

LOS MICRORREVENTONES COMO UN PELIGRO PARA LA AVIACION Y EL PROBLEMA DE SU PREDICCIÓN

Por Fernando CARACENA*

Introducción

Las corrientes descendentes en las tormentas pueden llegar a ser tan fuertes que produzcan vientos peligrosos en superficie, pues en ella se desarrolla un viento divergente horizontalmente como respuesta al impacto y a la presión hidrostática del flujo hacia abajo. En 1985, Fujita llamó a este tipo de corrientes descendentes fuertes y concentradas “reventones descendentes” y “microrreventones”, si los vientos peligrosos se extendían sobre una zona con menos de 4 kilómetros de diámetro. Los reventones descendentes ya habían sido considerados por algunos investigadores (por ejemplo, Hall y Brewer en 1959), pero no habían atraído mucha atención dentro de la meteorología hasta que se empezó a identificar a los microrreventones como la causa principal de una serie de accidentes de aviación al despegar y al aterrizar [Fujita y Byers (1977); Fujita y Caracena (1977)]. El más reciente de los accidentes relacionados con un microrreventón fue el del vuelo 191, de la compañía Delta Air Lines, en el aeropuerto internacional de Dallas/For Worth (DFW), el 2 de agosto de 1985 [Fujita (1986); Caracena y col. (1986)]. Dado que el avión era un reactor para mucho pasaje y equipado con registradores digitales del vuelo, pudo proporcionar datos nuevos acerca de la estructura a pequeña escala de estos microrreventones.

Los esfuerzos actuales tendentes a solucionar los problemas que los microrreventones suponen para la seguridad aérea se centran en su detección por sensores a distancia, principalmente el radar Doppler. Sin embargo, si se quiere colocar un sistema de vigilancia de los microrreventones sobre unos cimientos conceptuales firmes, es necesario estudiar otros tres campos, ya que precisamos conocer:

- La estructura dinámica de los microrreventones, para darnos completa cuenta de la amenaza que suponen para los aviones;
- Cómo se inician dinámicamente los microrreventones, para poder reconocer cualquier precursor que pueda aparecer en los sensores a distancia;
- Qué situaciones meteorológicas son propensas al desarrollo de los microrreventones.

Los campos primero y tercero son el tema de este artículo.

La estructura a pequeña escala de los microrreventones

El flujo contra una superficie plana

El modelo más sencillo de un microrreventón es el de un chorro no viscoso (la corriente descendente) que choca contra una superficie plana (el suelo). Esos modelos se analizan en los textos de dinámica de fluidos [por ejemplo, Batchelor (1970)], y los más sencillos son los flujos de simetría axial, no rotatorios, y de extensión infinita. Una modifica-

* NOAA Weather Research Program, Boulder.

ción ulterior del modelo añade la viscosidad como fuente de vorticidad superficial, que genera una capa límite de espesor constante en la competencia entre la difusión hacia arriba y la convección hacia abajo por la corriente descendente. Si el modelo viscoso se especializa posteriormente para una corriente descendente concentrada de simetría axial, entonces se introduce otro elemento dinámico en forma de una funda cilíndrica de vorticidad en la cizalladura que separa a la corriente descendente de su entorno.

Vórtices anulares

En 1982, el autor fue el primero en reconocer que un microrreventón puede tomar la forma de un vórtice anular. En 1985, Fujita presentó algunas pruebas para confirmar esta hipótesis, pero las mejores las ha proporcionado el análisis de los datos del registrador digital de vuelo, procedentes del vuelo 191 de la Delta Air Lines.

El modelo de microrreventón propuesto por Caracena es un vórtice anular que desciende dentro de la corriente descendente y que se ensancha horizontalmente en la superficie (figura 1). El ensanchamiento del vórtice anular proporciona un mecanismo por el que se refuerza el viento incluso cuando el microrreventón se extiende y llega a sufrir una disipación por rozamiento. Apoya a este modelo el análisis de los datos de radar sobre microrreventones [Wilson y col. (1984)] que muestra que, como promedio, en un microrreventón se duplica la velocidad del viento (desde 12 ms^{-1} al principio a 24 ms^{-1} al final), durante los primeros cinco minutos después de que se produzca la primera divergencia del viento en superficie, intervalo cronológico en el que el diámetro se agranda de 1,8 a 3,1 km. El único problema del modelo de vórtice anular para microrreventones radica en el origen del vórtice anular.

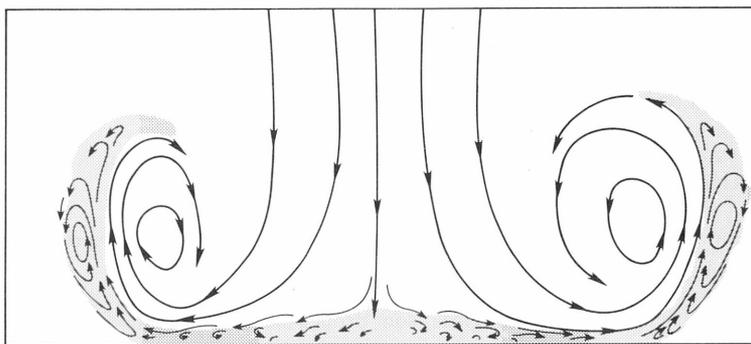


Figura 1.- Sección vertical de un microrreventón en un modelo en el que se considera como un vórtice anular que rodea al centro de la corriente descendente en un plano horizontal (el vórtice primario). El sombreado indica la capa límite de rozamiento en la que la vorticidad es opuesta y se induce un vórtice secundario que posteriormente degenera en turbulencia.

El mecanismo más sencillo para producir vórtices anulares en una corriente descendente concentrada es un tipo de inestabilidad de Kelvin-Helmholtz en la funda cilíndrica de vorticidad que rodea a la corriente descendente, que rola hasta convertirse en un vórtice anular en la base de la corriente descendente. Este efecto, así como la interacción de este vórtice anular con una capa límite superficial de vorticidad opuesta, ha sido estudiado en el laboratorio por Didden y Ho (1985), para el caso de un chorro que choca. Las medidas, mediante un anemómetro de alambre caliente, del flujo que sale o de un chorro que choca con una pared indican que, a una distancia desde el centro del choque de unas dos veces el radio del chorro, la circulación del vórtice aumenta la velocidad del flujo saliente hasta aproximadamente 1,6 veces la velocidad en la boca del chorro.

Los experimentos de laboratorio indican que la inestabilidad del vórtice anular de un chorro que choca es periódica; es decir, que la inestabilidad del vórtice anular a lo largo del borde afilado del chorro que choca puede producir una serie de reventones en la superficie, incluso cuando el chorro sale a una velocidad constante de la boca del tubo. En cada reventón, la convección de vorticidad hacia la superficie se reúne en un vórtice anular que es desplazado hacia arriba por el flujo saliente en superficie. La vorticidad de signo contrario es producida por el arrastre por rozamiento en superficie y se reúne en un vórtice anular, que gira en sentido contrario y que por advección se sitúa alrededor del anillo primario hasta que al romperse degenera en turbulencia.

El análisis del accidente del aeropuerto DFW y también los experimentos de Didden y Ho indican que, dependiendo de las longitudes de onda de las inestabilidades de los vórtices anulares, los resultados pueden ser o bien una circulación fuerte con vórtices dentro de ella o bien una serie de reventones intercalados con periodos de calma relativa.

El accidente de Dallas/Fort Worth

La estructura a pequeña escala del microrreventón implicado en el accidente del vuelo 191 del avión de Delta Air Lines, del 2 de agosto de 1985, lo ha estudiado Bach y Wingrove (1985), Fujita (1986) y Caracena y col. (1986). Todos estos estudios se han basado en los datos del registrador digital del vuelo, que han proporcionado la información mejor y más detallada de la estructura espacial de los 300 metros inferiores de un microrreventón. (Se dispone de los datos de una torre para un espesor similar, pero solamente como serie cronológica). Se encontró que:

- La corriente descendente era fría (unos 10 K más fría que su entorno);
- Contenía vórtices dentro de ella, de diámetro menor que unos 200 m, que producían corrientes ascendentes localizadas en el seno del flujo descendente;
- Se caracterizaba por una corriente ascendente fría de retorno en el borde delantero, lo que sugería una circulación a escala mayor en forma de un vórtice anular grande.

El microrreventón de Wichita, que se representa en la *figura 2 (a)*, es muy similar al suceso del aeropuerto DFW como han analizado Caracena y col. (1986) en la *figura 2 (b)*. Smith (1986) ofrece una descripción más detallada de las características visuales de los microrreventones. Una característica que merece la pena señalar en la fotografía es el prominente vórtice horizontal, que se ha hecho visible en el borde de la zona de lluvia gracias a la precipitación; corresponde al vórtice del borde delantero en el microrreventón del aeropuerto DFW.

Los reventones múltiples y los vórtices que hay en ellos

Una característica importante de los accidentes de aviación relacionados con microrreventones es la tendencia de éstos a tener lugar periódicamente como reventones múltiples. Al investigar las condiciones meteorológicas asociadas al accidente del vuelo 66 de la compañía Eastern Air Lines, ocurrido en el aeropuerto Kennedy, de Nueva York, el 24 de junio de 1975, Fujita y Byers (1977) analizaron tres reventones descendentes separados (eran realmente microrreventones, pero entonces aún no se había introducido este término), que sucedieron con intervalos de unos nueve minutos en el mismo lugar, sobre la aproximación a la pista 22-L. En un accidente anterior relacionado con los microrreventones que le ocurrió, en Nueva Orleans, al vuelo 759 de la compañía Pan American Airways, se había producido unos siete minutos antes en el mismo punto un microrreventón que ha-

(a)

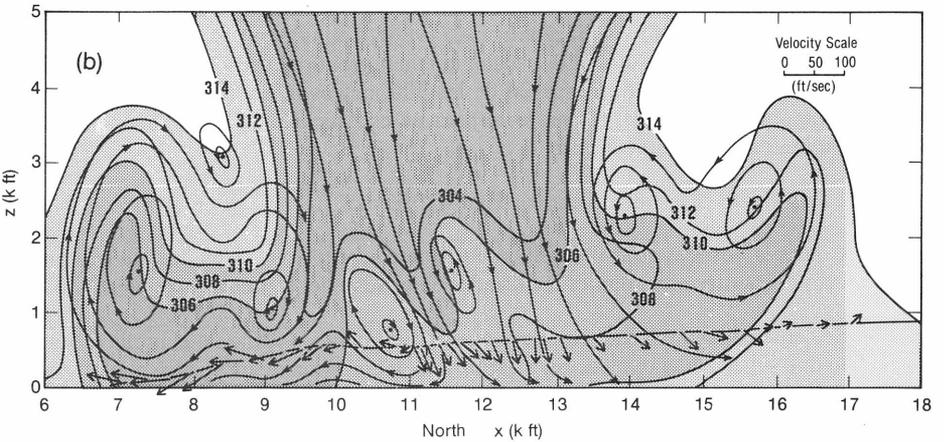


Figura 2.- (a) Fotografía realizada por M. Smith de un microrreventón de ambiente húmedo cerca de Wichita (Kansas).

(b) Modelo del autor para el campo de flujo del microrreventón, del 2 de agosto de 1985, en el aeropuerto de Dallas/Fort Worth.

bía afectado gravemente al despegue del vuelo 632 de la compañía Republic Airlines [Carcena y col. (1983); Fujita (1983)], pero no al del vuelo siguiente. Como ya se ha señalado, los datos del registrador del vuelo indicaron que el microrreventón asociado al accidente del aeropuerto DFW tenía en su seno varios vórtices de escala menor.

Los análisis indican que los microrreventones tienen estructuras dinámicas complejas. Pueden contener vórtices muy fuertes con escalas del orden de los 200 m, que suponen por sí mismos una amenaza grave para un avión. Así, los microrreventones pueden producir no solamente fuertes cizalladuras del viento, sino también circulaciones fuertes del aire que presentan a un piloto serios problemas de control del avión en un momento en que ese control ya es difícil debido a una fuerte disminución de la velocidad del aire.

Los experimentos realizados en un tanque de fluidos proporcionan algún conocimiento sobre la periodicidad de los microrreventones. Cuando la periodicidad de un chorro que choca es suficientemente larga, éste se disgrega en una serie de vórtices anulares discretos

que se disipan entre los choques sucesivos. Esto puede explicar la tendencia de los microreventones a formarse periódicamente, llegando al mismo lugar con varios minutos de separación. Alternativamente, la periodicidad de los vórtices anulares puede ser más corta que su tiempo de disipación, en cuyo caso se puede producir un microrreventón complejo y duradero en el que cada nueva oleada revigore la circulación a escala mayor.

La naturaleza periódica de los microrreventones tiene implicaciones prácticas para las directrices aeroportuarias. Del conocimiento de que en un lugar determinado ha sucedido un microrreventón, no se puede suponer que el peligro ha pasado sólo porque ya no se reciban más informes de cizalladura del viento. En idéntico lugar puede ocurrir otro microrreventón pocos minutos más tarde. Donde la periodicidad de los reventones es corta, es probable que se produzca un microrreventón duradero que se puede expandir hasta convertirse en un reventón descendente de escala mayor. Por lo tanto, una vez que se detecte un microrreventón se le debe vigilar muy cuidadosamente para determinar su tipo de evolución.

Las situaciones que pueden originar microrreventones y el problema de su predicción

Intentos actuales en la predicción

Caracena y Flueck (1987) han estudiado sistemáticamente el problema de predecir los microrreventones a partir de los datos de los sondeos sinópticos, utilizando el cálculo diario de microrreventones durante el proyecto de Estudios conjuntos del tiempo de los aeropuertos, que se realizó cerca de Denver, en 1982, como medida de la actividad de los microrreventones. Estos datos, junto con los de algunos estudios de casos anteriores en esa zona, forman una buena base para conocer el tipo de microrreventón que se produce sobre la parte semiárida del oeste de los EE.UU. Parece que habitualmente desciende de los cumulonimbus que tienen su base bastante alta (aproximadamente 3000 m), a través de las columnas de precipitación que se adelgazan progresivamente hasta desaparecer antes de llegar al suelo. Los resultados son vientos peligrosos, pero poca o ninguna lluvia llega al suelo y en muchos casos no hay relámpagos. Actualmente intentamos extender muestras directrices a una mayor variedad de situaciones que puedan originar microrreventones.

Extremadamente secos y extremadamente húmedos

El caso que acabamos de describir es un microrreventón en un ambiente seco. Otro tipo de microrreventón [Caracena y Flueck (1987)] es el de ambiente extremadamente húmedo, tipo bastante común sobre el sureste de los EE.UU. El estudio de uno de estos últimos casos fue presentado por Caracena y Maier (1987) y sirvió de base para el modelo que se muestra en la *figura 3*.

En el microrreventón con ambiente seco [Brown y col. (1982)], una capa húmeda que contiene nubes se desliza sobre una capa gruesa de aire seco que tiene una estabilidad estática seca neutra. Un chubasco débil de nieve, que cae de la nube de base elevada, se funde convirtiéndose en finas gotas de lluvia que se evaporan rápidamente en la capa seca de debajo de la nube, lo que produce un disparo inicial de enfriamiento por evaporación. Después de que la partícula de la corriente descendente baja de una forma casi adiabáticamente seca, y debido a que el gradiente vertical de temperatura del ambiente es más o menos adiabático seco, el déficit de temperatura de la corriente descendente tiende a conservarse durante todo el recorrido hasta la superficie. Por lo tanto, en ambiente seco los microrreventones los *inicia* la evaporación.

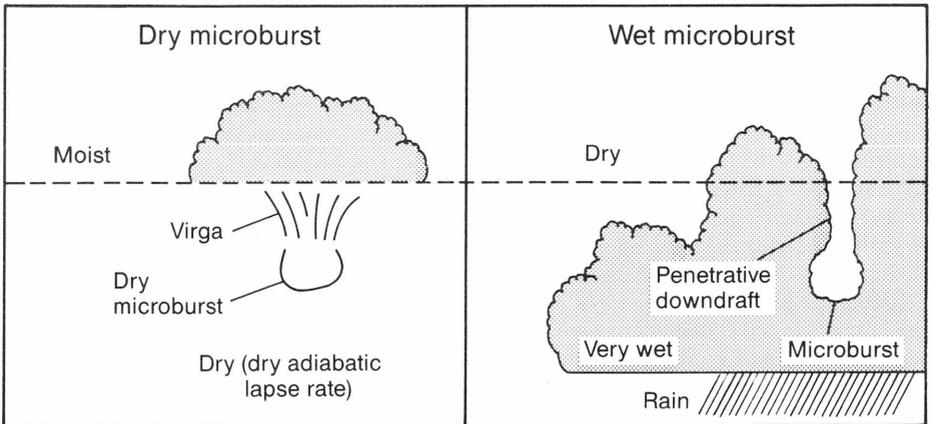
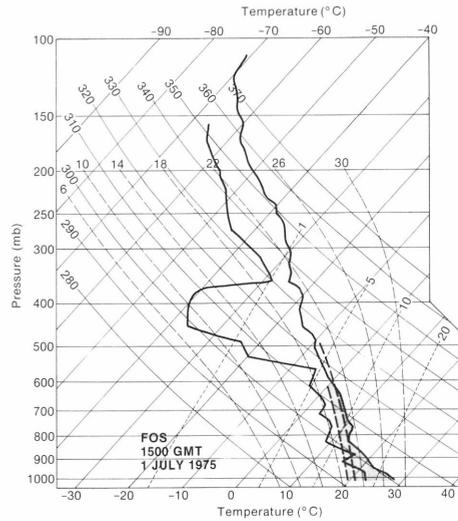
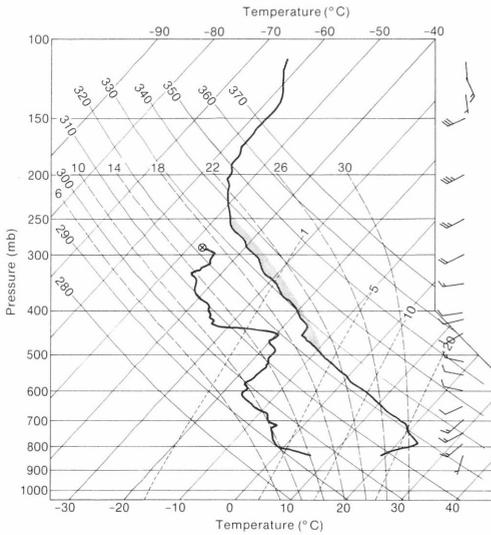


Figura 3.- Diagrama en el que se comparan en función de los sondeos y de los modelos los microrreventones de ambiente extremadamente secos (izquierda) y extremadamente húmedos. El sondeo de la izquierda se hizo en Denver, a las 12.00 TU del 15 de julio de 1982, y corresponde a la máxima cantidad de microrreventones durante el proyecto de Estudios conjuntos del tiempo de los aeropuertos. El sondeo de la derecha se realizó a las 15.00 TU del 1 de julio de 1975, sólo tres horas antes de que en ese lugar se diera un microrreventón.

En un ambiente extremadamente húmedo puede haber poco potencial de corriente descendente a partir del enfriamiento por evaporación en la baja troposfera (que es húmeda y se caracteriza por un gradiente adiabático cuasisaturado) y la fuente de lluvia templada puede que esté demasiado cerca del suelo para dar mucha aceleración mediante el arrastre de la precipitación. Sin embargo, es perfectamente posible que una capa de aire seco de la troposfera media sea transportado por corrientes en altura desde una fuente distante hasta una de estas regiones húmedas. La capa seca, potencialmente fría, podía actuar entonces como fuente elevada de aire descendente y, si algunas partículas de este aire permanecen casi saturadas a todo lo largo de su descenso, pueden conservar un déficit de temperatura y un empuje negativo durante todo su recorrido hasta el suelo, produciendo microrreventones. Por lo tanto, en ambiente húmedo los microrreventones los *guía* la evaporación.

Tormentas fuertes clásicas

Las situaciones de tormentas fuertes clásicas asociadas con líneas de turbonada o supercélulas tormentosas también pueden producir microrreventones bastante fuertes, a veces en asociación con tornados [Fujita (1985)]. En el pasado, los daños producidos por los microrreventones se habían atribuido erróneamente a los tornados. Por otra parte, no se conoce ningún accidente de aviación que haya ocurrido como resultado de encontrarse un microrreventón bajo condiciones de tormenta fuerte. La razón probable es que estas tormentas son verticales, altas, muy reflectantes y duraderas y, por lo tanto, fácilmente visibles por el ojo y por el radar y los controladores aéreos y las tripulaciones las evitan prudentemente. Sin embargo, los pilotos no deben olvidar que los microrreventones pueden suceder en asociación con tormentas fuertes y que al riesgo de encontrárselos se deben añadir los otros riesgos inherentes de turbulencia, granizo, rayos y tornados.

Conclusión

Hemos estudiado dos aspectos de los microrreventones: sus estructuras internas a escala pequeña, que afectan mucho a las características de vuelo de los aviones que penetran en ellos, y el problema de predecirlos, en el contexto de los modelos de ambientes secos y húmedos asociados con una probabilidad alta de microrreventones. Estos dos temas requieren estudios posteriores a fin de conocer mejor el fenómeno y así contribuir a desarrollar para la aviación un sistema completo de predicción, detección, vigilancia, esquivas y tratamiento de los microrreventones.

BIBLIOGRAFIA

- BACH, R.E. y WINGROVE, R. C. (1985): Estimation of the winds along the flight path for the Delta L-1011 accident at the Dallas/Fort Worth Airport on August 2, 1982. Special Report to NTSB, NASA. Ames Research Center.
- BATCHELOR, G. K. (1970): *An Introduction to Fluid Dynamics*. Cambridge Univ. Press, London.
- BROWN, J. M., KNUPP, K. R. y CARACENA, F. (1982): Destructive winds from shallow high-based cumulonimbi. Preprints for Twelfth Conference on Severe Local Storms; AMS, Boston.
- CARACENA, F. y FLUECK, J. A. (1987): Forecasting and classifying dry microburst activity in the Denver area subjectively and objectively. AIAA 25th Aerospace Sciences Meeting; paper AIAA-87-0443.
- y MAIER, M. W. (1987): Analysis of a microburst in the FACE meteorological mesonet in South Florida. *Mon. Wea. Rev.* **115** págs. 969 a 985.
- MADDOX, R. A., PURDOM, J. F. W., WEAVER, J. F. y GREENE, R. N. (1983): Multiscale analysis of meteorological conditions affecting Pan American World Airways flight 759. NOAA Tech. Memo ERL ESG-2.
- ORTIZ, R. y AUGUSTINE, J. A. (1986): The crash of Delta flight 191 at Dallas/Fort Worth international airport on August 2, 1985: Multiscale analysis of weather conditions. NOAA Tech. Report ERL 430-ESG-2.
- DIDDEN, N. y HO. Chih-Ming (1985): Unsteady separation in a boundary layer produced by an impinging jet. *Jour. Fluid Mech.* **160** págs. 235 a 256.
- FUJITA, T. T. (1983): Microburst and wind shear at New Orleans international airport on July 9, 1982. SMRP Res. Paper 210, Univ. of Chicago.
- (1985): The downburst, microburst and macroburst. SMRP Res. Paper 210, Univ. of Chicago.
- (1986): DFW microburst on August 2, 1985. SMRP Res. Paper 217, Univ. of Chicago.

- y BYERS, H. R. (1977): Spearhead echo and downbursts in the crash of an airliner. *Mon. Wea. Rev.* **105** págs. 129-146.
- y CARACENA, F. (1977): An analysis of three weather-related aircraft accidents. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **58** págs. 1164 a 1181.
- HALL, F. y BREWER, R. D. (1959): A sequence of tornado damage patterns. *Mon. Wea. Rev.* **87** págs. 207 a 216.
- SMITH, M. (1986): Visual observations of Kansas downbursts and their relation to aviation weather. *Mon. Wea. Rev.* **114** págs. 1612 a 1616.
- WILSON, J. W., ROBERTS, R. D., KESSENGER, C. y MCCARTHY, J. (1984): Microburst wind structure and evaluation of Doppler radar for airport wind shear detection. *J. Climate Appl. Meteor.* **23**] págs. 898 a 915.

LA OMM Y LA ANTARTIDA

Por N.A. STRETON *

El continente antártico y los mares que lo rodean es una zona de creciente interés y actividad de la meteorología, tanto por lo que respecta a la ciencia como a las operaciones. La *figura 1* muestra la distribución actual de las estaciones meteorológicas de observación pertenecientes a las naciones que forman parte del Tratado del Antártico; representa la evolución de un ideal que tuvo sus orígenes en el Año Geofísico Internacional (AGI) 1957/1958, cuando llegó a hacerse realidad el antiguo sueño de disponer de una red de estaciones científicas en las regiones australes. Aparte de las observaciones que se realizan en las estaciones casi permanentes, que aparecen en la *figura 1*, se dispone de muchas más procedentes de los lugares en que acampan las expediciones durante semanas o meses, de las estaciones meteorológicas automáticas instaladas en la capa de hielo, en los témpanos y en el océano, así como de los buques y aviones que participan en las expediciones o que desarrollan actividades comerciales.

Aunque la estructura de las asociaciones regionales de la OMM termina formalmente a la latitud de 60° S, en la época del AGI quedó reconocido claramente que la coordinación de los aspectos operativos de la meteorología antártica constituía una misión para la que la OMM era la única organización adecuada. Dado que el Tratado del Antártico firmado en 1959 "congeló" prácticamente las reclamaciones nacionales sobre territorios situados al sur de 60° S (ni aprobándolas ni denegándolas), la manera más adecuada de coordinar las actividades meteorológicas fue a través de un grupo de trabajo con representantes de todas las naciones que fueran parte del Tratado y que desarrollaran programas en la Antártida. El grupo de trabajo sobre meteorología antártica se estableció inicialmente para informar al Comité Ejecutivo de la OMM (ahora Consejo Ejecutivo), y celebró su primera reunión en Melbourne, en 1966, bajo la presidencia del Dr. W.J. Gibbs (Australia). El Comité Científico del CIUC para las investigaciones antárticas (SCAR) disponía también de un grupo de trabajo sobre meteorología, que facilitaba asesoramiento, a petición, a las reuniones consultivas del Tratado del Antártico; pero este grupo fue disuelto por el SCAR en 1986 y su misión en meteorología operativa ha sido asumida en gran manera por el grupo de la OMM.

Este último grupo desarrolla su labor según instrucciones precisas del Consejo Ejecutivo, y está compuesto por miembros designados por los representantes permanentes de los

* Oficina Meteorológica Australiana. El Dr. Stretton es el presidente del grupo de trabajo del Consejo Ejecutivo sobre meteorología antártica.