

## EL PROYECTO "EOLE" Y LOS MODELOS NUMERICOS DE LA CIRCULACION ATMOSFERICA

ENRIQUE LUIS SAMATAN

Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires

La finalidad del proyecto "EOLE" es estudiar la circulación general de la atmósfera en las latitudes medias del Hemisferio Sur. Se lanzarán unos 500 globos de nivel constante desde tres estaciones ubicadas en la Argentina los cuales medirán los parámetros que caracterizan el estado de la atmósfera, los que, a su vez, serán transmitidos a tierra por intermedio de un satélite. Este proyecto está dirigido por el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia y cuenta con la colaboración de los Estados Unidos para el lanzamiento del satélite y con la de la Comisión de Investigaciones Espaciales de la República Argentina en lo que se refiere a las estaciones de lanzamiento. Se tratará luego de introducir esta información en alguno de los modelos de la circulación general con el fin de conocer y explicar la dinámica de la atmósfera en el Hemisferio Sur. Este proyecto constituye un ensayo previo al Programa de Investigación Global de la Atmósfera (GARP) a realizarse dentro de algunos años en escala mundial.

The aim of the "EOLE" project is to study the general circulation of the atmosphere in middle latitudes of the Southern Hemisphere. About 500 hundred constant level balloons will be launched from three stations in Argentina; these will determine the characteristics of the atmosphere and will transmit them to the earth by means of a satellite. This project is supervised by the French Center of Space Research and has the collaboration of the United States for the launching of the satellite and of the Committee of Space Research of Argentina for the launching stations. The collected data will be introduced in a numerical model of the general circulation in order to know and explain the dynamics of the atmosphere in the Southern Hemisphere. This project is a preliminary experiment to the Global Atmospheric Research Programme (GARP) which will be executed on a planetary scale within few years.

Le but du projet "EOLE" est d'étudier la circulation générale de l'atmosphère aux latitudes moyennes de l'Hémisphère Sud. Quelque 500 ballons a niveau constant seront lancés depuis trois stations installées en Argentine; ils mesureront les paramètres qui caractérisent l'atmosphère et les transmettront au sol au moyen d'un satellite. Ce projet est dirigé par le Centre National d'Etudes Spatiales français avec la collaboration des Etats-Unis pour le lancement du satellite et de la Commission de Recherches Spatiales argentine en ce qui concerne les stations de lancement. Les données recueillies seront introduites dans un modèle numérique de la circulation générale afin de connaître et d'expliquer la dynamique de l'atmosphère dans l'Hémisphère Sud. Ce projet constitue un essai par rapport au Programme de Recherche Globale de l'Atmosphère (GARP) qui sera exécuté dans quelques années à l'échelle mondiale.

## 1. INTRODUCCION

En esta reunión de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, ha parecido oportuno hacer una referencia a un proyecto meteorológico de interés mundial, el proyecto "EOLE", que tendrá en esta ciudad de Mendoza, sede de la reunión, una de sus bases de operación.

El proyecto "EOLE" es una etapa en la evolución de la ciencia meteorológica tendiente a un mejor conocimiento del mecanismo que rige el movimiento de la atmósfera con miras, en la práctica, a elaborar un pronóstico del tiempo más seguro y más extendido.

La red de observaciones realizadas a partir de estaciones ubicadas en la superficie de la tierra sufre de un defecto muy serio: hay grandes extensiones, los océanos y también las regiones poco pobladas, que carecen de observaciones o las tienen con una densidad geográfica muy inferior a la que requiere la meteorología moderna. Aun el pronóstico del tiempo en lugares en que existe una buena red de observaciones, si se lo quiere extender a una o dos semanas, exige información de todo un hemisferio; un pronóstico a largo plazo o una fundamentación teórica de la climatología necesitan que se conozca el estado de la atmósfera en todo el planeta.

Con el fin de subsanar esta deficiencia, se ensayaron en los años 1957 a 1958 los radiosondeos horizontales llamados "transosondas". En lugar de explorar los distintos niveles de la atmósfera sobre un mismo punto geográfico, como lo hace el radiosonda clásico, el transosonda navega arrastrado por el viento manteniéndose a un nivel aproximadamente constante y transmitiendo información del lugar en que se encuentra. Fueron lanzados en aquellos años unos cien globos a través del Océano Pacífico a un nivel de 300 mb que equivalen a unos 4500 metros.

Algunos años más tarde, se comenzó a utilizar los satélites TIROS, NIMBUS y COSMOS, que miden la radiación de onda larga emitida por la atmósfera y fotografían las nubes.

En el año 1961, Lally propuso un mecanismo de observación, extensible a toda la atmósfera, en el que se utilizan globos construidos para volar a un nivel prefijado. Estos globos están provistos de un equipo transmisor cuya información es captada por uno o varios satélites lanzados al efecto. Esta propuesta dio lugar al proyecto GHOST, sigla que significa "Global Horizontal Sounding Technique". Con el fin de estudiar el comportamiento de este sistema, se lanzaron globos adaptados a distintos niveles desde Nueva Zelanda y desde la isla de la Ascensión, los cuales fueron seguidos por varias estaciones ubicadas en tierra.

## 2. EL PROYECTO EOLE

Ante las buenas perspectivas que ofrecía este procedimiento de observación, el Centro Nacional de Estudios Espaciales de Francia (CNES) proyectó en 1964 la ejecución de un estudio sistemático de la circulación de la atmósfera en latitudes medias del Hemisferio Sur y en latitudes tropicales, proyectos que se denominaron respectivamente: EOLE—A y EOLE—B. Para ello se utilizarían equipos de observación transportados por globos cuya información sería recogida por un satélite construido por el CNES y lanzado al espacio por los Estados Unidos en virtud de un convenio de colaboración científica entre los dos países.

En el proyecto EOLE—A, que es el que nos interesa, se eligió el Hemisferio Sur por ser el menos conocido, meteorológicamente hablando, y también por tener éste un régimen meteorológico más sencillo ya que es geográficamente más uniforme que el Hemisferio Norte. Dentro de ese hemisferio, se buscaron lugares de lanzamiento de los globos que estuvieran ubicados en distintas latitudes y dentro de un mismo país, este último requisito permitiría la centralización de toda la tarea de equipamiento y manutención de las estaciones: fue así como se eligió a la Argentina para ese fin. En un principio se proyectaron cuatro estaciones escalonadas desde el extremo norte al extremo sur del país, pero, posteriormente, se suprimió la estación que se pensaba instalar en la provincia de Salta o en la de Jujuy. La red quedó fijada en tres estaciones que son: Mendoza, Neuquén y el Lago Fagnano. La colaboración de nuestro país en este proyecto, la presta la Comisión Nacional de Estudios Espaciales.

Los globos están constituidos por un envoltorio de un material plástico, denominado Mylar, transparente y de un módulo de elasticidad elevado lo cual lo hace prácticamente inextensible en las condiciones de la presente experiencia. Esta característica les asegura un volumen constante y, por consiguiente, el equilibrio en un nivel en que la densidad del aire es constante e igual a la densidad media del globo con todo su equipo. Por razones de seguridad para el caso hipotético de un choque con un avión, el gas utilizado es helio y no hidrógeno.

Un aspecto importante para el éxito del proyecto es la duración del globo. Un primer inconveniente puede ser la presencia de pequeños orificios en el envoltorio que dejen escapar el gas: pueden existir en el material de fabricación o provenir del manipuleo posterior del globo. Se elimina la primera causa empleando una doble capa de Mylar pegada una a otra; para evitar la segunda causa hay que adoptar precauciones en el plegado, transporte y utilización del globo en la estación de lanzamiento.

De acuerdo a experiencias realizadas por el Profesor Morel, director científico del proyecto EOLE, en Nueva Caledonia y Australia, se han detectado otras causas que limitan la vida útil del globo. Si el nivel es bajo, el globo puede ser destruido por choques contra la superficie de la tierra. En niveles algo más altos existe una gran probabilidad de encontrar nubes con agua en sobrefusión que depositen hielo sobre el globo; pero aun los cirrus, formados por cristales de hielo, son también un peligro. Las experiencias han mostrado que los cristales se depositan sobre el globo por gravitación propia como si fuera una nevada: el aumento de peso consiguiente provoca un descenso pronunciado de nivel. En cambio, los globos que se estacionan en 200 mb, es decir a unos 12000 metros o a mayor altura, han demostrado tener una vida muy larga. En el proyecto EOLE el nivel elegido fue en un

principio de 300 mb pero luego se lo llevó a 200 mb. Es ésta una presión media ya que, en realidad, se trata de un nivel de densidad constante del aire: las fluctuaciones alrededor de una presión determinada tienen un desvío cuadrático medio de unos 5 mb.

Se ha ideado en los Estados Unidos un dispositivo que, a mi conocimiento, no ha sido aún ensayado, que permite "salvar" los globos que entren en una zona peligrosa haciéndolos ascender a niveles más altos. Consiste en colocar una membrana interna que separa al globo del volumen constante en dos regiones: una llena de helio y la otra con aire. La cantidad de aire puede hacerse variar extrayendo aire del interior o impulsando aire del exterior con una bomba alimentada por un generador solar. De esta manera se puede modificar el volumen relativo del helio y del aire y, en consecuencia, hacer variar la densidad media del globo.

La elección de las estaciones en tierra se ha hecho teniendo en consideración los riesgos que puede sufrir el globo en el momento de su lanzamiento y durante su ascenso. Por un lado, para que el globo no sufra daños, la velocidad del viento no debe ser demasiado elevada: se puede admitir hasta un máximo de 10 m/s. Por otro lado, en su ascenso, el globo no debe atravesar nubes que puedan depositar hielo sobre él. Por tales motivos se han buscado lugares con poca frecuencia de vientos fuertes y con poca nubosidad. La elección de los emplazamientos fue bastante simple al norte del paralelo 40° S pero en la Patagonia los vientos fuertes son casi constantes. La misión enviada por el CNES optó por instalar la estación más austral en el interior de la Tierra del Fuego, al borde del Lago Fagnano. Las localidades importantes de Río Grande y Ushuaia fueron descartadas: la primera por ser muy fuerte el viento en ella y la segunda por tener demasiada nubosidad.

Cada globo está equipado con una serie de elementos que cuelgan uno a continuación del otro y que son, siguiendo el orden de arriba hacia abajo, los siguientes:

Una cápsula barométrica para medir la sobrepresión del gas contenido en el globo y un dispositivo para poder destruir a éste.

Un generador solar y un acumulador para poder operar de día y de noche.

Elementos sensibles para medir la presión y la temperatura del aire exterior.

Un equipo electrónico para la comunicación radial con el satélite.

La antena y un reflector de radar.

Este conjunto pesa unos 3 kg. y se extiende sobre una longitud total, incluyendo la antena, de 10 a 12 m, longitud necesaria para asegurar que, en caso de choque con un avión, todo el equipo se desintegraría sin causar perjuicios; también es conveniente que los elementos sensibles estén alejados de un posible efecto perturbador del globo. Para sustentar esta carga útil a nivel de 200 mb, el globo debe tener un diámetro de 4 m.

El satélite que captará las informaciones de los globos del proyecto EOLE ha sido construido en las instalaciones del CNES en Brétigny a unos 30 km al sur de París. Se proyecta lanzarlo en agosto del corriente año desde Estados Unidos y colocarlo en una órbita circular inclinada con respecto al ecuador de manera a abarcar la mayor parte de la superficie de la tierra: desde las latitudes de 70° N hasta 70° S. Se trata de un pequeño satélite equipado de manera a poder interrogar individualmente un máximo de 500 globos, recibir de ellos, y conservarlas en su memoria, la presión y la temperatura captadas por los elementos sensibles y re-

gistrar la información necesaria para determinar la posición del globo.

El satélite interroga sucesivamente los distintos globos mediante una señal característica para cada globo. Los globos que se encuentran dentro del alcance del satélite, que es de unos 3000 km, contestan mediante una emisión que permite determinar la distancia del globo al satélite por el tiempo de propagación y el coseno del ángulo que forma la dirección en que se encuentra el globo con la dirección del movimiento del satélite; se deduce este último valor de la variación de la frecuencia aparente debida al efecto Doppler suponiendo que el globo está inmóvil: la velocidad de este último es muy pequeña comparada con la del satélite. Las distintas posiciones de un mismo globo determinadas en órbitas sucesivas del satélite, viene a ser en intervalos de unos 110 minutos, proporcionan una determinación muy buena de la dirección y la velocidad del viento medio en ese intervalo: el error cuadrático medio es de 0,5 m/s. El viento obtenido de esta manera es más significativo que el observado por los métodos clásicos porque corresponde a un desplazamiento de las masas de aire del orden de los 100 km, bastante mayor que con los otros métodos. La información acumulada en la memoria del satélite es transmitida a cinco estaciones de recepción de datos ubicadas en Brétigny y en Africa. Como el plano de la órbita del satélite gira con respecto a la tierra dando una vuelta alrededor del eje de los polos en 24 horas, un mismo globo será detectado en dos oportunidades durante el día, sin tener en cuenta la localización suplementaria desde órbitas sucesivas de que se ha hecho mención.

El profesor Morel, en su proyecto inicial, ha justificado el número de globos al exigir que hubiese un globo en cada cuadrado de  $1000 \times 1000 \text{ km}^2$ , lo cual, considerando la superficie del hemisferio, conduce a un número de 250 globos. Pero, teniendo en cuenta una distribución geográfica aleatoria de los globos, se debe prever un número doble: 500, para evitar que regiones demasiado grandes se vean desprovistas de datos. Sin embargo, Hale Mintz, en California, ha hecho una previsión de la experiencia hasta 130 días más tarde: ha utilizado para ello un modelo numérico de la circulación general que le es propio. Ha resultado, por un lado, que ningún globo se desplaza más al norte que los  $30^\circ \text{ S}$ , y por otro, que los globos tienden a concentrarse en aglomeraciones ubicadas con preferencia a la latitud de  $45^\circ$  y en las regiones polares. Al quedar vacías las regiones tropicales, la densidad de globos en latitudes medias y altas es mayor que el término medio calculado para todo el hemisferio; pero al existir acumulación de globos en ciertos puntos, como compensación, se producirán claros importantes. Este estudio, y también la experiencia previa adquirida con el proyecto GHOST, muestra que los globos dan una vuelta alrededor de la tierra en 10 ó 12 días.

El máximo de 500 globos, ó 512, impuesto por la capacidad del satélite, se refiere a los globos que están en operación simultáneamente. Si uno de ellos se vuelve inútil, ya sea porque se haya desinflado o haya descendido a otro nivel, ya sea porque alguno de sus instrumentos no funcione debidamente o porque se haya desviado hacia la zona tropical, es posible y es conveniente para no perder información, reemplazarlo por otro con la misma característica; en tal caso hay que eliminar al primero para no tener dos respuestas a una misma interrogación. Es por este motivo que el globo lleva un dispositivo capaz de destruirlo mediante una orden dada desde tierra.

A medida que se vaya recibiendo en las estaciones de tierra la información recogida por el satélite, esta información será concentrada en Brétigny. Allí, la pri-

mera operación que se ha de efectuar es determinar la posición de cada globo. Es un cálculo bastante complejo que comprende la determinación de la posición y la velocidad del satélite en el momento de la observación, la distancia y la dirección de su movimiento y, finalmente, el cálculo de las coordenadas geográficas del globo. El cálculo se hará en tiempo real, es decir a medida que se vaya recibiendo la información. Se podrá preparar así un registro objetivo de las observaciones; día y hora, posición, presión, temperatura y viento, con lo cual se tendrá un panorama de la circulación general en latitudes medias del Hemisferio Sur. Este resultado constituye uno de los objetivos principales del proyecto.

### 3. LOS MODELOS NUMERICOS DE LA CIRCULACION ATMOSFERICA

Cabe preguntarse ahora qué se hará con el cúmulo de datos obtenido. Para contestar esta pregunta, hay que hacer una referencia somera a los modelos numéricos de la dinámica atmosférica.

A mediados del siglo pasado, Helmholtz había elaborado una teoría del viento y de las olas apoyándose en las ecuaciones del movimiento de los fluidos. A principios de este siglo, la escuela noruega de meteorología, encabezada por V. Bjerknes, hizo el primer ensayo de aplicación sistemática de las ecuaciones de la dinámica al estudio de los movimientos de la atmósfera al buscar soluciones de las ecuaciones aproximadas linealmente. Fue el inglés Richardson, en 1922, el primero que trató de hacer un pronóstico del tiempo resolviendo numéricamente las ecuaciones previamente transformadas en ecuaciones en diferencias finitas. El resultado fue un fracaso y, en aquel momento, no se trató de averiguar qué errores se habían cometido ya que, en razón del tiempo que demandaban los cálculos el método era inaplicable al pronóstico del tiempo. En 1939, Rossby, mediante una drástica simplificación de las ecuaciones, halló soluciones en forma de ondas de la corriente zonal que son gobernadas por la variación con la latitud de la componente vertical del vector rotación de la tierra, es decir el parámetro de Coriolis. Estas ondas, ahora llamadas ondas de Rossby, son de especial importancia en la circulación general de la atmósfera en latitudes medias. La simplificación introducida consiste en suponer que la atmósfera es barotrópica, es decir que, a igual presión, la densidad del aire y, en consecuencia, la temperatura es la misma. Esta condición se cumple bastante bien por encima del nivel de 500 mb, unos 6000 m de altura, donde las curvas de nivel de la superficie isobárica coinciden aproximadamente con las isotermas, pero no se cumple a niveles inferiores. Sin embargo, para los niveles mencionados, los resultados de esta simplificación son satisfactorios. Cuando no se supone que exista barotropía, es decir en el caso general, se dice que la atmósfera es baroclínica.

Ya de tiempo atrás, se sabía que los gradientes vertical y horizontal de la presión del aire están equilibrados aproximadamente: el primero por la fuerza de la gravedad y el segundo por la componente horizontal de la fuerza de Coriolis: se dice que la atmósfera está en equilibrio cuasiestático y cuasigeostrófico respectivamente. En 1948, Charney, por la consideración del orden de magnitud de los parámetros físicos que definen una perturbación zonal, mostró que, si se introducían en el planteo inicial de las ecuaciones, las hipótesis cuasiestática y cuasigeostrófica, quedaban eliminadas de la solución, las ondas acústicas y las ondas de gravedad que carecen de interés meteorológico las primeras y son de importancia se-

cundaria las últimas. El decir "cuasi" significa que no se aplica la hipótesis hasta sus últimas consecuencias: así, en la hipótesis cuasiestática, se admite que puedan existir velocidades y aceleraciones verticales pero se supone que éstas no perturban el equilibrio hidrostático por ser su efecto de un orden de magnitud inferior al de las otras fuerzas verticales en juego; análogamente, en la hipótesis cuasigeostrófica, se admite que la divergencia horizontal del viento pueda no ser igual a cero, contrariamente a lo que resultaría de aplicar rigurosamente la relación geostrófica. Si a estas dos hipótesis, se agrega la hipótesis barotrópica, es fácil mostrar que el campo de velocidades horizontales es independiente de la altura. Basta estudiar el comportamiento de la atmósfera en un nivel para conocer todos los demás niveles.

Hay otro motivo práctico que aconseja eliminar las ondas acústicas y las de gravedad. Cuando se quiere resolver la ecuación de las ondas por medio de diferencias finitas, existe una limitación en la elección de la distancia entre puntos consecutivos  $\Delta x$ : y el intervalo de tiempo  $\Delta t$ : es la condición de Courant-Friedrichs que dice que el valor de  $\Delta t$  debe ser menor que el tiempo que demora la onda más rápida en pasar de un punto del reticulado al siguiente. En caso contrario, los valores numéricos dados por el cálculo para valores sucesivos del tiempo oscilan con una amplitud cada vez mayor dando lugar a la llamada inestabilidad computacional. Las ecuaciones fundamentales contienen como soluciones las ondas acústicas, de gravedad, de Rossby y las de tipo mixto. Si se adopta una distancia  $\Delta x$  de 300 km, los incrementos  $\Delta t$  no deben pasar de 20 min para las ondas acústicas, de 35 min para las de gravedad y de 2 horas para las de Rossby. Las velocidades de propagación son respectivamente de 1130 km/h, 480 km/h y 160 km/h; las dos últimas son órdenes de magnitud. Los intervalos de tiempo indicados son valores máximos; en la práctica hay que tomar valores mucho menores. Se comprende así que el número de pasos necesarios para obtener un pronóstico a un plazo dado, es mucho mayor cuando existen ondas acústicas y de gravedad que en el caso en que éstas hayan sido previamente eliminadas.

Sin embargo, actualmente, en los centros meteorológicos que poseen calculadoras de gran velocidad y gran capacidad de memoria, se tiende a utilizar las ecuaciones "primitivas", vale decir que no han sido modificadas, o filtradas, para eliminar las ondas de gravedad; la hipótesis cuasiestática es mantenida en todos los casos. Las ecuaciones primitivas tienen la ventaja de ser más reales y de prestarse a un esquema de cálculo más simple ya que la derivada con respecto al tiempo de cada uno de los parámetros que definen el estado de la atmósfera; componentes de la velocidad horizontal, altura de la superficie isobárica, temperatura, están dadas explícitamente. En las ecuaciones "filtradas" se aplica la ecuación de la conservación de la vorticidad, componente vertical del rotor del viento, que conduce a una ecuación implícita en derivadas parciales de segundo orden.

Además de las aproximaciones hechas en el sistema de ecuaciones, hay que considerar los factores físicos que inciden en el estado de la atmósfera: el relieve del suelo, la turbulencia que produce fuerzas de fricción y difusión del calor, la nubosidad que incide sobre la radiación solar recibida por la superficie de la tierra, el aporte de calor desde el suelo o desde la superficie del océano, el calor absorbido por la evaporación o cedido por la condensación y, en general, todos los fenómenos de una escala menor que las que describen las ecuaciones. Estos deben ser estimados mediante hipótesis simplificadoras que los hacen depender de los parámetros

que definen el estado de la atmósfera: velocidad del viento, presión, temperatura o densidad. También hay que fijar cual es la extensión geográfica que abarcarán los estudios, el tipo de proyección cartográfica utilizado, la densidad de los puntos del reticulado horizontal, el número de niveles sobre la vertical, la forma particular de representar los operadores diferenciales por funciones lineales de valores discretos con el fin de emplear los métodos de resolución por diferencias finitas. Todas estas opciones constituyen un modelo matemático o numérico de la atmósfera. Hasta el presente se han elaborado un gran número de modelos, más o menos complicados algunos de ellos utilizados regularmente en el pronóstico diario del tiempo por varios servicios meteorológicos, otros en experimentación para el mismo fin y otros destinados a investigaciones.

En la elaboración de los datos del proyecto EOLE, se utilizarán, según las informaciones que posee el autor, una proyección estereográfica polar. Sobre ella se trazará un cuadrículado de 700 km de longitud de malla. Existe una diferencia de escala entre el polo y las latitudes bajas, pero ésta no es muy importante mientras el modelo se limite a las latitudes altas y medias de un solo hemisferio. La situación cambia cuando se trata de representar toda la tierra: una longitud de malla constante conduce a una definición exageradamente detallada de las variables meteorológicas en la vecindad de algunos puntos: por ejemplo cerca de los polos en la proyección de Mercator. Se han propuesto reticulados que compensen las diferencias de escala o, también, una red que prescindiera de una proyección particular y en la cual los nudos se distribuyan uniformemente sobre la superficie de la tierra: por ejemplo una red hexagonal dentro de las caras de un icosaedro y 12 mallas pentagonales en correspondencia con cada uno de los vértices.

Los datos obtenidos con la interrogación de los globos corresponden a lugares y tiempos distribuidos al azar. Para hacerlos entrar en un esquema de cálculo en diferencias finitas, es preciso, antes que nada, reducirlos a los nudos del reticulado y a ciertos tiempos prefijados por interpolación.

Las ecuaciones en diferencias proporcionan soluciones aproximadas que se van apartando paulatinamente de las soluciones exactas a medida que pasa el tiempo. Cuando se pretende hacer un pronóstico a corto plazo, dos o tres días, este inconveniente carece de importancia. Pero cuando se integran las ecuaciones en lapsos de un mes o varios meses, como es el caso en el proyecto EOLE, se puede llegar a situaciones calculadas enteramente absurdas. Para evitarlo, se busca la manera de transformar los operadores diferenciales en combinaciones de valores que correspondan a puntos del reticulado en forma tal que la solución de la ecuación en diferencias finitas conserve ciertas características de la solución exacta. Por lo general, se exige que en la solución aproximada se conserven la masa, la energía y la vorticidad totales. En muchos modelos, ésto se consigue reduciendo las distintas variables a puntos de la malla que pueden no ser los mismos para todas ellas: centro de la malla, vértices, puntos medios de los lados. En el Laboratorio de Meteorología Dinámica de Meudon, en París, dirigido por el Profesor Morel, se están haciendo estudios sobre este punto, incluyendo el caso en que las mallas no sean cuadradas.

Sin embargo, a pesar de todas las precauciones que se tomen al armar un esquema de cálculo numérico, éste no se lo puede considerar satisfactorio mientras no se lo haya ensayado. No es necesario para ello contar con datos reales: se pueden adoptar valores iniciales arbitrarios siempre que sean razonables y luego exami-

nar si los resultados son también razonables.

Los globos del proyecto EOLE están todos en un mismo nivel, por lo cual, si no se cuenta con más información, no se podrán utilizar modelos baroclínicos. Aunque no parece ser el fin primordial del proyecto actual, se podrán completar los datos obtenidos con los que proporcionen las medidas de radiación hechas desde satélites. La radiación emitida por la atmósfera hacia el espacio exterior en las distintas frecuencias depende de la temperatura de la atmósfera en sus distintos niveles. Se ha conseguido resolver matemáticamente el siguiente problema: calcular el gradiente vertical de la temperatura del aire en los distintos niveles conociendo la radiación emitida en algunos intervalos de frecuencias. Pero sólo se conoce el gradiente: se necesita una superficie de referencia para que esté determinada la temperatura. En el Hemisferio Norte, el nivel de referencia puede ser la superficie de la tierra que está cubierta por una buena red de estaciones de observación, pero en el Hemisferio Sur, habrá que fijar una superficie de referencia por algún procedimiento diferente, por ejemplo con globos que naveguen a un nivel constante como ocurre en el proyecto EOLE. Se ha propuesto otra forma de explorar los niveles inferiores a aquél en que se encuentra el globo: se trata de dejar caer desde el globo de nivel constante, pequeños globos equipados con un radiosonda, llamados en inglés "dropsondes", con poder ascensional negativo, que efectúan un sondeo vertical de la atmósfera de arriba hacia abajo.

En el presente proyecto se aplicará un modelo barotrópico partiendo de las ecuaciones primitivas, es decir, sin introducir la hipótesis cuasigeostrofica. Si el modelo fuera perfecto, sería posible conocer el estado futuro de la atmósfera en todo tiempo partiendo de un estado inicial. En la realidad, irán apareciendo discrepancias con el correr del tiempo que se harán desaparecer reemplazando de tanto en tanto los valores calculados por los valores observados. Es lo que se hace normalmente en el pronóstico numérico diario. Cuando se trata de la red sinóptica de estaciones meteorológicas, la sustitución es simultánea en todo el reticulado pero, en el caso de los globos, ésta sólo se hace en algunos puntos; se produce así una falta de coherencia con los demás valores que se traduce en la aparición de ondas numéricas sin realidad física que es preciso eliminar.

De acuerdo con el informe inicial en el que el profesor Morel propone la ejecución del proyecto EOLE, el objetivo principal, aparte del puramente descriptivo, es demostrar que se puede rectificar la solución introduciendo únicamente los valores observados del viento. Desde este punto de vista, los valores de la presión y de la temperatura no son necesarios; sí, lo serían, si se quisiera extender los cálculos a varios niveles de la atmósfera utilizando otras fuentes de información. Se debe agregar que el valor de la presión sin conocer la altura o el perfil de temperatura no es utilizable en los cálculos. En proyectos futuros se ha previsto equipar los globos con un radioaltímetro.

Un beneficio importante que se podrá extraer de la experiencia es mejorar el modelo elegido. Al aparecer divergencias entre el cálculo y la observación, se podrán modificar algunas de las simplificaciones, de las hipótesis o de los valores empíricos adoptados en el modelo con el fin de reducir las discrepancias.

Finalmente, el proyecto servirá para recoger experiencia sobre el sistema de observación con globos de nivel constante, experiencia que será valiosa en el programa de investigación global de la atmósfera GARP, sigla de Global Atmospheric Research Programme, que se llevará a cabo dentro de algunos años y en el cual se tratará de emplear simultáneamente todos los medios disponibles para explorar

la atmósfera.

Para terminar, se destaca que el proyecto EOLE ofrece a la meteorología argentina una oportunidad para colaborar en un proyecto de alcance internacional y para poder participar en el futuro más activamente en proyectos de mayor envergadura como el GARP. Con este propósito están actualmente en París tres jóvenes meteorólogos, los licenciados Hordij, Ciappesoni y Necco trabajando dentro del grupo dirigido por el profesor Morel.

## BIBLIOGRAFIA

- CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES (CNES), 1970:** "Les ballons du CNES font 10 fois le tour de la terre". *COSPAR information Bulletin - Nº 53, p. 56.*
- CENTRE NATIONAL D'ETUDES SPATIALES, 1970:** "Report de l'expérience EOLE". *COSPAR Information Bulletin, Nº 54, p.17.*
- COMMITTEE ON ATMOSPHERIC SCIENCES (CAS) & COMMITTEE ON SPACE RESEARCH (COSPAR), 1967:** "Numerical simulation of the general circulation". *Report of the Study Conference held at Stockholm, 28 June—11 July 1967 on the Global Atmospheric Research Programme (GARP), p.6.*
- COSPAR WORKING GROUP VI, 1967:** "EOLE System. Doppler Shift Determination". *COSPAR Transactions, Nº 3, p. 85.*
- GRAVILIN, B.L., 1967:** "Numerical experiments on the general circulation of the atmosphere". *Report of the Study Conference held at Stockholm, 28 June—11 July 1967 on the Global Atmospheric Research Programme (GARP), Appendix I.*
- MESINGER, F. & MINTZ, Y., 1970:** "Numerical simulation of the 1970-71 EOLE experiment. Numerical Simulation of Weather and Climate". *Technical Report Nº 4, Department of Meteorology, University of California, Los Angeles.*
- MOREL, P., 1966:** "Définition scientifique du projet de satellite FR-2 (Projet EOLE)". *Service d'Aéronomie du Centre National de la Recherche Scientifique, Nº 175, París.*
- MOREL, P., FOURRIER, J. & SITBON, P., 1968:** "The occurrence of icing on constant level balloons". *Service d'Aéronomie du Centre National de la Recherche Scientifique, Nº 175, París.*
- MOREL, P., FOURRIER, J., GREIF, M. & SITBON, P., 1968:** "Campagne EOLE Pacifique IV (1<sup>ère</sup> partie)". *Service d'Aéronomie du Centre National de la Recherche Scientifique, Nº 1179, París.*