

**TRANSPORTE DE MASA, MOMENTO ANGULAR Y ENERGIA  
POR LA CIRCULACION MERIDIONAL MEDIA DURANTE  
LA FASE III DEL GATE**

**JORGE A. AMADOR\***

**RESUMEN**

Se estudian en este trabajo los transportes de masa, momento angular, energía potencial y cinética y los flujos de calor sensible y latente por la circulación meridional media para diferentes sectores de la escala A durante la Fase III del GATE. Grandes diferencias fueron encontradas en el transporte de propiedades entre los diferentes sectores para este período. En el oeste del Atlántico una débil celda de circulación opuesta a la de Hadley parece ser el modo de circulación dominante durante este período en particular. A pesar de que este resultado es consistente con algunas características climatológicas de la región, existen aspectos al respecto que deben ser clarificados. En el resto del área investigada el flujo de masa es del tipo de la celda de Hadley, encontrándose los valores más intensos en la región continental africana. Lo anterior, sumado a valores altos en el transporte de momento y energía en la misma región permite soportar la idea de una temprana transición a la circulación general de invierno en el hemisferio norte y sugiere que la transición toma lugar en forma zonalmente asimétrica. En la región africana cerca de  $10^{\circ}\text{N}$ , donde se observaron ondas de propagación este-oeste (en especial en la baja troposfera) existe una fuerte convergen-

\* Escuela de Física, Centro de Investigaciones Geofísicas, Universidad de Costa Rica, San José.

cia del flujo de momento angular, indicando un sumidero de momento angular de la circulación general y una posible fuente de momento para los disturbios ondulatorios en la región.

El flujo de energía potencial determina la dirección del transporte de energía total en casi todas las regiones, lo cual, está de acuerdo con los resultados de Oort y Rasmussen (1970). El flujo de calor latente por su parte es de signo contrario al de energía potencial en todos los sectores. Lo anterior es consistente con el hecho de que los flujos de energía potencial y calor latente estén dominados respectivamente por las ramas superior e inferior de la celda de Hadley.

**ABSTRACT**

Mass, angular momentum, potential and kinetic energy, sensible and latent heat transports by the mean meridional circulation are investigated for different sectors during Phase III of GATE. Large differences were found in the meridional transport of properties for the sectors analyzed in this study. In the Western Atlantic a weak indirect cell appears to dominate. Although this result is consistent with some climatological features of the region, there are aspects of it that need to be clarified. In the rest of the area analyzed the mass transport is of the Hadley cell type. A maximum of mass transfer is found over the African continent. The above result and large values of momentum and energy transfer in the same region support the idea of an early transition of the tropical circulation to the general winter type circulation of the northern hemisphere and suggests that this transition takes place in a zonally asymmetric manner. Over the African region near  $10^{\circ}$  north, where waves were observed to propagate westerly (especially in the lower troposphere) there is a strong convergence of angular momentum of the general circulation and a possible momentum source for the wave-like disturbances over the region. The potential energy transfer determines the sign of the meridional transport of

energy in most regions, in agreement with Oort and Rasmussen (1970). The latent heat flux is of different sign to that of the potential energy in all sectors. This is consistent with the fact that the potential energy and latent heat transfers are dominated by the upper and lower branches of the Hadley cell.

## 1. INTRODUCCION

La falta de datos atmosféricos con razonable densidad espacial ha limitado fuertemente los estudios de la circulación general de la atmósfera. En parte por la escasez de información en algunas regiones, existe hoy en día solo una idea general muy básica acerca del papel de la circulación general en el transporte de propiedades en el globo basada en trabajos como los de Tucker (1959), Lorenz (1967), Kidson y colaboradores (1969), Palmen y Newton (1969), Oort y Rasmusson (1970) y Newell y colaboradores (1974), entre otros.

Como los datos del GATE constituyen sin lugar a dudas un importante grupo de información para tales estudios de la circulación general, es el propósito de este trabajo estudiar los transportes de propiedades en la escala A durante la Fase III del GATE y comparar estos resultados con las diferencias regionales obtenidas por Amador (1981).

Los transportes que se investigan están asociados a la circulación meridional media solamente (un estudio comprensivo de todos los mecanismos de transferencia se escapa a los alcances del presente trabajo) y la contribución de otras circulaciones como las debidas a los disturbios transitorios y estacionarios son ignorados en virtud de su orden de magnitud en regiones tropicales (Palmen y Newton, 1969; Newell y colaboradores, 1974 y Riehl, 1979).

## 2. INFORMACION BASICA

En el presente trabajo se hace uso de los datos básicos durante la Fase III del GATE a las 12 T.M.G.

El área de trabajo es la escala A\* del GATE (compárese las escalas A y A\* en la

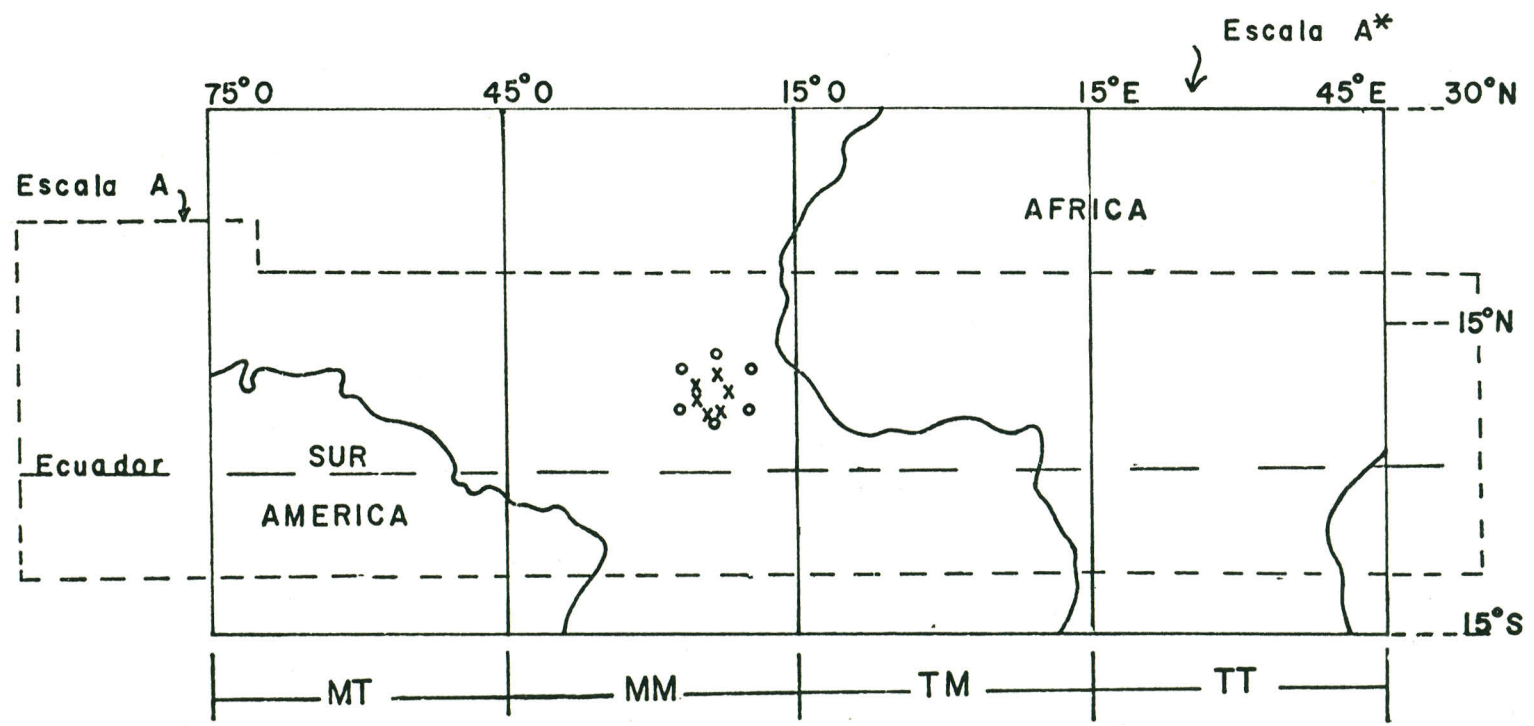


Fig. 1. Dominio de las escalas A y A\* durante la Fase III del GATE mostrando las áreas o sectores usados en el análisis del transporte de propiedades.

Fig. 1) y la información básica utilizada, procedimientos y otros detalles acerca de los datos atmosféricos tomados durante el GATE han sido descritos en detalle por Amador (1981, 1983),

Las matrices de información son del tipo 64 x 26 puntos en la horizontal correspondientes a valores de los parámetros utilizados (temperatura, humedad específica, componentes zonal y meridional del viento y altura del geopotencial) definidas en 12 niveles en la vertical (1000, 950, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100 y 70 mb) y durante los 21 días de la Fase III del GATE (29 agosto al 28 de setiembre de 1974). El cálculo de los transportes se realizó en un dominio ligeramente menor (por razones computacionales) y se utilizaron para cada parámetro matrices de información del tipo 62 x 24 x 12 x 21.

### 3. METODO Y DETALLES COMPUTACIONALES

Los transportes de propiedades en la escala A\* fueron calculados para varios sectores a fin de estudiar la asimetría zonal del transporte, sus características y su relación con los fenómenos climatológicos del área. La Fig. 1 muestra los diferentes sectores para los cuales se hizo el cálculo de los transportes. Ellos son: MT (en el sentido Norte-Sur significa Mar-Tierra), MM, TM y TT. Nótese que esos sectores y la notación usada corresponden aproximadamente a la configuración geográfica de los continentes Americano y Africano (las porciones de ellos dentro de la escala A\*). La razón para dividir la escala A\* en esos cuatro sectores reside fundamentalmente en que al aplicar los promedios zonales, éstos no se verán afectados por fuertes contrastes entre el mar y la tierra (caso de sectores MT y TM) y además que tanto MM como TT son aproximadamente homogéneos pues representan porciones casi totalmente oceánicas y terrestres respectivamente. La anterior división no solo

permite estudiar la dependencia longitudinal del transporte de propiedades inducida por contrastes topográficos y de tipo mar-tierra entre las regiones, sino que permite investigar esas propiedades en relación con los disturbios de escala sinóptica que se propagan en la región (las asimetrías zonales en la estructura de la atmósfera tropical podrían ser importantes en el desarrollo y naturaleza de los disturbios).

### 3.1. Transporte de masa

La transferencia latitudinal de masa sobre cada uno de los sectores de estudio fue investigada introduciendo una función corriente  $\psi$  en un sistema  $(x, y, p, t)$  tal que

$$g \frac{\partial}{\partial p} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\tau} \psi(x, y, p, t) d\lambda dt = \frac{\pi a \cos \varphi}{6} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\tau} v(x, y, p, t) d\lambda dt \quad (1)$$

con  $y = y(\lambda)$

en donde:

$g$ : aceleración de la gravedad

$\lambda$ : ángulo de longitud ( $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  denotan los límites de cada uno de los sectores considerados)

$\varphi$ : ángulo de latitud

$\tau$ : intervalo de tiempo (21 días para la Fase III del GATE)

$a$ : radio de la tierra (6378.2 km)

$v$ : componente meridional del viento

$x, y$ : coordenadas espaciales "horizontales", positivas hacia el este y norte res-

pectivamente

p : presión, coordenada espacial vertical (disminuye con la altura).

t : tiempo

La ecuación (1) es consistente con la forma en coordenadas esféricas de la ecuación de continuidad (w,v: componentes del viento en p, x respectivamente).

$$\frac{1}{a} \left( \frac{\partial}{\partial \varphi} - \tan \varphi \right) \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\tau} v(x,y,p,t) d\lambda dt \right) + \frac{\partial}{\partial p} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\tau} \omega(x,y,p,t) d\lambda dt + \frac{1}{a \cos \varphi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_0^{\tau} u(x,y,p,t) d\lambda dt = 0 \quad (2)$$

si el último término de esta ecuación es cero o pequeño en magnitud comparado con los otros términos. Si la integración se lleva a cabo a lo largo de un círculo de latitud este último término es cero. Amador (1981) mostró que para la extensión de la escala A\*, la contribución de ese término en la ecuación de continuidad es en general mucho menor que cualquiera de los otros términos en casi todo el dominio de integración excepto en áreas cercanas a fuertes corrientes en chorro. En general, el uso de la ecuación (1) es razonable para todos los sectores excepto en algunas regiones del sector MT. Los transportes de masa deben considerarse entonces como aproximaciones de primer orden del transporte real.

### 3.2. Transporte de momento angular absoluto

El momento angular absoluto M de un volumen atmosférico de ancho unidad en la dirección "y", a la latitud  $\varphi$  y limitado por las longitudes  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  ( $\lambda_2 > \lambda_1$ )

y por las superficies  $p_0$  y  $p_t$  ( $p_0 > p_t$ ) está dado por

$$M = \frac{a^2 \cos^2 \varphi}{g} \int_{p_t}^{p_0} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[ \Omega a \cos \varphi + u(x, y, p, t) \right] d\lambda dp \quad (3)$$

donde  $\Omega$  es la velocidad angular de rotación de la tierra. Si el integrando de (3) se multiplica por el flujo meridional  $v$ , se obtiene el transporte total de momento hacia el norte a través del volumen considerado. La componente zonal del viento se denota por  $u$ .

La contribución al transporte meridional de momento  $M_t$  en cada uno de los sectores estaría dado por

$$M_t = \frac{C a \cos \varphi}{g} \int_{p_t}^{p_0} \left[ \Omega \langle \bar{v} \rangle a \cos \varphi + \langle \bar{v} \rangle \langle \bar{u} \rangle + \langle \bar{u}^* \bar{v}^* \rangle + \langle \bar{u}' \bar{v}' \rangle \right] dp \quad (4)$$

donde se han introducido los operadores

$$\overline{(\quad)} = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau (\quad) dt \quad (5)$$

$$(\quad)' = (\quad) - \overline{(\quad)} \quad (6)$$

$$\langle (\quad) \rangle = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} (\quad) d\lambda \quad (7)$$

$$(\quad)^* = (\quad) - \langle (\quad) \rangle \quad (8)$$

con  $C = \frac{\pi a \cos \varphi}{6}$  (arco de cada sector) y utilizando el paréntesis  $(\quad)$  para denotar cualquier cantidad atmosférica. El primer término en el integrando de la ecuación (4) es el transporte de momento terrestre por la circulación meridional

media  $\langle \bar{v} \rangle$ , y el segundo término representa el transporte de momento angular relativo por  $\langle \bar{v} \rangle$ . Los últimos dos términos corresponden a las partes transitorias y estacionarias (transporte de momento por sistemas transitorios y estacionarios). Nótese que estos transportes se obtienen por combinación apropiada de los operadores (5), (6), (7) y (8). En el presente trabajo estos términos no se calculan y se estudia solo el transporte asociado a  $\langle \bar{v} \rangle$ . Además, se prefiere la forma "verticalmente integrada" (ecuación (4)), para discutir el transporte, de modo que la contribución del término relacionado con el momento angular terrestre es cero.

### 3.3. Transporte de Energía

Procediendo en forma análoga al caso del transporte de momento, el transporte de energía por la circulación meridional media  $\langle \bar{v} \rangle$  está dado por

$$E = C \int_{p_t}^{p_0} \left[ g \langle \bar{z} \rangle \langle \bar{v} \rangle + C_p \langle \bar{T} \rangle \langle \bar{v} \rangle + L \langle \bar{q} \rangle \langle \bar{v} \rangle + \frac{1}{2} \overline{\langle u^2 + v^2 \rangle} \right] dp \quad (9)$$

con  $z$ : altura del geopotencial

$C_p$ : calor específico a presión constante

$T$ : Temperatura

$L$ : Calor latente de condensación

$q$ : humedad específica

El primero y último términos en el integrando de (9) representan respectivamente el flujo de energía potencial y cinética por la circulación meridional media. El tercero y cuarto representan los flujos de calor sensible y latente respectivamente.

### 3.4. Esquemas numéricos

La aplicación de los operadores (5) y (7) con valores definidos en puntos de grilla en el dominio de la escala  $A^*$  es inmediato y no requiere explicación posterior. En el caso del transporte de masa la distribución  $\Psi(y,p)$  fue calculada mediante la ecuación (1) con diferencias "hacia arriba" en sentido decreciente de  $p$  (con la condición de frontera  $\Psi = 0$  en  $p = 1000$  mb) es decir (para  $y =$  constante):

$$\langle \overline{\Psi(p)} \rangle_{i+1} = \langle \overline{\Psi(p)} \rangle_i + \frac{C}{2} \left[ \langle \overline{v} \rangle_{i+1} + \langle \overline{v} \rangle_i \right] \Delta p$$

en donde

$\Delta p = p_{i+1} - p_i$  y los subíndices  $i+1$  e  $i$  se refieren a dos diferentes niveles isobáricos en la vertical con  $i$  creciente con la altura ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ).

En el caso de los términos que interesan en los transportes de momento y energía total (ecuaciones (4) y (9) respectivamente), estos se integraron verticalmente para presentar el transporte neto como función de la latitud. En ambos casos una integración simple trapezoidal fue llevada a cabo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Transporte de masa

La distribución de  $\psi(y,p)$  en cada uno de los sectores MT, MM, TM y TT se presentan en las Fig. 2 a 5 respectivamente. El transporte neto de masa debajo de cualquier nivel  $p$  considerado está dado por los valores de  $\langle \overline{\psi(y,p)} \rangle$  (en adelante denotado simplemente  $\psi$ ). El intervalo de ploteo es  $5.0 \times 10^9 \text{ Kg s}^{-1}$  y el transporte hacia el norte es positivo. Un centro negativo en el hemisferio norte implica transporte de masa hacia el Ecuador en niveles bajos y transporte hacia los polos en niveles altos.

En la Fig. 2 el sector MT muestra flujo hacia el norte en niveles bajos y hacia el Ecuador en niveles altos. Aún cuando esto podría ser una cruda representación del transporte real de masa, como se esperaba es consistente con la distribución de  $\langle \overline{v} \rangle$  dada por Amador (1981). El transporte anterior se opone a la idea de la circulación de Hadley del hemisferio norte (C.H.N.) en la cual el transporte de masa se realiza hacia el norte en niveles altos y hacia el sur en niveles bajos. El anterior es un resultado sumamente interesante pues por un lado, la información fue relativamente pobre sobre Sur y Centro América y el suroeste del Océano Atlántico (Lyne y colaboradores, 1975 y Met 0 11 Analysis Group, 1976) y un simple análisis estadístico no condujo al posible sentido de la circulación (Amador, 1981). Por otro lado fuentes independientes parecen confirmar la posibilidad de una circulación como la encontrada en el presente trabajo (Atkinson y Sadler, 1970; Sadler 1975 y Naval Weather Service Detachment, 1974). Aún cuando no es del todo concluyente, la confianza que se deposita en los valores de la

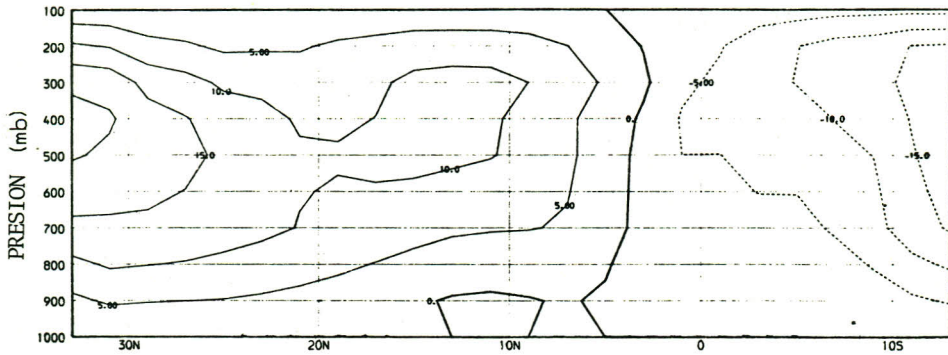


Fig. 2. Transporte de masa  $\langle \bar{\Psi} \rangle$  por la circulación meridional media para el sector MT. Unidades de  $\langle \bar{\Psi} \rangle$  en  $10^9 \text{ kg s}^{-1}$ . La unidad vertical es la presión en mb.

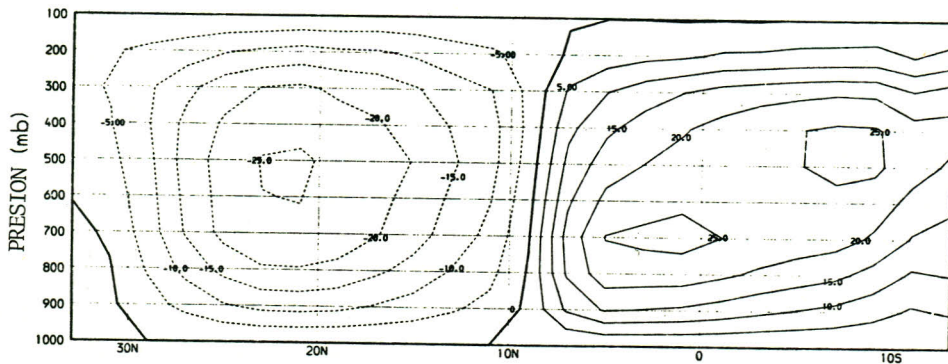


Fig. 3. Como en la Fig. 2 excepto para el sector MM.

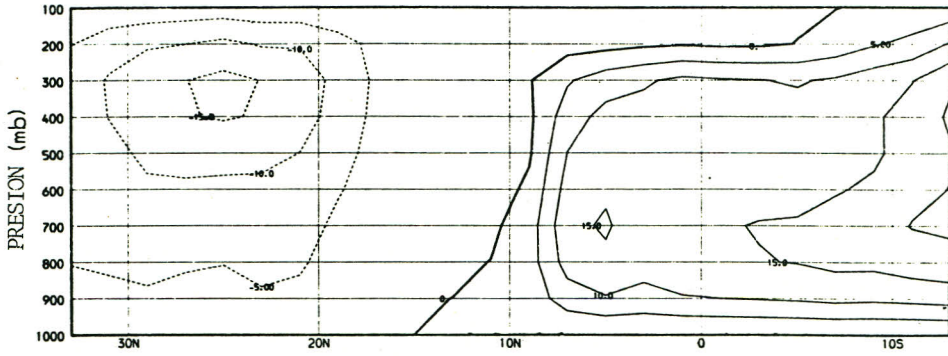


Fig. 4. Como en la Fig. 2 excepto para el sector TM.

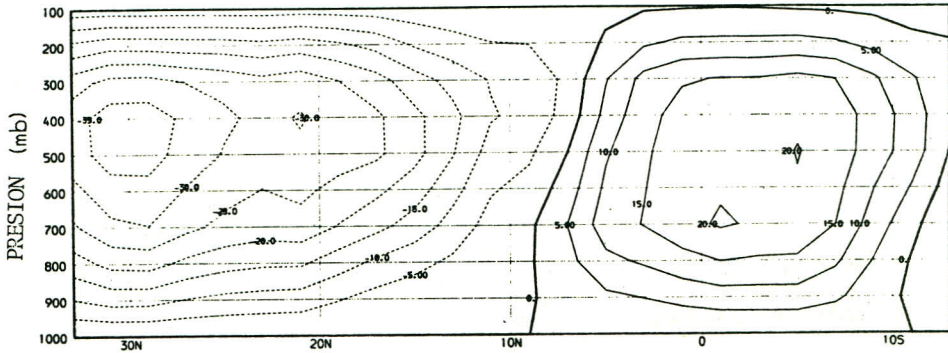


Fig. 5. Como en la Fig. 2 excepto para el sector TT.

Fig. 2 aumenta considerablemente si regiones positivas y negativas son consideradas nivel por nivel como observaciones independientes lo cual sería consistente con el análisis objetivo de la información (Lyne y colaboradores, 1975).

Un buen grado de simetría con respecto a  $10^{\circ}\text{N}$  es evidente en la C.H.N. y la C.H.S. (celda de Hadley del hemisferio sur) en especial en los sectores MM y TT. El último sector muestra una circulación más intensa en el norte que en el sur. Además en general, los valores más grandes de transporte en los sectores MM y TM en el norte con respecto a los del sur parecen indicar que la transición a la circulación dominante del invierno en el norte está tomando lugar durante este período en particular. Si la transición ocurre en una forma más o menos simétrica con respecto a los círculos de latitudes durante los meses de octubre-noviembre como encontrara Kidson y colaboradores (1969) y Oort y Rasmusson (1970) para la circulación meridional media, los resultados del presente trabajo indicarían no solo una temprana transición a la dominante C.H.N. durante el invierno del hemisferio norte, sino además que la transición se lleva a cabo en una forma totalmente asimétrica con valores anómalos grandes de la circulación en especial en TT.

#### 4.2. Transporte de Momento

El transporte de momento verticalmente integrado ( $M_t$ ) para todos los sectores estudiados se presenta en la Fig. 6. Un máximo de  $M_t$  se encuentra en casi todos los sectores cerca de  $5^{\circ}\text{N}$  (observado también por Kidson y colaboradores, 1969 y Oort y Rasmusson, 1970). La máxima contribución se observa en el sector TM lo cual es totalmente consistente y se explica por la presencia y alta correlación entre la corriente en chorro en niveles superiores sobre Africa

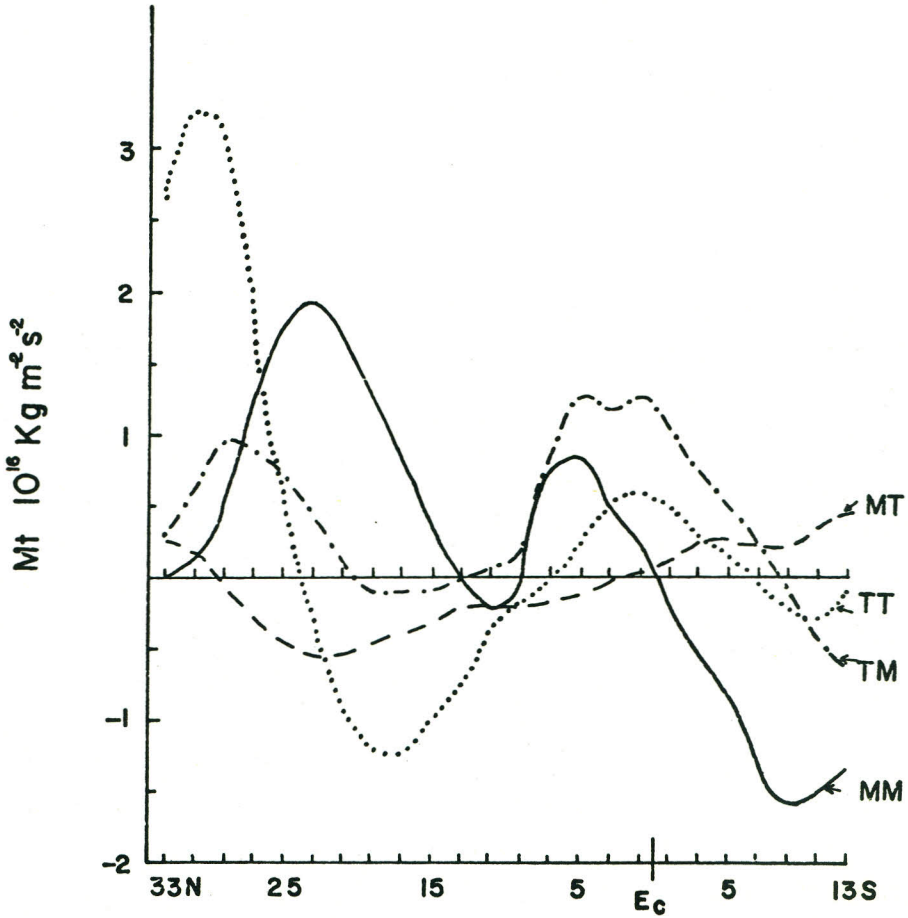


Fig. 6. Valores verticalmente integrados del transporte de momento por la circulación meridional media para los diferentes sectores analizados. Unidades de  $Mt$  en  $10^{16} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ .

del Este y el flujo de retorno de la C.H.S. Al norte de  $5^{\circ}\text{N}$ , MT muestra un rápido decrecimiento en magnitud (lo cual está de acuerdo con los dos trabajos arriba mencionados).

En casi todos los sectores Mt alcanza un mínimo no esperado entre  $11^{\circ}$  y  $17^{\circ}\text{N}$  y luego aumenta substancialmente hacia otro máximo. Es interesante notar que los sectores TT, TM y MM presentan el mínimo valor de Mt en un cinturón donde de disturbios transitorios se han observado propagándose hacia el oeste durante los meses de verano. De acuerdo a estudios realizados por Reed y colaboradores (1977) y Norquist y colaboradores (1977), las ondas en la región oeste de Africa transportan momento negativo hacia el sur (lo cual indica conversión de energía cinética zonal a energía cinética del disturbio puesto que el transporte es en contra del gradiente de Mt). En esas regiones es posible que los disturbios transitorios sean el mecanismo más importante en el transporte de momento hacia el norte.

Otro aspecto interesante de la Fig. 6 es la distribución de la divergencia del flujo en algunos sectores. En el sector MT, Mt decrece hacia el norte sobre la mayor parte de la región ( $-\frac{\partial \text{Mt}}{\partial y} < 0$ ) implicando un sumidero de momento sobre esa región. En el sector MM, Mt refleja la importancia de la corriente en chorro de bajos niveles sobre el oeste de Africa en el balance total de momento pues en esa región  $\frac{\partial \text{Mt}}{\partial y} > 0$  indicando una fuente de momento angular. En la región donde se observan las ondas de propagación este-oeste (cerca de  $10^{\circ}\text{N}$  en parte del sector TT y en TM y MM) hay una fuerte convergencia de momento ( $-\frac{\partial \text{Mt}}{\partial y} < 0$ ) sugiriendo la posibilidad de una transferencia de momento de la circulación general a los disturbios de escala sinóptica presen

tes (sistemas cuasi-ondulatorios).

Finalmente, el flujo de momento a través del ecuador (interacción hemisférica) parece ser más pronunciado en los sectores africanos que en cualquier otra región de la escala A\*.

#### 4.3. Transporte de Energía

Las Fig. 7 a 10 muestran respectivamente para los sectores MT, MM, TM y TT, la contribución relativa del transporte de energía potencial ( $Pe$ ), el flujo de calor sensible  $Sh$  y el flujo de calor latente  $Lh$  al flujo total de energía TEF.

En todos los sectores  $Pe$  es el término dominante y determina generalmente la dirección de TEF (la transferencia de energía cinética  $Ke$ , en apariencia pequeña comparada con  $Pe$ ,  $Sh$  y  $Lh$  se presenta aparte en la Fig. 11 para comparación entre sectores). La distribución de  $Pe$  tiene un carácter transicional entre las de invierno y verano, lo cual también soporta la idea de una transición temprana hacia la circulación de invierno del hemisferio norte durante este período. Lo anterior ha sido deducido de los resultados del presente trabajo y su comparación con los de Holopainen (1965), Kidson y colaboradores (1969) y Oort y Rasmusson (1970). Posiblemente como resultado de esa transición, los flujos de  $Sh$  y  $Lh$  no muestran características muy definidas presentando una distribución meridional compleja.

Como se esperaba de consideraciones puramente teóricas, el flujo de  $Lh$  se opone en dirección al de  $Pe$  en todos los sectores. Esto indica que al menos cualitativamente el flujo de  $Lh$  (tan difícil de evaluar en general) ha sido esti-

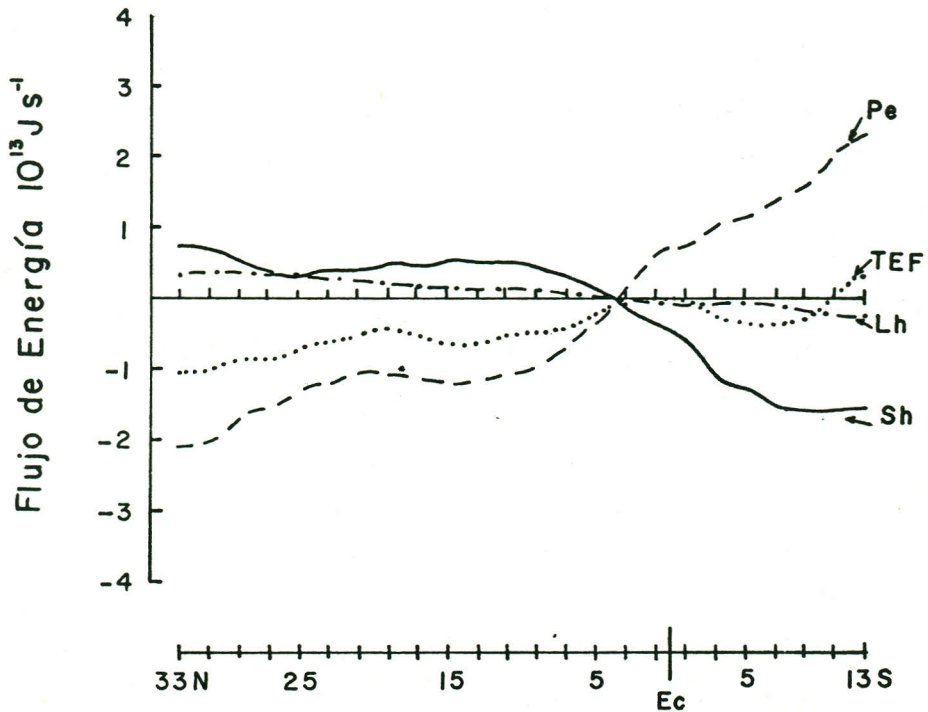


Fig. 7. Valores verticalmente integrados del transporte de energía potencial (Pe), de calor latente (Lh), calor sensible (Sh) y energía total (TEF) por la circulación meridional media para el sector MT. Unidades en  $10^{13} \text{ J s}^{-1}$ .

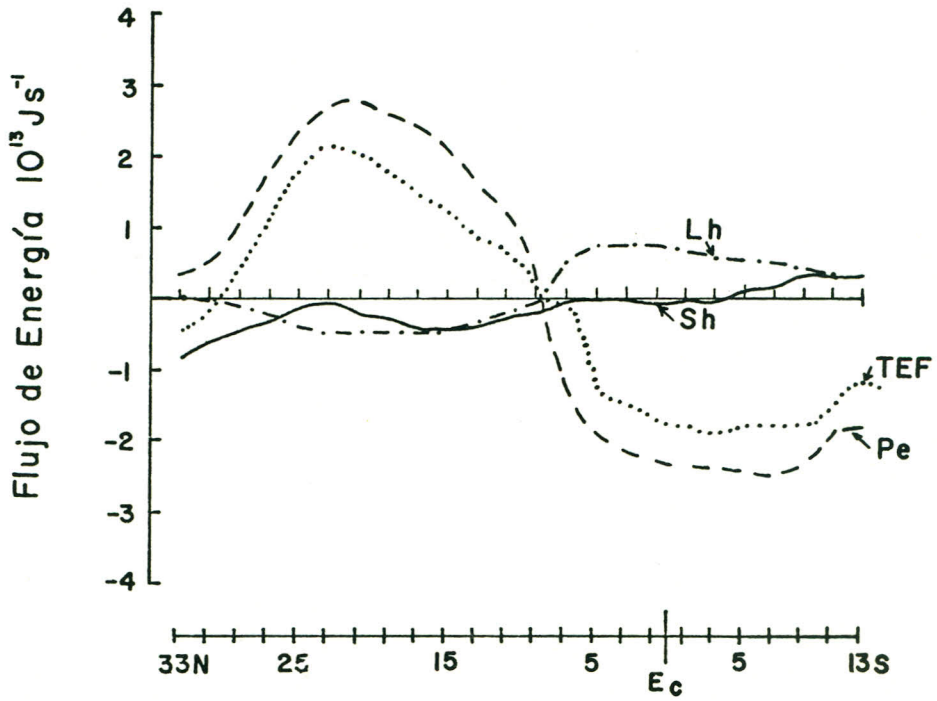


Fig. 8. Como en la Fig. 7 excepto para el sector MM.

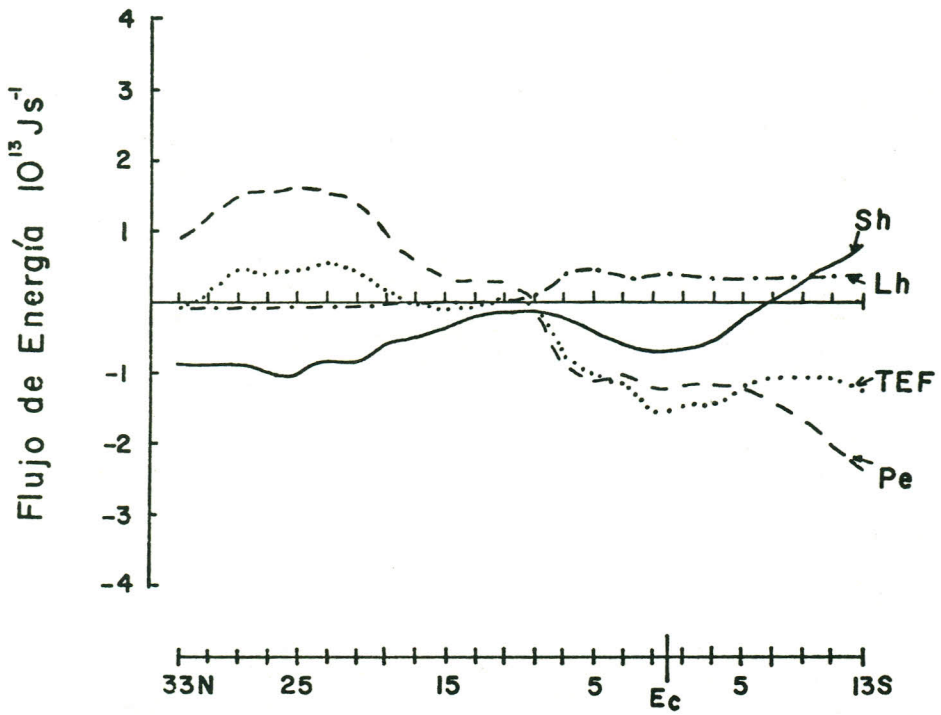


Fig. 9. Como en la Fig. 7 excepto para el sector TM.

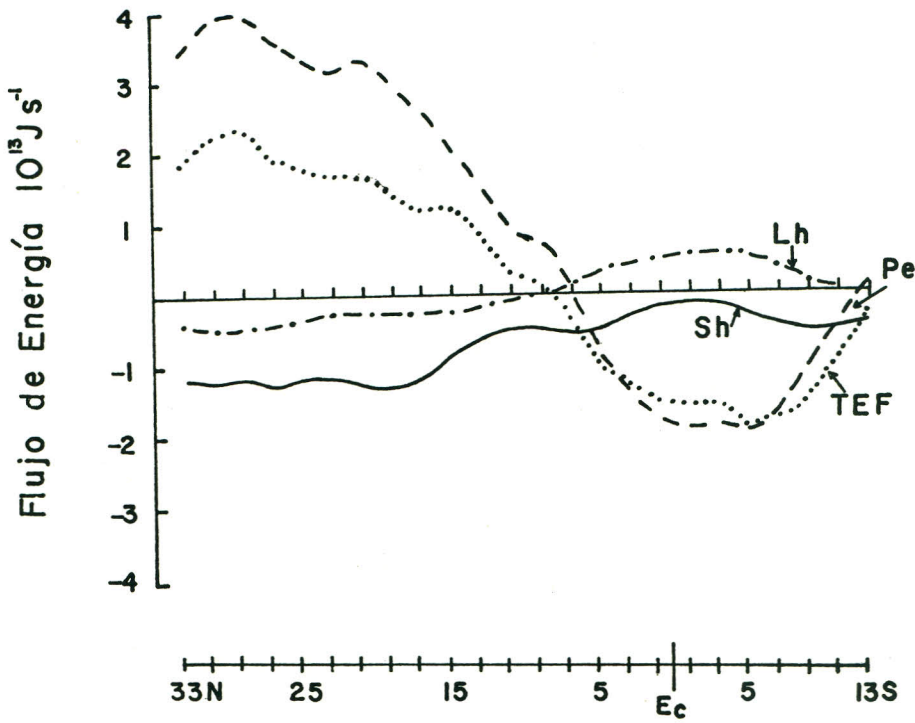


Fig. 10. Como en la Fig. 7 excepto para el sector TT.

mado correctamente, estimulando la confianza en los resultados para los otros transportes.

El flujo de Sh muestra un comportamiento complejo en la mayor parte de los sectores. Solamente en Mt (Fig. 7) Sh se opone a Pe en todas las latitudes contribuyendo substancialmente a valores relativos pequeños de TEF. Es notable que en el sector MT, el flujo de Sh y el de Lh son positivos, lo cual tendería a inducir una circulación térmicamente indirecta lo cual está de acuerdo con los resultados del transporte de masa sobre esa región y con la existencia de la salida de una corriente en chorro en niveles altos en latitudes medias (Sadler y Oda, 1978). En otros sectores, Sh y Pe se oponen, al norte de la latitud en la cual Pe cambia de signo lo que indica, un probable desarrollo de la celda de circulación del invierno del hemisferio norte.

Al sur de esa latitud Sh y Pe son del mismo signo en clara contradicción a los resultados de los trabajos de Kidson y colaboradores (1969). Oort y Rasmussen (1970) y Newell y colaboradores (1974), entre otros. La razón por esa contradicción no está clara, sin embargo no parece estar relacionada con la distribución norte-sur de océanos y tierras pues está presente en los sectores TS y TT.

Otro aspecto interesante observado en todas las Fig. 7 a 10 es la tendencia de casi todos los flujos de cambiar signo cerca de la posición promedio de la ZCIT (Zona de Confluencia Inter-Tropical) para esta época del año: 7°N aproximadamente. Este resultado enfatiza la importancia de la ZCIT (escala convectiva en la liberación de calor latente y su interacción con otras escalas de movimiento en el transporte de propiedades y energía en la atmósfera.

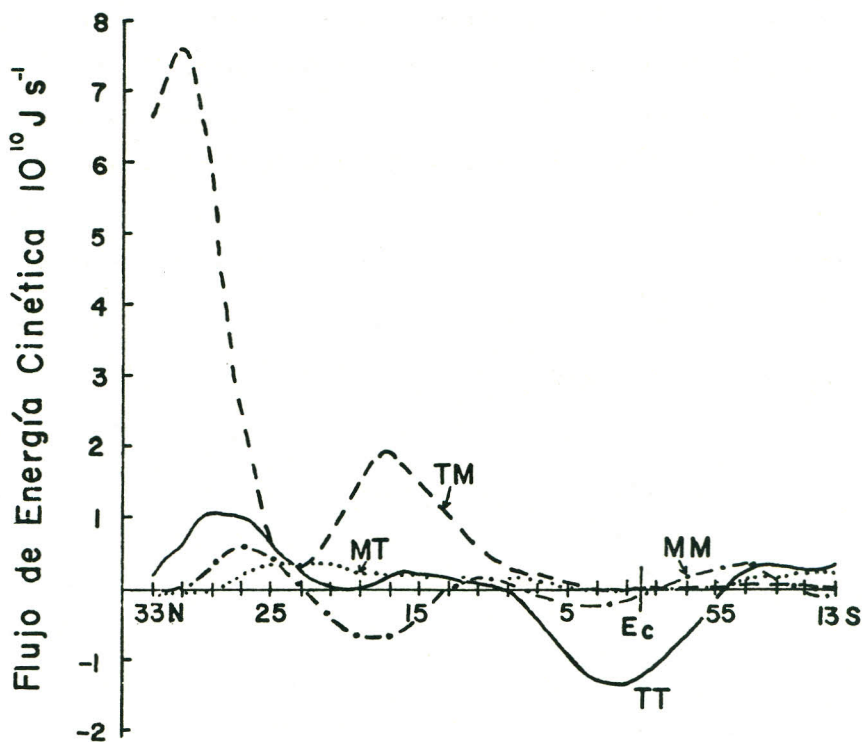


Fig. 11. Valores verticalmente integrados del transporte de energía cinética por la circulación meridional media para los diferentes sectores analizados. Unidades en  $10^{10} \text{ J s}^{-1}$ .

Finalmente en la Fig. 11 se presenta el flujo de energía cinética por la circulación meridional media para los diferentes sectores. El mayor transporte de  $Ke$  en toda la escala  $A^*$  lo realiza el sector TM. Cerca de  $17^\circ N$  un máximo secundario en TM posiblemente refleja la interacción entre  $\langle \bar{v} \rangle$  y la corriente en chorro en la parte central y oeste de Africa. Las distribuciones de  $Ke$  en los sectores TT y TM son consistentes con el desvío hacia el norte observado en la corriente en chorro sobre el Africa en niveles bajos (Amador, 1981). En contraste a esto,  $Ke$  presenta un mínimo en MM, donde la corriente en chorro se observa menos definida con valores relativamente débiles en el flujo zonal.

## 5. DISCUSION FINAL Y CONCLUSIONES

Una estructura altamente coherente de los transportes y de algunas de las características climatológicas ha sido obtenida en el presente trabajo mediante el uso de datos dinámicamente inicializados durante la Fase III del GATE. Lo anterior resalta la importancia de experimentos como los del GATE y de los modelos numéricos operacionales en la complementación y extensión del dato meteorológico básico en áreas con poca información. Tanto experimentos como modelos numéricos proveen la información básica necesaria para el estudio y descripción de fenómenos atmosféricos en las latitudes tropicales. En el presente trabajo se lograron reproducir satisfactoriamente algunas de las características climatológicas del área y se encontraron algunas que no han sido publicadas en la literatura usualmente disponible. Tal es el caso de la celda de circulación opuesta a la de Hadley y de la transición zonalmente asimétrica de la circulación general en los trópi-

cos. Con respecto a la celda opuesta, no solo la evidencia independiente presenta da en la sección de Resultados parece confirmar su existencia, sino que además esa celda es consistente dinámicamente con la posición climatológica de la salida de la corriente en chorro en el norte del sector MT (Sadler y Oda, 1978) y un flujo de calor y viento meridional hacia el norte en niveles bajos y una componente meridional hacia el ecuador en niveles altos. Es necesario sin embargo, investigar más acerca de esta celda, su estructura y el papel que juega en latitudes bajas.

Por otro lado, la descripción del transporte de propiedades por sectores ha revelado importantes diferencias en los transportes de momento y energía; algunas de esas diferencias podrían estar ligadas al desarrollo y mantenimiento de disturbios de escala sinóptica presentes en la región (ondas en los estes por ejemplo).

Una extensión natural de este estudio (aparte del mencionado arriba) sería el cómputo de la contribución de los transportes de energía y momento por los disturbios transitorios y estacionarios al transporte total. Esto podría conducir a un mejor entendimiento de la estructura y mantenimiento del flujo zonal en latitudes tropicales.

**RECONOCIMIENTOS**

Se agradece al Prof. R. P. Pearce de Reading University las valiosas sugerencias y discusiones durante la elaboración de este trabajo. A la Oficina Meteorológica Británica se reconoce la ayuda prestada en la adquisición de los datos básicos y al University of London Computer Centre por las facilidades otorgadas en el procesamiento de la información. A la Organización Meteorológica Mundial, a la Universidad de Costa Rica y al CONICIT (Costa Rica) por el financiamiento de las diferentes etapas de este trabajo, el reconocimiento del autor. Se agradece también al Sr. Mario Fernández la confección de algunas de las figuras y a la Sra. Ana I. Rojas el trabajo mecanográfico.