

*H.T.*— ¿Está usted contento con los progresos realizados en meteorología agrícola en estos últimos años? ¿Cómo ve usted su desarrollo futuro?

*P.M.A.B.*— Gracias a la labor de la OMM (en particular al celo de la CMAg) y a la cooperación de la FAO, en la mayoría de los países se da mucho más valor a la función que la agrometeorología puede desempeñar en el desarrollo de la agricultura. Me complace decir que este reconocimiento es especialmente patente en los países del Tercer Mundo, donde lo que está por hacer es sumamente arduo, pero la recompensa enorme. La mayor parte de los servicios meteorológicos nacionales han creado una sección de agrometeorología. Naturalmente, esto no es más que un primer paso. Si se quieren hacer progresos auténticos, han de recordarse ciertas premisas fundamentales, a saber: en primer lugar, un servicio tiene valor únicamente si se utiliza; ha de haber estrechos contactos de trabajo a escala nacional entre el meteorólogo y los diversos especialistas en agricultura y asesores de los que en ella trabajan, así como con los órganos que se ocupan de esa actividad, también ha de haber buenas comunicaciones entre el equipo con el que trabaja el meteorólogo y el especialista en agricultura que trabaja sobre el terreno. El asesoramiento ha de ser de carácter práctico para que el agricultor vea con claridad el modo de utilizarlo. El objetivo debería consistir en hacer que el servicio agrometeorológico fuese tan eficaz operativamente como lo es hoy en día la meteorología aeronáutica. En segundo lugar, la meteorología agrícola es el punto de interconexión entre dos ciencias muy complejas. Su práctica requiere que a ella se dediquen los mejores talentos; no ha de creerse que se trata de una esfera a la que pueden dedicarse los miembros menos dotados del personal. En tercer lugar, los servicios meteorológicos para la agricultura abarcan no sólo la información climática, sino también el suministro de datos y predicciones en tiempo real, por lo cual una sección agrometeorológica encerrada dentro de la división climatológica de un servicio meteorológico no puede alcanzar un desarrollo completo saludable. Estos preceptos y otros análogos son cada vez más aceptados y tengo la convicción de que a medida que nos acercamos al tercer milenio, la utilidad de la meteorología agrícola irá en aumento y contribuirá a resolver cualquier tipo de problema de la agricultura.

*H.T.*— *Dr. Bourke*, le agradezco sinceramente esta concisa descripción de la función de la meteorología en la producción de alimentos.

## LOS MONZONES

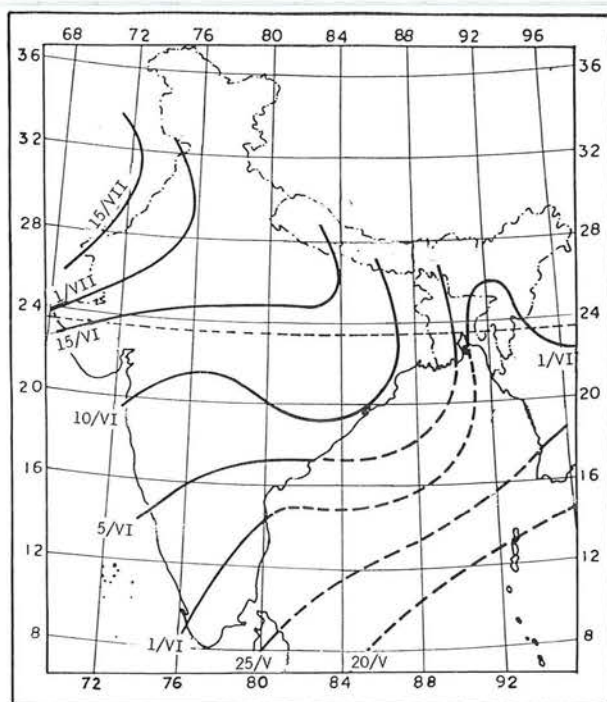
*Por P.K. DAS\**

Los diferentes tiempos de respuesta de la tierra y de los océanos a la radiación solar que llega originan los gradientes térmicos, que dan lugar a un sistema de vientos que soplan del mar hacia la tierra en verano y de la tierra hacia el mar en invierno. Estos regímenes alternantes, que afectan a muchos países tropicales, y que son especialmente pronunciados en las regiones del Océano Índico y del Mar de Arabia, se conocen como monzones, término que proviene de una palabra árabe que significa "estación". Las circulaciones monzónicas son importantes para muchos países de Asia y África, debido a su capacidad de producir lluvias estacionales, de las que dependen en gran manera la

\*Universidad de Nairobi. El presente artículo es un resumen de la conferencia OMI pronunciada por el profesor Das en el Noveno Congreso. La versión completa se halla en fase de publicación por la OMM.

agricultura y la renovación de los recursos hídricos. Es una realidad que la economía nacional de muchos países se halla a merced de la llegada oportuna de las lluvias y su subsiguiente distribución.

La intensidad y extensión de los monzones vienen determinadas por varios factores: la influencia de la orografía, la convección de aire húmedo, y el calor latente desprendido por la conversión del vapor de agua en lluvia son algunas de las características importantes que influyen en la trayectoria de los vientos monzónicos.



Las denominaciones empleadas en este mapa y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, de parte de la Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial, juicio alguno sobre la condición jurídica de ninguno de los países o territorios, ciudades o zonas citados o de sus autoridades, ni respecto de la delimitación de sus fronteras o límites.

Figura 1— Fechas normales de comienzo del monzón de verano en la India

#### Características a escala planetaria

Los monzones mundiales están dominados por el volteo a gran escala en planos zonal y meridiano. De esta manera, la energía potencial disponible se convierte en energía cinética. Al volteo en un plano meridiano se le llama célula de Hadley, mientras que el que tiene lugar en un plano zonal se conoce como célula de Walker. Las circulaciones de Hadley y de Walker se mantienen debido a una situación de calentamiento diabático que muestra una alineación característica. Como respuesta al movimiento del Sol, se produce una traslación del norte al sur y viceversa, de las fuentes y sumideros diabáticos.

Las ramas ascendentes de estas circulaciones están localizadas sobre las fuentes de calor; en el caso del monzón de verano del hemisferio norte, la meseta tibetana actúa como una de las principales fuentes de calor, y, en cambio, el monzón de invierno está dominado por el calor latente desprendido por la convección de aire húmedo sobre las regiones oceánicas que rodean a Indonesia y a Malasia. Las ramas descendentes de la circulación de Hadley están localizadas en las proximidades de los grandes anticiclones;

en el monzón de verano, esto ocurre cerca de la zona de alta presión de las Mascareñas, al sur del ecuador; en el monzón de invierno, se sitúan sobre Siberia. También se observan las circulaciones de Hadley y de Walker sobre África occidental. La rama ascendente de la circulación de Hadley está sobre la región saheliana, y la descendente toma la forma de corriente del sudoeste que sale del África occidental.

Una característica de interés de la circulación de Walker asociada con el monzón asiático de verano es su rama descendente sobre las regiones semiáridas del noroeste de la India. Esta zona recibe un total de radiación solar mayor del normal, a pesar de lo cual es un sumidero de radiación, a causa del alto albedo del suelo. Para compensar el enfriamiento debido al déficit de radiación, sobre esta región hay un movimiento de subsidencia y calentamiento adiabático —las observaciones en los desiertos de Arabia Saudita confirman la subsidencia a través de una parte importante de la troposfera.

Un rasgo de la atmósfera que responde notablemente al movimiento estacional norte-sur del Sol es la zona de convergencia intertropical (ZCIT), que es la región de convergencia entre los alisios de los hemisferios norte y sur. Durante el verano del hemisferio norte, la ZCIT se traslada al norte del ecuador, pero aún no se sabe con certeza si eventualmente pierde su identidad o se funde con una vaguada extensa en la troposfera inferior.

Los monzones de verano e invierno están gobernados por grandes circulaciones anticiclónicas en la troposfera superior, con una corriente en chorro del oeste en el norte y del este en el sur. Justamente antes del comienzo del monzón de verano aparece, como rasgo característico, un movimiento pronunciado hacia el norte de la corriente en chorro del oeste.

#### *Características a escala regional*

Las características regionales de los monzones están relacionadas con los volteos en las células de Hadley y de Walker, aunque todavía no se comprende bien el mecanismo de acoplamiento. Las variaciones de período corto en las lluvias dentro de la estación monzónica son producidas por perturbaciones a escala sinóptica, cuyas dimensiones son pequeñas en comparación con las de las circulaciones de Hadley y de Walker. Una característica regional importante es la sorprendente regularidad de la llegada de los monzones. Por ejemplo, la desviación típica de la fecha de comienzo de las lluvias monzónicas del verano, en el extremo sur de la India, es del orden de solamente una semana. Un descubrimiento importante obtenido por el Experimento sobre los monzones (MONEX) de 1978/79 fue el súbito aumento de la energía cinética de los vientos monzónicos un poco antes de la fecha de la irrupción. Este aumento se observó durante unos pocos días, y hay diferentes opiniones sobre el mecanismo responsable de esta conversión sustancial de la energía potencial en cinética en la época de comienzo del monzón. Se ha sugerido como un mecanismo posible la inestabilidad barotrópica que provoca la formación de un vórtice inicial, pero no hay unanimidad en cuanto a la existencia de dicho vórtice.

Entre las demás características regionales, las que han recibido mayor atención son la formación de una vaguada monzónica a poca altura, los ciclones de la troposfera media, y la propagación hacia el oeste de las depresiones monzónicas y de las ondas ecuatoriales, sistemas todos ellos que parecen estar presentes en regiones de cizalladura meridiana y vertical. De acuerdo con esto, la investigación actual tiende a centrarse en la inestabilidad barotrópica y baroclínica combinadas. Pero también existen indicios de

que algunos de los sistemas son los residuos de perturbaciones que se trasladan hacia el oeste y que están localizadas lejos de las zonas afectadas por el monzón.

### Los procesos del monzón

Los estudios sobre la inestabilidad se han concentrado en la detección de puntos de inflexión en perfiles de las vorticidades absoluta y potencial. En el mejor de los casos, ésta es sólo una condición necesaria para la inestabilidad, condición que se cumple en muchas partes del régimen monzónico. Una segunda condición necesaria, que aún no ha sido comprobada con gran detalle, es la existencia de una correlación positiva entre la circulación media y el gradiente meridional de la vorticidad media. Es difícil, por lo tanto, evaluar la importancia relativa de la inestabilidad barotrópica y de la baroclínica para las circulaciones monzónicas. Las conversiones de energía sugieren que, en algunas ocasiones, la que predomina es la inestabilidad barotrópica.

Se ha tratado de averiguar hasta qué punto un mecanismo de inestabilidad barotrópica-baroclínica en combinación está modulado por (a) la convección húmeda y (b) el rozamiento en la capa límite, mediante la inestabilidad condicional de la segunda clase. Los esquemas de parametrización para la inclusión de estos efectos en un análisis de inestabilidad indican el aumento de la energía potencial disponible, producido por el

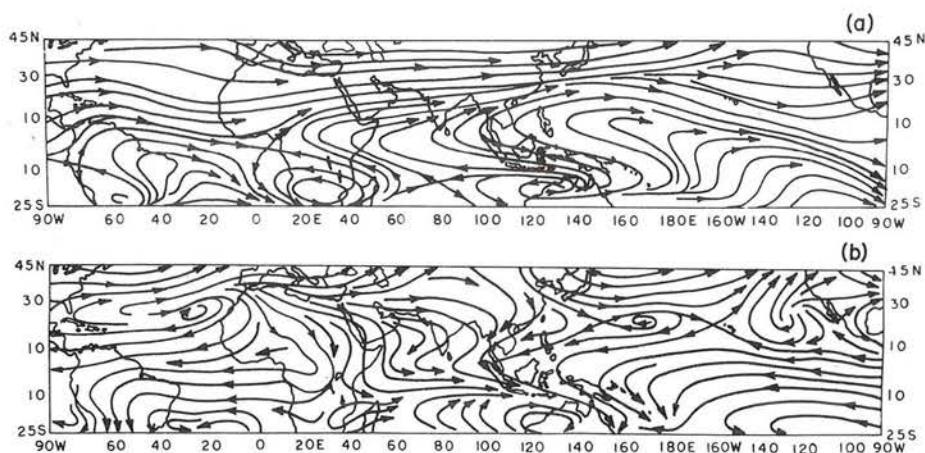


Figura 2 – Campo de vientos medios en enero: (a) a 200 hPa, y (b) a 850 hPa

desprendimiento del calor latente, pero los resultados son, sorprendentemente, no muy distintos entre sí. Por lo que respecta a la escala preferida del movimiento, hay divergencia de opiniones, lo que es debido, en gran manera, a que la mayoría de los estudios teóricos están basados en aproximaciones lineales de las ecuaciones a aplicar.

Se han utilizado modelos de la circulación general para la simulación del crecimiento de las circulaciones monzónicas pero, desafortunadamente, no se ha tenido mucho éxito en la descripción de los detalles más finos, especialmente en la distribución de la presión y de la lluvia (probablemente, esto es debido a que las resoluciones horizontal y vertical no son las adecuadas). A pesar de la falta de éxito en este aspecto, los modelos de la circulación general resultan útiles para las pruebas de sensibilidad. Está demostrado que las fluctuaciones de la temperatura de la superficie del mar, el albedo del suelo, la hidrología del terreno y la capa de nieve probablemente influyen sobre la intensi-

dad de los monzones. Las anomalías en la temperatura de la superficie del mar en el Pacífico central indican la existencia de teleconexiones entre la lluvia monzónica por un lado y acontecimientos en el Pacífico por el otro, pero existen discrepancias sobre las pruebas estadísticas adecuadas para establecer el significado de un cambio producido por las fluctuaciones en las condiciones de contorno. La comparación entre las integraciones a largo plazo, incluyendo las anomalías con las que sirven de referencia, no ha suministrado mucha información sobre cómo se efectúan los cambios generados en los modelos. La existencia de las teleconexiones es, sin embargo, cada vez más evidente. Es oportuno recordar aquí que, hace muchos años, Sir Gilbert Walker postuló la existencia en la atmósfera de una "oscilación del sur", que tendía a enlazar acontecimientos en el Pacífico con la lluvia del monzón de verano, mediante un volteo zonal a gran escala.

### *Estudios sobre los monzones del Océano Indico*

Las pruebas de sensibilidad realizadas con la barrera del Himalaya y sin ella sugieren que, si estas montañas no estuvieran allí, no existiría prácticamente el brusco desplazamiento hacia el norte del chorro del oeste en la troposfera superior. Estas pruebas también indican que sin la gran fuente de calor en altura que constituye la meseta tibetana, la circulación de Hadley del monzón de verano sería mucho más débil. El flujo vertical de calor sensible sería entonces el único propulsor de la célula de Hadley y,

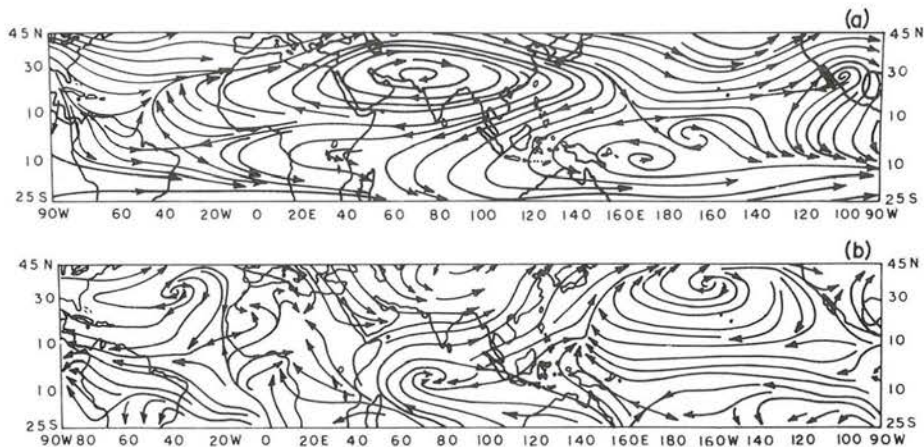


Figura 3 – Campo de vientos medios en julio: (a) a 200 hPa, y (b) a 850 hPa

con toda probabilidad, el monzón tendría poco efecto en la ocurrencia de las lluvias de verano.

Las montañas de Africa oriental son muy eficaces en acelerar la corriente que cruza el ecuador hacia el norte en el monzón de verano. Esta corriente aparece en forma de corriente en chorro a bajo nivel cerca de la costa de Kenya. Esta corriente resulta reforzada por impulsos que pasan por el canal de Mozambique, y a unos 10° N de latitud parece desviarse de la costa para dirigirse hacia la India. Los experimentos con modelos de simulación del chorro se basan o bien en la conservación de la vorticidad potencial a lo largo de las líneas de corriente, o bien en ecuaciones barotrópicas primitivas para un nivel; ambos métodos han servido para simular con éxito la desviación brusca del chorro alejándose de la costa, después de haber recorrido cierta distancia al norte del ecuador. La alineación del chorro se ha confirmado también por el experimento BALSAMINE con globos a nivel constante, lanzados por un equipo de científicos franceses desde

las Seychelles y Diego Suárez. Un seguimiento preciso de las trayectorias de los globos indica un acoplamiento estrecho entre la fuerza del gradiente de presión y la resistencia producida por el rozamiento en las configuraciones de corriente a través del ecuador, y también sugiere la existencia de una capa límite de tipo advectivo muy próxima a la costa de Africa entre el ecuador y los 5° N; en otras regiones más alejadas del ecuador, las trayectorias de los globos indican una capa límite de Ekman.

Entre otras barreras de escala regional, se ha estudiado con interés la corriente sobre los Ghats Occidentales. Se ha conjeturado que estas cadenas montañosas generan ondas de Rossby corriente abajo, las cuales aceleran en última instancia la ciclogénesis al este de la barrera. Pero, también en este caso, las opiniones están divididas, y los modelos numéricos no han sido capaces de detectar las ondas de Rossby corriente abajo.

Los monzones generan un sistema de corrientes en la superficie del océano, que tiene interés especial por ser uno de los pocos ejemplos en que el océano parece responder rápidamente a los cambios de la circulación atmosférica. Este fenómeno se conoce como la corriente de Somalia, que va hacia el norte durante el monzón de verano e invierte su dirección durante el de invierno. Aparece, aproximadamente, un mes an-

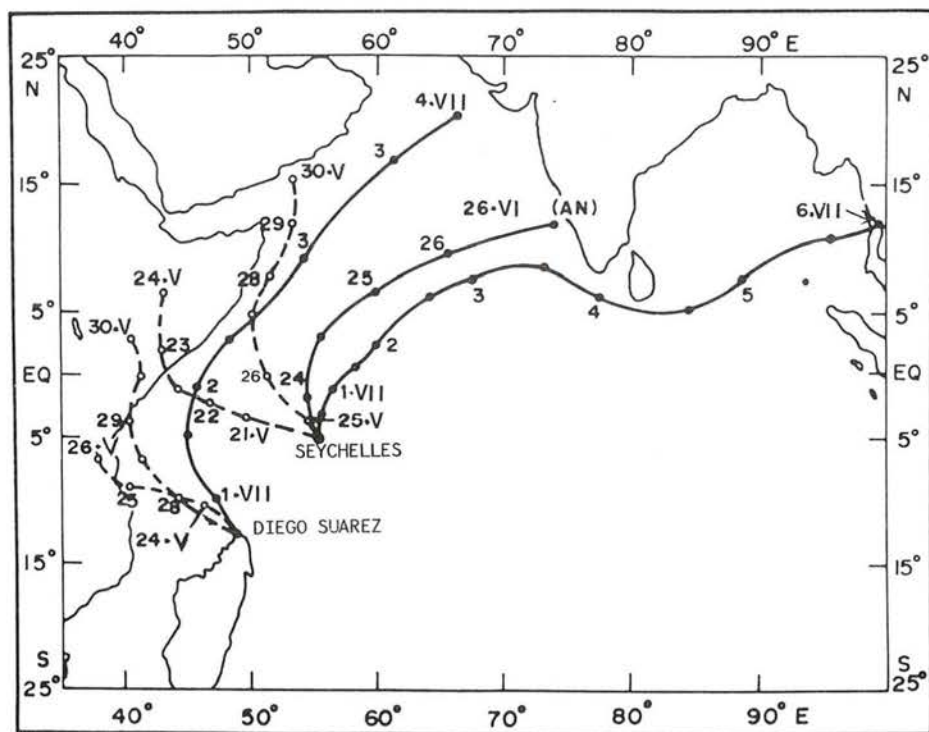


Figura 4 - Trayectorias de los globos a nivel constante lanzados desde las Seychelles y Diego Suárez durante el MONEX de verano. Las líneas de trazos señalan las trayectorias de los globos lanzados antes del comienzo del monzón, y las continuas las de los lanzados después.

tes de la irrupción de los vientos monzónicos sobre el Mar de Arabia. Un análisis teórico sugiere que, si se consideran modos baroclínicos, esta corriente es producida por modulaciones desde grandes distancias. Otros experimentos posteriores mediante modelos dan más importancia a la modulación producida por los vientos locales que a una perturbación distante.

La teoría sugiere que, en las etapas iniciales, la modulación local debida a la divergencia de la tensión de rozamiento del viento es más importante, pero que después ganará en importancia la modulación desde zonas alejadas medida por el rotacional de la tensión de rozamiento del aire. La corriente de Somalia está asociada con un fuerte afloramiento de aguas profundas costeras que provocan gradientes térmicos altos.

Antes de la llegada del monzón se observa un enfriamiento general de la superficie del agua del Mar de Arabia, hecho que no está explicado satisfactoriamente. Se creía que las aguas afloradas de la corriente de Somalia se propagaban hacia el este enfriando así el Mar de Arabia, pero los modelos no confirman esta idea.

### *Predicción de los monzones*

La predicción a largo plazo de las lluvias monzónicas ha ocupado la atención de los meteorólogos durante muchas decenas de años. Se intentan tres tipos de predicción: (a) Predicción de la fecha del inicio de las lluvias; (b) La cantidad total de precipitación durante toda la estación monzónica; (c) Predicciones mensuales de precipitación. Las dos primeras se basan en ecuaciones de regresión con cierto número de predictores, y en ellas se ha logrado éxito razonable en cuanto a la fecha del inicio, pero no en lo que se refiere a la cantidad total de precipitación. La correlación estadística entre la lluvia y los fenómenos previos presenta grandes fluctuaciones con la cronología. Se están desarrollando modelos autorregresivos para predecir la precipitación estacional y mensual, y aunque aún se hallan en su etapa inicial, ya sirven mejor que una ecuación de regresión para predecir la lluvia estacional (aún se está analizando el éxito que pueden tener en las predicciones de precipitación mensual).

La predictibilidad de los monzones ha sido el tema de interesantes trabajos de investigación en los últimos años. Medida por el cociente entre la variabilidad interanual y la natural, se ha observado que la predictibilidad es mejor en los trópicos que en las latitudes medias y, aunque esto indica un mayor potencial de predicción a largo plazo de la evolución de los monzones, la teoría sugiere que esto es cierto principalmente para la predicción de las medias mensuales; para escalas cronológicas menores, la predictibilidad en los trópicos es menor. Esta conclusión se basa en experimentos numéricos con modelos de la circulación general; comenzando con valores medios iniciales muy diferentes e imponiéndoles perturbaciones aleatorias, la integración a largo plazo muestra unos resultados que apenas se diferencian después de un mes. Al contrario que los sistemas de las latitudes medias, las circulaciones de Hadley y de Walker son más estables para los monzones; las fluctuaciones son en gran manera la consecuencia de cambios en las condiciones de la capa límite inferior. Si esta premisa básica es correcta, es posible que las futuras mejoras en el comportamiento de los modelos dependerán de unos mejores esquemas de parametrización.

## **PREDICCIÓN A MUY CORTO PLAZO: SISTEMAS E INVESTIGACIÓN**

**CURSILLO PRACTICO EN BOULDER (EE.UU.), AGOSTO DE 1983**

La predicción a muy corto plazo (PMCP) es un concepto que se está introduciendo rápidamente en todo el mundo. En los fenómenos meteorológicos de corta vida y de pequeña escala es cuando con frecuencia el tiempo atmosférico muestra su cara más