

CLIMATOLOGIA, ¿CIENCIA DESCRIPTIVA O FISICA?

Por H. FLOHN *

En muchos servicios meteorológicos la prospección y el análisis climatológico del propio territorio, se ha detenido en una fase que tiempo atrás pudo considerarse satisfactoria. En la actualidad, hace falta un análisis mucho más refinado: necesitamos mapas climatológicos en gran escala (topoclimatología, según el método propuesto por C. W. Thornthwaite y R. Geiger, y desarrollado por K. Knoch); necesitamos hacer uso de parámetros estadísticos en muchas aplicaciones prácticas; necesitamos rellenar no pocos huecos regionales en nuestro conocimiento descriptivo y nos vemos obligados a informar a nuestros clientes sobre el clima de localidades de las que carecemos en absoluto de datos. Aquí se plantean varias cuestiones: nuestro conocimiento de la evapotranspiración actual no es completo ni mucho menos; incluso aquellas medidas, aparentemente sencillas, como la de la lluvia, adolecen de errores sistemáticos, mayores de lo que se suponía. En nuestras grandes ciudades la contaminación atmosférica crece de día en día afectando los climas local y regional. Se observa una tendencia climática bien marcada de calentamiento global desde 1880, aproximadamente, hasta 1945, seguido en la actualidad de un extenso enfriamiento, especialmente sensible en las regiones subárticas. Sin embargo, aunque podemos describir con más o menos precisión todos estos hechos, no somos capaces de predecirlos. Sin embargo, no podemos eludir el conocimiento de los efectos que pueden producir las modificaciones en gran escala de nuestro medio ambiente, bien sea para un previsible futuro, bien que hayan comenzado inadvertidamente desde largo tiempo atrás.

Con esto llegamos al punto crucial: Durante varias décadas los servicios de climatología realizaron una excelente labor limitada al análisis y descripción del clima actual, perfeccionando las técnicas de diagnóstico y echando una mirada marginal hacia los climas pretéritos. En la actualidad, el análisis climatológico debe completarse, cada vez más, con la predicción climatológica.

Permítanme presentar algunos ejemplos sobre tan importantes problemas con los cuales hemos tropezado o tropezaremos pronto muchos de nosotros:

- (a) Dado un proyecto hidroeléctrico en una región montañosa con glaciares, ¿cuál será la masa de agua aportada por los glaciares, o cuál será la cantidad total de agua aportada pasados cincuenta o cien años?
- (b) Dado un proyecto de embalse en gran escala, necesitado con urgencia para riego y/o producción de energía eléctrica, ¿cuál será realmente la cantidad de evaporación que podemos esperar que se produzca en esa masa de agua, todavía inexistente, evaporación que va a engendrar un

* El profesor Dr. H. Flohn es director del Instituto Meteorológico de la Universidad de Bonn, en la República Federal de Alemania. Este artículo está basado en una conferencia pronunciada por él en la quinta reunión de la Comisión de climatología (Ginebra, 1969).

nuevo sistema local de circulación térmica? ¿Cómo afectará al clima de las zonas circundantes?

- (c) Dado que se observa una frecuencia creciente de temporales, inundaciones costeras, y grandes olas oceánicas, ¿debemos cambiar nuestros dispositivos técnicos en los diques y en la construcción de buques?
- (d) Dado un clima actualmente árido pero con síntomas de haber sido más húmedo en otra época: ¿Cuál es la causa de este cambio climático? ¿Ha contribuido el hombre inadvertidamente al mismo con sus cultivos, erosión del suelo, etc.? ¿Cómo puede reestablecerse la situación anterior?
- (e) Dado un proyecto técnico de modificación del clima, por ejemplo para el adelanto de la fusión primaveral de las nieves en la región subártica con medios artificiales, ¿cuál será el efecto de una tal modificación a escala de 10, 1.000 ó 100.000 kilómetros cuadrados?

Hay que admitir francamente que la climatología descriptiva no es apta para resolver tales problemas. En muchos casos, nuestra vida no es quizá bastante larga para atestiguar el fracaso o el éxito de una simple respuesta adivinada. Pero como profesionales no podemos esquivar nunca la responsabilidad de encontrar soluciones satisfactorias a tan árduas cuestiones. Acabamos de ser testigos de la llegada del primer hombre a la superficie de la luna; esta ha sido indiscutiblemente una de las mayores proezas de la historia. Pero puesto que la luna y otros planetas son definitivamente inhabitables, nuestra preocupación debe dirigirse a nuestra propia habitación, a este planeta tierra con su atmósfera y sus recursos. Prescindiendo de lo rápidamente que crece la población humana, nuestros hijos y nuestros nietos tendrán que vivir en este triste planeta.

Todos estamos de acuerdo sobre el rápido crecimiento de la población humana. En la actualidad, es de unos 3.600 millones y aumenta, aproximadamente, en un 2 por 100 anual, en dos individuos por segundo. No vamos a discutir aquí este explosivo crecimiento con todas sus implicaciones económicas y morales, cómo detenerlo o no detenerlo: esto cae fuera de nuestra tarea. Debemos esperar que antes de que acabe el presente siglo se habrá llegado a una población de seis mil millones (6.10^9), y que los niños nacidos este año vivirán quizá en un mundo de diez mil millones de habitantes a mediados del siglo próximo.

Sin embargo, este crecimiento exponencial ha producido ya algunos síntomas alarmantes de alteraciones inadvertidas del clima, y esto sí que pertenece, sin duda, a nuestra tarea. Aquí vamos a limitar nuestra atención a las modificaciones climáticas regionales o en macro-escala. F. Davitaya ha medido en el hielo de un glaciar del Cáucaso, a una altura de más de 4.000 metros, un aumento creciente del depósito de polvo del orden de 25 veces en comparación con la relación constante durante el período 1792-1922 (Fig. 1). La cantidad de radiación solar directa recibida por la superficie terrestre queda reducida, no sólo en ciudades tales como Washington D. C., Alma Ata (Asia Central) y Davos (Suiza), donde los focos locales difícilmente pueden ser evitados, sino también en el Observatorio de Mauna Loa en Hawai (3.394 metros), a una distancia de más de 4.000 kilómetros del centro continental de contaminación más próximo. En el parque no perturbado de Yellowstone, en invierno, el contenido de polvo en el aire ha aumentado 10 veces en sólo cinco

años. Como consecuencia de la industrialización la frecuencia de nieblas en muchas poblaciones ha aumentado rápidamente, por ejemplo, en Halle (República Democrática alemana) de trece a cincuenta y siete días al año, mientras que en Londres, gracias a un cambio en la calefacción, ha disminuido en un 20 por 100 o más.

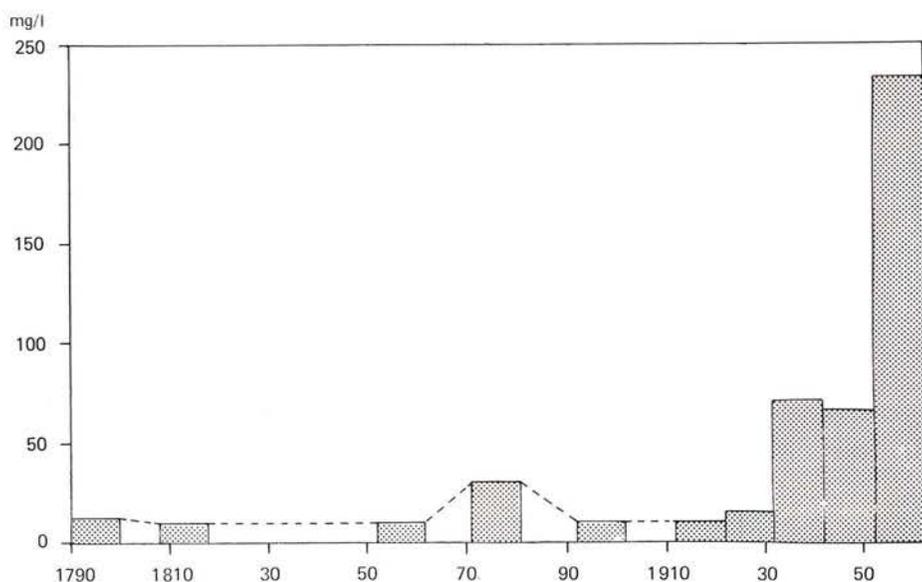


Figura 1 — Cantidad de polvo caído en un glaciar del Cáucaso (Davitaya, 1965)

Las operaciones agrícolas producen variaciones en el albedo del suelo, no ciertamente muy grandes, pero sí de gran extensión. La conversión de la vegetación natural (bosques, estepas) en cultivos, ha afectado a amplias zonas continentales durante el último milenio. El creciente contenido de polvo en la atmósfera —debido a la labor del arado, quema de matorrales, erosión del suelo y destrucción de la vegetación, industrias y calefacción—, hace que disminuya la radiación solar directa S . Como consecuencia de la radiación reflejada aproximadamente un 65 por 100 de la pérdida se recupera como radiación celeste difusa H , con lo que la radiación global ($S + H$) es decreciente. Podríamos intentar estimar el cambio en la radiación global: en la misma zona climática, con casi iguales temperaturas y contenidos de vapor de agua, el valor medio veraniego del factor de turbidez de Linke (establecido hace cuarenta años), era de 3,05 sobre las zonas boscosas, virtualmente no modificadas, de las cercanías de Helsinki o de Leningrado, de 3,67 sobre las estaciones, aparentemente libres de polvo de la Europa central (montañas del Harz o del Taunus), y de 4,40 sobre las grandes ciudades. Transformando estas cifras en variaciones de la radiación global podemos deducir que, desde el comienzo de la colonización de Europa central, la radiación global ha disminuído en un 5 por 100 y, localmente, hasta en un 12 por 100.

La influencia de los cambios de vegetación sobre la radiación de onda larga es ciertamente no despreciable, pero la radiación reflejada efectiva es relativamente insensible a las modificaciones artificiales.

Por el contrario, el balance calorífico puede resultar fuertemente modificado, especialmente la *razón de Bowen*, es decir, la relación entre el flujo vertical del calor sensible y el calor latente. Debido a la desigual rapidez en el consumo de agua de los distintos cultivos y de la vegetación natural, en todas las regiones agrícolas la razón de Bowen resulta afectada y puede variar entre cerca de cero y muy por encima de 10. En muchas zonas de regadío puede, incluso, ser negativa, debido al conocido efecto de oasis, por el cual la advección de aire cálido del desierto transfiere calor a la superficie evaporante y contribuye así a la energía de evaporación. La tabla 1 da valores anuales representativos de los balances de calor en oasis de regadío del sur de Túnez y del semidesierto que los rodea.

TABLA I

Valores representativos del balance calorífico anual,
al sur de Túnez, Lat. 33-34,5° N.

	<i>Semidesierto</i>	<i>Oasis</i>
Radiación global ($S + H$) (langley día ⁻¹)	425	425
Albedo (supuesto)	0.25	0.15
Radiación terrestre efectiva (langley día ⁻¹)	160	150
Radiación neta (Q) (langley día ⁻¹)	158	211
Evapotranspiración actual (cm año ⁻¹)	15	200
Calor latente transmitido (langley día ⁻¹)	24	324
Idem en tanto por ciento de Q	15	154
Calor sensible transmitido (langley día ⁻¹)	134	— 113

Como actualmente el área global de regadío se estima en 1,5 millones de kilómetros cuadrados, o sea, el 1 por 100 del área total de los continentes, el hombre ha provocado un aumento de la evaporación natural en cantidad ciertamente no despreciable. Los ingenieros —y también algunos políticos—, se han complacido en prometer que gracias a la evaporación que se produce en los grandes embalses, el clima local mejorará por incremento de la lluvia. Esto puede ser cierto, bajo determinadas condiciones de humedad: en aquellos puntos en los que las corrientes ascendentes —debidas a una convergencia de vientos— engendran nubes y lluvia, cualquier aumento en la cantidad de agua precipitable contenida en el aire puede ser seguido de un incremento en la intensidad de la lluvia principalmente, sin embargo, a muy largos intervalos. Drozdov ha desarrollado métodos para estimar el incremento de lluvia en regiones tales como el sur de Rusia. Sin embargo, en el centro de los desiertos, como en Asia central o en el Sahara, la aridez procede de la subsidencia de los movimientos en gran escala, con independencia del contenido del aire en vapor acuoso. Bajo tales condiciones la precipitación no puede nunca ser manejada eficazmente. Esto sigue siendo cierto aún cuando consideremos manipulaciones sobre los procesos microfísicos en las nubes. Los efectos de estos cambios sobre el balance de energía o sobre la razón de Bowen respecto de las condiciones de temperatura y humedad, son evidentes: como ejemplo voy

a citar tan sólo varios pares de estaciones en Asia central, alrededor de los 42° de latitud Norte y donde las temperaturas de verano, en el interior de los oasis es 2,7° C. más baja que en el desierto circundante, mientras que la humedad absoluta resulta en un 55 por 100 más elevada.

Si tomamos en consideración el hecho de que durante los últimos cinco-ocho mil años el hombre ha sustituido la vegetación natural de un 30 por 100 por lo menos de la superficie sólida (por ejemplo, 45×10^6 km²), en tierra cultivable, en otros tipos de bosque o en pastizales excesivamente regados, no cabe duda de que muchos parámetros físicos del clima habrán sido sustancialmente modificados. Sólo se habrán librado, más o menos completamente, unas pocas zonas: la selva ecuatorial lluviosa de las cuencas del Amazonas y del Congo; parte de los bosques septentrionales de coníferas del Canadá y de Siberia, los casquetes glaciares de la Antártida y de Groenlandia y el centro del Sahara.

Tan sólo una pequeña porción —menos del 0,3 por 100 de la superficie de los continentes, o sea, 500.000 kilómetros cuadrados—, ha sido convertida en ciudades y zonas industriales. Aquí se han producido modificaciones climáticas, por lo menos fuera de la zona tropical. En los climas templados y subpolares el uso del carbón y del petróleo para la calefacción se añade a la energía de la radiación neta incidente, especialmente en invierno, cuando la radiación reflejada excede a la incidente. Las grandes ciudades de los países industriales producen, como promedio anual, hasta 250 Ly/d (Manhattan) o 200 Ly/d (Montreal), debido a las grandes pérdidas de calor que sufren los rascacielos dotados de calefacción, y las zonas industrializadas —sobre áreas de 1.000-10.000 kilómetros cuadrados—, hasta 20-50 Ly/día; es decir, en la Europa central o en la noroccidental un 20-50 por 100 de la radiación neta recibida de los manantiales naturales, prescindiendo de la influencia negativa de la creciente contaminación del aire.

La tabla 2 muestra la producción de energía artificial de ciertas comarcas industrializadas, suponiendo una distribución uniforme (no real) sobre toda la zona. La aportación de energía fósil al balance de energía excede ya del nivel del 1 por 100 sobre un área de unos 15.10^6 kilómetros cuadrados, o sea, el 10 por 100 del área continental total del globo. Esto podría parecer inofensivo; sin embargo, la tasa media anual de crecimiento de la producción de energía (Fig. 2), oscila alrededor del 4 por 100 —en países como Italia o el Japón— puede llegar al 10-15 por 100. Si limitamos nuestra atención a las zonas altamente industrializadas de unos 10.000 kilómetros cuadrados de extensión cada una, debemos esperar que durante la primera mitad de la próxima centuria la aportación de energía artificial habrá alcanzado o sobrepasado el nivel de los 50 Ly/d, o sea, alrededor de la mitad de la energía natural proporcionada por la máquina atmosférica (en las latitudes medias). Dicho con otras palabras (como han indicado Budyko, Drozdov y Yudin, recientemente): *estamos ya al borde de producir*, sobre tales zonas, *nuestro propio clima*, con todas sus consecuencias. Olvidamos frecuentemente que muchos de nosotros vivimos en un ambiente de continuo crecimiento de la contaminación del aire. Desde el punto de vista global la fuente más importante de la contaminación de este aire no es la industria ni la calefacción: es la combustión periódica de las malezas en el seco invierno tropical y la diseminación del polvo en las márgenes de nuestros desiertos, donde el hombre y el ganado están destruyendo descuidadamente la escasa vegetación.

Bryson ha indicado que parte del reciente enfriamiento de amplitud mundial puede ser probablemente atribuible al incremento de la contaminación atmosférica. Basándonos en el inapreciable instrumento de observación que son los satélites meteorológicos, podremos quizá evaluar el papel del hombre en el balance energético del sistema tierra + atmósfera, en el límite superior

TABLA II

Densidad de energía consumida en regiones industriales

	Área (10 ³ km)	Consumo de energía (10 ¹⁵ cal/año ⁻¹)	Consumo de energía/área (langley d a ⁻¹)	
			1962	1967
Benelux	73	921 (1967)	2.72	3.44
Rep. Fed. de Alemania	246	2.532	2.54	2.82
Rep. Dem. de Alemania	108	1.130	.	2.87
Reino Unido	242	2.204	2.42	2.50
Francia	573	¹ 411	0.51	0.67
Italia	299	1.198	0.62	1.10
Austria, Suiza	124	215	0.34	0.47
Europa central y occidental	1.557	8.481	1.24	1.49
Japón	366	1.966	0.81	1.47
EE. UU., 14 estados ¹	932	(6.410)	.	1.89
EE. UU., totalidad	7.760	13.876	0.41	0.49

¹ Triángulo Boston-St. Luis-Norfolk (Virginia).

de ésta. Desgraciadamente no podemos observar su estado original no perturbado.

Sin embargo, no es la *energía* la que juega el principal papel en el control artificial del clima: es la necesidad creciente de *agua* para el riego, ganadería, industria e higiene. Dado que muchos pueblos se han visto obligados a vivir en comarcas semidesérticas, el consumo de agua dulce crece de año en año. Además, por lo que se refiere a todos los proyectos de suministro de agua a larga distancia, podemos afirmar con seguridad que el crecimiento incesante de la población nos obligará algún día a surtirnos del gran depósito de los océanos, el cual —con una profundidad media de 3.800 metros, comparada con el contenido de agua precipitable en la atmósfera de 2,4 centímetros—, parece ha de ser inagotable en el futuro durante muchos siglos. La desalinización del agua del mar requiere energía, ya sea fósil, solar o nuclear.

Según eso, hemos de esperar que la creciente necesidad de agua hará que aumente mucho más el uso de la energía artificial. Como el consumo de energía *por individuo* aumenta, el consumo total aumenta más deprisa que la población. Con la desalinización del agua del mar la evaporación continental y la precipitación aumentarán lentamente, reduciéndose así el tiempo de permanencia del vapor acuoso en la atmósfera y acelerándose el ciclo hidrológico.

Una aceleración semejante del ciclo hidrológico es producida por los eficaces sistemas de alcantarillado: un 60-75 por 100 del agua de lluvia caída en nuestras ciudades es eliminada inmediatamente por las alcantarillas. Aquí

resulta también modificada la razón de Bowen: cualquier modificación de la evaporación va acompañada de un efecto inverso sobre la reserva local de calor sensible y, por consiguiente, de un cambio de temperatura. Recientes estudios (R. Keller), han demostrado que en la República Federal de Alemania la evapotranspiración ha aumentado en más del 15 por 100.

En realidad, la *explosión demográfica* es la raíz indiscutible de todas nuestras actividades como climatólogos. Nos vemos obligados a desviar nuestra

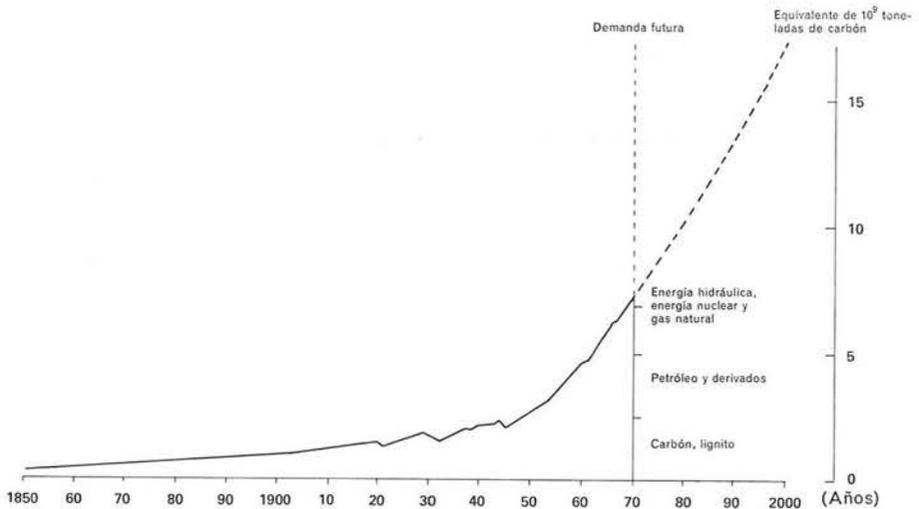


Figura 2 — Consumo mundial de energía
(Tomado de «Times Atlas of the World», edición de 1967)

atención del *análisis* climatológico hacia la *predicción* climatológica y, finalmente, hacia el *control* del clima. Además de los clásicos términos descriptivos de temperatura, lluvia y viento, necesitamos de los términos físicos del balance de energía: albedo superficial, parámetros de rugosidad tales como el número de Rossby, difusibilidad turbulenta y razón de Bowen. Bajo tales circunstancias la espectacular capacidad del hombre para visitar la luna u otros planetas es ciertamente menos esencial que su poder para modificar —y finalmente controlar— el clima, combinando esfuerzos a escala regional, hemisférica o mundial.

¿Qué significa que nosotros tenemos que prever el alcance climático de los proyectos técnicos? Hace treinta años se admitía generalmente que los meteorólogos eran incapaces de realizar experimentos que tuviesen algún efecto significativo sobre la atmósfera. Hoy sería mejor decir que debemos tratar de evitar firmemente la realización de cualquier experimento no local en nuestra atmósfera antes de que podamos prever claramente todas sus consecuencias. Afortunadamente, estamos hoy día en condiciones de simular los efectos de un proyecto de tal naturaleza haciendo uso de los *modelos numéricos de climatología teórica* por el estilo del presentado por el Dr. Smagorinsky. Deseo añadir unas modestas aportaciones a escala media, sobre un sencillo modelo proyectado por el Dr. E. Dittman en nuestro Instituto, que se refiere a la evaporación en un lago cuadrado en un desierto, basándose en la ecuación del transporte turbulento.

Al principio se pretendió limitar el estudio a la difusión del vapor de agua sobre una región manantial extensa. Pero, después de haber calculado el flujo de vapor acuoso a través de todas las caras de este modelo tridimensional, se pensó también en la utilidad de estudiar el papel desempeñado por ciertos parámetros (difusión por turbulencia, temperatura, estabilidad y humedad absoluta) del flujo de advección sobre la intensidad de la evaporación. Aplicando estos métodos será posible calcular la influencia del área de un depósito, de su forma y de su exposición respecto al flujo general. Otro modelo de circulación, impulsada térmicamente (por ejemplo, las brisas de mar y tierra), está actualmente en estudio y, eventualmente, puede combinarse con el primero, puesto que un modelo completo del efecto climático de un gran embalse en una comarca árida no puede comprenderse sin tener en cuenta la circulación térmica provocada por la entrada diferencial de calor sensible y latente en el aire.

Todos nuestros actuales resultados descriptivos obtenidos en técnicas de aplicación estadística o en climatología sinóptica, no son suficientes. El futuro de la climatología bajo los aspectos de un mundo rápidamente cambiante, nos enfrentará con nuevas tareas que sólo pueden resolverse con los métodos de la *climatología física*. Nuestra tarea no puede limitarse a la investigación y al archivo de climas preexistentes: en una época de explosión demográfica debemos satisfacer la demanda de una humanidad en crecimiento. A la larga debemos habituarnos al *control del clima*, y esto no debe entenderse no sólo en el sentido de anulación de los peligros y riesgos climáticos, sino en la mejora planificada del mismo clima de acuerdo con las leyes físicas de la climatogénesis.

Este tipo de desarrollo no está, ni mucho menos, fuera de la tradición de nuestra disciplina. En una época tan remota como 1845, A. Humboldt (1769-1859), propuso una climatología teórica; después, A. Voeikov (1842-1916), reconoció varios aspectos físicos de la climatología, especialmente el papel desempeñado por la cubierta de nieve. En nuestros tiempos, H. U. Sverdrup (1888-1957) y F. Albrecht (1896-1965), midieron y/o evaluaron todos los términos del balance térmico, según el atlas de M. I. Budyko. C. W. Thornthwaite (1899-1963), ha desarrollado técnicas contables simples (tal vez demasiado sencillas), del balance hídrico, y H. Wexler (1911-1962), esbozó algunas futuras posibilidades de control climático. Admiramos mucho la amplitud de horizontes y la perseverancia de sabios como C. G. Rossby (1898-1957) y J. V. Neumann (1903-1957), que fueron los primeros en prever el uso de calculadores electrónicos para la previsión a largo plazo que, de hecho, incluye nuestro problema de la predicción climatológica. Necesitamos un conocimiento más completo de los procesos climatogénicos y de las variaciones en el tiempo y en el espacio de los parámetros físicos que controlan estos fenómenos climatogénicos. Necesitamos, además, modelos físico-matemáticos suficientemente reales de la atmósfera, tanto a escala local como regional, capaces de simular todos los efectos de la modificación del clima. Necesitamos algo parecido a una climatología teórica sintética completamente general, como fue esbozada por H. Lettau. Ahora, pocos meses después de que el primer hombre llegase a la superficie de la luna, parece haber llegado el momento oportuno de estudiar el futuro de este planeta y de su atmósfera, en términos científicos. Desde el punto de vista de nuestro bienestar, la climatología se convertirá pronto en la rama más importante de las ciencias de la atmósfera.