

## CAPA LIMITE ATMOSFERICA

Por R. W. STEWART

No es nada extraño que los temas tratados por los distintos conferenciantes de la OMI tuvieran una estrecha relación con los temas abordados por los subgrupos del Programa de Investigación Global de la Atmósfera. Así, en la primera conferencia, pronunciada en 1967, por el Profesor E. N. Lorenz, se hizo una exposición del tratamiento teórico de la circulación general de la atmósfera. En la segunda, en 1971, K. Ya Kondratyev consideró los problemas que surgen al tratar la radiación en el seno de la atmósfera, así como hacia y desde la superficie terrestre. El Profesor Kondratyev señaló que el Profesor Lorenz había identificado la radiación como un factor de capital importancia para el completo conocimiento de la circulación de la atmósfera terrestre, señalando al mismo tiempo que era demasiado *premature* suponer que la comprensión de los problemas de la radiación era lo suficientemente completa como para afrontar las necesidades.

Ahora, en 1975, siguiendo una línea similar, puedo indicar que el intercambio de cantidad de movimiento y de momento cinético, entre la atmósfera y la superficie inferior fue uno de los puntos principales de la exposición del Profesor Lorenz, y que la necesidad del balance total del intercambio de momento cinético es uno de los factores esenciales que controlan la circulación general atmosférica. En efecto, no hay duda sobre la limitación que supone el momento cinético medio de la atmósfera y que requiere, por ejemplo, que los vientos del Oeste de las latitudes medias sean más intensos que los vientos del Este de las latitudes bajas. La conjugación de todos estos temas, y de otros, se extiende más allá de la influencia que cada uno ejerce sobre la circulación general. El que la radiación influya en la capa límite se pone vivamente de manifiesto en los cambios radicales que tienen lugar en la capa límite durante el transcurso de veinticuatro horas sin nubosidad sobre el suelo. Los aerosoles desplazados inversamente en la capa límite, y el vapor de agua que se origina en ella y es obligado a condensarse a causa de la acción de los movimientos ascendentes originados en la capa límite, producen efectos drásticos sobre el campo de la radiación.

Existen otras razones para estudiar la capa límite, las cuales serán tratadas más adelante, pero primero vamos a tratar el tema dentro del contexto del GARP. El propósito del Programa de Investigación Global de la Atmósfera es obtener los conocimientos suficientes sobre la circulación general de la atmósfera que permitan lograr avances importantes tanto en la precisión como en el alcance de las predicciones meteorológicas detalladas de todo tipo, y que aumenten sustancialmente nuestros conocimientos sobre las bases fundamentales del clima y su variación. Para alcanzar estos fines tenemos, entre otras cosas, que perfeccionar nuestros conocimientos de dinámica y de termodinámica de la atmósfera.

---

*Nota:* Este artículo es un resumen de la tercera Conferencia de la OMI, que el Profesor R. W. Stewart (Canadá) pronunciará ante el Séptimo Congreso de la OMM, Ginebra, 1975.

La capa límite afecta a ambas. Existen diversos efectos dinámicos: la mitad, quizás más, de la pérdida de la energía mecánica de la atmósfera tiene lugar en la capa límite. El rozamiento en dicha capa permite a la atmósfera inferior eludir parte de los efectos geostroáficos y fluir a través de las isobaras con una serie de resultados dinámicos muy importantes. La interacción en la capa límite también permite a las masas de aire modificar su vorticidad, bien directamente por medio de intercambios con el límite de la capa, o bien indirectamente a causa de flujos convergentes o divergentes dentro de la capa límite. Ningún modelo de la circulación está conceptualmente completo si no se incluyen los efectos de la capa límite. Ningún modelo de *predicción* puede tener éxito sin incluir de una manera suficientemente precisa la influencia de la capa límite.

Tal como se mencionó anteriormente, la capa límite también influye en la termodinámica de la atmósfera. Todo el vapor de agua que penetra en la atmósfera procedente de la superficie lo tiene que hacer a través de la capa límite. El calor sensible que puede penetrar o abandonar la atmósfera lo hace por diversos caminos y por esta razón resulta más complejo que su cantidad de movimiento o incluso que el vapor de agua (cuya complejidad se debe a otras razones ya que están implicados los cambios de fase); pero la transferencia de calor sensible a través del límite de la capa es con frecuencia muy importante y en algunos casos dominante.

No se debe de olvidar que la capa límite también juega otro papel, en particular respecto al clima. A través de la capa límite el mar adquiere la mayoría de su cantidad de movimiento. Ahí también pierde una cantidad sustancial de agua, resultando de ello un aumento de la salinidad en la superficie. La entrada de cantidad de movimiento resultante y los cambios de densidad son, en gran parte, responsables de la circulación oceánica. La circulación del océano ejerce de nuevo su acción sobre la atmósfera transportando calor desde una parte del globo hacia otra, particularmente y de manera más importante a través de los paralelos geográficos, ayudada por la presencia de los límites continentales meridionales que no tienen un efecto sobre la atmósfera comparable al que tienen sobre el océano. Es sabido, que el mar tiene un efecto sobre el clima totalmente comparable al de la atmósfera, aunque, desde luego, visto el tema de esta manera realmente no es posible separar sus efectos y hay que hablar del sistema conjunto océano-atmósfera.

Por tanto, no resulta demasiado sorprendente que el estudio de la capa límite haya sido un motivo principal para muchos de los mayores experimentos atmosféricos de los últimos años, tanto dentro como fuera del GARP. Entre estos experimentos están el Experimento americano de las Islas Line y el Experimento Oceanográfico y Meteorológico de Barbados, el Experimento soviético sobre la energía total de la atmósfera, el Año Internacional EE. UU.-Canadá de estudios sobre el terreno en los Grandes Lagos, el JASIN Británico (Experimento sobre la interacción conjunta aire-mar) así como un extenso número de programas a escala nacional y de instituciones, pero con unos alcances no tan amplios como para prestarles una atención tan detallada como a los nombrados. A mayor escala, aún tenemos el Experimento sobre la modificación artificial de las masas de aire, dirigido por los japoneses pero con un alcance internacional, y el gigantesco Experimento Tropical del GARP en el At-

lántico, completamente internacional y realizado con destacado éxito durante 1974.

¿Por qué toda esta cantidad de gastos, de potencial humano y de inteligencia? La razón principal está en el hecho de que el estudio de la capa límite no sólo es muy importante sino que ¡también es muy difícil! Las dificultades son tanto conceptuales como de observación. El problema de concepto radica en el hecho de que salvo excepciones triviales, la capa límite es turbulenta. Tanto el Profesor Lorenz como el Profesor Kondratyev iniciaron los resúmenes de sus conferencias de la OMI con referencias apropiadas. Yo he demorado mi referencia a este punto ya que indudablemente es inexacto y puede resultar apócrifo. No obstante, es apropiado. He oído un dicho atribuido a Theodore Von Karman y que viene a decir algo así: «Para mí, hay dos grandes misterios sin explicar en nuestro conocimiento sobre el universo. Uno es el carácter de una teoría de campos general y unificada para explicar tanto la gravitación como el electromagnetismo. El otro, es el conocimiento de la naturaleza de la turbulencia. Cuando muera espero que Dios me aclare la teoría general de campos. ¡No tengo las mismas esperanzas sobre la turbulencia!».

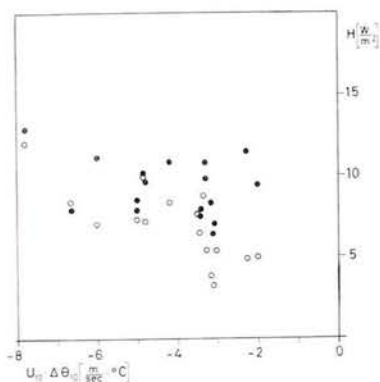
Actualmente, en las pocas décadas transcurridas desde que se hizo dicha observación, se ha experimentado un notable progreso en el desarrollo de la teoría de la turbulencia. Sin embargo, esta teoría todavía es esencialmente semiempírica lo cual requiere la inserción de gran cantidad de datos de observación para hacerla útil con vistas a la predicción. Muchos programas de investigación han tenido como objetivo central la recopilación de datos empíricos de este tipo. Y aquí chocamos con los problemas estadísticos antes mencionados.

Una situación típica de la capa límite atmosférica es muy compleja, dependiendo de varios parámetros. Quizás, el más importante sea el gradiente de presión local, determinante del viento geostrófico. Se ha llevado a cabo una tremenda cantidad de trabajo teórico con el fin de construir un esquema para los datos empíricos obtenidos bajo las simples condiciones de flujo estable y uniforme en una atmósfera carente de estratificación de densidad potencial, esto es, dependiendo solamente del gradiente de presión, de la latitud y de parámetros de la superficie. El hecho de que la naturaleza de esta situación aparentemente simple aún no se conozca por completo, se debe al hecho de que dichas circunstancias son extremadamente raras, tan raras que no se puede decir con confianza que *algún* programa de medidas se haya realizado aún en semejantes condiciones favorables. Más típica es la estratificación de densidad, estable, inestable o ambas. Normalmente el régimen temporal del cambio de las condiciones atmosféricas, tanto en la estabilidad como en la variación del gradiente de presión, no es pequeño comparado con las escalas de tiempo características para tal capa límite, las cuales generalmente no podrán ser mucho más cortas que el período de las oscilaciones inerciales, en ninguna parte menor de doce horas y mucho mayor en las latitudes bajas. Sobre el agua la situación de la capa límite inferior, determinada por el campo de ondas, cambia típicamente con el tiempo. Sobre el suelo la situación de la capa límite inferior casi siempre varía en el espacio.

Todo esto no sería tan grave si no fuese por el hecho de que para realizar las medidas hace falta una cantidad de tiempo considerable; las medidas se toman en un orden fijo con el fin de proporcionar una descripción estadística significativa de la capa límite. No paran ahí las dificultades de la técnica de la medida, de forma que medidas simultáneas realizadas mediante técnicas diferentes no siempre concuerdan bien, sino que incluso hay una gran dispersión en los resultados obtenidos por el mismo instrumento bajo las mismas condiciones aparentes (Figura 1)

Figura 1.— De Dunckel, Hasse, Krugermeyer, Schriever y Wucknita, en *Boundary Layer Meteorology* (Meteorología de la capa límite) (1974): Comparación de los flujos verticales de calor sensible a partir de perfiles simultáneos (círculos) y de medidas directas (puntos).

No sólo no concuerdan las medidas realizadas simultáneamente por medio de técnicas diferentes, sino que incluso los resultados obtenidos por el mismo aparato, en condiciones aparentemente semejantes, se encuentran caracterizadas por una amplia dispersión. Esto complica enormemente los esfuerzos llevados a cabo para establecer relaciones empíricas entre distintos parámetros de la capa límite.



Esto bien puede estar relacionado con el hecho, revelado por la visualización del flujo proporcionado por las nubes en el techo de la capa límite, de que en la capa límite existen desplazamientos organizados, o semiorganizados, a escala muy grande (Figura 2). Las medidas tomadas en estos



Figura 2.—Las nubes que aparecen en la parte superior de la capa límite al materializar la circulación, revelan la presencia, en dicha capa, de movimientos a gran escala organizados o semiorganizados.

desplazamientos a gran escala, aunque en esencia bajo las mismas condiciones, dan resultados diferentes. Incluso donde no existen señales de tal desplazamiento organizado a gran escala se observa que se tarda mucho tiempo para que los promedios de algunas de las cantidades más importantes tales como flujo de cantidad de movimiento, calor y vapor de agua se *estabilicen* estadísticamente.

El resultado es que, bajo cualquier tipo de condiciones, se necesita una cantidad de tiempo apreciable para obtener una serie de medidas fidedignas, con una pequeña dispersión estadística. Pero las mismas condiciones generalmente no permanecen estables durante mucho tiempo. Tampoco se repiten exactamente en el mismo lugar con gran fidelidad o frecuencia. Por lo tanto, no es nada sorprendente que nuestra base de datos empíricos, necesaria para hacer que nuestras teorías semiempíricas



*Figura 3.*—Una estratificación estable tiende a impedir que el aire que se encuentra en la parte inferior de la capa límite se mezcle con el aire de las capas superiores y le sustrae de la influencia de la advección existente en aquellas. Por esta causa, los contaminantes tienden a concentrarse en las capas bajas.

tengan sentido real, deje mucho que desear, ni el hecho de que hagan falta programas tan minuciosos y caros con el fin de mejorar esta situación.

Como señalamos anteriormente, la capa límite tiene una importancia independiente de aquella asociada con su influencia en la circulación general. ¡La capa límite es donde vivimos! Contiene el aire que respiramos,



*Figura 4.*—El relieve tiende a aprisionar al aire denso de el mismo modo que retiene al agua para formar los lagos.

y es en la capa límite donde vertemos nuestros contaminantes atmosféricos (*Figura 3*). Muchos de los estudios más exhaustivos sobre la capa límite están dirigidos hacia el conocimiento y hacia la solución de los problemas de la contaminación urbana. No sólo están entre los estudios más importantes de la capa límite, sino que están entre los más difíciles. Las ciudades no fueron situadas en lugares proyectados para simplificar

los problemas de los meteorólogos dedicados a la micro y a la mesometeorología. Con frecuencia se hallan situadas a lo largo de grandes extensiones de agua, de manera que el contraste del agua y de la tierra en las condiciones de contorno produce efectos de brisas tierra-mar. Frecuentemente están emplazadas en valles, y el terreno puede atrapar el aire denso (con todos sus contaminantes) casi de una forma tan eficaz a como el terreno puede recoger el agua para formar lagos (*Figura 4*). La ciudad en sí es una pesadilla para los teóricos de la capa límite. Contiene fuentes de calor dispersas y variables. Tiene rugosidades en forma de edificios, los cuales son grandes, irregulares y distribuidos sin uniformidad. Bajo estas condiciones no hay que sorprenderse tanto de que persistan las dificultades para la predicción de los niveles de contaminación en las ciudades, como de que en muchas ciudades del mundo se haya logrado un progreso sustancial y útil.

Así pues, la capa límite es difícil de estudiar pero también es importante que se estudie. Lo suficientemente importante como para que se continúe disponiendo de los recursos de las naciones y de la inventiva y los pensamientos de los hombres con ingenio.

## EL SISTEMA EXPERIMENTAL AFOS

Por R. E. JOHNSON y J. GIRAYTYS\*

Las demandas nacionales, siempre crecientes en los EE. UU. para los servicios y productos relacionados con el tiempo, han sido satisfechas a lo largo de los años a través de una combinación de avances científicos en el campo de la predicción meteorológica/hidrológica y la expansión de la estructura del National Weather Service (NWS). Esta estructura consiste en su mayor parte en medios materiales, enlaces de comunicaciones y personal.

Las peticiones de servicio son hasta ahora crecientes y el avance científico es continuo. La estructura del NWS no puede, sin embargo, continuar progresando sin algunos cambios significativos en los conceptos operativos. Conseguir el desarrollo añadiendo simplemente más instalaciones, personal y enlaces de comunicación, está llegando a ser prohibitivo económicamente. El NWS se ha embarcado en un programa de modernización de las estaciones a escala nacional, anticipándose así al momento en que su actual estructura fuera insuficientemente adecuada para proporcionar el nivel de servicio exigido. Este programa se conoce con el nombre de AFOS (Automation of Field Operations and Services).

El sistema AFOS, como se concibe actualmente, no solamente responderá a las necesidades presentes y futuras de la información relacionada con el tiempo sino que, una vez puesto en marcha, su costo de operación será sustancialmente menor que el del sistema existente. Las estimaciones actuales indican que el ahorro acumulado en un período de seis a ocho años será igual a la inversión inicial.

---

(\*) Tanto el Sr. R. E. Johnson como el Dr. J. Giraytys trabajan en el National Weather Service, Silver Spring, Maryland, EE. UU.