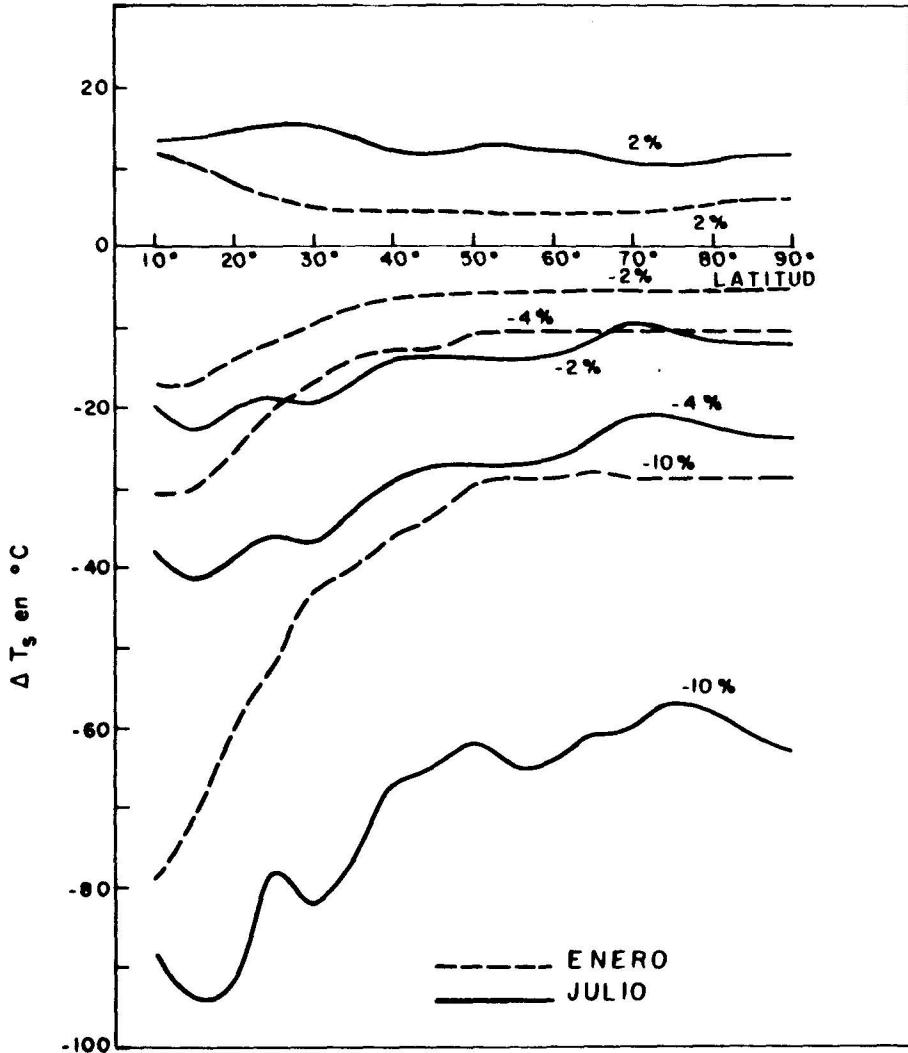


Figura 9. Valores zonalmente promediados de los cambios en las temperaturas en la superficie calculados con el modelo termodinámico, para enero y julio, correspondientes a aumentos de la constante solar de 2% -2% -4% y -10%, en décimas de grados centígrados.

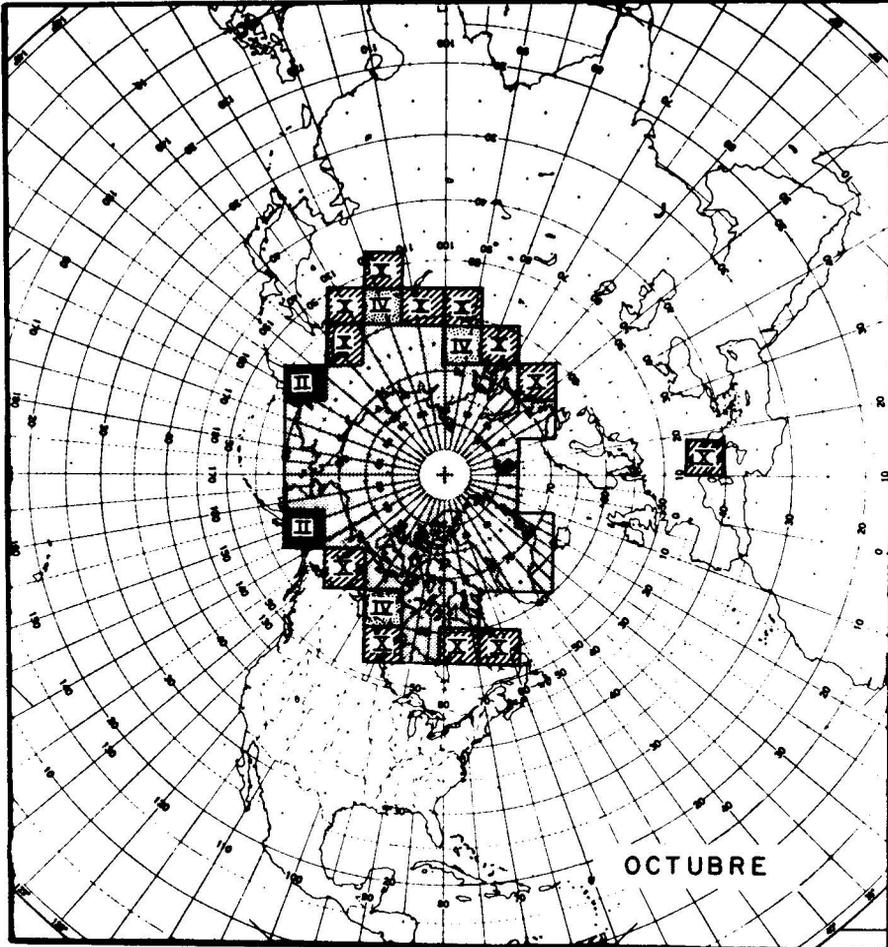


Figura 10. Cubierta de hielo y nieve para octubre, calculada con el modelo termodinámico. La región cerrada alrededor del polo es la frontera normal para las condiciones actuales. Los cuadros marcados con II representan el aumento de nieve y hielo debido a la disminución de 2% en la constante solar; las regiones marcadas con IV son los aumentos adicionales en nieve y hielo, que aparecen cuando se disminuye la constante solar hasta 4%; y las regiones marcadas con X son los aumentos adicionales en nieve y hielo que aparecen cuando se disminuye la constante solar hasta 10%.

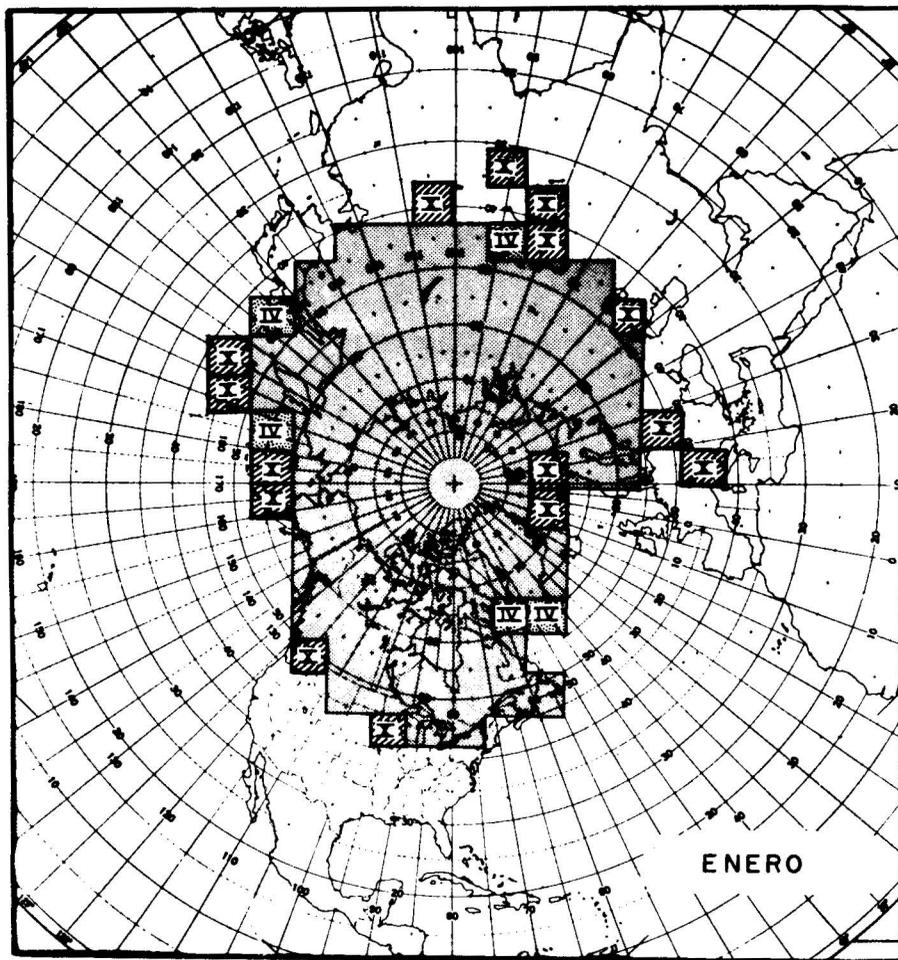


Figura 11. Cubierta de hielo y nieve para enero calculada con el modelo termodinámico. La región cerrada alrededor del polo es la frontera normal para las condiciones actuales. Los cuadros marcados con II representan el aumento de nieve y hielo debido a la disminución de 2% en la constante solar; las regiones marcadas con IV son los aumentos adicionales en nieve y hielo que aparecen cuando se disminuye la constante solar hasta 4%; y las regiones marcadas con X son los aumentos adicionales que aparecen cuando se disminuye la constante solar hasta 10%.

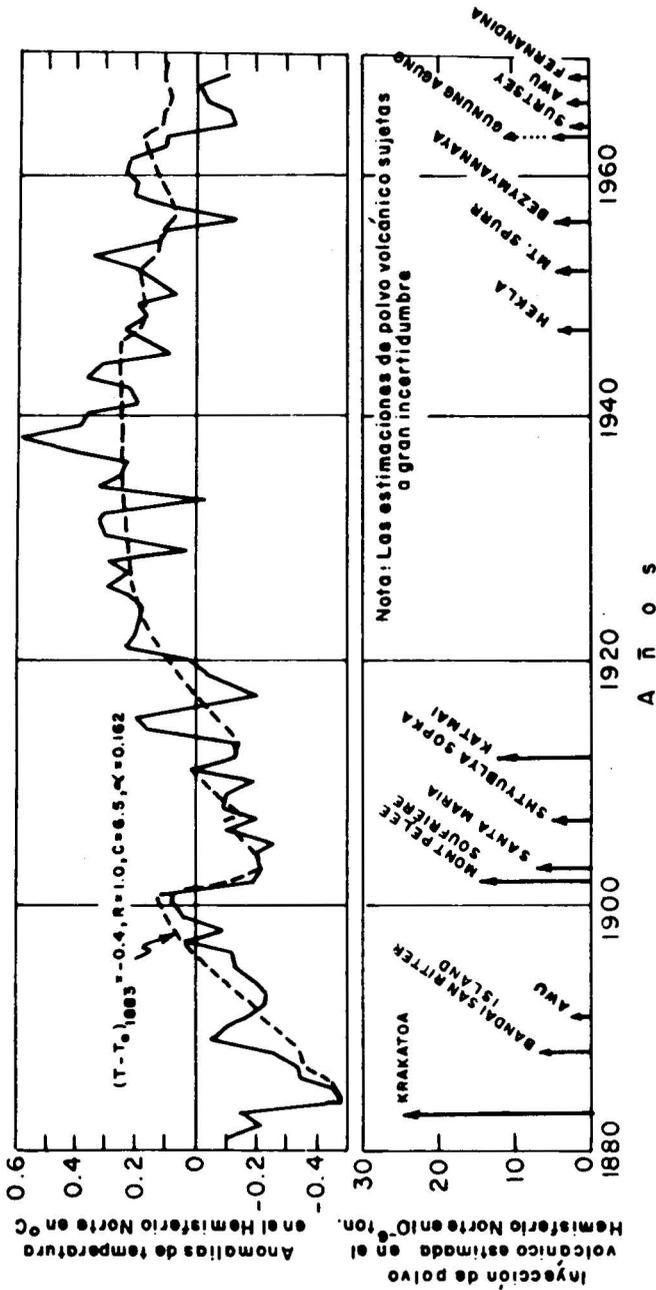


Figura 12. Variación de la temperatura media del aire en la superficie de la Tierra para el hemisferio norte desde 1881, y estimación de los cambios hemisféricos de temperatura que resultan de las erupciones volcánicas identificadas en la parte inferior de la figura, según Oliver, 1975. La línea continua es anomalía de temperatura observada respecto al valor medio. La curva discontinua es la estimación de los cambios de temperatura basada en el modelo de Oliver. La altura de las flechas para cada erupción en la parte inferior indica el polvo volcánico supuestamente inyectado en el hemisferio norte, en 10⁶ toneladas (figura publicada por J. M. Mitchell, 1975).

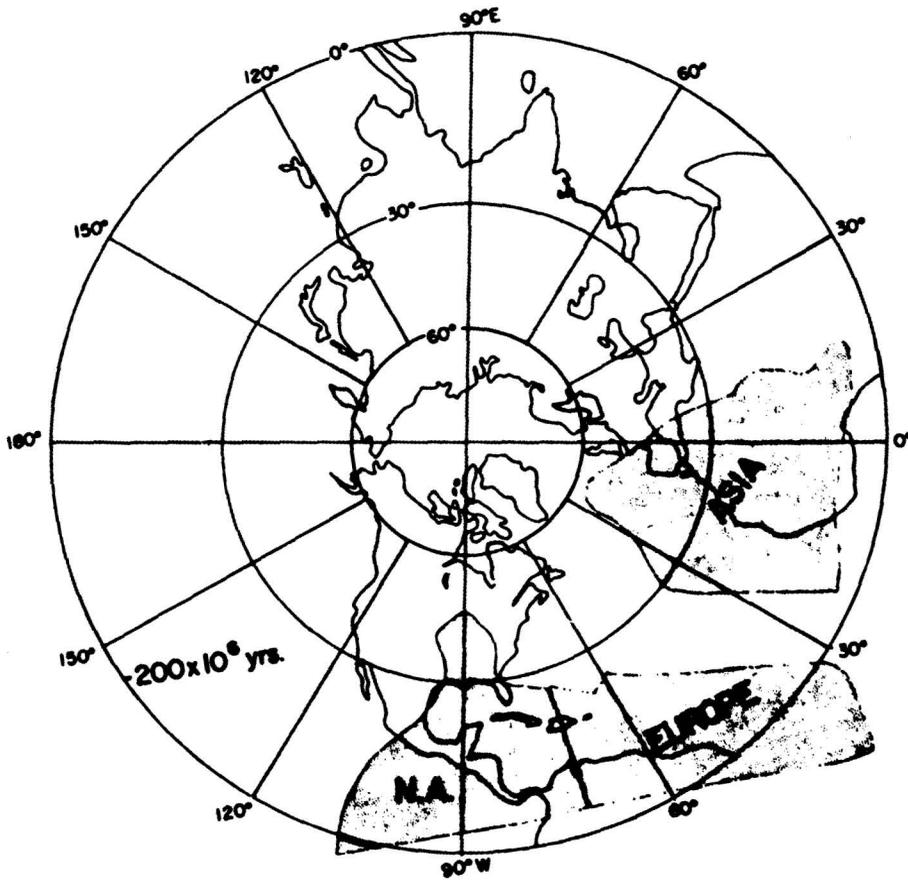


Figura 13. Reconstrucción de los continentes en el hemisferio norte en el periodo Triásico inicial, hace 200 millones de años (según Phillips y Forsyth, 1972).

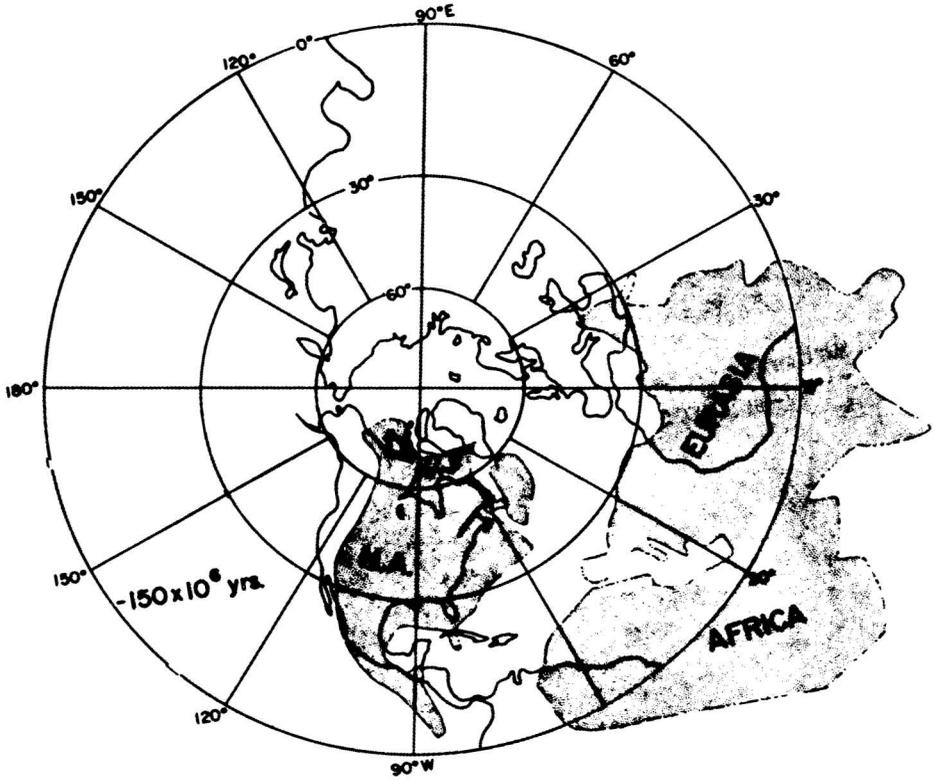


Figura 14. El hemisferio norte en el periodo Jurásico medio, hace 150 millones de años (según Phillips y Forsyth, 1972).

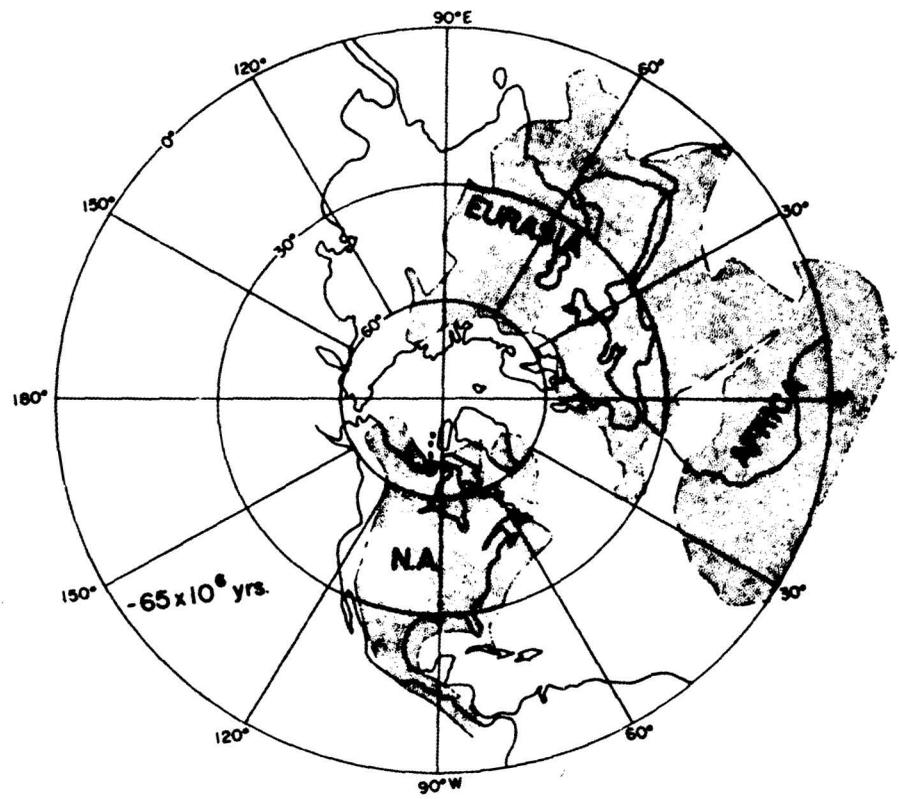


Figura 15. El hemisferio norte durante el periodo de transición Mesozoico-Cenoico, hace 65 millones de años (según Phillips y Forsyth, 1972).

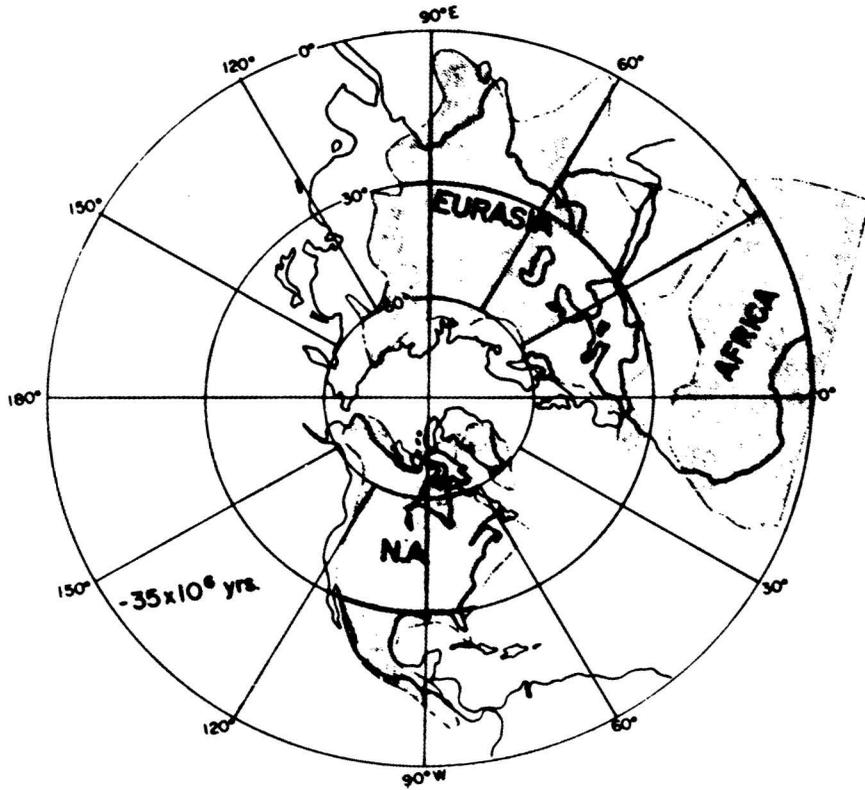


Figura 16. El hemisferio norte durante la época oligocena, hace 35 millones de años (según Phillips y Forsyth, 1972).

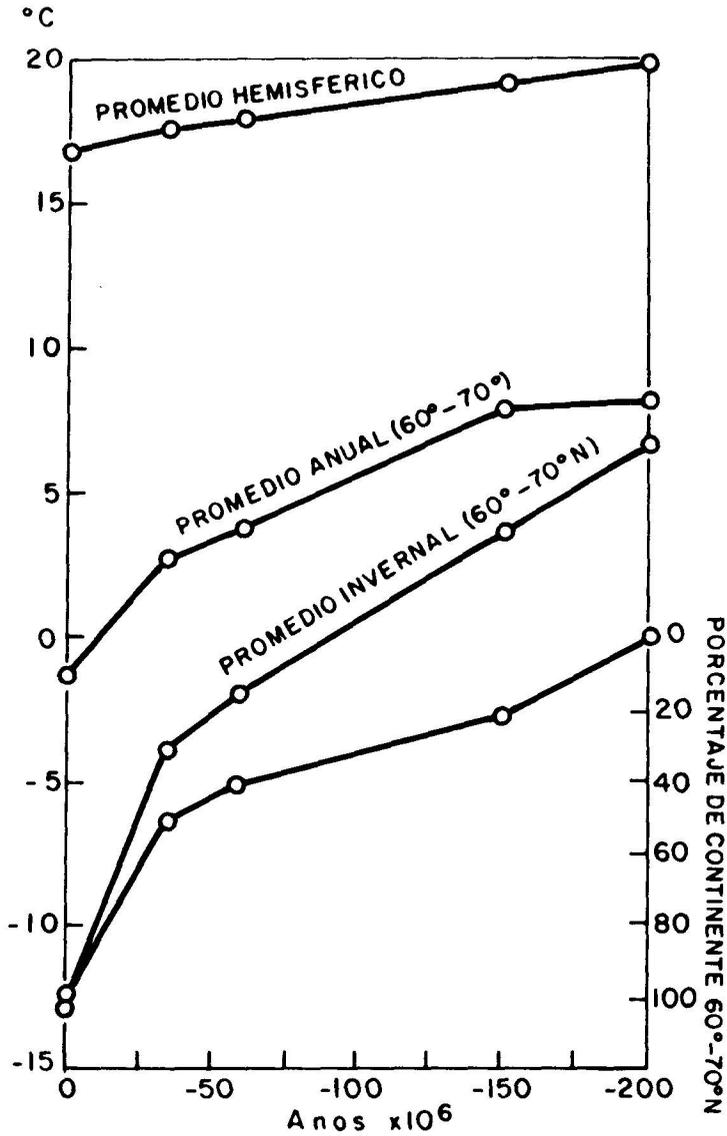


Figura 17. Cálculos de la temperatura en la superficie de la Tierra del periodo Triásico al presente, aplicando el modelo termodinámico de Adem a paleogeografía (según Donn y Shaw, 1975).

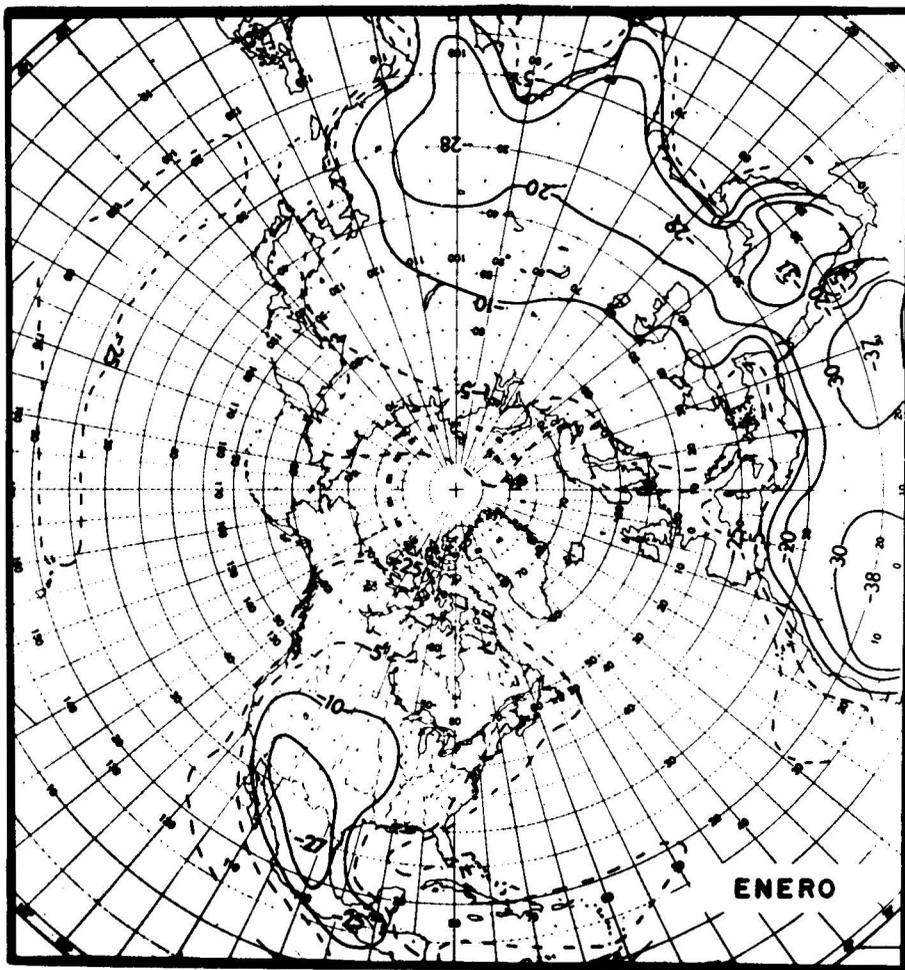


Figura 18. Incremento en la temperatura de la superficie de la Tierra debido a la adición de 10 por ciento en el albedo de la superficie, en décimas de grados centígrados.

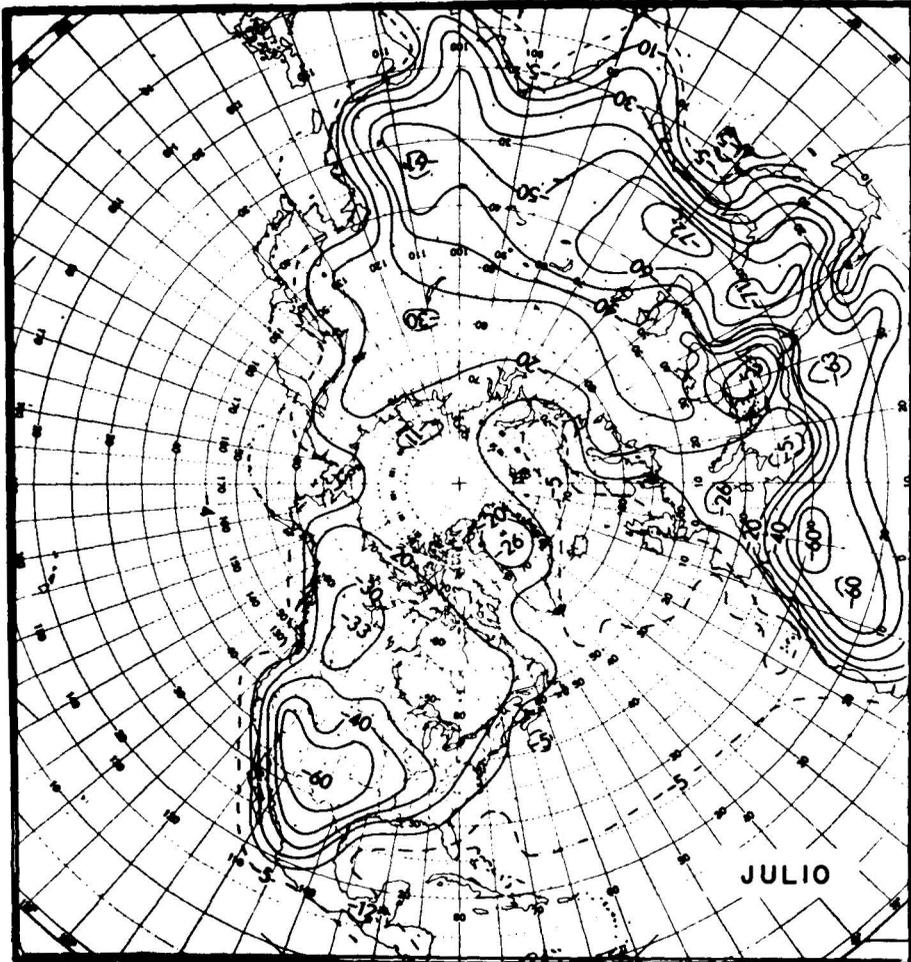


Figura 18. Incremento en la temperatura de la superficie de la Tierra debido a la adición de 10 por ciento en el albedo de la superficie, en décimas de grados centígrados.

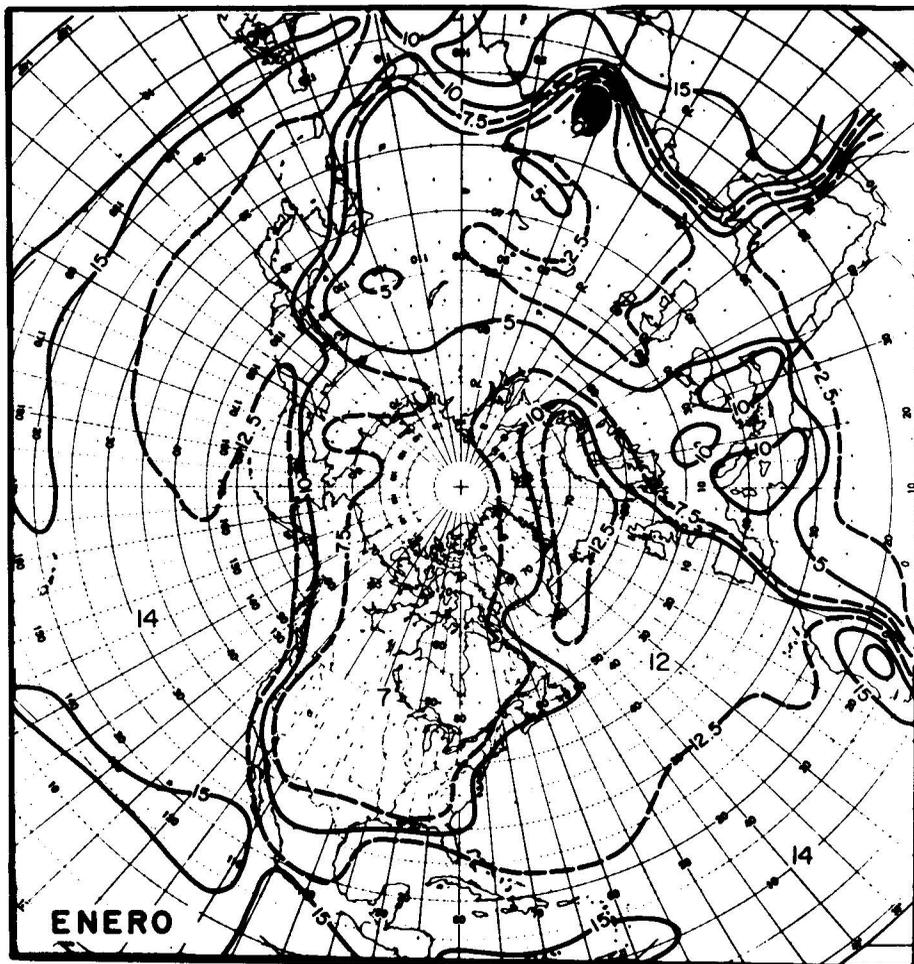


Figura 19. Incremento en la temperatura mensual de la superficie de la Tierra debido a un aumento de 2°C en la temperatura de la superficie de los océanos en el mes anterior, en décimas de grados centígrados.

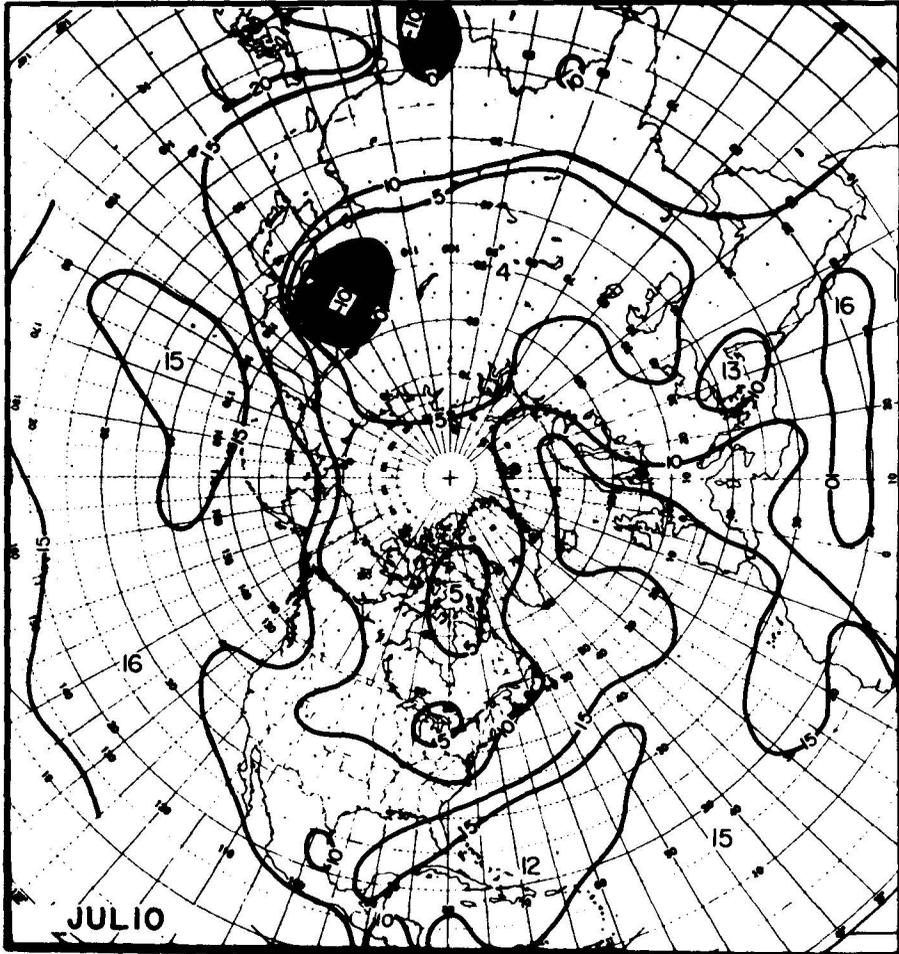


Figura 19. Incremento en la temperatura mensual de la superficie de la Tierra debido a un aumento de 2°C en la temperatura de la superficie de los océanos en el mes anterior, en décimas de grados centígrados.

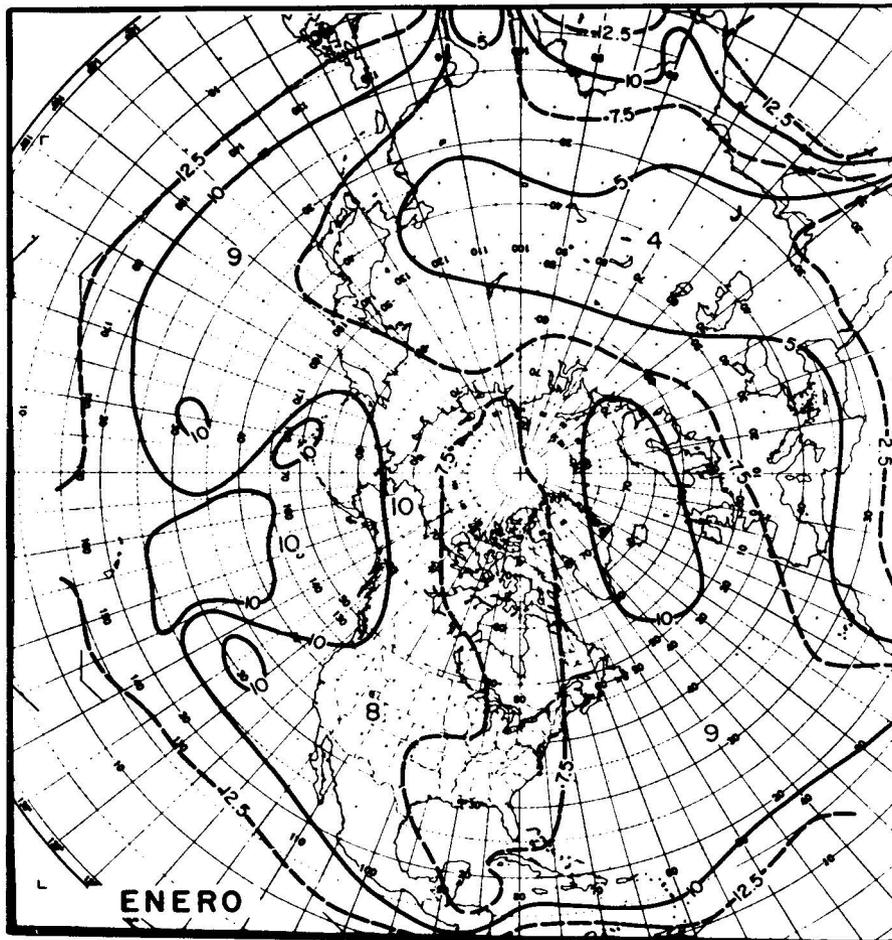


Figura 20. Incremento de la temperatura mensual en la troposfera media, debido a un aumento de 2°C en la temperatura de la superficie de los océanos en el mes anterior, en décimas de grados centígrados.

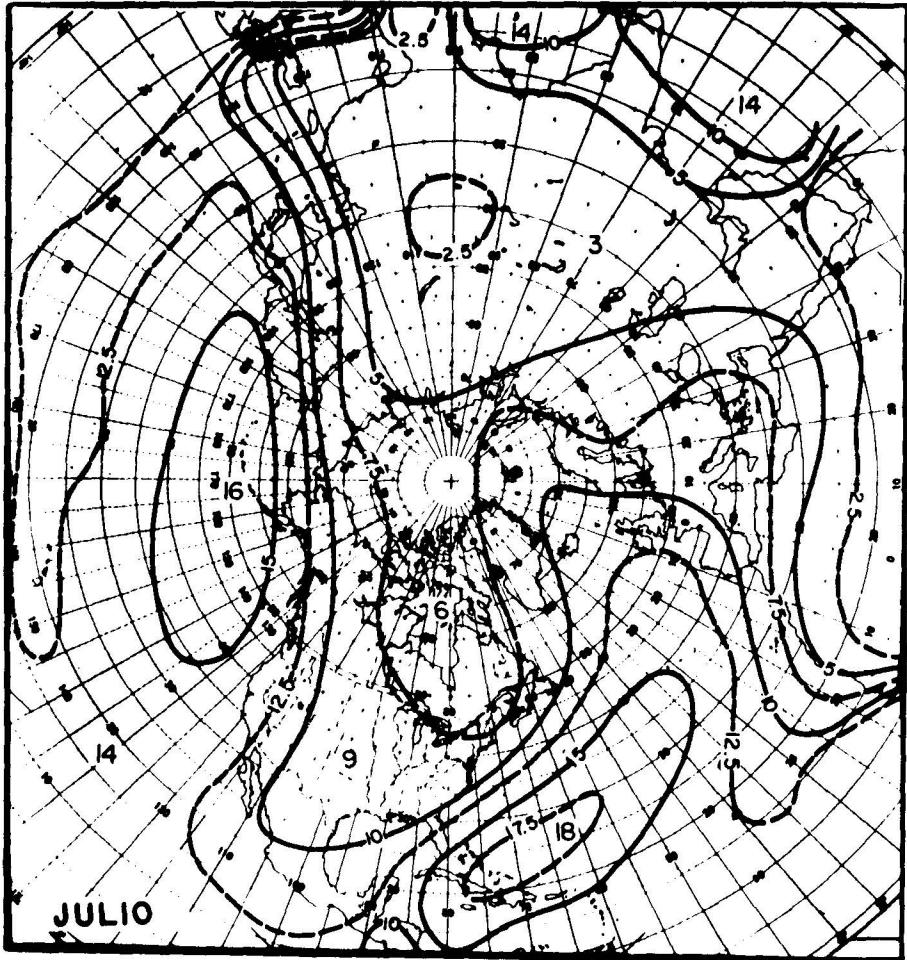


Figura 20. Incremento de la temperatura mensual en la troposfera media, debido a un aumento de 2°C en la temperatura de la superficie de los océanos en el mes anterior, en décimas de grados centígrados.

BIBLIOGRAFIA

- ADEM, J., 1964. On the physical basis for the numerical prediction of monthly and seasonal temperatures in the troposphere-ocean-continent system. *Mon. Wea. Rev.*, 92: 91-104.
- ADEM, J., 1970. Incorporation of advection of heat by mean wind and by ocean currents in a thermodynamic model for long-range weather prediction, *Mon. Wea. Rev.* 98: 776-786.
- ADEM, J., 1973. Ocean effects on Weather and Climate, *Geofís. Intern.* 13: 1-71.
- ADEM, J., 1974. Thermodynamic approach for the study of climatic changes. Proceedings of the Symposium on Physical and Dynamic Climatology, Leningrad, August 1971, WMO, No. 347, pp. 359-389. (Disponible en la Organización Meteorológica Mundial.)
- ADEM, J., 1976. Sensitivity studies using a climate thermodynamic model, with particular reference to the effect of changing the solar constant. Sometido para su publicación en *Journal of Atmospheric Sciences*.
- ADHEMAR, 1842. Les révolutions de la mer, déluges périodiques, París.
- BACASTOW, R. and C. D. KEELING, 1973. Carbon and the biosphere. G. M. Woodwell and E. V. Pecan, Editores, USAEC CONF-720510, p. 86 (NTIS, Springfield, Va.).
- BJERKNES, J., 1964. Atlantic Air-Sea Interaction. Advances in Geophysics, 10, Academic Press, New York & London.
- BUDYKO, M. I., 1969. Effect of solar radiation variations on the climate of the earth. *Tellus*, 21: 611-619.
- BUDYKO, M. I., 1974. Climate and life. Academic Press, New York and London, 508 pp.
- CALLENDAR, G. S., 1938. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 64: 223-237.
- CROLL, J., 1875. Climate and time. London.
- DONN, W. L. and D. SHAW., 1975. The evolution of climate. Proceedings of the WMO/IAMAP Symposium on long-term climatic fluctuations, WMO. No. 421, XII, 503 pp. (disponible en la Organización Meteorológica Mundial).
- HOFFERT, M. I., 1974. Global distributions of atmospheric carbon dioxide in the fossil-fuel era: A project. *Atmos. Environ.* 8: 1225-1249.
- KOPPEN & WEGENER, 1924. *Die klimate der geologischen Vorzeit*.
- LANDSBERG, H. E., 1974. Man-Made Climate Changes, Proceedings of the Symposium on Physical and Dynamic Climatology. Leningrad August 1971, WMO No. 347, pp. 262-303 (disponible en la Organización Meteorológica Mundial).
- MANABE, S. and R. T. WETHERALD, 1975. The effects of doubling the CO₂

- concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.* 32: 3–15.
- MILANKOVITCH, M., 1920. Théorie mathématique des phénomènes termiques produits par la radiation solaire. Belgrade.
- MILANKOVITCH, M., 1938. Die chronologie des Pleistocäns, *Bull. Acad. Sci. Math. et Nat.* Belgrade, 4, 49.
- MITCHELL, J. M., 1975. Note on Solar Variability and Volcanic Activity as potential sources of climatic variability, the physical basis of climate and climate modelling, GARP Publication Series No. 16, WMO, pp. 127–136 (disponible en la Organización Meteorológica Mundial).
- MONIN, A. S., 1972. Weather Forecasting as a problem in Physics. The MIT Press, Cambridge, Mass., 199 pp.
- MITCHELL, J. M., 1975. Note on Solar Variability and Volcanic Activity as potential sources of climatic variability, the physical basis of climate and climate modelling, GARP Publication Series No. 16, WMO, pp. 127–136 (disponible en la Organización Meteorológica Mundial).
- MONIN, A. S., 1972. Weather Forecasting as a problem in Physics. The MIT Press, Cambridge, Mass., 199 pp.
- NAMIAS, J., 1975. Short Period Climatic variations. Collected Works 1934 through 1974. University of California. San Diego, 905 pp.
- NEWCOMB, S., 1876. *American Journal of Sciences and Arts*, II.
- OLIVER, R. C., 1975. On the response of mean temperature to stratospheric dust: an empirical approach (manuscrito inédito mencionado por Mitchell (1975)).
- PHILLIPS, J. and D. FORSYTH, 1972. Plate tectonics, paleomagnetism and the opening of the Atlantic. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83, p. 1584.
- SALTZMAN, B. and A. D. VERNEKAR, 1971. Note on the effect on earth orbital radiation variations on climate. *J. Geophys. Res.*, 76:4195–4197.
- SCHNEIDER, S. H., 1975. On the Carbon Dioxide–Climate Confusion. *J. Atmos. Sci.* 32:2060–2066.
- SELLERS, W. D., 1969. A global climatic model based on the energy balance of the earth–atmosphere system. *J. Appl. Meteor.* 8: 392–400.
- SHAW, D. M. and W. L. DONN, 1968. Milankovitch radiation variations. A quantitative evaluation. *Science*, 162: 1270–1272.
- SIMPSON, G. C., 1940. Possible causes of change of climate and their limitations. *Proc. Linnean Soc.* 152: 190–219.
- SLEEPER, H. P., Jr., 1970. Bi-stable oscillation modes of the sun and long range predictions of solar activity, NASA Contract No. NAS 8–20082, Northrop Corporation, Huntsville, Ala., 35807, 58 pp.
- U. S. NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, 1974. Understanding climatic change, a program for action. Report of the Panel on Climatic Variations to the

- U. S. Committee for GARP.
- VARIOS AUTORES, 1974. Physical and Dynamic Climatology, Proceedings of the Symposium on Physical and Dynamical Climatology, Leningrad, August, 1971. WMO No. 347, 381 pp. (disponible en la Organización Meteorológica Mundial).
- VARIOS AUTORES, 1975. The physical basis of climate and climate modelling. GARP publication series No. 16, WMO, 265 pp. (disponible en la Organización Meteorológica Mundial).
- VERNEKAR, A. D., 1972. Long period global variations of incoming solar radiation. *Meteorological Monographs*, 12, No. 34. Publicado por American Meteorological Society.
- VOLTZ, F. E., 1970. Spectral skylight and solar radiance measurements in the Caribbean: maritime aerosols and Sahara dust. *J. Atmos. Sci.*, 27: 1041–1047.
- WETHERALD, R. T. and S. MANABE, 1975. The effects of changing the solar constant on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 32: 2044–2059.
- WILLETT, H. C., 1974. Do recent climatic trends portend an imminent ice age? *Geofís. Intern.* 14: 265–302.
- WOERKOM, A. J. J. van, 1953. The astronomical theory of climate changes. Climatic change, evidence, causes and effects. Editado por Harlow Shapley, Harvard University Press, Cambridge, 318 pp.