

# EL ENCADENAMIENTO DE LOS FENÓMENOS CLIMATOLÓGICOS SUDAMERICANOS

P O R

**Ingeniero JUAN JAGSICH**

Profesor en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales

**Resumen:** La finalidad del presente estudio es: ratificar nuestra explicación del encadenamiento de los fenómenos climatológicos sudamericanos, publicada en "La Prensa", el 30 de Mayo de 1929, — basada en la influencia que el polvo volcánico, suspendido en las altas capas de la atmósfera, ejerce sobre la intensidad de la circulación atmosférica y oceánica, — contra las objeciones del capitán de fragata, M. Z. Escola, contenidos en su estudio "Los pronósticos a largo plazo del tiempo", publicado en los N° 481 y 482 del "Boletín del Centro Naval", año 1930; procurando al mismo tiempo fundamentar más todavía esta explicación.

El estudio se compone de 8 capítulos, tratando en el:

- 1°.— El transporte del calor solar de la zona ecuatorial a las zonas polares.
- 2°.— Origen volcánico del período climatológico de  $3\frac{3}{4}$  de años.
- 3°.— Las causas de las corrientes marinas.
- 4°.— El avance de la corriente El Niño.
- 5°.— La aparición de témpanos.
- 6°.— La base científica de nuestro pronóstico del tiempo a largo plazo.
- 7°.— Los rumbos principales del derrame del aire polar.
- 8°.— Observaciones de orden personal.

**Zusammenfassung:** Der Zweck dieser Abhandlung ist: unsere, am 30. Mai 1929, in "La Prensa" veröffentlichte Erklärung

des Zusammenhanges der klimatologischen Phänomenen Südamerikas, — gestützt auf die Wirkung, die der in höheren Luftschichten suspendierte Vulkanstaub auf die Intensität der atmosphärischen und der ozeanischen Zirkulation ausübt, — gegen die Einwände des Kapitän z. See, Melchior Z. Escola, die in seiner, in den N° 481 und 482 des “Boletin del Centro Naval”, veröffentlichten Studie “Los pronósticos a largo plazo del tiempo” enthalten sind, aufrechtzuerhalten, und sie noch tiefer zu begründen.

Die Abhandlung besteht aus 8 Kapiteln, in denen wir uns mit folgenden Problemen beschäftigen:

1. — Der Wärmetransport von niederen in höhere Breiten.
2. — Ueber den vulkanischen Ursprung der  $3\frac{3}{4}$ -jährigen Klimaperiode.
3. — Die Ursachen der Meeresströmungen.
4. — Die Ursachen des El Niño-Stromes.
5. — Das Erscheinen der Eisberge.
6. — Die wissenschaftliche Grundlage unserer langfristigen Wettervoraussage.
7. — Die Hauptstrassen der Kaltlufteinbrüche aus dem Südpolarbecken.
8. — Bemerkungen persönlicher Natur.

**Summary:** The object of the present paper is to confirm our explanation of the correlation of the South American climatological phenomena, published in “La Prensa”, May 30 1929, — based on the influence which the volcanic dust suspended in the higher atmospheric layers exerts on the intensity of the atmospheric and oceanic circulation, — in response to the objections raised by Cap. Melchior Z. Escola, in his writing “Los pronósticos a largo plazo del tiempo”, published in N° 481 and 482 of the “Boletin del Centro Naval”, trying at the same time to give a deeper foundation to our views.

The study comprises 8 chapters, dealing with:

1. — The transport of solar heat from the equatorial to the two polar zones.
2. — The climatological period of volcanic origin.

3. — The causes of the oceanic currents.
4. — The origin of the progression of El Niño current.
5. — The apparition of the icebergs.
6. — The foundation of our long-term weather forecasting.
7. — The principal directions followed by the incursions of cold air from the polar basin.
8. — Personal remarks.

### INTRODUCCION

Todo tiene su principio, así también nuestro entusiasmo por los fenómenos climatológicos que tienen por teatro a nuestro hermoso continente sudamericano. Este entusiasmo data desde aquel célebre avance de la corriente El Niño por las costas del Pacífico, observado al finalizar el año 1924, y que fué seguido por lluvias torrenciales en las costas peruanas, transformando en poco tiempo en prados verdecientes las regiones áridas de aquellas comarcas.

Es sabido que los fenómenos que se producen en el vasto escenario de la naturaleza, no suceden a capricho, sino que, más bien, existe un encadenamiento lógico entre ellos. Es por eso que sospechábamos desde el primer momento que el avance de aquella corriente estuviera en relación con algún fenómeno natural de caracteres sobresalientes. Así, del ordenamiento de los datos históricos y estadísticos que estaban a nuestro alcance, pudimos deducir ya entonces que un avance de esa corriente suele ser precedida por alguna erupción volcánica potente, y seguida por la aparición de témpanos en los océanos que bañan las costas de nuestro continente; y que, poco tiempo después, se inicia una época de sequía en la vasta zona geográfica que ocupan nuestras pampas inmensas.

Un examen detallado de la relación existente entre estos fenómenos no pudimos efectuar entonces. La escasez de datos de que disponíamos, ante todo la falta de los de carácter oceanográfico, se oponía a ello. Esta circunstancia nos dió motivo para exponer en el Tercer Congreso Universitario Anual, reunido en Córdoba en el mes de Octubre de 1925, la conveniencia de propiciar

la "iniciación de estudios oceanográficos continuos, como asimismo la intensificación de las observaciones meteorológicas y geofísicas en general, con particular atención de las regiones antárticas, para facilitar de este modo los estudios tendientes a resolver el problema de la predicción del tiempo a largo plazo, de excepcional interés para la agricultura de nuestro país", como consta en el Boletín de la Universidad de La Plata, tomo IX, número 6; Octubre de 1925.

Deseosos, sin embargo, de descubrir, aunque fuera en sus rasgos generales solamente, el encadenamiento lógico que puede existir entre los fenómenos climatológicos, registrados hasta el presente, hemos proseguido con nuestros estudios. Primero hicimos un ensayo tendiente a correlacionarlos con el ritmo que se observa en la actividad solar; ensayo que bajo el título: "Problemas del clima sudamericano" fué publicado por "La Prensa" el 17 de Enero de 1926. Llegamos a la conclusión de que son principalmente tres los períodos que rigen los grandes sucesos atmosféricos nuestros: el primero de 3,7 de años, el segundo de 11,1 de años y por fin el tercero de 33,3 de años. Apoyándonos en estos períodos, habíamos establecido entonces un pronóstico del tiempo para los años próximos; de carácter general, como se entiende, y válido sólo para la zona central de nuestra República. La certidumbre de este pronóstico bien pudo ser considerada muy elevada, pero en ningún caso absoluta, dada la insuficiencia de los elementos que nos habían servido de base para establecerlo. En efecto, el comportamiento del sol es para nosotros, aún hoy, un tanto caprichoso. Las irregularidades que se observan en la duración de los distintos períodos que caracterizan su actividad, no las podemos explicar satisfactoriamente, y menos prever, naturalmente. Y luego, porque para un pronóstico exacto es imprescindible tener en cuenta también la influencia de los factores terrestres propiamente dicho, como por ejemplo, del casquete polar, cubierto de nieve eterna, incubadora potente de los témpanos que periódicamente inundan las aguas de nuestros océanos; como así mismo de las grandes erupciones volcánicas, capaces de modificar por sí solo el desarrollo normal de los sucesos atmosféricos ordinarios.

Al examen de la influencia de estos factores, en particular del factor volcánico, nos habíamos dedicado más adelante, dejándonos guiar en este empeño por los resultados de las investigaciones del profesor W. J. Humphreys, reunidas en su importante obra, titulada "Physic of the Air", Philadelphia, 1920. Pero al profundizar nuestros estudios, habíamos notado, como lo exponremos detalladamente más adelante, que la teoría de este sabio no concuerda del todo con los hechos observados. Esto nos indujo a tratar de llegar por otro camino a la explicación satisfactoria de los fenómenos interesados. Para ésto habíamos supuesto que el polvo volcánico, echado por las grandes erupciones a las altas capas de la atmósfera, efectuase pulsaciones rítmicas en el sentido vertical, alejándose y aproximándose a la tierra alternativamente, y tomando contacto de este modo con las capas bajas, ricas en vapor de agua, facilitando de esta manera la condensación, y por ende la producción de lluvias. Esta teoría que se encuentra descripta en nuestro estudio, titulado "Del tiempo y de la cosecha", publicado por "La Prensa" el 10 y el 24 de Marzo de 1927, resulta, sin duda, muy cómoda para la explicación de las distintas temporadas de lluvia que ha habido en la zona geográfica nuestra, pero no así para los demás fenómenos interesados. Nuestro empeño se vió coronado por el éxito recién después de orientar las investigaciones en el sentido indicado por el profesor A. Defant, en dos estudios célebres; uno referente a la circulación atmosférica en general, y otro referente a las variaciones de la circulación encima del Océano Atlántico del Norte, aparecidos ambos en los célebres "Geografiska Annaler" de Estocolmo, el año 1921 y 1924 respectivamente. Desde luego hubiéramos deseado poder publicar nuestras investigaciones con toda la amplitud. Esto, sin embargo, no fué posible. Lo único que pudimos hacer hasta hoy, fué: dar un resumen suscito de sus resultados; en un estudio, titulado "La sequía reinante y su probable duración", publicada en "La Prensa" el 30 de Mayo de 1929.

Pues bien, este es el estudio que fué objeto de una severa, y al mismo tiempo tendenciosa crítica por parte del señor capitán de navío, Don Melchor Z. Escobedo, ex-jefe de la división de meteorología de nuestro servicio oficial, en su estudio, titula-

do: “Los pronósticos a largo plazo del tiempo”, aparecido en los números 481 y 482 del “Boletín del Centro Naval”, llegando en resumidas cuentas a la conclusión de que tanto nuestra explicación del encadenamiento de los grandes fenómenos climatológicos, como también el pronóstico del tiempo, basado en este mismo encadenamiento “carecen de base científica”.

¡No esperábamos semejante crítica!

No la esperábamos, porque nuestro estudio **tiene** base científica, amplia y sólida. Y esta base es la ciencia meteorológica, climatológica y oceanográfica actual, como lo vamos a demostrar amplia y cabalmente.

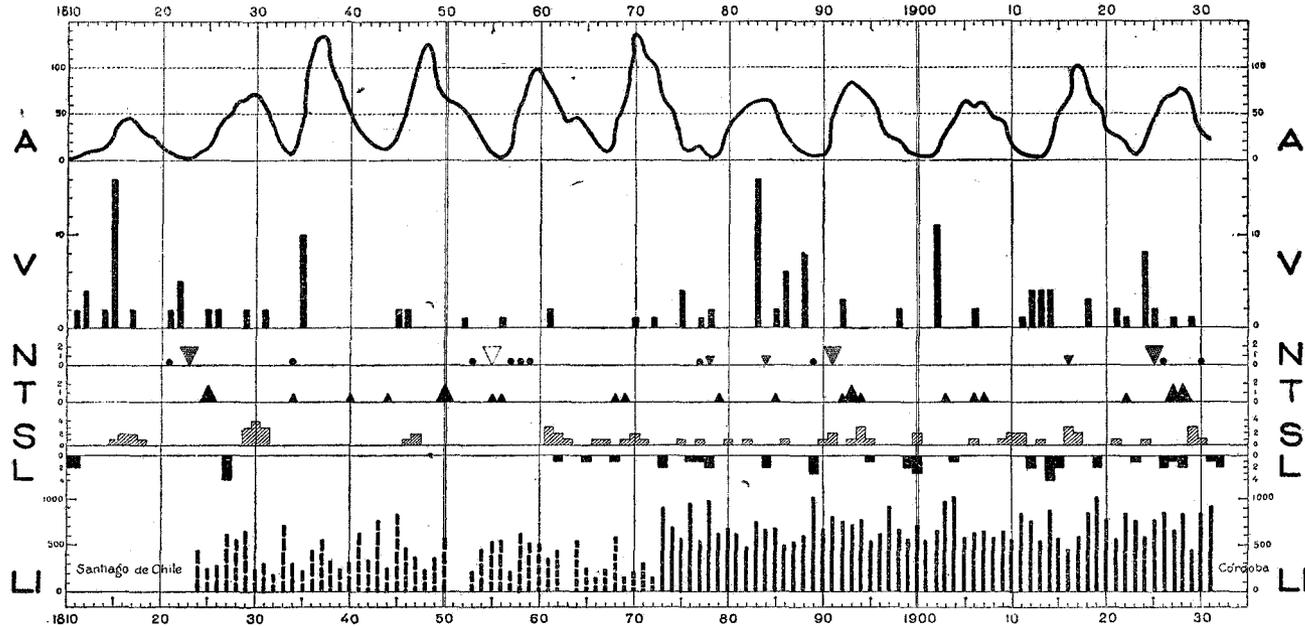
De todos los estudios que hemos publicado hasta hoy, a este le atribuimos el mayor valor, porque en él hemos presentado, por primera vez, un “Cuadro Climatológico Argentino”, en el cual se encuentran reunidos y representados todos los fenómenos naturales de importancia, ocurridos en los últimos 120 años, y que tuvieron alguna repercusión en la parte sur de nuestro continente, o en las zonas geográficas adyacentes; en él hemos señalado, por primera vez, el ritmo característico que domina en la sucesión ordenada de estos grandes fenómenos; y por último, en este mismo estudio hemos dado, también por primera vez, una descripción sencilla de las fuerzas naturales que actúan en el conjunto y producen el encadenamiento lógico entre estos fenómenos que tanto llaman nuestra atención.

¡Estos son sus méritos!

Y estos méritos los conservará hasta tanto se dé a la luz otro estudio, mejor y más completo que el nuestro, basado en otra teoría, por medio de la cual se consiga explicar con más facilidad y con mayor perfección el lógico encadenamiento de los grandes fenómenos naturales que a base de la nuestra.

Dudamos, sin embargo, de que esto suceda. Creemos más bien que se tratará solamente de “perfeccionar”, o de “completar” nuestras consideraciones, conforme al adelanto que se consiga en el mejor y más amplio conocimiento de los fenómenos naturales que nos envuelven, para nuestro bien y mal, en la larga sucesión de los tiempos.

CUADRO CLIMATOLÓGICO ARGENTINO



AA = actividad solar; VV = actividad volcánica; NN = avance de la corriente El Niño; TT = inundación de témpanos; SS = épocas de sequía en las pampas argentinas; LL = temporadas de lluvia en las mismas; LI LI = precipitaciones registradas en Santiago de Chile y en Córdoba.

## CAPITULO I.

**El transporte del calor solar de la zona ecuatorial a las zonas polares.**

## INDICE BIBLIOGRAFICO

1. — Hann-Süring: Lehrbruch der Meteorologie. Cuarta edición. Leipzig, 1926.
2. — Angot, A.: Recherches théoriques sur la distribution de la chaleur à la surface du globe. Annales du Bureau Central Météorologique de France. Tomo I. París, 1883.
3. — Zenker, W.: Die Verteilung der Wärme auf der Erdoberfläche. Berlin, 1888.
4. — Liznar, J.: Berechnung der Mitteltemperaturen der Breitenkreise einer Land- und Wasserhemisphäre, sowie der Erde aus den an der Grenze der Atmosphäre zugestrahlten Wärmemengen. Meteorologische Zeitschrift, 1900.
5. — v. Bezold, W.: Der Wärmeaustausch an der Erdoberfläche und in der Atmosphäre. Sitzungsberichte der Kgl. Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin. 1892.
6. — Emden, R.: Ueber Strahlungsgleichgewicht und atmosphärische Strahlung. Sitzungsberichte der Kgl. Bayerischen Akademie der Wissenschaften zu München, 1913.
7. — Milankovich, M.: Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire. Académie Yougoslave des Sciences et des Arts de Zagreb. Paris, 1920.
8. — Defant, A.: Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemäßigten Breiten der Erde. Grundzüge einer Theorie der Klimaschwankungen. Geografiska Annaler, Estocolmo, 1921.
9. — Defant, A.: Die meridionale Temperaturverteilung auf der Erde und der Massenaustausch zwischen Aequator und Pol. Meteorologische Zeitschrift, 1922.
10. — Talor, G. J.: Phenomena connected with the turbulence in the lower atmosphere. Proceedings of the Royal Society, Londres, 1917.
11. — Schmidt, W.: Der Massenaustausch bei der ungeordneten Strömung in freier Luft und seine Folgen. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Wien, 1917.
12. — Defant und Obst: Lufthülle und Klima. Leipzig y Viena, 1923.
13. — Meinardus, W.: Neue Mitteltemperaturen der höheren südlichen Breiten. Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 1925.
14. — Exner, F. M.: Dynamische Meteorologie 2ª edición. Viena, 1925.



15. — Angström, A.: Evaporation and precipitation at various latitudes and the horizontal eddy convectivity of the atmosphere. Arkiv för mat., astron. och fysik. Tomo 19 A. Estocolmo, 1925.
16. — Angström, A.: Energiezufuhr un Temperatur auf verschiedenen Breitengraden. Gerlands Beiträge zur Geophysik. Tomo XV. Leipzig 1926.
17. — Mügge, R.: Eine Berechnung des horizontalen Wärmeaustausches in der Atmosphäre mit Hilfe der Stratosphärentemperatur. Zeitschrift für Geophysik, tomo II, 1926. Braunschweig.
18. — Richardson, L. F. and Proctor, D.: Diffusion over distances ranging from 3 km. to 86 km. Memoirs of the Royal Meteorological Society. Vol. I, N° 1. Londres, 1926.
19. — Defant, A.: Die Bestimmung der Turbulenzgrößen der atmosphärischen Zirkulation aussertropischen Breiten. Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Wien. Tomo 130, pág. 383. Viena 1921.
20. — Defant, A.: Die Austauschgröße der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation. Köppen-Heft der Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie. Berlin, 1926.
21. — Schmidt, W.: Strahlung und Verdunstung an freien Wasserflächen: ein Beitrag zum Wärmehaushalt des Weltmeeres und Wasserhaushalt der Erde. Annalen der Hydrographie und der maritimen Meteorologie. Berlin, 1915.
22. — Wüst, G.: Die Verdunstung auf dem Meere. Veröffentlichungen des Instituts für Meereskunde. Neue Folge, A. Heft 6. Berlin, 1922.
23. — Simpson, G. C.: Further studies in terrestrial radiation. Memoirs of the Royal Meteorological Society. Vol. III, N° 21. Londres, 1928.
24. — Simpson, G. C.: The distribution of terrestrial radiation. Memoirs of the Royal Meteorological Society. Vol. III, N° 23. Londres, 1929.
25. — Wien, W. und Harms, F.: Handbuch der Experimentalphysik. Tomo XXV. Geophysik. I. Leipzig, 1928.
26. — Gutenberg, G.: Lehrbuch der Geophysik. Berlin, 1929.
27. — Müller-Pouillet, G.: Lehrbuch der Physik. Tomo V, 1: Physik der Erde. Braunschweig, 1928.
28. — Supan, A.: Grundzüge der physischen Erdkunde. Tomo I. Berlin u. Leipzig, 1927.
29. — Süring, R.: Leitfaden der Meteorologie. Leipzig, 1927.
30. — Köppen, W.: Die Klimate der Erde. Berlin, 1928.
31. — Börnstein-Brückmann: Leifaden der Wetterkunde. Braunschweig, 1927.
32. — Blanck, E.: Handbuch der Bodenlehre, tomo II. Berlin, 1929.
33. — König, W.: Grundzüge der Meteorologie. Leipzig, 1927.
34. — Geiger, R.: Das Klima der bodennahen Luftschicht. Braunschweig, 1927.
35. — Milankovich, M.: Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen. Handbuch der Klimatologie von Köppen-Geiger, Band I, Teil A. Berlin, 1930.
36. — Humphreys, W. J.: Vertical temperaturgradient of the atmosphere. Astrophysical Journal, Vol. XXIX, 1909, pág. 14.
37. — Gold, E.: The isothermal Layer of the atmosphere and atmospheric radiation. Proceedings of the Royal Society, London. Ser. A. Vol. 82. 1909.
38. — v. Socher, H.: Die Temperaturverteilung in der Atmosphäre bei Strahlungsgleichgewicht. Meteorologische Zeitschrift, 1928, S. 188.
39. — Wegener, A.: Thermodynamik der Atmosphäre. 2. Aufl. Leipzig, 1924.

40. — Simpson, C. G.: Some studies in terrestrial radiation. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, Vol. II, N° 16. London, 1928.
41. — Mügge, R.: Ueber die Stratosphärentemperatur und die Strahlungsbedingungen der oberen Atmosphäre. *Zeitschrift f. Geophysik*, tomo V, 1929. Braunschweig.
42. — Mügge, R.: Wärmeabstrahlung zwischen Himmel und Erde. *Meteorologische Zeitschrift*, 1929.
43. — Albrecht, F.: Der Wärmeumsatz durch die Wärmestrahlung des Wasserdampfes in der Atmosphäre. *Zeitschrift f. Geophysik*, tomo VI, 1930.
44. — Albrecht, F.: Ueber die Glashauswirkung der Erdatmosphäre und das Zustandekommen der Troposphäre. *Meteorologische Zeitschrift*, 1931.
45. — Angström, A.: A study of the radiation of the atmosphere. *Smiths. Miscell. Collections*. Vol. 65, N° 3. Washington 1915.
46. — Köppen, W.: Lufttemperaturen, Sonnenflecken, Vulkanausbrüche. *Meteorologische Zeitschrift*, 1914.
47. — Bartels, J.: Die Wärmestrahlung der Erde. *Die Naturwissenschaften*. Tomo 17. Berlin, 1929.
48. — Ekholm, N.: Ueber Emission und Absorption der Wärme und deren Bedeutung für die Temperatur der Erdoberfläche. *Meteorologische Zeitschrift*, 1902.
49. — Humphreys, W. J.: A factor in the temperature of the stratosphere. *Monthly Weather Review*, tomo 57, 1929. Washington.
50. — Jeans, J. H.: *Dynamische Theorie der Gase*. Nach der 4. englischen Auflage übersetzt von R. Fürth. Braunschweig, 1926.
51. — Möller, M.: Die Ursache atmosphärischer Strömungen. *Meteorologische Zeitschrift*, 1892.
52. — Exner, F. M.: Ueber die Zirkulation zwischen Rossbreiten und Pol. *Meteorologische Zeitschrift*, 1927.
53. — Exner, F. M.: Ueber die Zirkulationen kalter und warmer Luft zwischen hohen und niedrigen Breiten. *Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften zu Wien*. Tomo 137, 1928.
54. — Sir Napier Shaw: *Manual of Meteorology*. Vol. III. Londres.
55. — Wien, W. und Harms, F.: *Handbuch der Experimentalphysik*, tomo XXV: Geophysik II. B. Physik des Meeres. Leipzig, 1931.
56. — Tor Bergeron: Ueber die dreidimensional verknüpfende Wetteranalyse. *Erster Teil. Geofysiske Publikasjoner*, vol. V, N° 6. Oslo, 1928.
57. — Sprung, A.: *Lehrbuch der Meteorologie*. Hamburg, 1885.
58. — Dira Kitao: *Beiträge zur Theorie der Bewegung der Erdatmosphäre und der Wirbelstürme*. Gutenberg, B.: *Lehrbuch der Geophysik*. Berlin, 1929.
59. — Hobbs, W. H.: *The glacial anticyclones; the poles of the atmospheric circulations*. New York, 1926.
60. — Everdingen, E.: Gibt es stationäre glaziale Antizyklogen? *Köpen-Heft der Annalen der Hydrographie und maritimenen Meteorologie*. Berlin, 1926.
61. — Exner, F. M.: W. H. Hobbs, Die glazialen Antizyklogen, die Pole der atmosphärischen Zirkulation. *Meteorologische Zeitschrift*, 1926.
62. — Simpson, G. C.: Past climates. *Quart. Journal of the Royal Meteorological Society*, July 1927.
63. — Köppen-Wegener: *Die Klimate der geologischen Vorzeit*. Berlin, 1924.

64. — BarreL, J.: Rhythmes and measurements of geological time. Bulletin of the Geological Society of America. 1917.
65. — Sir James Jeans: The Universe around us. London, 1929.
66. — Svante Arrhenius: Erde und Weltall. Leipzig, 1926.
67. — Wegener, A.: Die Entstehung der Kontinente und Ozeane. 4. Auflage. Braunschweig, 1929. Traducción española de la tercera edición alemana: El derive de los continentes. Madrid, 1923.
68. — Schmauss, A.: Beiträge zur Dynamik der Atmosphäre. Meteorologische Zeitschrift, 1917.
69. — Wallén, A.: Deux nouvelles revues de géophysique. Geografiska Annaler. Estocolmo, 1926.
70. — Defant, A.: Die Veränderungen in der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre in den gemässigten Breiten der Erde. Sitzungsberichte der K. Akademie der Wissenschaften. Viena, 1912.

\*

El fenómeno natural básico, sobre cuya existencia hemos edificado nuestra explicación del encadenamiento de los fenómenos climatológicos sudamericanos, es el **transporte de calor solar** de la zona ecuatorial a las dos zonas polares.

¿Existe este transporte?

Esta es la pregunta a que tenemos que responder, antes de poder considerar alguna variación periódica o rítmica en la cantidad de calor trasportado; variación que, desde luego, alterará sensiblemente los valores normales de los elementos meteorológicos, contribuyendo así a la formación de temporadas de características sobresalientes, como por ejemplo, de las épocas de grandes calores y de grandes fríos, de las sequías y de las temporadas de lluvia. Para ésto, veamos pues, cual fué la evolución de este concepto en la ciencia meteorológica a través de este último siglo; y en particular, cual es su estado actual.

Hace ya más de un siglo que A. v. Humboldt trazó las primeras líneas de igual temperatura media anual en un mapamundi. La escasez de datos de que se disponía en aquella lejana época, no permitía, naturalmente, alcanzar gran perfección en este trazado, pero con los años la posición de esas isothermas iba mejorándose, conforme aumentaba el número de las estaciones meteorológicas, diseminadas por la superficie de la tierra, y se alargaban las series de observaciones de las estaciones existentes. En este trabajo conquistaron marcados méritos los sabios Dove, v. Hann y Buchan, para no mencionar sino los eminentes (1, p. 135).

Disponiendo de semejante mapa es posible determinar las temperaturas medias que caracterizan a los distintos paralelos. El primero quien ejecutó este trabajo fué Dove; a él seguía Spitaler, luego Batchelder, y muy recientemente Meinardus (1, p. 848). Sobra decir que, desde el primer ensayo ya, se notó un marcado descenso de las temperaturas hacia los polos, a partir del ecuador térmico, cuya posición coincide bastante bien con el paralelo de + 6°,5 de latitud.

Pero la meteorología como ciencia no puede contentarse con el solo registro de un fenómeno natural; su misión es más elevada, más noble: la de explicar el fenómeno, basándose en las leyes físicas, inmutables a través de los tiempos.

Pues bien, hace ya más de medio siglo que los sabios abordaron la explicación de este fenómeno, aparentemente tan sencillo. El triunfo, sin embargo, es muy reciente, si bien halagador, porque permitirá la solución de muchos otros problemas de meteorología y de climatología, un tanto estancados en este último tiempo.

En la larga búsqueda de esa explicación se pueden distinguir netamente tres períodos.

Durante el primer período se suponía que la temperatura media de un lugar o, mejor de una región, dependiese de la cantidad de energía que le fuera suministrada por medio de la radiación solar y atmosférica, y quitada por medio de la irradiación. A esta época pertenecen los estudios de Halley, Lambert, Poisson, Meech, Wiener, Angot, Baldin, Lamont, Zenker, Liznar y otros. Entre estos los más importantes son, y gozan del debido aprecio aún hoy, los estudios de Angot (2), de Zenker (3) y de Liznar (4); si bien a la explicación satisfactoria de las temperaturas medias de los distintos paralelos no se llegó en ninguno de ellos.

El segundo período se inicia con el descubrimiento de que la igualdad entre la insolación y la emisión, como se suponía durante el primer período, existe solamente para la tierra en conjunto, pero no para una región cualquiera; porque hay zonas, más bien, en las cuales predomina la insolación, y zonas donde prevalece la emisión, o sea la irradiación, estando encargadas las corrientes

atmosféricas y oceánicas del transporte del calor de las regiones favorecidas hacia las necesitadas. Quien hizo este descubrimiento fué el célebre meteorólogo alemán, M. v. Bezold (5), en el año 1891.

Como consecuencia de este descubrimiento se impone, conforme lo hizo ya v. Bezold, dividir nuestra tierra en tres zonas: en una ecuatorial, en la cual prevalece la insolación, y en dos polares, en las cuales predomina la emisión. Estas tres zonas están separadas, en la superficie de la tierra, por dos líneas, llamadas por él "líneas neutrales", o "líneas de igual insolación y emisión", como también "líneas de equilibrio de radiación". Estas líneas coincidirían con dos paralelos simétricos al ecuador, si la tierra fuera homogénea; pero por la influencia de los continentes y los mares, su posición es un tanto irregular (24).

A esta época pertenece también el valioso estudio de Emden, referente al equilibrio térmico y a la radiación atmosférica (5), publicado el año 1913. Por medio de un análisis físico-matemático riguroso, este sabio demostró que la radiación atmosférica, observada en las altas latitudes, tiene que ser de origen tropical. El fué también el primero quien llamó la atención sobre el hecho de que la circulación atmosférica general transporta inmensas cantidades de aire, fuertemente calentadas en la zona ecuatorial, a las dos zonas polares; debiéndose a la radiación de estas masas las temperaturas relativamente elevadas que se registran en estas apartadas regiones.

El estudio clásico de esta época es sin embargo recién la notable obra del profesor de la Universidad de Belgrado, M. Milankovich, titulada "Théorie mathématique des phénomènes thermiques, produits par la radiation solaire", aparecido el año 1920 (7). Este sabio trató, haciendo gala de un análisis matemático profundísimo, de determinar las temperaturas medias de los paralelos, suponiendo primeramente la atmósfera de la tierra en calma. Pero, comparando los resultados de sus cálculos con las temperaturas directamente observadas, resultó que ellas no son iguales, lo que quiere decir que la radiación solar directa, en combinación con la radiación atmosférica y la irradiación terrestre, **no** determinan de por sí las temperaturas me-

días de los distintos paralelos de la tierra. (Véase tablilla 1 y figura 1). Hay un factor todavía que debe considerarse, y este factor es justamente el **transporte de calor** de la zona tropical

TABLILLA I:

Latitud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
Temperaturas calculadas:	+ 32,8	+ 31,6	+ 28,2	+ 22,1	+ 13,7	+ 2,6	- 10,9	- 24,1	- 32,0	- 34,8
Temperaturas observadas:	+ 26,2	+ 25,3	+ 22,9	+ 18,4	+ 11,9	+ 5,5	- 4,1	- 13,3	- 24,7	- 30,0
Influencia del transporte de calor	- 6,6	- 6,3	- 5,3	- 3,7	- 1,8	+ 2,9	+ 6,8	+ 10,8	+ 7,3	+ 4,8

hacia las dos zonas polares. El resultado a que llegó Milankovich, lo encontramos resumidos en estas pocas líneas: "...aux

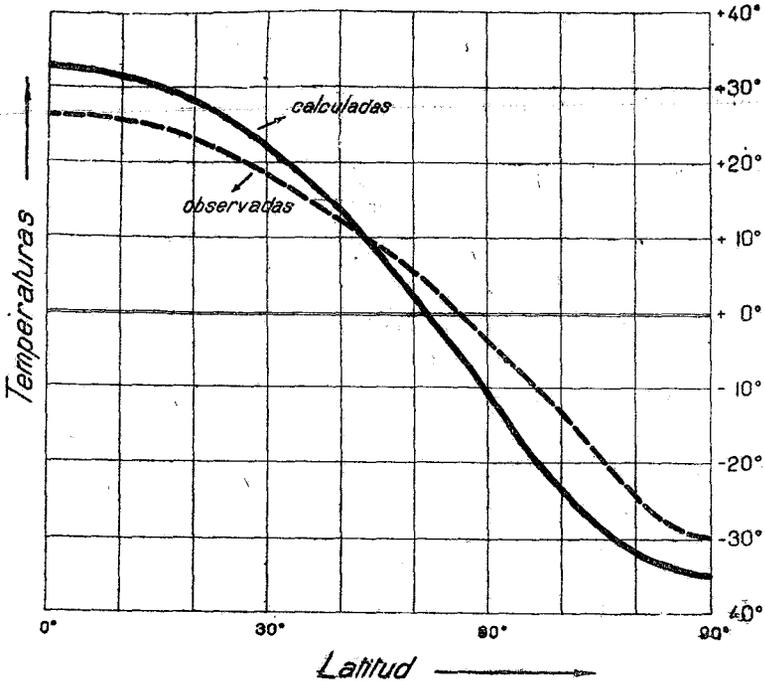


Figura 1. — Temperaturas de los distintos paralelos de la tierra.

environs du 41° degré de latitude les températures solaires ne diffèrent que peu des températures observées; en s'approchant de l'équateur, les températures solaires s'élèvent de plus en plus au-dessus des températures observées; tandis que vers les pôles elles s'abaissent au-dessous des températures observées. Le climat solaire est, ainsi qu'on pouvait s'y attendre, plus excessif que le climat réel dont les extrêmes géographiques sont adoucis par les courants atmosphériques et marins. Ces courants ont lieu dans ce sens que l'air et l'eau transportent sans cesse de la chaleur des régions équatoriales vers les régions polaires, tandis qu'ils circulent refroidis dans la direction opposée. De cette façon, de la chaleur est enlevée sans cesse aux zones équatoriales — qui y est remplacée par l'insolación — pour être cédée aux zones polaires” (7, pág. 202-203).

De cómo se efectúa este **transporte de calor** por medio de las corrientes aéreas y oceánicas, *Milankovich*, sin embargo, no nos lo había dicho. Este triunfo corresponde recién al genial profesor *A. Defant*, hoy día sin duda una de las notabilidades más grandes de que se puede enorgullecer la ciencia meteorológica y oceanográfica. El estudio de referencia, con la cual se inicia la tercera y la última etapa en la búsqueda de la solución de este problema, se titula: “*Die Zirkulation der Atmosphäre in den gemässigten Breiten der Erde. Grundzüge einer Theorie der Klimaschwankungen*”; apareció en la célebre revista de la Sociedad Geográfica Sueca, “*Geografiska Annaler*”, en Estocolmo, en el año 1921 (8). Un resumen bastante amplio de este estudio, confeccionado por *Defant* mismo, se encuentra en la “*Meteorologische Zeitschrift*” del año 1922, pág. 8-14.

El triunfo de *Defant* se debe a la feliz aplicación del concepto de “turbulencia”, — introducido en la ciencia meteorológica durante la gran guerra por los sabios *Taylor* (10) y *W. Schmidt* (11), — al análisis de la circulación atmosférica general. Su manera de razonar la encontramos condensada en estas pocas líneas (12, pág. 75):

En las zonas templadas y frías de nuestra tierra, la circulación atmosférica, como se sabe, es extremadamente **desordenada**, careciendo ella por completo de la constancia en la dirección y en

la potencialidad que le son tan particulares en la zona ecuatorial, bajo el régimen de los vientos alizios. Pero precisamente en este movimiento desordenado, turbulento, reside la fuerza que sostiene el intercambio de calor entre el ecuador y los polos. Es sabido también que en un medio cualquiera, en que existe un gradiente térmico, pronto se inicia un movimiento desordenado, turbulento, cuya finalidad es realizar la isoterma por medio de una mezcla perfecta de la masa que forma el medio. La intensidad de este movimiento dependerá, como es natural, de la magnitud del gradiente térmico existente.

Pues, también la circulación atmosférica general, tan desordenada en las zonas templadas de la tierra, es en realidad una mezcla de masas aéreas de caracteres térmicos distintos; unas procediendo de la zona ecuatorial y otras viniendo de las zonas polares. Y también el resultado de esta mezcla sería una isoterma perfecta en la superficie de la tierra, si la radiación solar, cuya intensidad, como se sabe, depende de la latitud, no renovase constantemente el gradiente térmico entre el ecuador y los polos. Este gradiente, considerando la atmósfera “en calma”, como lo hizo Milankovich, estaría condicionado solamente por la insolación, — con el máximo en el ecuador y mínimo en los polos, — y por la irradiación que, como se sabe, es aproximadamente igual por toda la superficie de la tierra. Pero la atmósfera está “en movimiento”, por lo que corresponde al gradiente térmico un valor un tanto reducido, debido a la extracción de masas aéreas calientes de la zona ecuatorial, y su reemplazo por otras frías, de origen polar. Tres son, en consecuencia, los factores principales que determinan las temperaturas medias de los distintos paralelos. Son estos: **la radiación solar, la irradiación terrestre y la circulación atmosférica general**, ordenada en la zona ecuatorial y desordenada, turbulenta en las zonas templadas de la tierra.

Hermosa es también la descripción que da Defant de la importancia que este movimiento turbulento de las masas aéreas reviste en la circulación atmosférica extratropical. Dice al respecto: “Si bien es cierto que la temperatura media de la tierra, en su conjunto, lo determina la radiación solar, su variación en

función de la latitud, como también sus aberraciones estacionales, dependen de otros factores. Entre éstos la turbulencia de la circulación atmosférica extratropical ocupa un lugar preponderante. Ella es la que lleva las entropías necesarias a las regiones de latitudes altas; ella es la que regulariza el intercambio de temperaturas en el transcurso de las estaciones del año; ella es la que favorece la formación de condiciones térmicas que permiten el desarrollo de la vida orgánica en las altitudes altas; y ella es la que distribuye equitativamente el calor solar por la tierra, impidiendo de esta manera que en la zona tropical se seque todo por el exceso de calor y que en las regiones de latitudes altas se entumescas toda la vida por el frío glacial. La turbulencia atmosférica es uno de los más grandiosos fenómenos que podemos admirar en nuestra tierra, de por sí rica en fenómenos naturales llamativos" (8. pág. 232).

Entrando ya más en detalles, podemos decir que los méritos del estudio de Defant son varios. El primero consiste en haber determinado la **cantidad de calor solar** que la circulación atmosférica planetaria transporta de la zona ecuatorial a las dos zonas polares. La ecuación diferencial que le sirvió de partida, fué la siguiente:

$$S = -c A \frac{1}{R} \frac{dT}{d\varphi} \quad (1)$$

en la cual significa:

$c$  = calor específico del aire

$A$  = coeficiente de turbulencia

$R$  = radio de la tierra

$T$  = temperatura media de un paralelo

$\varphi$  = latitud del mismo paralelo

$S$  = calor transportado.

Valores numéricos para el "coeficiente de turbulencia" pudo conseguir Defant por varios métodos, dando todos ellos un valor medio de  $5 \cdot 10^7$  gr/cm sec, lo que quiere decir que el "coeficiente de pseudo-conductibilidad" del aire, en el plano horizontal, es enorme; más o menos diez millones de veces mayor que el "coeficiente de conductibilidad" de nuestros metales.

Con los valores numéricos del caso,

$$c = 0,238 \text{ cal/gr } 1^\circ$$

$$A = 5 \cdot 10^7 \text{ gr/cm sec}$$

$$d\varphi = 10^\circ$$

$$R = 6,37 \cdot 10^8 \text{ cm}$$

$$Rd\varphi = 1,11 \cdot 10^8 \text{ cm}$$

y tomando como unidad del tiempo el minuto, esta ecuación se reduce a

$$S \frac{\text{gr cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}} = 6,33 \text{ } dT^\circ \quad (2)$$

por medio de la cual podemos calcular ya la cantidad del calor transportado, siempre que dispongamos de las temperaturas medias de los paralelos de 10 a 10 grados. Este cálculo lo hemos efectuado para nuestro hemisferio (véase la tablilla II), toman-

TABLILLA II.

Latitud	-0°	-10°	-20°	-30°	-40°	-50°	-60°	-70°	-80°	-90°
$T^\circ =$	+26,2	+25,3	+22,9	+18,4	+11,9	+ 5,5	- 4,1	-13,3	-24,7	-30,0
$dT^\circ =$		-0,9	-2,4	-4,5	-6,5	-6,4	-9,6	-9,2	-11,4	-5,3
$S \frac{\text{gr cal}}{\text{cm}^2 \text{ min}} =$		5,7	15,2	28,5	41,2	40,5	60,7	58,3	72,0	33,5

do como base las temperaturas medias dadas últimamente por Meinardus (1, pág. 848) (13).

Los valores obtenidos son “valores aproximados” solamente, y como tales, expuestos a correcciones, naturalmente, ante todo por la causa que la distribución de los continentes y mares ejerce. Pero estas correcciones no llegarían a mucho. Queda establecido, pues, que la circulación atmosférica planetaria transporta, a través de una superficie de 1 cm<sup>2</sup>, expuesta verticalmente sobre los paralelos, en la zona geográfica a que pertenecen nuestras pampas inmensas, como se puede deducir de la figura 2, la enorme cantidad de 40 gramcalorías por minuto!

El segundo mérito del estudio de Defant consiste en haber deducido, al fin, las **temperaturas medias** de los distintos parale-

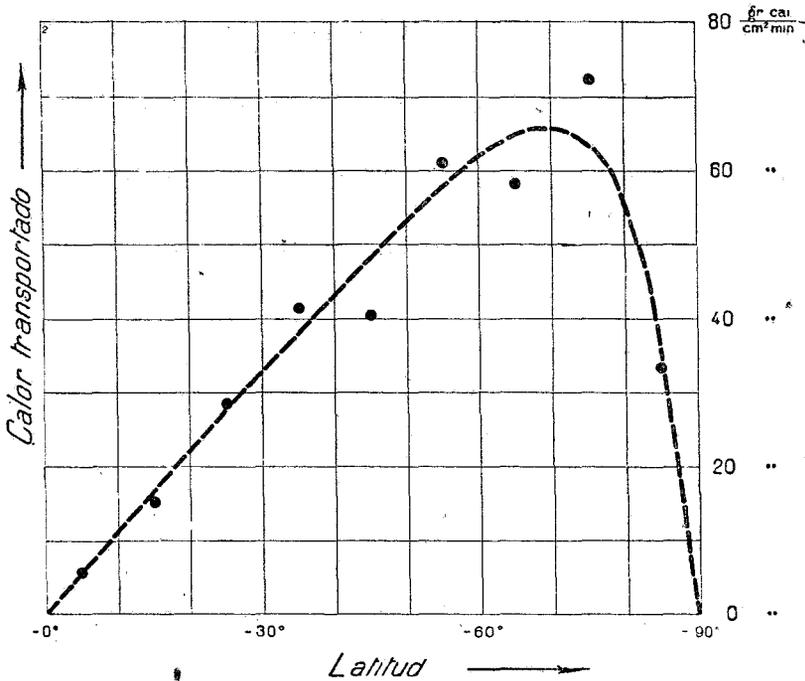


Figura 2. — Cantidad de calor solar transportado a través de los distintos paralelos por la circulación atmosférica planetaria.

los de la tierra. La ecuación diferencial parcial que le ha servido de punto de partida en el análisis correspondiente, es la siguiente:

$$\frac{1}{\cos \varphi} \frac{\delta}{\delta \varphi} \left\{ A \cos \varphi \frac{\delta T}{\delta \varphi} \right\} - \lambda \varrho R^2 (T - T_0) = 0 \quad (3)$$

donde significa:

A = coeficiente de turbulencia

$\lambda$  = coeficiente de irradiación

$\varrho$  = densidad del aire

R = radio de la tierra

$\varphi$  = latitud de un paralelo cualquiera

T = temperatura media efectiva del paralelo

$T_0$  = temperatura media del mismo en clima solar

A la solución de esta ecuación pudo llegar solamente, haciendo uso de las “funciones cónicas” de Mehler, que, por otra parte, tiene una forma tal que permite calcular progresivamente las temperaturas medias de los paralelos, introduciendo valores numéricos convenientes, tanto para el coeficiente de turbulencia  $A$ , como también para el coeficiente de irradiación  $\lambda$ . El cálculo numérico fué ejecutado por Defant sólo para el hemisferio norte; nada se opone, desde luego, a hacerlo de igual manera también para el hemisferio sur. Los resultados por él obtenidos, están representados en la figura 3.

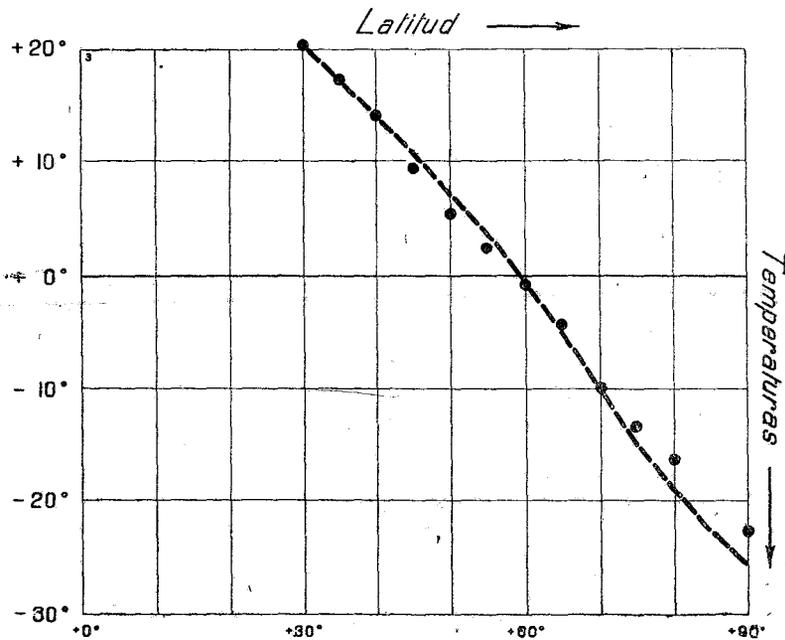


Figura 3. — ---- Temperaturas calculadas  
 . Temperaturas registradas.

Es conveniente señalar que tanto el coeficiente  $A$ , como también el coeficiente  $\lambda$ , resultaron “variables”, es decir: un tanto dependientes de la latitud. El coeficiente  $A$  tiene valores mínimos en el ecuador y en el polo, y un valor máximo en la zona comprendida entre los paralelos de 40° y 60°, zona que se ca-

raeteriza precisamente por la magnitud y frecuencia de las variaciones aperiódicas de la presión barométrica. Esta zona es, como se sabe, la gran cancha, por la cual pasan los ciclones y anticiclones que no son otra cosa que los "elementos de turbulencia" de esta nueva manera de considerar los fenómenos atmosféricos; elementos grandísimos, desde luego, de 1000 a 2000 kilómetros cada uno, y sin embargo jugando el simple papel de una molécula en la teoría cinética de los gases. El coeficiente  $\lambda$  crece hacia el polo, donde alcanzan un valor que es múltiplo del que le corresponde en las latitudes medias. Ya que este coeficiente representa la rapidez, con que una masa aérea tiende a alcanzar la temperatura que le corresponde en un estado de equilibrio térmico, nos da buenos indicios respecto a la cantidad de calor que se pierde en la zona polar, fenómeno con que nos ocuparemos más adelante.

Otro gran mérito del estudio de Defant consiste en haber establecido la ecuación diferencial general de la **variación del clima**. Su forma es:

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \frac{1}{\rho R^2 \cos \varphi} \cdot \frac{\delta}{\delta \varphi} \left\{ A \cos \varphi \cdot \frac{\delta T}{\delta \varphi} \right\} - \lambda (T - T_0) \quad (4)$$

significando de nuevo:

$A$  = coeficiente de turbulencia

$\lambda$  = coeficiente de irradiación

$\rho$  = densidad del aire

$R$  = radio de la tierra

$\varphi$  = latitud de un paralelo cualquiera

$T$  = temperatura media efectiva del paralelo

$T_0$  = temperatura media del mismo en clima solar.

En esta ecuación tanto  $A$ , como  $\lambda$  y  $T_0$  deben ser considerados como dependientes o sean funciones del tiempo. La variación en  $T_0$  representaría la variación que se produce en la insolación, sea por el cambio de la intensidad de la radiación solar, o sea por la modificación ocurrida en los elementos de la órbita terrestre. La variación en  $\lambda$  será un reflejo de la variación ocurrida en la irradiación, sea en consecuencia de una modificación de la composición de la atmósfera, o de una modificación en sus propiedades

ópticas, de su transparencia en primer lugar, alterada por una erupción volcánica por ejemplo. La variación del  $A$  señalaría modificaciones producidas en la intensidad de la circulación atmosférica, y con ella en la magnitud del transporte del calor solar. Que las variaciones de este coeficiente son importantísimas, lo ha demostrado bien claramente *Defant*; de ello nos ocuparemos en el segundo capítulo de nuestro estudio.

Desde luego, esta ecuación es complicadísima, y en consecuencia grandes las dificultades matemáticas a vencer. *Defant* abordó resueltamente su solución, pero sin resultado completo. Únicamente consiguió algunas soluciones parciales, considerando constantes los coeficientes  $A$  y  $\lambda$ ; soluciones que sin embargo son de mucha importancia, porque representan un período climatológico con características térmicas idénticas a las que son particulares al período undecenal de origen solar, según las características deducidas por el célebre climatólogo *W. Köppen* (46). Mayor interés revistirían naturalmente las soluciones, considerando variables  $A$  y  $\lambda$  al mismo tiempo, porque sabemos que la intensidad de la circulación atmosférica es un elemento variable, y no ignoramos que precisamente en esta variación reside la causa de muchos cambios del clima. Pero, como hemos dicho, las dificultades matemáticas que se presentan en este caso, son, por el momento, insalvables. Los períodos climatológicos, originados por la variación en la intensidad de la circulación atmosférica planetaria, carecen, pues, todavía de una base matemática exacta. Y entre estos períodos se debe computar también el período de 3,7 de años, de predominio absoluto de los fenómenos climatológicos nuestros.

Desde luego, los resultados obtenidos por *Defant*, ante todo los relativos a la gran cantidad del calor solar, transportado por la circulación atmosférica general, eran en verdad sorprendentes, por lo que se los recibió con reserva, y consideró con cierta incredulidad, hasta tanto dos grandes de la ciencia meteorológica no los confirmaron plenamente. Eran estos: el eximio profesor de la Universidad de Viena y Director del Servicio Meteorológico de Austria, *F. M. Exner*, fallecido recientemente, y el no menos célebre profesor de la Universidad de Estocolmo, *A. Angström*.

*Exner*, en su clásica obra "Dynamische Meteorologie", 2ª

edición, pág. 236, párrafo titulado: "Transporte de calor de las latitudes bajas a las latitudes altas", toma un nuevo camino, un tanto distinto del de D e f a n t, para llegar a la determinación de la cantidad del calor transportado. Como resultado de su análisis matemático obtiene los siguientes valores numéricos (corregidos ya por un error en la medida del tiempo) para el coeficiente de turbulencia:

$$\begin{array}{ll} \varphi = 30^\circ & A = 1,2 \cdot 10^7 \text{ gr/cm sec} \\ \quad = 50^\circ & \quad = 1,3 \cdot 10^7 \quad \text{,,} \\ \quad = 70^\circ & \quad = 1,6 \cdot 10^7 \quad \text{,,} \end{array}$$

en plena concordancia con los resultados de D e f a n t, tanto en lo que respecta a la magnitud de este coeficiente, como también en lo referente a su crecimiento con la latitud, hasta alcanzar el valor máximo en la zona de las mayores perturbaciones atmosféricas (14).

A. A n g s t r ö m por su parte se ocupó en dos estudios distintos con el problema planteado por D e f a n t. En el primero, titulado: "Evaporation and the horizontal eddy convectivity of the atmosphere" (15), trató de deducir de la distribución geográfica del vapor de agua un valor adecuado para el coeficiente de turbulencia, llegando a la conclusión de que el valor  $A = 4,5 \cdot 10^7$  concuerda lo mejor posible con la realidad, en plena armonía con el resultado ya obtenido por D e f a n t. En el segundo estudio, titulado "Energiezufuhr und Temperatur auf verschiedenen Breitenkreisen" (16), demostró que la temperatura media de los paralelos, expresada para el hemisferio boreal por la ecuación de F o r b e s,

$$T^0 = 27,01 - 44,9 \text{ sen}^2 (\varphi - 6^\circ,1) \quad (5)$$

es la consecuencia de la energía total suministrada a cada paralelo, más la energía transportada de la zona ecuatorial a las dos zonas polares por medio de la circulación atmosférica planetaria, cuya intensidad se puede definir con un coeficiente de turbulencia constante;  $A = 5,4 \cdot 10^7$ ; de nuevo en plena concordancia con el valor deducido por D e f a n t.

Después de estas clásicas comprobaciones vinieron otras. Entre ellas debemos mencionar ante todo un importantísimo estudio

de R. M ü g g e (17), en el cual se demuestra que las temperaturas observadas en la estratósfera pueden ser explicadas con la sencilla suposición de que las corrientes de energía que la atraviesan en el sentido vertical, no se compensan, mutuamente, sino que, en la zona ecuatorial prevalece la corriente dirigida hacia la tierra, (consecuencia de la radiación solar) y en las zonas polares la corriente dirigida hacia el espacio (efecto de la irradiación); existiendo, además, una corriente de energía, transportadora del calor de la zona ecuatorial hacia las dos zonas polares, necesitadas de ella. La cantidad del calor que, según M ü g g e, transpasa los distintos paralelos, resulta igual al determinado por D e f a n t, de lo que se deduce un valor numérico para el coeficiente de turbulencia de  $A = 5.10^7$  gr/cm sec.

Luego debemos citar las comprobaciones suministradas por los célebres meteorólogos ingleses L. F. R i c h a r d s o n y D. P r o c t o r (18), quienes determinaron el coeficiente de turbulencia, primero por medio de la dispersión de las órbitas de globitos, lanzados al aire, obteniendo valores entre  $0,2.10^7$  y  $130.10^7$  gr/cm sec, con un término medio de  $5.10$  gr/cm sec; y luego, considerando la difusión del polvo volcánico, observado después de ciertas erupciones, obteniendo un valor de  $69.10^7$  gr/cm sec para el coeficiente de turbulencia.

Y por último debemos mencionar la comprobación dada por el célebre director del servicio meteorológico inglés G. C. S i m p s o n. En uno de sus estudios recientes (23) este sabio determinó la cantidad del calor transportado a través de los distintos paralelos de una manera verdaderamente original, pero no ha dado valor numérico para el coeficiente de turbulencia. Sin embargo podemos deducirlo, si bien con gran aproximación solamente. Para esto es necesario tener presente que la cantidad máxima del calor transportado a través de un paralelo, el de  $40^\circ$  de latitud, es, según él,  $1,83.10^7$  gr cal/cm min. Suponiendo ahora, lo que no es de todo exacto, que todo este calor fuera transportado por las masas aéreas troposféricas solamente, y admitiendo para éstas una altura media de 10 kilómetros más o menos, obtenemos el valor de  $3,6.10^7$  gr/cm sec, en buena concordancia con los resultados de D e f a n t.

En la tablilla III hemos reunido los resultados de todas estas determinaciones. En vista de ellos podemos considerar ya como definitivo el valor de  $5 \cdot 10^7$  gr/cm sec, y con él el **transporte de calor solar** de la zona ecuatorial a las dos zonas polares como un fenómeno natural **perfectamente comprobado**.

TABLILLA III.

**Resultados de las distintas determinaciones del coeficiente de turbulencia A.**

N°	Autor:	A gr/cm sec	Referencia bibliográfica N°.
1.	Defant	$5,0 \cdot 10^7$	8, pág. 219
2.	Defant	$30 \cdot 10^7$	8, pág. 247
3.	Defant	$5-10 \cdot 10^7$	19
4.	Defant	$5,5 \cdot 10^7$	19
5.	Defant	$1,7 \cdot 10^7$	20
6.	Exner	$1,2-1,6 \cdot 10^7$	14
7.	Angström	$3,5 \cdot 10^7$	20
8.	Angström	$4,5 \cdot 10^7$	15
9.	Angström	$5,4 \cdot 10^7$	16
10.	Mügge	$5 \cdot 10^7$	17
11.	Richardson y Proctor	$0,2-130 \cdot 10^7$	18
12.	Richardson y Proctor	$5 \cdot 10^7$	18
13.	Richardson y Proctor	$60 \cdot 10^7$	18
14.	Simpson	$3,5 \cdot 10^7$	23

Haciendo caso de las insinuaciones de Ficker y de Angström, Defant se esmeró también en la determinación de la cantidad de calor solar, transportado por la circulación oceánica (20). Basándose en un estudio de W. Schmidt (21), y haciendo uso de los datos suministrados por G. Wüst (22), determinó de nuevo la cantidad del calor que las aguas oceánicas transportan a través de los distintos paralelos. Estos cálculos han podido ser llevados, sin embargo, hasta el paralelo  $50^\circ$  de latitud boreal y  $40^\circ$

de latitud austral solamente, porque el régimen térmico más allá de estos paralelos está trastornado ya por la capa de hielo que se forma todos los años en aquellas regiones, y cuya fusión absorbe una considerable cantidad de calor. El resultado a que llegó es que el coeficiente de turbulencia que caracteriza la circulación oceánica, tiene un valor medio de  $8 \cdot 10^7$  gr/cm sec, es decir que es un tanto mayor que el correspondiente a la circulación atmosférica, y que su valor máximo lo alcanza en la zona ecuatorial, donde, como es sabido, se efectúa la mezcla de las corrientes tro-

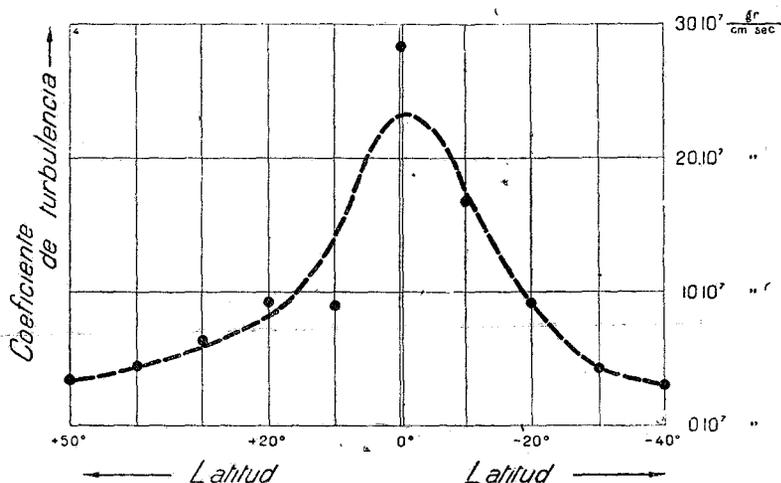


Figura 4. — Representación gráfica del coeficiente de turbulencia de la circulación oceánica, en dependencia de la latitud.

picales con las aguas de las corrientes de procedencia polar. El mayor transporte de calor, como se puede ver en la figura 5, tiene lugar, sin embargo, en las regiones subtropicales, y no en la zona ecuatorial, ni tampoco en las latitudes altas, como es el caso en la circulación atmosférica.

Los estudios realizados hasta hoy consideran este magno fenómeno, llamado **transporte del calor solar** de la zona ecuatorial a las zonas polares solamente en su forma general, porque faltan todavía datos suficientemente exactos de todos los factores que entran en juego, para poder efectuar un cálculo más preciso, más

minucioso. Así es que recién para más adelante podemos esperar investigaciones que consideren más en detalle este problema. Podrá hacerse esto, cuando conozcamos mejor la circulación oceáni-

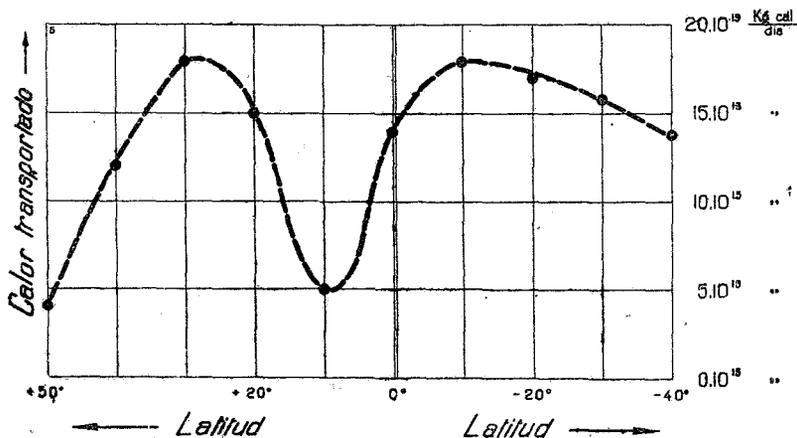


Figura 5. — Representación gráfica del calor transportado por la circulación oceánica, a través de los distintos paralelos.

ca y atmosférica, y sepamos apreciar más claramente la influencia que los continentes ejercen sobre este fenómeno. Pero ya ahora vislumbramos un notable resultado para estas investigaciones científicas futuras que será que: precisamente la parte austral del continente sudamericano, ocupado por el territorio de nuestra república, sobresale por la gran cantidad de calor que lo atraviesa en su desplazamiento de la zona ecuatorial hacia las regiones antárticas. Nuestras pampas serán consideradas como un camino principal, una verdadera "Heerstrasse" para este transporte de energía solar, el más brillante de las tres que ya se pueden señalar en el hemisferio austral!

Así debe ser, en atención debida del régimen de los vientos que observamos en nuestras llanuras, por encima de las cuales continuamente soplan vientos del sector norte, vientos que llevan aire caliente y húmedo hacia el sur. Estos vientos nos llegan del Océano Atlántico, pisando nuestro continente frente a las extensas costas de Brasil. Su paso obligatorio los lleva por encima de la corriente marina, llamada "corriente de Brasil", río inmen-

so de calor que se mueve lentamente hacia el sur, caldeando el aire que sopla encima de ella, y llenando de vapor de agua a sus entrañas...

Las temperaturas que nuestros termómetros registran al fondo del océano aéreo, no son, pues, originadas sólo por la radiación solar y atmosférica y la irradiación terrestre, sino que en la formación de ellas participa, muchas veces de una manera preponderante, el estado térmico del aire, traído por el viento al lugar de observación. Las temperaturas registradas serán altas, cuando el lugar de observación esté cubierto por aire caliente, llegado de región más templada que la nuestra; y serán bajas cuando aire frío, de procedencia polar cubra nuestro territorio, sin que hubiera cambiado ni la intensidad de la radiación solar, ni la pérdida por irradiación. El **transporte de calor solar** por medio de la circulación atmosférica debe considerarse como un factor de importancia capital en la formación de las características de nuestro "tiempo".

Interesante es también fijar la posición de la "línea neutral", según el concepto de v. Bezold, o sea del paralelo, ya que de una grosera determinación se trata solamente, que divide la tierra en tres zonas, en una ecuatorial, en la cual prevalece la insolación y en dos polares, en las cuales predomina la emisión, o sea la irradiación. v. Bezold (5) había señalado para ella la faja comprendida entre los paralelos de 35° y 40°; Milankovich (7) la ubica aproximadamente sobre el paralelo de 41°; Exner (14) deduce para ella la latitud de 38°; según Angström (16) su posición es 35° 16', mientras tanto según Simpson (23) corresponde ubicarla sobre el paralelo de 30° 28'. Como se ve, la concordancia entre estos valores es suficientemente buena. Simpson, en un estudio nuevo, titulado "The distribution of terrestrial radiation" entra ya más en detalle del problema, confeccionando mapas de toda la tierra, en los cuales se encuentran representadas las posiciones de las "líneas neutrales" durante los meses Enero y Julio, con todas las sinuosidades que les imprime la influencia de los continentes y mares (24. pág. 62 y 63).

El segundo estudio de Angström antes citado (16) reviste también bajo otro punto de vista mucho interés, porque en él encontramos valores numéricos muy aproximados de la energía to-

tal que obtienen los distintos paralelos de la tierra, teniendo en cuenta todas las fuentes de suministro, como ser: la ganancia por la radiación solar y atmosférica, la pérdida por irradiación y por evaporación, y el incremento por causa de condensación; valores que están representados en la figura 6 por medio de una serie de

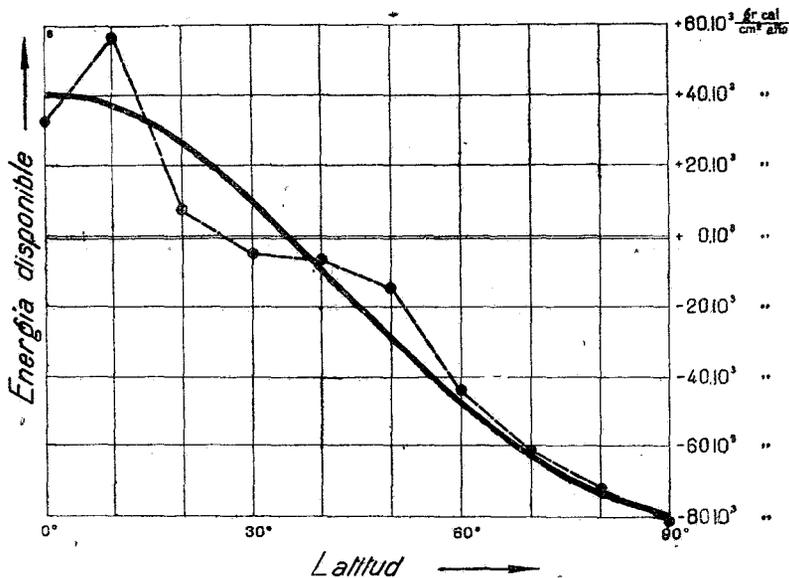


Figura 6. — Balance térmico de los distintos paralelos, según Angström.

puntos, y pueden ser expresados por la fórmula:

$$E \frac{\text{gr cal}}{\text{cm}^2 \text{ año}} = -80.10^3 + 120.10^3 \cos^2 \varphi$$

significando:  $\varphi$  = la latitud y E el exceso de la energía suministrada con respecto a la pérdida.

Esta figura nos muestra a las claras que en la zona ecuatorial hay un exceso de energía y en las zonas polares una notable deficiencia. Semejante estado térmico naturalmente no puede subsistir, porque originaría temperaturas del aire siempre más crecientes en la zona tropical, y siempre más bajas en las zonas glaciales; fenómenos que la observación directa no confirma. Para que haya constancia en las temperaturas medias que caracterizan las distintas zonas geográficas de la tierra, es necesario que sea extraído el

calor solar excesivo de la zona ecuatorial, y llevado a las dos zonas polares. Este transporte lo efectúa la circulación atmosférica y oceánica; ellas son, en realidad las encargadas por la naturaleza, de efectuar una mejor y más provechosa distribución del calor solar por la superficie de la tierra.

\*

\* \*

El **transporte del calor solar** desde la región ecuatorial hacia las regiones polares **existe** pues. Es uno de los fenómenos naturales más grandiosos que se pueden observar sobre la tierra; fenómeno, cuya importancia para la vida es inmensa.

Y precisamente sobre la existencia de este fenómeno se basa nuestra explicación del encadenamiento de los fenómenos climatológicos sudamericanos, tal como lo hemos dado en nuestro estudio, “La sequía reinante (del año 1929) y su probable duración”. En efecto, sentamos la siguiente base para toda explicación posterior;

“El calor solar penetra en la atmósfera de la tierra principalmente por la zona ecuatorial y se escapa por los dos casquetes polares. La traslación de este calor solar, desde la zona tórrida hasta las zonas glaciales, se realiza por medio de la “circulación atmosférica”, o dicho sencillamente, por medio de los vientos”.

Como se ve, este párrafo no es otra cosa que una breve y sencilla descripción, — quiso serlo amena también, — del grandioso fenómeno, llamado “transporte del calor solar”, sin mencionar por el momento la participación que en él corresponde a la circulación oceánica, simplemente para no dificultar la comprensión del fenómeno básico, dejando más bien para después el señalamiento de la importancia que esa circulación ejerce.

Veamos ahora qué objeciones hace a esta descripción el señor **E s c o l a**. Ya al principio de su crítica encontramos esta frase sorprendente: **El señor J a g s i c h se inicia de entrada con dos tesis nuevas, pero erróneas sobre el proceso de absorción y de la distribución del calor que nuestra tierra recibe del sol.**

El capitán **E s c o l a**, quien ocupaba durante siete meses el alto cargo de “jefe de la división meteorología” de la Dirección de Meteorología del Ministerio de Agricultura de la Nación, y quien,

como tal, hubiera tenido que ser el director técnico de las investigaciones científicas que tienen a su cargo las secciones: meteorología sinóptica (carta del tiempo), climatología, agrometeorología, aerología, meteorología marítima y oceanografía, confiesa con esta crítica que de los progresos alcanzados por la ciencia meteorológica en estos últimos cuarenta años, no tiene conocimiento! Con la simple constatación de este hecho, poco honroso para el señor ex-jefe, podríamos poner punto final a este capítulo. Pero toda la crítica del señor capitán es tan audaz, tan hueca, tan llena de calificativos deprimentes para nosotros, que no solamente tenemos derecho de reverla, sino hasta la **obligación** misma de hacerlo.

¡Principiemos, pues!

El señor *Escola* cree que nosotros ya de entrada nos hemos iniciado con “dos tesis nuevas, pero erróneas”. Lamentamos tener que corregirlo. En nuestro estudio hay una sola tesis. Y esa tesis no es nueva, ni mucho menos inventada o descubierta por nosotros. Es conocida ya desde hace 40 años. Fué establecida por von *Bezold*, y presentada a la consideración de la Academia de Ciencias de Berlín el 28 de Mayo de 1891 (5).

Y no solamente que la tesis que sostenemos no es nueva, ni nuestra, sino que tampoco es errónea. Las investigaciones de *Emden* (6), de *Milankovich* (7), de *Defant* (8) (9), de *Exner* (14), de *Angström* (13) (16), de *Mügge* (17), de *Richardson* y *Proctor* (18) y de *Simpson* (23) lo han demostrado con el rigor matemático debido, yendo por muy distintos caminos pero llegando al mismo resultado. Esta tesis hoy ya no se discute; se conoce o ne se conoce. Esto es todo.

Y bien, para discutir sobre el valor o desacierto de nuestro modo de interpretar el encadenamiento de los fenómenos climatológicos sudamericanos, es absolutamente necesario tener conocimiento cabal de esta “tesis”, o dicho claramente, conocer la existencia del grandioso fenómeno, denominado “transporte de calor solar”. Lamentamos que el señor ex-jefe no posea este conocimiento, y nos extraña sobremanera de que sin embargo tenga la audacia de abrir una controversia científica.

Sigue el señor *Escola*: La lectura de la transcripción anterior no deja lugar a dudas de que este calor penetraría por la

zona ecuatorial y como por un tubo se escaparía, perdiéndose, por las regiones polares y esto ni como forma de una más sencilla y mejor explicación podría aceptarse por cuanto la explicación exacta de este mecanismo está al alcance de cualesquiera.

En efecto, tanto según nosotros, como según los meteorólogos ilustres que acabamos de citar, "el calor solar penetra por la zona ecuatorial y se escapa por las regiones polares". Los valores numéricos que vienen al caso, establecidos por Angström, están representados en nuestra figura 6. Solamente del "tubo" no hemos hablado, porque no venía al caso. Si el señor Escola, en lugar de decir "tubo", hubiera dicho "condueto", entonces estaríamos conformes sobre la interpretación que da a nuestra descripción. Pero es nuestro deber recordar que ya v. Bezold "no dejó lugar a dudas" al respecto, porque dijo: "todo el intercambio de calor en la atmósfera y por la superficie de la tierra, teniendo en cuenta promedios anuales, podemos imaginarnos reemplazado por una corriente de calor que penetra en la zona ecuatorial por el límite de la atmósfera, y que, después de dividirse en dos ramas, sale por las zonas polares". (5, pág. 1152). Así se habla, y así hemos hablado, al querer dar una explicación del transporte del calor solar "al alcance de cualesquiera".

Pero tratándose de un análisis matemático, entonces es necesario volver al clásico "tubo". En efecto, cortando nuestra envoltura aérea con dos planos, por los paralelos  $\varphi$  y  $\varphi + d\varphi$ , obtenemos una masa aérea, de forma de un anillo. Efectuando ahora una integración cualquiera, entre dos límites bastante distantes, obtenemos un "tubo", ya que la altura de la atmósfera es una magnitud pequeña en comparación con el radio de la tierra. Así es que tanto Defant (8), como Exner (14), Angström (16), y Mügge (17), tuvieron que recurrir a ese "tubo", en su análisis matemático del problema. Pero, dicho sea de paso, las consideraciones de ellos **no están** "al alcance de cualesquiera"; todo lo contrario, la ecuación diferencial 3, establecida por Defant, espera todavía el cerebro matemático suficientemente potente, capaz de resolverlo.

Continúa el señor Escola: **Además, la circulación atmosférica no tiene por misión el transporte del calor solar sino el resta-**

**blecimiento del equilibrio térmico (que no es la misma cosa) entre las diversas regiones del planeta desigualmente calentadas debido a la permanente desigual absorción del calor en todas ellas.**

Ante todo debemos decir, con la claridad meridiana que ningún equilibrio térmico perdido puede ser restablecido, **sin** agregar o quitar calor. Así que si la misión de la circulación atmosférica es restablecer el equilibrio térmico entre las diversas regiones del planeta, entonces **debe** transportar calor!

Después, las diversas regiones del planeta **no** están desigualmente calentadas, debido a la “permanente desigual absorción del calor en todas ellas”, sino debido a la forma esférica de la tierra! En el curso de un año, una superficie de  $1 \text{ cm}^2$  recibe  $157.10^8$  gramecalorías en el ecuador y sólo  $23.10^8$  en los polos, supuesto un coeficiente de transmisión para la atmósfera de 0,6. Como se ve, el ecuador está 6,8 veces más favorecido por la radiación solar que los polos. Esto es fundamental, ya que la cantidad del calor absorbido está en relación directa con la cantidad del calor suministrado. Resulta en consecuencia que la absorción es grande en la zona ecuatorial y pequeña en las zonas polares, por lo que las temperaturas son altas en la primera y bajas en las últimas. Pero estas temperaturas serían “más altas” todavía que las registradas en la zona ecuatorial, y “más bajas” que las observadas en las zonas polares, si no interviniese el “transporte del calor solar”, ese admirable drenage de energía en beneficio de las zonas polares y en manifiesto detrimento de la zona tórrida de la tierra. E m d e n (6) y M i l a n k o v i c h (7) lo han demostrado claramente.

Además, cuando se trata de explicar el equilibrio térmico sea de la tierra en su totalidad, o sea de sus distintas regiones geográficas, es deficiente hablar de “absorción del calor” solamente; es necesario fijar la atención también en la “emisión del calor”. La región calentada debe enfriarse también; si así no fuera, notaríamos un aumento continuo de las temperaturas en ella, lo que evidentemente no es el caso. Desde que existen observaciones meteorológicas exactas, y también desde mucho antes, la temperatura media de la tierra, como también de sus distintas regiones, **no** ha variado.

Pero el modo de “absorber” el calor y de “deshacerse” de él nuevamente, es muy distinto, como se sabe, según si se consideran continentes o mares. Débese esto a la gran diferencia del calor específico que caracteriza la tierra y el agua en primer término, y luego a la circunstancia de que masas de líquidos se desplazan fácilmente. En mérito de estos factores, el calor absorbido penetra poco en los continentes, pero mucho en los mares, gracias a la “convección vertical” o sea al intercambio de masas de agua de distintas densidades entre la superficie y las profundidades del océano. La consecuencia de ésto es que la superficie de los continentes se calienta mucho, pero poco la de los mares; por lo que el calor absorbido es fácilmente emitido por los continentes, pero no por los mares que tardan mucho en deshacerse de él. Esta lerdura la aprovechan las corrientes oceánicas, llevando el calor absorbido por el agua hacia otras zonas geográficas, más necesitadas de él. La cantidad de calor así transportado a través de los distintos paralelos de la tierra fué determinado por Defant (20); los valores numéricos por él deducidos se encuentran representados en nuestra figura 5. No cabe duda, pues, de que los continentes y los mares son factores de importancia para el magno fenómeno de “transporte de calor solar”. Ellos influyen sensiblemente sobre la posición de las dos “líneas neutrales” que, según v. Bezold, dividen la superficie de nuestra tierra en una zona ecuatorial y dos zonas polares, como así mismo sobre el “exceso de calor” que hay disponible en la primera y la “deficiencia de calor” que se nota en las últimas. Simpson, en uno de sus estudios últimos, trató de determinar esta influencia. Los resultados de sus cálculos que abarcan toda la tierra, se encuentran representados en dos mapas, llenos de sugerencias interesantes sobre las distintas condiciones que encuentran la circulación atmosférica y oceánica para el “transporte del calor solar” debido a la “permanente desigual absorción del calor en todas partes” (24, pág. 62 y 63).

Sigamos adelante. Dice el señor Escobar: **Vamos a demostrar de la manera más sencilla posible hasta dónde son erróneos estos conceptos emitidos por el señor Jagsich que se encuentran sin embargo en algunos textos de meteorología destinados a la enseñanza elemental.**

En este párrafo hay algo de audacia, pero desgraciadamente ninguna lógica. Antes el señor Esc o l a dijo que nos habíamos iniciado con dos tesis “nuevas pero erróneas”, ahora resulta que “se encuentran sin embargo en algunos textos de meteorología destinados a la enseñanza elemental”. ¿Cuál es la verdad?

Los conceptos emitidos no son nuevos, se conocen ya desde 40 años; tampoco son erróneos, como tenemos el agrado de demostrarlo.

El fenómeno llamado “transporte del calor solar” es conocido desde el año 1891, así que todo texto bueno, publicado después de esta fecha, puede contener referencias de él; pero “cualitativas” solamente, como se entiende, ya que su conocimiento “cuantitativo” data recién del año 1921. Y es simplemente sorprendente que la descripción de este fenómeno se encuentre aún hoy, 10 años después, en tan pocos tratados como hemos tenido oportunidad de constatar. Son estos los (14) (12) (11) (25) y (54) de nuestro índice bibliográfico. Referencias sí hemos encontrado muchas; así por ejemplo, en: (27) (28) (1) (29) (30) (31) (32) (33). Vale la pena de mencionar que la mayoría de estos tratados está destinada a la enseñanza universitaria, algunos de ellos exclusivamente para los especialistas en la materia.

Veamos ahora “hasta dónde son erróneos” nuestros conceptos, según el señor capitán Esc o l a. Dice al respecto: **Como los fenómenos meteorológicos que observamos en la superficie de la tierra se suceden continuamente sin degradación, necesario es suponer que deben ser alimentados por un caudal de energía exterior que se renueva sin cesar. Este foco de energía es el sol que emite sobre nuestro planeta radiaciones de orden térmico, actínico, radioactivo, etc., parte de los cuales actúan directamente sobre nuestra atmósfera, y otras en forma indirecta por la acción de otros fenómenos primarios que tienen acción importante sobre la evolución de los climas.**

En todo esto no encontramos ningún argumento, ni en pro, ni en contra del “transporte del calor solar”. Veamos lo que sigue:

**Considerando ahora la radiación térmica que, al parecer, es la causa principal de los procesos atmosféricos, empezaremos diciendo que nuestro planeta absorbe, por intermedio de la atmósfera,**

da los continentes y de los mares, el calor emitido por el sol y lo irradia a su vez hacia el espacio.

Hasta aquí todavía marchamos más o menos de acuerdo con el señor Esc o l a, pero viene ahora un párrafo que suscita nuestra decidida oposición.

**Consecuencia del equilibrio entre la absorción y la irradiación y el calor no irradiado y retenido, son las temperaturas medias registradas en la superficie, el gradiente térmico en altura y la existencia de la capa isoterma llamada estratosfera.**

Cosas muy gravec dice en este párrafo el señor Esc o l a, por lo que bueno hubiera sido emplear más empeño en la clara y precisa expresión de su pensamiento.

Cuando en la ciencia meteorológica se trata de establecer las condiciones del “equilibrio térmico” que reina en las distintas partes de la tierra, entonces no se habla ni de la “absorción” de calor, ni tampoco de “calor no irradiado y retenido”. Hay razones poderosas para ello.

Imaginémonos una balanza, por medio de la cual fuese posible constatar el “equilibrio térmico” de un lugar cualquiera. En un platillo tendríamos que cargar entonces todo el calor que es “suministrado” a este lugar, y en el otro todo el calor que es “extraído” del mismo, de cualquier modo que sea. Cuando estas dos cantidades, — la ganancia por una parte y la pérdida por otra, — resulten iguales, entonces habrá un “equilibrio térmico”; en caso contrario no habrá. El calor “absorbido” no lo podemos poner en ningún platillo, porque tiene la sola misión de representar, digamos, un depósito de energía, muy efímero desde luego, del cual se alimentan las distintas fuentes de pérdida de calor, como ser: la irradiación del calor, la convección, la conducción y la evaporación.

Si el “calor absorbido” no fuera extraído íntegramente por las fuentes de pérdida que acabamos de mencionar, entonces quedaría “retenida” una cierta cantidad, es cierto. Pero semejante “almacenaje” de energía existe sólo del día hasta la noche, y del verano hasta el invierno. Considerando el equilibrio térmico para un lapso de tiempo mayor de un año, condición previa para poder considerar “temperaturas medias” en la superficie de la

tierra, la cantidad del calor “retenido” desaparece por completo. La igualdad entre el total de la energía suministrada y el total de la energía restada resulta perfecta. Así por lo menos lo considera la ciencia meteorológica contemporánea.

Entremos ahora en detalles.

Establezcamos primero la condición de equilibrio térmico para nuestra tierra en conjunto. Para este fin imaginémonosla envuelta, junto con su atmósfera, por una esfera, o mejor todavía por un elipsoide. A través de la superficie de este elipsoide penetrará el calor solar, dirigido hacia la tierra, y a través de ella se escapará hacia el espacio el calor irradiado y reflejado por la tierra y su atmósfera. Entre estas cantidades debe existir una igualdad. Si así no fuera, las temperaturas en la superficie de la tierra deberían aumentar o disminuir continuamente, cosa que la observación directa no confirma.

Para la superficie de la tierra misma, o sea para los continentes y mares, el establecimiento de la ecuación de equilibrio térmica es ya más complicado, por el gran número de factores que entran en juego. En efecto, se “suministra” energía: por la radiación solar, por la radiación atmosférica, tanto difusa como selectiva, y por la condensación de vapor de agua que contiene la atmósfera. En oposición a esto se “pierde” energía: por la irradiación de la tierra, por la reflexión de los rayos caloríferos, por la convección, por la evaporación, y una pequeña cantidad por la conducción.

Del calor “no irradiado y retenido” no hay que hablar, porque la cantidad “retenida” durante el verano es “devuelta” durante el invierno. Si así no fuera, se registrarían variaciones continuas en las temperaturas medias, lo que no es el caso. No por eso negamos la importancia que ese almacenaje periódico de calor por parte de los continentes y mares tiene para los fenómenos meteorológicos. Todo lo contrario, merece ser mencionado de que el atraso de la fecha en que se producen las temperaturas extremas, con respecto a la fecha de los solsticios, se debe en parte a esta causa. Según Milankovich, este atraso sería de 9 días 7<sup>h</sup> 33<sup>m</sup>; pero aumenta a 26 días 1<sup>h</sup> 44<sup>m</sup>, tomando en consideración también el calor absorbido por la atmósfera, cuya capacidad ca-

lorífera resulta igual a una capa de agua de 1,11 de espesor (35).

Pues bien, equilibrio entre la cantidad de energía suministrada y la cantidad de energía perdida existe solamente para la tierra en su totalidad, pero **no** para sus diversas regiones geográficas. Todo lo contrario, hay más bien regiones en las cuales prevalece el suministro de energía, y otras, en las cuales predomina la pérdida. Como lo hemos dicho ya, v. Bezold fué el primero, quien expresó esto claramente (5) y Angström tiene el mérito de haber deducido los valores numéricos que nos enseñan por cuanto supera la cantidad de energía suministrada a la cantidad de energía perdida, o viceversa, paralelo por paralelo, desde el ecuador hasta los polos (16). Estos valores se encuentran representados, dada su importancia, en nuestra figura 6.

Un pequeño aparte merece el equilibrio térmico correspondiente a la superficie de los océanos. Defant, en su nueva "Física del mar", aparecida, dicho sea en descargo del señor Escolla, recién hace poco, estableció el balance sin descuidar ninguno de los factores que entran en juego. Los valores numéricos que resultaron de sus cálculos, previa reducción a las dimensiones empleadas por Angström, se encuentran representados en nuestra figura 7. En atención de ellos dice Defant: "en las la-

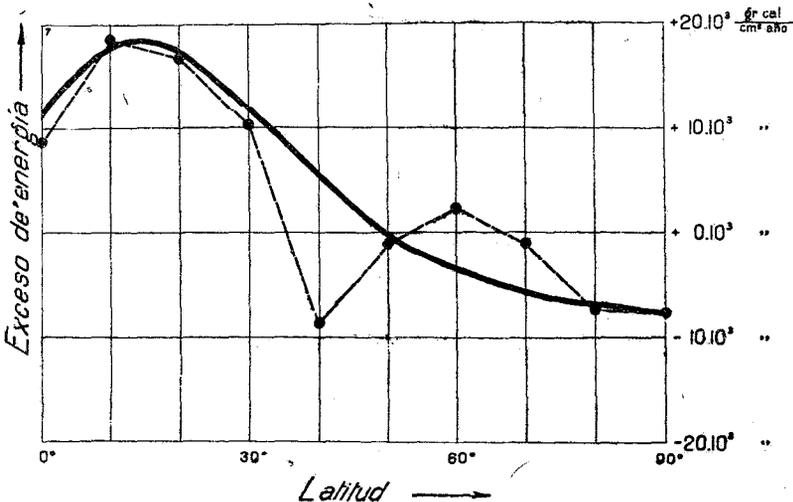


Figura 7. — Balance térmico de los océanos, según Defant.

titudes bajas, hasta 35° de cada hemisferio, prevalece el suministro de energía y en las latitudes altas la pérdida. Una compensación de estas diferencias tiene lugar, como es de esperar, por el transporte horizontal del calor por medio de las corrientes marinas y aéreas, transporte que siempre produce una reducción del gradiente térmico en la dirección de los meridianos” (55).

Como acabamos de demostrar, un “equilibrio entre la absorción y la irradiación y del calor no irradiado y retenido”, como supone el señor capitán Escola, en realidad **no** existe. Y ya que no existe, tampoco contiene ningún argumento contra el “transporte del calor solar”. Todo lo contrario; hemos visto que en las distintas regiones geográficas de la tierra puede haber equilibrio térmico solamente, cuando se tiene en cuenta también la cantidad de calor solar, transportada por la circulación atmosférica y la circulación oceánica.

Veamos ahora, si las “temperaturas medias registradas en la superficie” de la tierra son consecuencias de tal “equilibrio entre la absorción y la irradiación y del calor no irradiado y retenido”, como lo supone el señor Escola.

Hemos dicho ya que el análisis físico-matemático más profundo y más amplio de las temperaturas medias de los distintos paralelos, ha sido ejecutado, teniendo en cuenta todos los factores que vienen al caso, y no solamente los que menciona el señor Escola, por M. Milankovich, en su célebre obra, ya varias veces citada, titulada: “Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire” (7), llegando a conclusión de que las temperaturas medias de los distintos paralelos **no** se explican con una atmósfera supuesta en “calma”, es decir: prescindiendo de la influencia térmica que la circulación atmosférica y oceánica ejerce. Las temperaturas así calculadas resultan “demasiado altas” en la zona ecuatorial y “demasiado bajas” en las zonas polares. Recién después de tomar en cuenta también la cantidad de calor transportado por estas circulaciones, se obtienen temperaturas iguales a las observadas. Para mayor claridad representamos en nuestra figura 8 el efecto térmico de estas circulaciones. En ella figuran tanto los resultados de los primitivos cálculos de Milankovich (7), como también los de

un nuevo cálculo de Defant (20), efectuado con valores para los constantes que entran en juego, según fueron deducidos hace poco por Millikan, Angström y Aldrich. Esta figura muestra muy a las claras el gran aumento de la temperatura del aire en las zonas polares, como consecuencia de la presencia de las

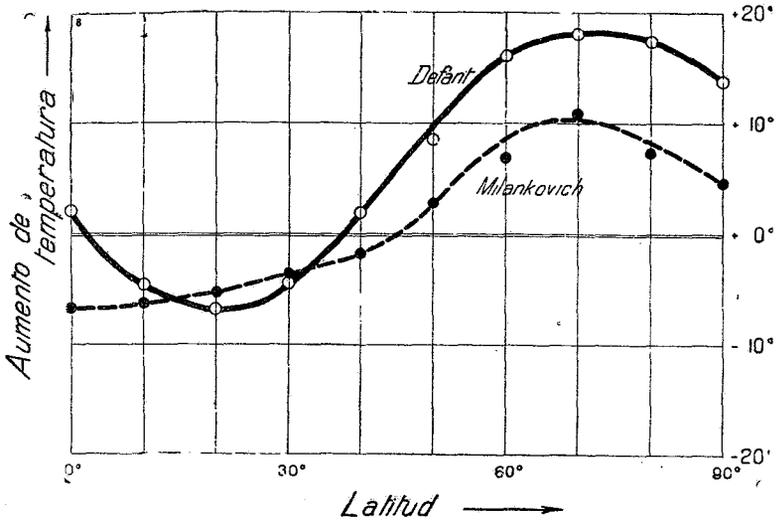


Figura 8. — Efecto térmico de la circulación atmosférica y oceánica, ---- según Milankovich y, — según Defant.

masas aéreas y masas líquidas calientes, llegadas de la zona tropical; aumento que en la latitud de 70° llega a 18°!

Como vemos, el señor Escola está lejos de la realidad, cuando piensa poder explicar las temperaturas medias en la superficie de la tierra *sin* la intervención del “transporte del calor solar”.

Examinemos ahora, si el “gradiente térmico en altura y la existencia de la capa isoterma llamada estratósfera” puede suministrar algún argumento contra nuestra tesis.

Fué en el año 1902, cuando dos investigadores, Teisserenc de Bort y R. Assmann, independientemente uno del otro, descubrieron que, más arriba de 11 kilómetros, y hasta una altura que no podemos indicar todavía, la atmósfera posee una temperatura constante; término medio — 54° en la región geográfica,

ocupada por la Europa Central. Como era de esperar, no tardaron en darse explicaciones de este interesante fenómeno. La primera la suministró H u m p h r e y s (36). Según sus sencillos cálculos, esa temperatura debería ser de  $-59^{\circ}$ , y producida exclusivamente por la radiación terrestre.

Desde luego los cálculos de H u m p h r e y s tienen hoy un valor relativo solamente, porque demasiado bien sabemos ya, cuán complicados y variados son los fenómenos que determinan las temperaturas del aire en distintas alturas, fenómeno que escapa todavía al dominio perfecto de la ciencia. Así que más importancia podemos atribuir al estudio que publicó el inglés G o l d (37), porque este investigador ha considerado ya las tres radiaciones que transpasan una masa aérea cualquiera: la solar, la atmosférica y la terrestre, y ha visto ya la importancia que el contenido del aire en vapor de agua ejerce sobre este fenómeno; la pesadez matemática que caracteriza este estudio, impidió sin embargo que adquiriese la importancia que en realidad posee.

Más suerte tuvo con la explicación de la existencia de esa capa isotérmica E m d e n (6). Los cálculos de él se basan en la "igualdad" de las corrientes de energía que transpasan una capa atmosférica en las dos direcciones opuestas y dieron por resultado que la capa isotérmica debería tener una temperatura de  $-57^{\circ},43$ , lo que concuerda bastante bien con la temperatura observada. No se puede decir lo mismo de las temperaturas que obtuvo para la tropósfera, porque éstas resultaron inferiores a las reales. En esto, sin embargo, no se veía inconveniente alguno, porque se creía entonces que el excedente del calor, causante de esta discrepancia, proviniera de la convección vertical, por medio de la cual, como es sabido, aire calentado encima de la superficie de la tierra es transportado hacia las capas altas de la atmósfera, hasta donde las condiciones térmicas del ambiente lo permitan.

Pero, repitiendo los cálculos de E m d e n con nuevos valores de las constantes,  $-1,94$  gr cal/cm<sup>2</sup> min para la constante solar, 43 % para el albedo, y  $5,73 \cdot 10^{12}$  Watt/sec<sup>2</sup> para la constante de emisión, conforme a la ley de S t e f a n - B o l t z m a n n, — se obtiene una diferencia demasiado grande entre la teoría y la realidad, como lo hizo ver v. S o c h e r (38). La suposición de E m d e n

tuvo que ser abandonada pues. Hoy ya no se exige más que las dos corrientes que atraviesan la atmósfera en direcciones opuestas, sean iguales, sino solamente que la “diferencia” entre ellas sea una cantidad “constante”. Sobre esta base efectuó interesantes cálculos Milankovich (7), tomando en cuenta solamente la radiación terrestre y suponiendo que ésta fuera absorbida íntegramente por un aire “seco”. Las temperaturas así obtenidas están representadas en nuestra figura 9. Como se ve, coinciden muy bien con las temperaturas deducidas por Wegener (39)

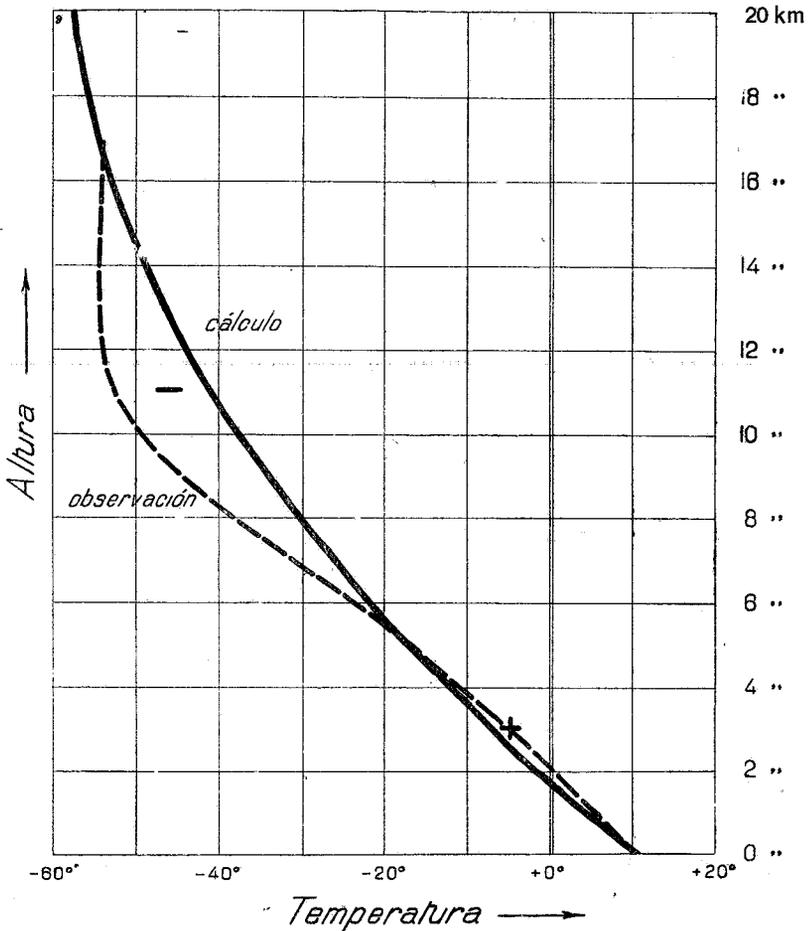


Figura 9. — Decrecimiento de la temperatura con altura, — supuesto aire seco, ---- según las observaciones.

de las observaciones aerológicas efectuadas en la Europa Central. La pequeña diferencia que existe todavía en los primeros kilómetros encima del suelo, puede ser fácilmente explicada con la influencia de la "convección vertical", y la grande, en lo alto, reducida notablemente, repitiendo el cálculo con aire "húmedo". Milankovich fué el primero en dar también este paso, llegando al interesante resultado de que, en Europa Central, la temperatura media del aire debe alcanzar su valor mínimo a la altura de 10530 metros; en plena concordancia con la observación. Desde entonces varios estudios han aparecido sobre este mismo problema, tratando de deducir la influencia que sobre el régimen térmico de la tropósfera y de la estratósfera ejerce el vapor de agua, contenido particularmente en las capas altas de la atmósfera. Entre estos estudios son dignos de ser mencionados los de Simpson (40) (23), los de Mügge (17) (41) (42) y muy particularmente los de Albrecht (43) (44). Con ellos nos ocuparemos más adelante.

Pero, aun considerando aire "húmedo", las temperaturas que se observan en grandes alturas, resultan "más bajas" que las calculadas en la zona ecuatorial, y "más altas" en las zonas polares. Así la capa isoterma tiene una temperatura de  $-83^{\circ}$  en el ecuador y  $-45^{\circ}$  solamente en los polos, es decir: hay una diferencia térmica de  $40^{\circ}$  aproximadamente a favor de las zonas glaciales. ¿De dónde proviene esto? La explicación de este curioso fenómeno no resulta tan difícil, admitiendo que las capas bajas de la estratósfera no se calientan suficientemente en la zona ecuatorial, porque está debilitándose continuamente una de sus fuentes de energía: la masa aérea troposférica, caldeada ya por la absorción de la radiación terrestre y por la convección vertical. Al parecer le falta el calor, emitido por esta masa, que es "transportada" por la circulación atmosférica planetaria a las zonas polares, donde, con su irradiación potente, contribuye a que se formen temperaturas mucho más elevadas que las deducidas por la teoría. Mügge en su estudio ya citado (17) se ocupó con este problema, llegando al resultado de que el decrecimiento de las temperaturas verticales en las distintas regiones geográficas no puede ser explicado *sin* el transporte del calor solar, tal como lo sos-

tenemos nosotros y Albrecht, en su estudio muy reciente (44) confirmó este resultado.

Como lo acabamos de demostrar no hay tal “equilibrio entre la absorción y la irradiación y del calor no irradiado y retenido”, como lo supone el señor Escola; ni tampoco son “consecuencias” de este equilibrio “las temperaturas medias registradas en la superficie”, ni “el gradiente térmico en altura”, ni la “existencia de la capa isoterma llamada estratósfera”.

Sigamos adelante. Dice el señor Escola: Como el calor absorbido y emitido varía de un máximo en el ecuador, donde los rayos hieren la tierra normalmente, hasta un mínimo en los polos, de ahí que la capa isotérmica tenga una altura máxima de unos 18 km. en media en el ecuador y una mínima en los polos de 3,5 a 7 km., donde por ser débil la absorción resulta también débil la irradiación del calor. La capa isoterma es pues un elipsoide que rodea la tierra en toda su extensión y la irradiación del calor un fenómeno normal en toda su superficie con un mínimo en las regiones polares, precisamente lo contrario de lo que supone el señor Jagstich.

En efecto, todo lo que aquí dice el señor Escola, es “precisamente lo contrario” de lo que opinamos nosotros, excepto la coincidencia en lo referente a la cantidad de calor absorbido que tiene un máximo en el ecuador y un mínimo en los polos, debido a la esfericidad de la tierra, como se entiende. Nos alegramos, en realidad, de esta coincidencia, ya que antes el señor Escola sostenía que “las diversas regiones del planeta están desigualmente calentadas debido a la permanente desigual absorción del calor en todas ellas”. Pero haciendo caso omiso de esta casual coincidencia de opiniones, podemos decir que todo lo demás que dice el señor Escola está en pugna con los resultados de la ciencia meteorológica.

Es un error que suelen cometer los novicios en la ciencia meteorológica, considerar que, lo mismo que la cantidad de calor suministrada, también la cantidad de calor irradiada tenga un máximo en el ecuador y un mínimo en los polos. Hay que tener en cuenta que la tierra dispone todavía de otros medios para deshacerse del calor absorbido que la irradiación solamente. El aire

en contacto con el suelo, se calienta "por conducto", y una vez calentado se eleva, iniciando así su peregrinación hacia las zonas altas de la atmósfera (fenómeno llamado convección) o hacia las lejanías de la tierra (fenómeno llamado advección). Tan importante es esta fuente de pérdida de calor para la tierra que *Angström* mismo creyó conveniente llamar la atención sobre ella, en uno de sus célebres estudios, señalando que "el mayor suministro de energía en las latitudes bajas se compensa por una mayor advección y convección, y no por una mayor irradiación" (16, pág. 4).

La equivocación del señor *Escola* se debe probablemente a la falsa creencia de que la tierra puede ser considerada como un "cuerpo negro", y que, por consiguiente, la cantidad de calor que ella irradia, estuviese determinada por la Ley de *Stefan-Boltzmann*; cantidad que puede ser calculada por la sencilla fórmula:

$$R = \sigma \cdot T^4 = \sigma \{ 273 + t \}^4$$

donde significa:

$t$  = temperatura media de la tierra

$T$  = temperatura absoluta de la misma

$\sigma$  = coeficiente de irradiación

$R$  = cantidad de calor irradiado.

Teniendo ahora en cuenta que:

$$\sigma = 7,64 \cdot 10^{-11} \text{ gr cal/cm}^2 \text{ min grado}^4$$

$$t = +14^{\circ},2 \text{ para la tierra en conjunto}$$

$$t_1 = +26^{\circ},2 \text{ para el ecuador}$$

$$t_2 = -30,0 \text{ para el polo sur,}$$

la cantidad de calor irradiado resultaría:

$$0,52 \text{ gr cal/cm}^2 \text{ min en término medio,}$$

$$0,61 \text{ ,, ,, ,, ,, en el ecuador, y}$$

$$0,27 \text{ ,, ,, ,, ,, en el polo sur.}$$

Si esta identificación fuese justificada, entonces el señor *Escola* tendría razón, porque la cantidad de calor que irradia el ecuador sería 2,2 veces mayor que la cantidad que irradian los polos. Las mediciones directas, efectuadas en distintos lugares de

la tierra, por investigadores como Maurer, Pertner, Exner, Kremer, Lo Surdo, K. Angström, Asklöf, Kimball, Defant, Dorno y otros, sin embargo **no** confirman esta suposición. Todo lo contrario, según los resultados obtenidos por éstos investigadores, la cantidad de calor irradiado es sensiblemente **igual** por la superficie de toda la tierra, oscilando levemente alrededor de un valor medio de **solo** 0,15 gr cal/cm<sup>2</sup> min.

¿A qué se debe esto?

Esto se debe a la existencia de la atmósfera que envuelve nuestra tierra, impidiendo a que la irradiación en su superficie se efectúe de una manera normal, ordinario. En efecto, la atmósfera es capaz de absorber gran parte del calor que irradia la tierra. Pero, al emitir este calor absorbido, se forman corrientes de energía, dirigidas hacia la tierra que compensan gran parte de la energía irradiada hacia el espacio. Es por eso que la cantidad de calor realmente irradiado es solo la “diferencia” entre la cantidad calculada por medio de la fórmula de Stefan-Boltzmann y la cantidad suministrada por la radiación atmosférica.

La absorción del calor, a que hacemos referencia, se efectúa principalmente por el **vapor de agua** que contiene nuestra atmósfera. Es por eso que, a la par de la “temperatura absoluta” que caracteriza una determinada región, hay que considerar también la “humedad” que le es particular, cuando se quiere determinar la cantidad de calor que ella irradia hacia el espacio.

Pues bien, tanto más nos alejamos del ecuador, tanto más bajas resultan las temperaturas medias que se registran en la superficie de la tierra, y por consiguiente tanto menor debería ser la cantidad de calor irradiado. Pero este decrecimiento se compensa por la influencia que ejerce sobre este mismo fenómeno el vapor de agua que contiene la atmósfera. Es cierto que también la cantidad de éste disminuye, acercándose a los polos; pero tanto más seco es el aire, con tanta mayor facilidad se efectúa la irradiación. Es por eso que la cantidad de calor irradiado resulta más o menos **igual** por toda la tierra.

Tanto en general. Ahora, para determinar la cantidad irra-

diada por los distintos paralelos, debemos recordar que A. Angström consiguió establecer una fórmula matemática, por medio de la cual se consiguen valores muy concordantes con los valores realmente observados (45). Ella tiene la siguiente forma:

$$R = \frac{T^4}{293^4} \left\{ 0,123 + 0,158.10^{-0,071 \varrho} \right\}$$

donde significa:

T — la temperatura absoluta de la región.

$\varrho$  — la humedad en la misma, y

R — la cantidad del calor irradiado.

Los resultados obtenidos por medio de esta expresión están representados en la figura 10. De ella se desprende que la can-

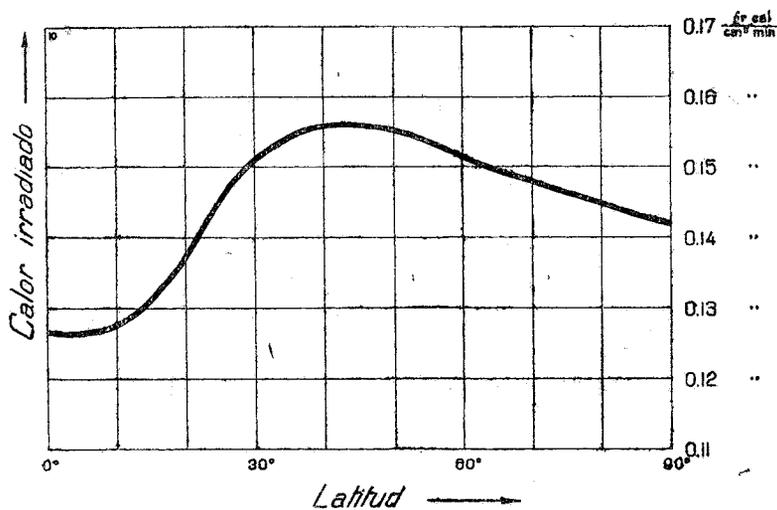


Figura 10. — Cantidad de calor irradiado en las distintas regiones de la tierra, según Angström.

tividad de calor irradiado tiene su **máximo** cerca del paralelo de 40°, donde se registra el mínimo de la humedad relativa y es escasa la nubosidad; y su **mínimo** en el ecuador, donde la humedad y también la nubosidad alcanzan el mayor grado posible. En los polos la cantidad irradiada es 8 % mayor que en el ecua-

dor, debido a la sequedad del aire, tan característica para las regiones polares (16) (14).

Como se ve, la naturaleza, y con ella la ciencia, dice “precisamente lo contrario de lo que supone el señor Escola”.

Más difícil resulta dar valores numéricos exactos de la cantidad de calor irradiado en el **límite de la atmósfera**. Esto es un problema que fué discutido mucho en los últimos años por Mügge (17) (41) (42), Simpson (40) (23), Bartels (47) y Albrecht (43) (44).

Quien abrió la discusión, fué Mügge. Su manera de razonar es la siguiente: La temperatura que reina en la estratósfera lo determina la cantidad de calor absorbido por el vapor de agua que ella contiene. Este calor proviene de la irradiación de la tierra. En efecto, el vapor de agua absorbe ondas de 7 a 14 micrones de longitud, de las cuales se compone principalmente la radiación terrestre. Ahora bien, teniendo presente que la estratósfera posee una temperatura de  $-83^{\circ}$  encima del ecuador y probablemente sólo  $-45^{\circ}$  encima de los polos, resultaría que la irradiación en las zonas polares debe ser considerablemente mayor que en la zona ecuatorial. Los cálculos respectivos dan  $0,22$  gr cal/cm<sup>2</sup> min para el ecuador y  $0,40$  gr cal/cm<sup>2</sup> min para los polos. Así que la irradiación sería 1,8 veces “mayor” en los polos que en el ecuador. Cuando escribimos nuestro estudio climatológico tuvimos presente estos resultados de las investigaciones de Mügge. De ahí que acentuáramos la importancia de la irradiación en las zonas polares sobre el desarrollo normal de un ciclo climatológico elemental.

Naturalmente podemos preguntar, qué se opina hoy en la ciencia meteorológica, respecto a los valores obtenidos por Mügge. En resumen podemos decir, asociándonos a la opinión de Bartels (47) que se los considera demasiado elevados. Se les critica también que fueron deducidos a base de las temperaturas de la estratósfera solamente, sin tener en cuenta las temperaturas en la superficie del suelo. Es cierto que aquellas crecen desde el ecuador hacia los polos, pero la influencia de este crecimiento puede ser compensada por las temperaturas observadas en la tierra, decrecientes en la misma dirección. Teniendo presente esta

circunstancia resultaría probable una uniformidad en la irradiación por toda la tierra. También Simpson, el muy conocido director del servicio meteorológico británico, puso en duda los resultados obtenidos por Mügge. Al principio con poca suer-

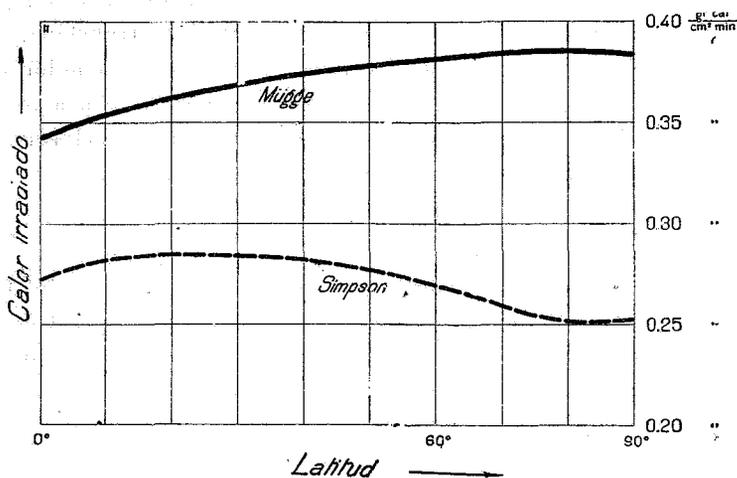


Figura 11. — Calor irradiado en distintos paralelos; ..... según Simpson, ——— según Mügge.

te (40), pero luego con un resultado respetable (23). Este investigador, con descomponer el espectro en grupos de ondas bien definidas y de caracteres particulares, y correlacionarlos con el poder absorbente y emisor del vapor de agua, sin descuidar la influencia de la nubosidad, ni la de la altura de las nubes, llegó al resultado de que la irradiación es una cantidad sensiblemente igual por toda la tierra, con leves máximos en los solsticios y leves mínimos en el ecuador y en los polos. Pero Mügge, en un estudio posterior (41), a la par de señalar algunas pequeñas deficiencias en las consideraciones de Simpson, confirmó el resultado de sus investigaciones anteriores, de que hay nomás un pequeño incremento en la cantidad del calor irradiado a favor de las zonas polares, de algunos 12%. Así que también la cantidad de calor irradiado en el límite de la atmósfera **crece**, si bien suavemente, desde el ecuador hasta los polos.

Que todavía no se llegó al final en las investigaciones re-

ferentes a este problema, lo demuestran los estudios de Albrecht (43) (44) que aportaron nuevas luces sobre el mismo, pero sin cambiar mayormente los resultados ya conocidos.

En el párrafo que estamos comentando, el señor Escola trajo a colación también la altura de la capa isotérmica. No porque ella representara algún argumento contra el “transporte del calor solar”, sino porque su altura es mayor en el ecuador que en los polos, y por consiguiente se presta a considerarla a la par del calor absorbido que también tiene su máximo en el ecuador y los mínimos en los polos; pero en ningún caso a la par del calor irradiado, porque este es más o menos constante por toda la superficie de la tierra.

La altura de la estratósfera es uno de los fenómenos un tanto rebeldes que tiene que afrontar la ciencia meteorológica. En su conocimiento se ha adelantado notablemente en estos últimos años, pero sin embargo, no se puede decir que se poseyera ya una explicación del todo satisfactoria.

Mucho tiempo se suponía que la altura de la estratósfera dependiese de la potencialidad de las corrientes aéreas que atraviesan la tropósfera, fenómeno llamado “convección vertical”, y que, desde luego, es tanto más pronunciado, cuanto más calentado está el suelo. Pero este calentamiento, supuesto la tierra homogénea, depende de la energía suministrada por medio de la radiación solar y la radiación atmosférica. Esta cantidad es considerable en la zona ecuatorial, pero pequeña en las zonas polares, y en consecuencia la capa isotérmica debería tener altura grande en las latitudes bajas, y altura reducida en las latitudes altas, tales como en realidad se observan.

Esta explicación, sin embargo, no satisface del todo. Los fenómenos térmicos de nuestra atmósfera son muy complejos; para explicarlos, es menester tener en cuenta también la composición de la atmósfera, y considerar la totalidad de las corrientes de energía que la atraviesan en la dirección vertical. Estamos lejos todavía de este desideratum, pero poseemos ya espléndidas iniciativas.

El primero quien afrontó el problema en debida forma, fué Milankovich (17), quien demostró, con un análisis matemá-

tico irreprochable, que la altura de la estratósfera depende de la cantidad del calor irradiado por la tierra y absorbido por el vapor de agua que contienen las altas capas atmosféricas, obteniendo para la Europa Central una altura de 10530 metros, cantidad que concuerda bien con la altura realmente observada, y que es de 11000 metros.

Pues bien, ya que la cantidad de calor irradiado es más o menos igual por toda la superficie de la tierra, resultaría entonces que la altura de la estratósfera depende de la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera. Esa cantidad es, según un importante estudio de Ekholm (48),  $18,7 \text{ gr/m}^3$  en el ecuador y sólo  $1,2 \text{ gr/cm}^3$  en los polos, y por consiguiente capaz de absorber el 71,3 % de la radiación terrestre cerca del ecuador y 26,3 % cerca de los polos. La relación entre estas cantidades es de 1:2,7; lo que no concuerda mal con la relación existente entre las alturas registradas para la capa isotérmica; 6—8 km en la región polar y 18 km en la región tropical.

Los cálculos de Milankovich han sido perfeccionados recientemente por Albrecht (44), quien demostró que la radiación terrestre parece ser absorbida por una sola capa de aire, caracterizada por la presión de vapor de agua entre límites de 0,015 y 0,15 mm. La altura de esta capa, llamada “capa emisora” disminuye, yendo del ecuador hacia los polos, como es natural, ya que la cantidad de vapor de agua que contiene la atmósfera, decrece también con la latitud. El calor emitido por esta capa, según las deducciones de Albrecht, parece desarrollar un papel importantísimo, no solamente para el régimen térmico de la estratósfera, sino también, o quizás ante todo, para la tropósfera, principalmente en las regiones polares.

Sin embargo, como se desprende de la figura 12, la capa “isoterma” se encuentra a una altura mayor que la capa “emisora” en toda la región tropical. Este hecho ha inducido a Albrecht a admitir que en esa zona la altura de la estratósfera esté influenciada también por la “convección vertical”, acercándose con este modo de ver a la opinión de Simpson.

Como se ve, el conocimiento de este fenómeno está bastante adelantado ya. Los resultados obtenidos, sin embargo, no son

definitivos. Habrá que considerar todavía algunos factores más que hasta hoy han sido dejados de lado, como por ejemplo, la influencia del calor reflejado tanto en la tierra, como en las nubes y en las partículas suspendidas en la atmósfera (7); luego habrá que tener en cuenta el efecto que pueda ejercer el ozón que contienen las altas capas de nuestra atmósfera y cuya cantidad, al parecer, crece con la latitud (49). Pero aún con estas imper-

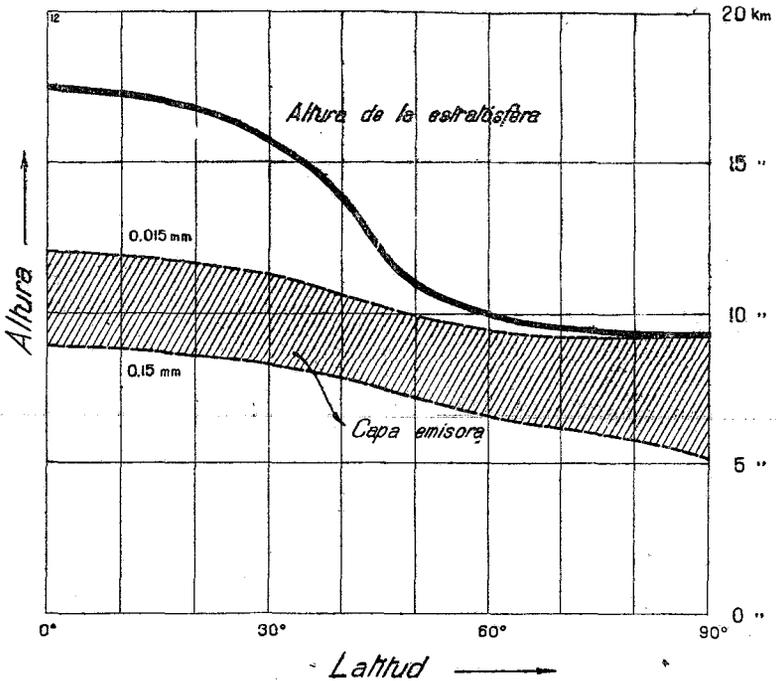


Figura 12. — La altura de la estratósfera, en dependencia de la “convección vertical” y de la “capa emisora”.

fecciones señaladas, los conocimientos científicos actuales, en lo que a la altura de la estratósfera se refieren, son contrarios en absoluto al modo de ver del señor Escola.

Sigamos adelante. Dice el señor capitán: **Podemos todavía llegar a un concepto más definido sobre la inexistencia, en las regiones polares de condiciones apropiadas para favorecer este escape de aire ecuatorial.**

A cosas muy extrañas “podemos llegar todavía” haciendo confusiones tan ridículas como ésta, de que es víctima el señor Escola, quien, por lo visto, confunde nuestro “escape de calor”, con “escape de aire”. Calor es una forma de energía, aire es materia. Esto hay que tener bien presente, ante todo cuando se quiere discutir algo con un profesor universitario. Haciendo semejantes confusiones, claro, hasta se podría edificar una nueva ciencia, pseudo-ciencia desde luego, a la cual, sin duda, vendría bien la designación: **metereología**, para distinguirla así de la “meteorología”, en la cual se funda nuestra explicación del encadenamiento de los fenómenos climatológicos sudamericanos. Antes el señor capitán Escola hablaba de “textos de meteorología destinados a la enseñanza elemental”. Pues bien, es el momento de recomendarle su estudio, para que en el futuro no cometa semejantes confusiones.

Entrando ahora en el análisis científico de este párrafo, podemos afirmar que no solamente las regiones polares carecen de “condiciones apropiadas para favorecer este escape de aire ecuatorial”, como lo dice el señor Escola, sino **todas** las regiones de la tierra, sin excepción alguna.

En efecto, el aire es una mezcla de gases, los que a su vez se componen de una infinidad de moléculas. Ya el célebre físico Clausius, uno de los fundadores de la teoría cinética de gases, allá por el año 1857, calculó el número de las moléculas que hay en 1 cm<sup>3</sup> de aire. Llegó a la cantidad formidable de  $21.10^{18}$ . Desde luego, todas esas moléculas se encuentran en un movimiento continuo, poseyendo una velocidad media de 485 m/sec, cuando la temperatura es 0°C y la presión barométrica 760 mm. Con esa velocidad, naturalmente, y habiendo tantas moléculas, las colisiones son innumerables. Cada molécula choca con sus semejantes 4700 millones de veces en cada segundo, por lo que, entre dos choques no puede recorrer mayor longitud que sólo 0,095 micrones. Pero cada choque significa una variación en la dirección del movimiento. Es fácil imaginarse que, bajo estas condiciones, el “escape del aire”, o, mejor dicho de las moléculas de que se compone, no resulta tan fácil, como se lo imagina el señor Escola. Y de que es así, lo podemos com-

probar fácilmente, echando un poco de perfume al aire, y observando su propagación en el espacio. Sorprende la lentitud con que ésta se realiza.

Hace poco el célebre físico J. H. Jeans, en su clásica obra "Teoría dinámica de los gases" analizó extensamente la posibilidad de que la tierra perdiese su atmósfera. Para que esto pudiese ocurrir, en un lapso de tiempo de 1000000 de años, sería necesario que las moléculas de los gases que componen el aire, pöseyeran una velocidad de 2600 m/sec, o sea 6 a 7 veces mayor que la real. No es dable, pues hablar de un "escape de aire", porque tal escape **no** existe.

Desde luego, en el límite de la atmósfera la cosa cambia. Allí, las condiciones para el vuelo de las moléculas, ya que el número de ellos decrece con la altura, son mucho más favorables que aquí abajo, en la superficie de la tierra. En 800 kilómetros de altura, el camino recorrido entre dos colisiones es ya de 10 metros, y en 3000 kilómetros de altura ya una cantidad formidable. En el límite de la atmósfera estamos, sin duda, perdiendo moléculas de los gases que allí se encuentran, pero es probable que estemos acaparando también algunas!

Veamos ahora, cómo "podemos todavía llegar a un concepto más definido sobre la inexistencia, en las regiones polares de condiciones apropiadas para favorecer este escape de aire ecuatorial", si queremos prestar fé al señor Esc o l a. Dice el señor capitán: **Una vez reconocido que los fenómenos que tienen por causa la presencia del vapor de agua son el resultado de procesos adiabáticos cuya gestación, evolución y ocurrencia deberían necesariamente ser el resultado de grandes y variadas transformaciones de la energía, el concepto de la estratificación fué estudiado desde el punto de vista termodinámico, lo que condujo a aceptar como superficies de nivel representativas de la estratificación térmica de la atmósfera a las superficies de igual entropía o superficies isentrópicas".**

Nos habíamos esmerado mucho en descubrir qué es lo que quiso decir el señor Esc o l a en este sonoro párrafo y cuál es el argumento que contiene contra el "transporte del calor solar". Lo confesamos con toda sinceridad: no hemos conseguido ni lo uno, ni lo otro.

Por otra parte debemos decir que, después de la confusión de que fué víctima el señor *Escola* en el párrafo anterior, al confundir “aire” con “calor”, la acumulación de expresiones técnicas, como: entropía, isentropía, procesos adiabáticos, tefígramos, etc., etc., ya no nos impresiona más. La finalidad de estas expresiones no es, adornar con ellas los discursos políticos, sino poder ser preciso y breve en la descripción de los fenómenos naturales.

Viene ahora un largo párrafo que tampoco tiene que ver nada con el fenómeno que se debate. **La concepción de una atmósfera estratificada en capas de igual entropía implica suponerla dotadas de una elasticidad que las capacite para experimentar, sin deformación, movimientos en altura, como sucede entre las superficies limitando dos líquidos de diferentes densidades. Esta elasticidad de las capas dependería de la diferencia entre las temperaturas del medio ambiente a cada nivel y la de la adiabática del aire que se eleva, de modo que, adquirida la temperatura del medio ambiente, las capas constituyen obstáculos físicos a la continuación del movimiento ascensional que de continuar sólo podría serlo más o menos horizontalmente por la capa isentrópica. Quiere decir entonces que el movimiento ascendente del aire alcanzará, en cada caso y región, una altura que dependerá del grado de estratificación de la atmósfera o sea del calor inicial absorbido por las masas de aire para aumentar su entropía a la del medio ambiente de cada nivel.**

Para analizar y corregir debidamente este párrafo, tendríamos que escribir un libro. No vale tanto. Esto lo demuestran las pocas líneas en que remata y que sin duda merecen ya un comentario. **Todos estos procesos podrán modificar sensiblemente el gradiente térmico en altura, pero siempre este gradiente marcará el límite de este escape de calor que por irradiación la tierra emite hacia el espacio, siendo este límite la base de la estratósfera en toda la superficie de la tierra.**

En este párrafo, el señor *Escola* confunde e identifica dos fenómenos térmicos esencialmente distintos, la “irradiación” y la “convección” de calor.

La “irradiación” es la transmisión del calor por medio del movimiento del éter, sin que se calentara el espacio entre el cuerpo emisor y el cuerpo receptor. Por medio de irradiación nos llega, por ejemplo, el calor solar, con una velocidad de 300000 km/sec, atravesando el espacio que nos separa de él en solo 8<sup>m</sup> 20<sup>s</sup>. Y con esta misma velocidad se escapa el calor irradiado por la tierra, cuyo valor medio es, según lo hemos visto, 0,15 gr cal/cm<sup>2</sup> min. Su límite **no** es la “base de la estratósfera”, como lo asevera con tanto aplomo el señor **Escola**, sino el espacio infinito!

La “convección” es la transmisión del calor por medio de transporte de moléculas. En efecto, las capas aéreas, en contacto con el suelo se calientan y por consiguiente se dilatan, perdiendo así de su peso específico. Esto da motivo a que se eleven, llevándose la energía térmica adquirida por las moléculas que componen su masa, hasta una altura, en la cual reinan condiciones térmicas idénticas a las suyas. Esta es la manera de producirse las corrientes “ascendentes” en nuestra atmósfera. En oposición a ellas, hay también corrientes “descendentes”, ante todo en las zonas polares. Ellas están formadas por las masas aéreas, enfriadas por la irradiación, y que por exceso de su peso específico, así adquirido, se aproximan hacia la tierra.

Alrededor de la tierra hay, pues, una zona de “corrientes verticales”, una zona de “convección”. Encima de esa zona ya no hay movimientos verticales, sino solamente horizontales. A esa altura la atmósfera parece “estratificada”; de ahí también su nombre. Podría decirse entonces que la base de la estratósfera es el límite del escape de calor que la tierra pierde por “convección”, pero en ningún caso para el calor que pierde por “irradiación”.

Sigue el señor **Escola**: **Tampoco es aceptable, como hemos dicho, la suposición del señor Jag sich, de una circulación atmosférica del ecuador hacia los polos, transportadora de este calor.**

¡Esto lo dice nada menos que un ex-jefe de la división de meteorología de nuestro servicio oficial!

La circulación atmosférica es para nosotros, seres humanos, “visible”, porque se realiza por medio de “vientos”. El viento

no es otra cosa que “aire en movimiento”. Pero el aire es un cuerpo gaseoso, por lo que también podemos decir que el viento es un “cuerpo gaseoso en movimiento”. No hay exageración alguna en esta designación; al contrario, hoy día es muy común, y a la vez muy provechoso, hablar de “cuerpos de aire”, de “Luftkörper” en idioma alemán, tan acertado siempre en expresiones térmicas precisas.

Pues bien, cuando desplazamos un cuerpo, desplazamos también todo el calor que el mismo alberga, salvo naturalmente la pequeña cantidad que se pierde durante el tiempo que necesitamos para efectuar este movimiento. Así también, cuando se traslada un “cuerpo de aire” de un lugar al otro, se traslada a la vez todo el calor que su masa tiene absorbido. Este traslado lo vemos, porque su manifestación son los “vientos”. Así que, cuando los vientos nos inundan con aire, procedente de una región geográfica “más caliente” que la nuestra, sentiremos **calor**; y cuando nos acarreen aire de una región más fría que en la cual nos encontramos, sentiremos **frío**. En el mismo lugar y a la misma hora, y con el mismo sol en el cielo, sentiremos pues **frío**, si el viento sopla del sector sur, y tendremos la sensación de **calor**, si sopla del sector norte. Para comprobar esto, basta salir de casa.

La circulación atmosférica es, pues, transportadora del calor. Esto no es una “suposición del señor Jagsich”, sino un fenómeno natural, uno de los más grandiosos que se pueden observar sobre nuestro planeta; fenómeno que, desde luego, se verifica desde el principio de los siglos, y seguirá verificándose hasta tanto la tierra tenga una atmósfera; sin preocuparse si es o no es “aceptable” para el señor Escuela.

Para más datos y más detalles, consúltense las obras citadas en nuestro “Índice Bibliográfico”, en particular los N° 5, 6, 7, 8, 9, 14, 16, 17, 20, 23, 25, 26 y 54.

Vamos adelante. Dice el señor capitán Escuela: **Sir Napier Shaw ha demostrado que para que una corriente pueda persistir a través de los paralelos deben cumplirse ciertas condiciones para el aflujo constante del aire capaz de mantener el aumento constante de altura y por lo tanto del caudal de aire que exige aquel desplazamiento y que indudablemente no se cumplen a**

lo largo del mismo. De allí que el circuito de los alizios no se extiende más allá de los 30° de latitud.

Sir Napier Shaw es una de las autoridades más grandes de la que la ciencia meteorológica actual se puede enorgullecer. Por esto nos sorprende que se lo cite en un escrito tendiente a demostrar la inexistencia del “transporte del calor solar”. El no ha participado en las investigaciones, tendientes a dilucidar este fenómeno, es cierto, pero no por eso niega su existencia. Todo lo contrario, un excelente, si bien brevísimo resumen de este fenómeno se encuentra en su monumental obra “Manual of Meteorology” tomo III, pág. 169; resumen basado en los resultados de las investigaciones efectuadas por el director del servicio meteorológico inglés Mr. Simpson.

Volviendo ahora al párrafo confuso que acabamos de transcribir, podemos decir que, según nuestro entendimiento, el señor Escola quiso expresar en él que una circulación atmosférica “superpuesta”, — abajo vientos dirigidos hacia el ecuador, alizios, y arriba vientos dirigidos hacia los polos, contraalizios, — puede existir más o menos hasta los paralelos de 30° solamente. Esto es cierto, solamente que no fué Sir Napier Shaw, quien lo había demostrado primero, sino M. Möller (51).

El fenómeno en sí es interesante, sin duda, por lo que se ocuparon ya muchos hombres de ciencia con su explicación. Hoy en general se admite que este fenómeno se debe a la rotación de la tierra. En efecto, las masas aéreas, en su movimiento hacia los polos, tratan de conservar su “momento de rotación” que les fué imprimido en la zona de su origen por la rotación de la tierra, lo que origina “vientos”, dirigidos hacia el este. Pero ya en la latitud de 30°, la velocidad de este viento debería ser, descontando previamente el efecto de la frotación en la superficie de la tierra, de 113 m/sec. Pues bien, en comparación con esta velocidad, la velocidad con que se desarrolla la circulación atmosférica entre el ecuador y los polos, es casi insignificante. La circulación atmosférica en dirección hacia este prevalece, pues, en detrimento de la circulación hacia los polos. De esta manera no puede llegar aire ecuatorial a las zonas polares. En esto tiene razón el señor Escola.

¡Y sin embargo llega!

Y para que llegue, es necesario y suficiente que cambie la forma de la circulación.

Ya hace mucho que se conocen las características generales de la circulación atmosférica a través de las zonas templadas, como la nuestra. Se sabía que ese movimiento es sumamente complicado y que las masas aéreas avanzan a través de ellas muy lentamente y con muchas dificultades; se sabía también que en este movimiento la mezcla entre masas aéreas de distintas características térmicas y dinámicas juega un papel importantísimo, porque reduce los movimientos de rotación de que disponen (1, pág. 504). Se ignoraba sin embargo, el verdadero carácter de este movimiento, hasta tanto Defant no lo haya iluminado en su estudio clásico, ya tantas veces citado (8), considerándolo como un movimiento "turbulento" grandioso.

Inducido por los resultados obtenidos por Defant, el sabio Exner afrontó la solución exacta de este problema. El resultado a que llegó en su análisis físico-matemático es que la circulación atmosférica extratropical ya no es más "superpuesta", como hasta los paralelos de 30°, sino "yuxtapuesta"; corrientes frías y calientes alternan, una al lado de la otra, en cada hemisferio, moviéndose en direcciones contrarias, y expuestas a un derive continuo hacia este, llevando calor a las latitudes altas, y frío a las latitudes bajas, ... en plena concordancia con la tesis nuestra (14, pág. 216-217) (52) y (53).

Dejamos expresamente constancia con esto de que ni la circulación atmosférica tropical, ni tampoco la extratropical, es fenómeno alguno que estuviese en riña con el "transporte de calor solar", como lo supone el señor Escola.

Sigue el señor capitán Escola: "**Considerando la cuestión termodinámicamente podríamos decir que la circulación atmosférica está gobernada no por una, sino por una serie de máquinas atmosféricas que funcionan con independencia del control polar y entre límites de temperaturas comprendidos entre las reinantes entre el ecuador y las latitudes medias y entre las latitudes medias y las regiones polares, no considerando sino las principales**".

Comparar la circulación atmosférica con una máquina térmica

ca, se le había ocurrido primero a Sir Napier Shaw, hace de ello ya muchos años. Pero esta comparación, en nuestra época de automóviles, camiones, aeroplanos y dirigibles, perdió ya la gracia. Hoy día correspondería compararla por lo menos con un camión. Y con cierta ventaja, porque como carga que el camión puede llevar, podríamos considerar la cantidad de calor solar que la circulación atmosférica transporta del ecuador hacia los polos. Tor Bergeron, en un estudio muy reciente y muy importante (56), descompone toda la circulación atmosférica en “ruedas” que, desde luego, es tan bueno o tan malo, como compararla con “máquinas”, con “camiones”, o con “dirigibles”. Esto son cosas que ni dan, ni quitan a la ciencia.

Entrando ya en la crítica del párrafo transcripto, diremos solamente que “con independencia del contralor polar” no puede funcionar ninguna “máquina atmosférica”, porque la pérdida de energía a que está expuesta nuestra tierra en las regiones polares es, a la par de la ganancia que experimenta en la zona ecuatorial, el factor principal, el regulador por excelencia de la circulación atmosférica planetaria. Esto no es un “modo de ver” nuestro, sino la “esencia” de la ciencia meteorológica actual. Los nombres de Helmholtz, Margules, Trabert, Exner, von Ficker, Hildebrand Hildebrandson, Shaw, Defanty muchos otros, son garantía para ello.

Además, también “considerando la cuestión termodinámica” se llega a resultados muy distintos de los que supone el señor Escola. En este caso hay que ir a las ecuaciones diferenciales que sirven de base para las deducciones matemáticas, únicas que nos pueden llevar al satisfactorio conocimiento de la circulación atmosférica planetaria. Ferrel primero, Oberbeck después (57) atacaron con mucho éxito este problema, pero sin conseguir resolverlo. ¿Por qué? Porque consideraron cuatro ecuaciones diferenciales solamente, — las tres ecuaciones hidrodinámicas y la ecuación de continuidad, — mientras que cinco hubieran sido necesarias para determinar las cinco incógnitas que interesan, y que son: los tres componentes del movimiento, la presión atmosférica y la temperatura, en dependencia del lugar y del tiempo. La quinta ecuación diferencial tendría que representar el su-

ministro de calor a cualquier punto de la superficie de la tierra. Hasta el célebre estudio de Defant (8) se sabía poco sobre este particular; con razón pudo decir entonces Exner (14, pág. 249 y ss.) que **sin** la debida consideración del “transporte del calor” **no** es posible adelantar nada en el conocimiento de la circulación atmosférica planetaria!

Sigamos. Dice el señor Escola: **Pero un gran ciclo gobernando la circulación general de la atmósfera, ¿se cerró alguna vez por las regiones polares?**

¡De esta pregunta del señor Escola hemos tomado nota con verdadero asombro!

Ante todo debemos manifestar que nosotros en ninguna parte de nuestro estudio que critica el señor Escola, hablábamos de un “gran ciclo” ni, de pequeño tampoco que gobernara la circulación atmosférica. No hemos hablado, porque creemos que para gobernar algo se necesitan “fuerzas”, y no “ciclos”, concepto que no tiene sino un significado descriptivo solamente. Y la fuerza que gobierna la circulación atmosférica es el “calor solar” que “penetra en nuestra envoltura aérea en la zona ecuatorial y se escapa por los dos casquetes polares” como habíamos dicho, apoyándonos en los resultados de los estudios de Defant, de Exner, de Angström y de Mügge.

Pero aún prescindiendo de esta imperfección “estilística”, encontramos todavía bastante curiosa la pregunta del señor jefe de la división de meteorología de nuestro servicio meteorológico oficial. Permítasenos llamarle la atención de que el contexto lo encuentra en cualquier texto serio de meteorología, con exclusión tal vez de los “destinados a la enseñanza elemental”. Muy en particular le recomendamos el estudio de la “Dynamische Meteorologie” de F. M. Exner; la obra más breve, más concisa y más profunda a la vez que existe en la literatura meteorológica moderna (14).

Pero ya que el señor Escola nos pregunta si la circulación atmosférica se cerró ya “alguna vez” por las regiones polares, tenemos que contestarle nomás. Pues, la circulación atmosférica se ha cerrado ya una infinidad de veces por las regiones polares, y seguirá cerrándose hasta el fin de los siglos, hasta tan-

to nuestra tierra conserve algo de su atmósfera o se apague el sol en la noche infinita del universo. Hasta tanto la tierra tenga una atmósfera y le llegue calor solar, por poco que sea, habrá diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos, y habrá una circulación atmosférica en proporción a ella, por las mismas razones, porque existe en nuestros días!

Vamos más allá todavía en nuestro contesto. No solamente hasta la región polar llega la circulación atmosférica, sino hasta los polos mismos. Razones poderosas tenemos con que demostrarlo.

El continente antártico está cubierto de hielo. Ya que un cambio de clima en medida apreciable en nuestros tiempos no se verifica, es necesario suponer que el espesor de esa capa de hielo sea más o menos constante. La ablación que ella experimenta, en consecuencia de la acción directa de los elementos meteorológicos, tiene que ser repuesta pues, para lo que se necesitan, según **Meinardus**, — profesor de la Universidad de Göttingen, y autoridad indiscutible en la meteorología polar, — 40 mm de precipitaciones! Esta cantidad es considerable, si se tiene en cuenta la altura de la región geográfica a que pertenece el polo sur, y que se avalúa en 2000 a 3000 metros. ¿De dónde puede venir esta precipitación? El señor **Escola** mismo lo indica, al decir más adelante: **“De acuerdo con las ideas de Bjerknes sobre las condiciones meteorológicas de la formación de la lluvia, etc., la necesidad de una circulación es evidente, por lo menos en las regiones de latitudes medias... En las regiones de latitud media y alta, y excepción hecha de las lluvias orográficas, las lluvias se producen como regla general por el avance de una corriente ecuatorial caliente y húmeda que se ve obligada a elevarse...”** Muy conformes. Así que, según **Bjerknes**, y también según nosotros, llueve o nieva en los polos, por el “avance de una corriente ecuatorial caliente y húmeda que se ve obligada a elevarse”, es decir: la circulación atmosférica llega hasta los polos. ¡Y eso es precisamente lo que pone en duda el mismo señor **Escola**!

Más todavía. Durante los años 1911 y 12, dos expediciones se encontraban en la zona antártica, las de **Amundsen** y de **Sir Ernest Shackleton**. Como se recuerda, ambas llegaron al

polo sur, con muy poca diferencia de días. Pues bien, de las observaciones meteorológicas efectuadas por ellas se deduce forzosamente que **hay** convulsiones atmosféricas, cambios del tiempo, o sea circulación atmosférica en aquella región. Sobre este problema existe ya una interesante literatura, de la cual merece ser nombrada la obra de **H o b b s**: *The glacial anticyclones* (59), un estudio del director del servicio meteorológico de Holanda, **E. van Everdingen** (60), conocedor excelente de las regiones polares, y una crítica de la obra de **H o b b s**, escrita por **E x n e r** (61).

Sigue diciendo el señor **E s c o l a**: **Es posible que esto** (el cierre de la circulación atmosférica por las regiones polares) **ha ya ocurrido hasta la era secundaria, como se podría deducir recurriendo al auxilio de la geología y de la paleontología, pero en la época actual de nuestro planeta, la presencia de los centros de acción anticiclónicos, que como perlas de un collar circundan la tierra a la altura de las latitudes medias, parecería indicar que entre el ecuador y el polo podrían considerarse al menos dos ciclos correspondientes a dos máquinas térmicas principales de la atmósfera.**

En la primera parte de este párrafo, el señor **E s c o l a** hace una pequeña excursión al campo de la ciencia paleoclimatológica. Con poca suerte, desde luego. Si para escribir sobre meteorología se necesita "saber" meteorología, para escribir sobre paleoclimatología se necesita mucho más; un dominio profundo de la meteorología, climatología, geofísica, geología y paleontología son indispensables, porque de otra manera todo termina en literatura barata.

Veamos primero si la circulación atmosférica llegó a las regiones polares **hasta** la era secundaria solamente, como lo supone el señor **E s c o l a**, o si esto sucedió en todas las épocas de la evolución geológica de nuestra tierra. Para eso es necesario, ante todo, darnos cuenta cabal de la causa originaria de la circulación atmosférica misma.

**S i m p s o n**, el sabio director del servicio meteorológico inglés, en su conferencia sobre "Past climates" (62), dijo que la circulación atmosférica general depende, en lo que a su energía

se refiere, de la diferencia de temperaturas que existe entre la región ecuatorial y la región polar. Cuando esta diferencia es grande, la circulación es intensa, y cuando es pequeña, entonces la circulación es débil. Tenemos que preguntarnos, pues, qué es lo que determina en primer término las temperaturas en el ecuador y los polos. La determinan sencillamente las cantidades de calor solar que nuestra tierra recibe en estos lugares; cantidades que pueden ser determinadas por medio de la ecuación diferencial:

$$dC = J_0 \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \sinh dT$$

en la cual significa:

$J_0$  = la constante solar

$r_0$  = distancia media entre sol y tierra

$r$  = distancia particular

$h$  = altura del sol

$dT$  = pequeño intervalo de tiempo

$dC$  = cantidad de calor solar, suministrado durante el mismo.

Con la integración de esta ecuación se ocuparon muchos sabios, principalmente Meech, Wiener, Angot, Zenker y Hopfner, llegando al resultado de que, actualmente, una superficie de 1 cm<sup>2</sup> recibe, en el límite de nuestra atmósfera, y en el curso de un año, 3,21.10<sup>4</sup> gramcalorías en el ecuador y 1,33.10<sup>4</sup> en los polos. Introduciendo también la influencia de la atmósfera de nuestra tierra, y suponiendo para ella un coeficiente de transmisión de 0,6, considerando, pues, la cantidad de calor solar que llega a la superficie de la tierra, estos valores se reducen a 1,57.10<sup>4</sup> gramcalorías para el ecuador y a 0,23.10<sup>4</sup> para los polos. Como se desprende de estos valores, el ecuador está 6,8 veces más favorecido que los polos.

¿A qué se debe esto?

Fijando nuestra atención en la ecuación diferencial citada vemos que la diversidad entre las cantidades de calor que las distintas regiones de la tierra reciben durante el mismo tiempo, depende, ante todo, de la altura del sol que en ellas se observa. Pero la altura del sol es función de la latitud geográfica, y por con-

siguiente originada por la esfericidad de la tierra. Tan importante es esto que Köppen y Wegener, en su reciente obra, "Die Klimate der geologischen Vorzeit" (63, pág. 3), pudieron sentar la siguiente base para toda consideración posterior de la evolución de los climas durante el pasado geológico: "La historia del clima de un lugar es en primera aproximación la historia de su posición con relación al polo y ecuador", es decir: la historia de su latitud geográfica!

Pues bien, la intensidad de la circulación atmosférica depende de la diferencia de temperaturas entre el ecuador y los polos. Pero estas temperaturas están condicionadas por la cantidad de calor solar suministrado. Esas cantidades son distintas debido a la esfericidad de la tierra, por lo que podemos decir que la esfericidad de la tierra es la causa principal de la circulación atmosférica!

Siendo esto así, entonces ha tenido que haber circulación atmosférica entre el ecuador y los polos, desde que la tierra es esférica, es decir: ¡desde el principio de los siglos! Y habrá circulación atmosférica, hasta tanto la tierra siga siendo esférica, o pierda su atmósfera, o se apague el sol, fuente de calor, aliciente de este movimiento planetario grandioso!

Como vemos pues, el señor Escuela, al suponer o admitir que la circulación atmosférica haya llegado a las regiones polares "hasta la era secundaria" solamente, está equivocado.

Veamos ahora, si tal vez la "intensidad" de la circulación atmosférica haya cambiado durante la evolución geológica en forma tal que pudiera jalonear épocas en la evolución de los climas en los tiempos pasados.

La circulación atmosférica, como sabemos, es transportadora de calor. La cantidad transportada, según lo demostró Defant, está en razón directa con la intensidad de la circulación, y por medio de ésta con la diferencia térmica que existe entre el ecuador y los polos. Pero, como lo hemos dicho ya, el "transporte de calor" disminuye las temperaturas en la zona ecuatorial y las aumenta en las regiones polares, reduciendo así la diferencia térmica que da origen a la mayor intensidad en la circulación. Vemos, pues, que el "transporte de calor solar" desempeña la fun-

ción de un freno de la circulación atmosférica, cuidando de que su intensidad no se eleve demasiado, como también que tampoco se apague al correr el tiempo (8).

Gracias a esta “fuerza reguladora” que el “transporte de calor solar” representa, hay una tendencia para establecer una especie de equilibrio, un “modus vivendi” entre la diferencia térmica entre el ecuador y los polos, y la intensidad de la circulación atmosférica, en cuyo mérito la intensidad de la circulación atmosférica tiende a ser **estacionaria**. Esto no impide, naturalmente que la intensidad de la circulación efectúe todavía “variaciones periódicas” alrededor de un valor medio, estacionario, como consecuencia de la variación periódica que puede ocurrir en los valores de los factores que en conjunto determinan la cantidad de calor solar que recibe la tierra, y entre los cuales la “constante solar” ocupa, sin duda, un lugar especial.

Pues bien, durante toda la evolución geológica de nuestro planeta que, según **Barrel** (64), como también según otros investigadores, como **Königsberger**, **Meitner**, **Holmes**, puede ser apreciada en 1200 a 1400 millones de años, el peso del sol no ha variado mayormente. Antes de 2000 millones de años pesaba, según **J e a n s** (65), solamente 1,00013 veces más que ahora y en esta misma proporción había sido también mayor la constante solar. Al principio de la historia geológica de nuestra tierra, una superficie de 1 cm<sup>2</sup> recibía, pues, durante un minuto y en el límite de la atmósfera, 0.00026 gramecalorías más que en la época actual; cantidad insignificante, y tan pequeña que ni la podríamos medir. Vemos, en consecuencia, que la tierra estaba recibiendo a través de las edades siempre la misma cantidad de calor solar; en su superficie, por consiguiente, reinaban las mismas temperaturas que hoy, en mérito de las cuales la intensidad de la circulación atmosférica planetaria ha tenido que ser la misma.

Los resultados de las investigaciones paleontológicas modernas confirman la validez de estas deducciones hasta la lejanísima formación algonquiana de la era primaria. **S v a n t e A r r h e n i u s**, quien nos dió un excelente resumen de ellas, dice textualmente: “Ya que la formación algonquiana pertenece a la era

más antigua de la historia geológica de la tierra, parece posible que la temperatura de la tierra, desde que hay vida en ella, se haya conservado en su conjunto casi invariablemente, si bien con cambios entre períodos fríos y calientes” (66, pág. 107).

A la formación algonquiana separa de la época actual, según Barrel (64), la bonita suma de 1200 millones de años, mientras tanto la era secundaria o mesozoica, de la cual habla el señor Escola, abarca solamente el tiempo entre 180 y 135 millones de años. Como vemos, **no hay ningún** fundamento científico para suponer, como lo hace el señor capitán, de que al principio de la época secundaria se hubiera producido algún cambio notable en la intensidad de la circulación atmosférica planetaria.

La constancia en la cantidad de calor solar que la tierra estaba recibiendo, como así mismo la constancia de las temperaturas medias y de la intensidad de la circulación atmosférica, no excluyen naturalmente la posibilidad de que el clima de un lugar haya cambiado a través de las edades. Basta para eso suponer que la **posición geográfica** de ese lugar haya variado con respecto al ecuador y el polo. De que semejantes cambios se hayan operado en gran escala, lo ha demostrado el malogrado sabio, A. Wegener, en su obra epocal, titulada “El derive de los continentes” (67).

Pues bien, el mismo A. Wegener, junto con W. Köppen, trató de reconstruir el clima de los diversos continentes a través de toda evolución geológica, sobre la sencilla base de que las temperaturas medias de la tierra, y por consiguiente también la intensidad de la circulación atmosférica, hubiera sido constante, pero que los continentes hayan cambiado de posición geográfica. El resultado de este ensayo, presentado en la obra: “Die Klimate der geologischen Vorzeit” (63), representa uno de los triunfos más brillantes que hombres de ciencia hayan cosechado hasta hoy. Con este estudio, el problema paleoclimatológico quedó resuelto hasta la formación carbonífera de la era primaria y solamente por falta de datos suficientes no fué posible llevar la explicación más allá todavía, hasta la formación algonquiana que señala el principio de la vida orgánica en nuestra tierra.

Tanto sobre los fundamentos básicos de la paleoclimatología. Entrando ya más detalles, tenemos que decir, igual que Arrhenius (66), que en el clima de las épocas pasadas hubo todavía notables cambios entre períodos calientes y fríos. Estos, como lo ha demostrado acabadamente Milankovich (7) (35) (63), han sido producidos, ante todo, por la variación periódica bastante rápida que los elementos de la **órbita de la tierra** experimentan.

Como es sabido, la excentricidad de la órbita de nuestro planeta crece y decrece periódicamente en un lapso de tiempo de 91800 años julianos, como así mismo que la oblicuidad de su eclíptica varía entre  $21^{\circ} 58',5$  y  $24^{\circ} 36',0$  durante un lapso de tiempo de 40400 años julianos, y por fin que la longitud de su perihelio aumenta proporcionalmente al tiempo, recorriendo los  $360^{\circ}$  en 20700 años. Todos estos cambios producen una variación en la distancia Tierra-Sol, y una modificación de las "horas del sol" a través una época geológica, lo que trae consigo una sensible variación en la cantidad de calor solar, suministrado a las distintas regiones de la tierra; variación capaz de por sí de producir períodos de frío o períodos de calor. Los cálculos respectivos han sido ejecutados por Milankovich hasta 650000 años atrás de nuestra época actual. Los períodos de frío, así localizados por un riguroso análisis matemático, coinciden perfectamente con las épocas glaciales, habidas durante todo este tiempo. ¡Un triunfo sin igual en la historia de las ciencias! Si no fuera materialmente imposible proseguir estos cálculos hasta la formación algonquiana, podríamos quizás admirar la explicación matemática de la primera época glacial periarctica que hubo en este lejano tiempo geológico!

Además de estos factores, — constancia de la radiación solar, derive de los continentes y cambio periódico de los elementos de la órbita de la tierra, — hay todavía otros factores que contribuyen a la formación del clima de una determinada región geográfica a través de las edades, si bien en menor escala que los anteriores. Ellos se encuentran perfectamente catalogados por el célebre geofísico Jeffreys, en su clásica obra "The Earth" (68). Con uno de ellos, con el factor **volcánico**, nos ocuparemos en

el segundo capítulo de nuestro estudio, pero no con el criterio paleoclimatológico, empleado hasta ahora, abarcando con nuestra vista millares y millares de años de la evolución geológica, sino con un criterio más detallista, más actual, fijando nuestra atención en la variación climatológica más mínima que existe, en el período de  $3\frac{3}{4}$  de años. Este período, desde luego, carece de todo interés, considerándolo con aquel criterio generalizador, pero su importancia crece cuando se trata de descubrir la causa de los grandes sucesos atmosféricos que dan las características particulares a nuestro "tiempo".

Tenemos que tomar bajo lupa todavía la segunda parte del párrafo antes citado, en la cual el señor Escola dice que **la presencia de los centros de acción anticiclónicos, que como perlas de un collar circundan la tierra a la altura de las latitudes medias, parecería indicar que entre el ecuador y el polo podrían considerarse al menos dos ciclos correspondientes a dos máquinas principales de la atmósfera.**

Ya hemos dicho, cuán poca importancia damos a esas comparaciones de la circulación atmosférica planetaria con máquinas térmicas. No vamos a insistir. Diremos solamente que el autor de esas comparaciones, Sir Napier Shaw, se ha contentado con **una**. También nosotros nos contentaríamos, si tuviéramos algún interés en ellas. Pero el señor Escola piensa que "podrían considerarse al menos **dos**". Esto no concuerda con el número de los anticiclones permanentes que "como perlas de un collar" circundan a nuestra tierra por los paralelos de  $30^{\circ}$  aproximadamente, porque el número de éstos en el hemisferio sur es de **tres**. Del hemisferio norte no es bueno ni hablar, porque allí esas "perlas" se hacen y deshacen en el curso del año, como si fueran de "pasta".

Consideremos ahora más de cerca, si la presencia de estos "centros de acción anticiclónicos", de que habla el señor Escola, representa algún argumento contra el "transporte del calor solar".

Es sabido que la circulación atmosférica general se encuentra un tanto dificultada por la esfericidad de la tierra. En efecto, a causa de ella, las masas aéreas que desde lo alto de la región

ecuatorial inician su peregrinaje obligatorio hacia las regiones polares, encuentran obstaculizado su camino, porque el espacio de que disponen resulta siempre más estrecho. La consecuencia de esto es que se produce una "acumulación" de aire, en tanto mayor escala, cuanto más lejos se está del ecuador; fenómeno que nuestros barómetros registran en forma de un incremento progresivo de la presión atmosférica en la superficie de la tierra (68). Este incremento llega a su límite en la altura de los paralelos de 30°, donde la influencia de la rotación de la tierra es ya tan grande que impide todo avance ordenado de esas masas hacia latitudes mayores. Aquí es, precisamente, donde cambia el carácter de la circulación atmosférica general, reemplazándose la circulación ordenada, superpuesta de la región ecuatorial por la circulación desordenada, juxtapuesta de las latitudes medias, como lo habíamos dicho ya (12) (14).

A causa de esta acumulación de masas aéreas existen dos "anillos" de alta presión atmosférica alrededor de toda la tierra. El "espesor" de estos anillos sería sin duda constante, si la superficie de la tierra fuese homogénea; condición que desde luego, no se cumple. Los continentes y mares que en realidad forman la superficie de nuestro planeta, son elementos heterogéneos, con comportamiento térmico muy distinto. Es por eso que, durante el verano, las masas aéreas, situadas encima de la tierra, se calientan más que las ubicadas encima de los mares. Debido a la dilatación consiguiente de estas masas, la altura de la columna de aire resulta más grande sobre los continentes que sobre los océanos; lo que a su vez origina, en lo alto de nuestra atmósfera, un "vuelco" de aire, dirigido de la tierra hacia los mares. En consecuencia de este "vuelco" se alivia la presión atmosférica encima de los continentes y aumenta encima de los mares. El espesor del anillo se encontrará, pues, "debilitado" encima de los continentes, pero "reforzado" encima de los mares; fenómeno que a su vez, es la causa de la inundación permanente de los continentes con aire oceánico. Durante el invierno este proceso se verifica en el sentido contrario; durante esta estación se calientan más las masas aéreas situadas encima de los mares que las ubicadas encima de la tierra, por lo que la dirección de la circula-

ción del aire resulta “mar afuera” en lo alto de la atmósfera, y “mar adentro” en la superficie de nuestro planeta; las partes “reforzadas” del anillo se encontrarán, pues, situadas encima de los continentes y las “debilitadas” encima de los mares.

Este cambio semestral de la ubicación se efectuaría con toda precisión, si el ancho de los continentes y mares que alternan en la superficie de la tierra, fuese el mismo; condición que en el hemisferio austral evidentemente **no** se verifica. Los tres blocks continentales que ocupan nuestro hemisferio, son sumamente angostos; ellos son capaces de “debilitar” el espesor del anillo en el curso del verano, pero incapaces de “reforzarlo”, en medida apreciable, durante el invierno, excepto el continente australiano. En consecuencia los tres océanos de nuestro hemisferio se encuentran ocupados, durante la mayor parte del año, por tres “regiones de alta presión atmosférica” o por tres “anticiclones estacionarios”, como es costumbre llamarlos (70).

Estos son los “centros de acción anticiclónicos”, de los cuales habla el señor Esc o l a y que representan su último argumento contra el **transporte del calor solar**. Pero, como acabamos de ver, la presencia de estos anticiclones estacionarios se debe, ante todo, a la existencia de la circulación atmosférica. Si hubiera una fuerza capaz de impedir la circulación general, los anillos de alta presión atmosférica que circundan nuestra tierra, quedarían deshechos. Y si hubiera algún medio, capaz de interrumpir el intercambio de aire entre los continentes y mares, desaparecerían también las partes “debilitadas” y “reforzadas” de este anillo, desaparecerían los “cyclones y anticiclones estacionarios” de la faz de la tierra. Sin circulación atmosférica no puede haber, pues, “centros de acción anticiclónicos”. Pero la circulación atmosférica no significa otra cosa que “traslado” de masas aéreas de un lugar a otro; traslado que, desde luego, significa también “transporte” de todo el calor que estas masas poseen.

La presencia de los “centros de acción anticiclónicos que como perlas de un collar circundan a nuestra tierra...! **no** es, pues, argumento alguno contra la tesis nuestra, contra el transporte del calor solar. Todo lo contrario: las “particularidades” que se observan en este transporte se deben precisamente a la “existen-

cia” de estos ciclones y anticiclones estacionarios. Estas formaciones atmosféricas son las que, junto con la rotación de nuestro globo, determinan la dirección y fuerza de los vientos que soplan en la superficie de la tierra; ellas son, pues, las que impulsan las masas aéreas a trasladarse de una región geográfica hacia la otra, y ellas las que determinan las órbitas que esas masas tienen que recorrer. Estas formaciones son, en fin, las que determinan los principales caminos para el transporte del calor solar, los verdaderos “Heerstrasse”, de los cuales uno, tal vez el principal del hemisferio austral, pasa por encima de nuestras pampas inmensas...

Veamos ahora el último párrafo de la crítica del señor Escola: **Analizando debidamente las condiciones medias de la circulación general de la atmósfera, esta parte de la exposición del señor Jagsich es inaceptable.**

Si el señor Escola cree que ha “analizado debidamente las condiciones medias de la circulación general de la atmósfera”, entonces está en un lamentable error. En toda su crítica no hemos encontrado un solo argumento contra la base científica de nuestro estudio, contra ese grandioso fenómeno natural, llamado: **transporte de calor solar**. Todo lo contrario, sus observaciones nos han dado una excelente oportunidad para iluminar la importancia de este transporte; demostrando que, en realidad, casi no hay fenómeno atmosférico que no dependiese del mismo. Y así debe ser, ya que la naturaleza es una sola e indivisible.

“Analizando debidamente las condiciones medias de la circulación general de la atmósfera” no se llega a la conclusión de que “la exposición del señor Jagsich es inaceptable”; porque ella es el fiel reflejo del estado actual de los conocimientos que la ciencia meteorológica posee de la circulación atmosférica planetaria. Para Simpson la exposición del señor Jagsich seguramente sería “aceptable”, porque dice “a problem of considerable meteorological importance is the transfer of heat from equatorial to polar regions”, (23, p. 17); lo mismo para Angström, para quien las investigaciones referentes al transporte del calor solar representan “una valiosa contribución para la edificación lógica de la ciencia meteorológica” (16, p. 6). También

sería “aceptable” para Exner, quien cree que con estos nuevos estudios, por fin, “se ha afrontado el problema principal de la circulación atmosférica” (14, p. 240); lo mismo resulta para Defant, quien considera el transporte del calor solar como “uno de los más grandiosos fenómenos que podemos admirar sobre nuestra tierra” (8, p. 232). Y estos cuatro sabios, con quienes concuerda nuestro modo de ver, son el orgullo de la ciencia meteorológica contemporánea, dicho sin exageración alguna.

“La exposición del señor Jagsich” no puede ser calificada de “inaceptable”, porque los estudios de v. Bezold (5), Emden (6), Milankovich (7), Defant (8) (9), Exner (14), Angström (15) (16), Mügge (17) y Simpson (23) han demostrado, con el rigor matemático debido, la **existencia real** del “transporte del calor solar”. Por el acierto de las deducciones de ellos responden además: Bartels (47), v. Ficker (27), Georgii (28), Knoch (32), König (33), Köppen (30), Schmidt (11), Schubert (32), Shaw (54), Walén (69), Wegener (27), Weickmann (26) y otros más. Hay que estar al tanto de la producción científica contemporánea para saber apreciar en debida forma lo que la sola enumeración de estos nombres ilustres significa. Al lado de la opinión de estos sabios la “aprobación” o la “reprobación” de la explicación de un fenómeno natural cualquiera, por parte del señor capitán Escola, tiene un valor **nulo**.

No hay exageración alguna en esta sentencia. Todo lo contrario, si quisiéramos ser justos, deberíamos ser más severos todavía, porque el señor capitán se pone, con su crítica dirigida a nosotros, también frente a las Academias de Ciencias de Berlín, de Múnich, de Viena y de Zagreb; frente a los servicios meteorológicos de Austria, de Alemania, de Inglaterra y de Suecia; y frente a las revistas como la “Meteorologische Zeitschrift”, “Gerlands Beiträge zur Geophysik”, “Zeitschrift für Geophysik”, “Geografiska Annaler” y “Memoirs of the Royal Meteorological Society”. Pero, por suerte, ella ha sido publicada en una revista de muy escasa difusión en los círculos científicos internacionales, por lo que, tal vez, pase desapercibida.

Para terminar diremos que lo que nosotros encontramos