

**ESCALAMIENTO ESPACIAL DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE
MESOESCALA SOBRE COLOMBIA Y EL PACÍFICO ORIENTAL EN 1998
SEGÚN LA MISIÓN TRMM**

Germán Poveda y John Freddy Mejía
Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas
Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín
gpoveda@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 07 de Julio de 2004 / Aceptación: 03 de Septiembre de 2004 / Recibida versión final: 20 de Septiembre de 2004

RESUMEN

Se estudian los patrones de escalamiento espacial bi-dimensional de tormentas intensas desarrolladas dentro de sistemas convectivos de meso-escala (SCM) sobre Colombia y el Pacífico Oriental, durante 1998, usando información de satélite de la misión TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*). Para caracterizar la variabilidad espacial de la precipitación con respecto a la escala espacial, se han usado herramientas de cuantificación de las propiedades estadísticas de escalamiento simple y múltiple de campos aleatorios, tales como el espectro de potencias de Fourier en dos dimensiones y el análisis de escalamiento de la función de estructura. Los resultados indican que la variabilidad espacial de los campos de precipitación sobre la región exhiben espectros de Fourier bidimensionales con decaimiento potencial, es decir, $E(k) = ck^{-\hat{a}}$, donde k denota el número de onda, c es el prefactor y \hat{a} es el exponente de escalamiento. Los estimados promedios de \hat{a} exhiben valores ligeramente mayores sobre el océano ($\hat{a}=2,873$) que sobre el continente ($\hat{a}=2,867$), lo cual parece reflejar las diferencias existentes entre la dinámica de organización espacial de la convección sobre océano y tierra, con mayor correlación espacial sobre el océano. Los resultados del análisis de la función de estructura de las fracciones de área con lluvia, permiten concluir la presencia generalizada de escalamiento múltiple en la variabilidad espacial de los eventos asociados con SCM. Una conclusión general indica que los eventos sobre el continente muestran una mayor desviación con respecto al escalamiento simple, que los eventos que se desarrollan sobre el océano. Se identifican diferencias significativas en los valores promedio de la intensidad espacial de las tormentas, R , con valores de 1,878 mm/h y 1,608 mm/h, sobre océano y continente, respectivamente. En forma similar, se encuentran diferencias significativas en el parámetro p , el cual relaciona la tasa promedio del crecimiento de la fracción del área cubierta por las regiones con lluvia o sin lluvia dentro de la tormenta, en las diferentes escalas espaciales, con valores promedio de 0,21 (océano) y 0,24 (continente). La relación estimada entre p y R es inversamente lineal entre océano y continente. El ciclo anual promedio de los valores de p , b y R permite concluir que el valor de p es mayor sobre el continente que sobre el océano, y que el valor de b es menor sobre el continente que sobre el océano a lo largo de todo el año. No es clara la relación con la variación anual de la intensidad promedio de los eventos con SCM. El valor de p sobre el océano exhibe fuertes fluctuaciones en las épocas de mayo-junio y de septiembre-octubre.

PALABRAS CLAVES: Colombia, Precipitación, Misión TRMM, Sistemas Convectivos de Meso-Escalamiento espacial.

ABSTRACT

Spatial scaling properties of intense storms developed within mesoscale convective systems (MCS) over Colombia and the eastern tropical Pacific are studied, using satellite data from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). We use quantitative tools of single and multi-scaling properties of random fields, such as the bi-dimensional Fourier spectra, and the so-called structure function. Rainfall fields exhibit power law Fourier spectra, $E(k) = ck^{-\hat{a}}$, with k denoting the wavenumber, c the prefactor, and \hat{a} the scaling exponent. Average estimates of \hat{a} are slightly higher for events developed over the ocean ($\hat{a}=2.873$), in comparison to those events developed over land ($\hat{a}=2.867$), which reflect the different spatial organization dynamics of SCM over both regions, with higher spatial correlation over the ocean. Results from the structure function estimation for fractional wetted areas, indicate that rainfall fields exhibit spatial multi-scaling properties in the variability of events associated with SCM. We found that those events occurring over the continent exhibit larger deviations with respect to single scaling. Important differences are found in average values of rainfall intensity, R , over ocean (1.878 mm/h) and over the continent (1.608 mm/h). In a similar fashion, important differences were found in p , a parameter which relates average growth rate of wetted areas with spatial scale, with values of 0.21 (ocean) and 0.24 (continent). An inverse linear relationship was found between p and R , for ocean and land. The average annual cycle of estimates of p , \hat{a} and R concluded that p is greater and \hat{a} is lesser over the continent than over the ocean, throughout the year. No clear-cut relationship was found for the annual cycle of R , for all events with MCS. The value of p over the ocean exhibited strong fluctuations during May-June and September-October.

KEY WORDS:

Colombia, Precipitation, TRMM Mission, Meso-scale Convective Systems, Spatial Scaling.

1. INTRODUCCIÓN

La distribución espacial de la precipitación tropical exhibe una alta variabilidad en todas las escalas, desde la micro-escala hasta la escala sinóptica (continental). Es importante cuantificar esa variabilidad espacial para el entendimiento de la dinámica de los procesos que gobiernan la lluvia, por sus implicaciones en tareas de modelación y en la predicción de eventos intensos de tormentas. Las aplicaciones incluyen la respuesta hidrológica de las cuencas, la cuantificación de los flujos de agua y energía a través de las ecuaciones de balance, y la modelación acoplada entre tierra y atmósfera. La transferencia radiativa de la atmósfera es afectada por la precipitación, y esto se refleja en la calidad de los estimativos de precipitación que se obtienen a partir de sensores de microondas (Harris et al., 2000).

La investigación hidrológica se ha concentrado en estudiar la variabilidad espacial horizontal bi-dimensional de la lluvia, y su evolución temporal. Una estructura espacial jerárquica que ha sido ampliamente observada en los campos de intensidad de la lluvia, dentro de regiones de escala sinóptica (típicamente mayores que 10^4 km^2) puede describirse de la siguiente manera. Las estructuras espaciales mas pequeñas consisten en racimos de regiones de alta intensidad de lluvia, llamadas “celdas”, las cuales están embebidas dentro de regiones de mas baja intensidad de lluvia, denominadas “pequeños sistemas de meso-escala” (PSM en la Figura 1). Estas a su vez, están embebidas dentro de regiones aun mas grandes de menor intensidad de lluvia, denominadas “grandes sistemas de meso-escala” (GSM). Los GSM están contenidos dentro de regiones de escala sinóptica. La estructura de tal tipo de organización espacial de la lluvia se muestra en forma esquemática en la Figura 1. Hay grupos de tormentas embebidos dentro de un sistema de meso-escala, los cuales se denominan “complejos convectivos de meso-escala”, y que contribuyen en gran medida a la cantidad de la precipitación total en Colombia (Zuluaga y Poveda, 2004). También se ha observado que las regiones que presentan diferente intensidad de lluvia, mostradas en la Figura 1, presentan diferentes ciclos de vida. Por ejemplo, las celdas de lluvia tienen ciclos de vida entre media hora y una hora. Durante ese periodo, la celda experimenta inicialmente un incremento en la intensidad de la lluvia, alcanza un máximo y luego se disipa. En forma similar, los PSM tienen ciclos de vida

entre 2 y 4 horas, y los GSM duran entre 6-12 horas. Lo interesante es notar que las escalas características de espacio y tiempo están ligadas (Houze, 1989). Tal organización espacio-temporal de la lluvia en la meso-escala ($<10^4 \text{ km}^2$) ha promovido múltiples estudios sobre la estadística y la dinámica de la precipitación.

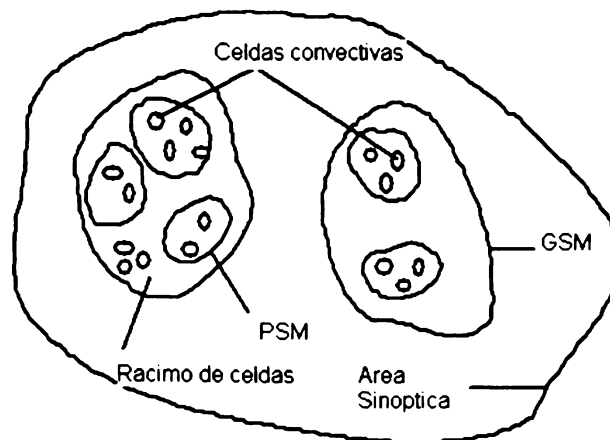


FIGURA 1. Esquema de la organización jerárquica en un campo espacial de complejos de meso-escala, incluyendo grandes sistemas (GSM) y pequeños sistemas (PSM). Figura adaptada de Barry y Carleton (2001, p. 11).

La existencia de tal tipo de organización auto-semejante en la intensidad máxima de las distintas regiones mostradas en la Figura 1, sugiere que la estadística apropiada para modelar la lluvia es el marco de la auto-semejanza estadística de procesos espaciales. En el contexto de la lluvia, la auto-semejanza implica que la estructura espacial de la intensidad de la lluvia parecerá la misma, independientemente de la escala de observación. El escalamiento de la precipitación es empírico en buena medida, aunque existen argumentos en la literatura que sugieren que el escalamiento de este campo está vinculado con el escalamiento observado en la turbulencia (Lovejoy y Schertzer, 1987, 1995; Gupta y Waymire, 1990; Frisch, 1995). Mas adelante, Gupta y Waymire (1993) y Deidda et al. (1999), entre otros, han identificado rasgos de escalamiento múltiple en la variabilidad de la lluvia en distintas escalas espaciales. Los esfuerzos en la última década se han encaminado a describir las variaciones espaciales de la intensidad de la lluvia, y a entender las variaciones geométricas de las áreas con lluvia y sin lluvia de sistemas de lluvia que ocurren en la meso-escala, a partir de la teoría de las “cascadas multifractales”

(Gupta y Waymire, 1993). El análisis de escalamiento múltiple sugiere que los campos de lluvia exhiben leyes de escalamiento anómalo, tanto en espacio como en el tiempo, en el sentido que los exponentes de escalamiento pueden ser expresados como una función no lineal del orden del momento estadístico (Deidda et al., 1999; Gupta y Waymire, 1993; Waymire et al. 1984; Harris et al., 2000). Esto plantea nuevos retos para el estudio teórico y experimental de la lluvia tropical. Observaciones recientes sugieren que los sistemas frontales de lluvia están asociados con propiedades de escalamiento espacial simple mientras que los campos de lluvia producidos por convección profunda están asociados con propiedades de escalamiento múltiple (Olsson y Niemczynowicz, 1996).

En este trabajo se usan las mediciones satelitales del proyecto “Misión para la Medición de la Lluvia Tropical” (TRMM, por las iniciales de *Tropical Rainfall Measuring Mission*), durante el año 1998. Los datos de la TRMM permiten examinar detalladamente la estructura espacial de la lluvia en diferentes escalas (desde 4,3 km hasta la meso-escala). Se cuantifican las propiedades de multiescala espacial de los campos de lluvia, específicamente de los SCM encontrados a partir de los datos de la Misión TRMM (TMI y PR), detallados en Zuluaga y Poveda (2004). Se indagan las diferencias desde el punto de vista estadístico entre los SCM ocurridos sobre el continente y sobre el océano de la región de estudio y se comparan estas propiedades estadísticas evaluadas mensualmente durante 1998. Se examina la posibilidad de usar un modelo de desagregación de la lluvia con base en la descripción fenomenológica de “*cascada multifractal*”, propuesta por Over y Gupta (1994).

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En el numeral 2 se describen los datos y se ilustran los métodos de análisis y la metodología implementada para el análisis espectral y de escalamiento múltiple de los campos espaciales de precipitación. En el numeral 3 se presentan los resultados de los análisis diferenciando los eventos con SCM ocurridos sobre océano y sobre continente. Mas adelante se ilustran los resultados de aplicar esta metodología sobre todos los SCM encontrados para la región y período de trabajo y se aplica un modelo de cascada multiplicativa a partir de la estructura espacial caracterizada. En el numeral 4 se presentan las conclusiones.

2. DATOS Y MÉTODOS

Los datos usados para la realización de este trabajo provienen del satélite de la Misión TRMM (“*Tropical Rainfall Measuring Mission*”; ver Theon 1992), los cuales se describen en detalle en el trabajo de Zuluaga y Poveda (2004, este número). TRMM es una misión conjunta entre Estados Unidos y Japón, encaminada a medir la precipitación de los cinturones tropical y subtropical del planeta, usando satélites y herramientas de percepción remota. La misión TRMM ha recolectado información desde diciembre de 1997 hasta el presente. El análisis que se presenta en este trabajo corresponde al año de 1998, con información de dos sensores a bordo del satélite. La información fue extractada para la región de estudio (ver Figura ** de Zuluaga y Poveda, 2004, este número). Los datos empleados corresponden al “Radar de Precipitación” (PR) y a “Imágenes de Microondas de TRMM” (TMI). La descripción detallada de las especificaciones de estos instrumentos puede consultarse en Kummerow et al. (1998). Específicamente, hemos usado la información de “Precipitación cerca de la superficie”, cuyos datos son tomados del Radar de Precipitación (PR 2A25) y “Temperatura de Brillo” a 85 GHz, tomados del TMI (1B11). Este tipo de información permite obtener información relevante de la precipitación, incluyendo: tipo de lluvia, tipo de nube, altura del tope de las nubes, densidad de gotas y partículas de hielo, etc. Ver los detalles en la Tabla 1 de Zuluaga y Poveda (2004, este número). La órbita de la misión TRMM es circular y no se encuentra sincronizada con el sol, y se desarrolla a una altura de 350 km y a una inclinación de 37° con respecto del ecuador. Las órbitas proveen un cubrimiento extensivo sobre los trópicos (entre las latitudes 35°S y 35°N), y están diseñadas de tal manera que cada punto sea cubierto a una hora local diferente, cada día. Este tipo de muestreo permite el análisis del ciclo diurno de la precipitación, pasando sobre un mismo punto a la misma hora del día cada 48 días.

Para caracterizar y cuantificar la dependencia de la variabilidad espacial de la precipitación con respecto a la escala, se han usado herramientas de cuantificación de las propiedades estadísticas de escalamiento simple y múltiple de campos aleatorios: (1) el espectro de potencias de Fourier bi-dimensional, y (2) el análisis del escalamiento de momentos. Estas aproximaciones representan ideas novedosas en el estudio de la turbulencia y de su conexión con la convección profunda

y la dinámica y organización de la precipitación tropical. Tales herramientas se aplican selectivamente a sistemas convectivos de meso-escala, a partir de la información de los sensores *TMI* y *PR* del satélite TRMM. Se escogieron algunos SCM seleccionando un vecindario de 275 km de lado alrededor de su centroide (64'64 píxeles), que constituye el máximo rango de escalas espaciales que es posible resolver con la información de TRMM.

En los numerales siguientes se describe brevemente cada método y su interpretación física es dada posteriormente en el análisis de resultados. Se muestran los resultados obtenidos para dos eventos de ocurridos uno sobre el océano y otro sobre continente. Los resultados se presentan para todos los SCM encontrados por Zuluaga y Poveda (2004, este número). Se comparará la influencia de la escala espacial en la variabilidad de los campos de precipitación de TRMM, con respecto a los campos modelados por medio de una cascada multifractal de la "Fracción de Área Mojada", $f(r)$.

2.1. Espectro de Potencias de Fourier para campos bi-dimensionales

Muchos fenómenos geofísicos exhiben un espectro de Fourier con una ley de decaimiento potencial de la forma (Korvin, 1992; Mandelbrot, 1998),

$$E(k) = ck^{-\beta} \quad (1)$$

en donde k es el número de onda (inverso de la escala espacial), c es el prefactor y β es el exponente de escalamiento. El parámetro β se estima como la pendiente de la regresión entre los valores maestres de $E(k)$ y k , en el espacio log-log. Tal pendiente se convierte en una medida de la rugosidad (Davis, 1996; Harris, 1996), de tal forma que valores bajos de β corresponden a campos aleatorios mas rugosos, con menor correlación espacial. Los exponentes de escalamiento del espectro de Fourier contienen información clave sobre la dinámica de la física subyacente a fenómenos altamente complejos. Por ejemplo, el bien conocido comportamiento de la disipación de energía cinética en flujos turbulentos, para la cual $E(k) \sim k^{-5/3}$ (Kolmogorov, 1941; Frisch, 1995), cuyo exponente de escalamiento, $5/3$, sintetiza la tasa a la cual se transfiere la energía cinética desde las escalas espaciales mayores hasta las escalas menores, de tal forma que se conserva la energía cinética promedio por unidad de masa y por unidad de tiempo. Muchos otros

fenómenos geofísicos exhiben espectros de Fourier con decaimiento potencial cuyos exponentes de escalamiento reflejan diferentes tipos de memoria estadística y la escala de fluctuación inherente a su estructura de correlación espacial o temporal (Korvin, 1992, Mesa y Poveda, 1993; Turcotte, 1997, Mandelbrot, 1998, Yano et al., 2001; Poveda y Salazar, 2004).

El espectro de potencias de Fourier es una herramienta simple y conceptualmente muy potente para analizar la variabilidad espacial en un amplio rango de escalas. Se calcula usando algoritmos de la "Transformada Rápida de Fourier" (FFT, Press et al., 1992). Para facilitar la visualización y la comparación, el espectro de potencias de los campos de lluvia en dos dimensiones de los SCM, son promediados angularmente alrededor de $k_x = k_y = 0$ para producir lo que se muestra aquí como el espectro de

potencias isotrópico, $E(k)$ con $k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$. El término espectro de energía isotrópico no es para sugerir que el campo es isotrópico, sino el promedio en todas las direcciones para $k_x = k_y = 0$ lo cual integra la anisotropía, facilitando así las comparaciones. Evidencia de escalamiento en el espectro de potencias de los campos de lluvia en espacio y tiempo han sido encontrados en numerosos estudios (Harris et al., 2000; Menabde et al., 1997; Lovejoy y Schertzer, 1995).

2.1. Escalamiento de la Función de Momentos

El análisis de escalamiento de la función de momentos permite la cuantificación de la intermitencia espacial (rugosidad) de un campo aleatorio, y proporciona una prueba del tipo de escalamiento espacial (simple o múltiple) de campos aleatorios (Over y Gupta, 1994; Harris et al., 2000). Para entender este punto, definamos el concepto de auto- semejanza estadística como semejanza estadística de un campo aleatorio a través de un rango muy amplio de escalas espaciales. Por tanto, el *escalamiento simple* es un tipo de auto- semejanza estadística. Consideremos un campo aleatorio $\{X(t); t \in I\}$, en donde I representa un conjunto de índices, y un escalar arbitrario $\lambda > 0$. Se define entonces que el campo aleatorio exhibe escalamiento simple si se cumple que,

$$X(\lambda t) = \lambda^\theta X(t) \quad (2)$$

en donde la igualdad se entiende en el sentido de todas la funciones de distribución de probabilidades

dimensionalmente finitas. A partir de la definición de los momentos estadísticos de una función de distribución, dados como

$$E(X^q) = \int x^q f(x) dx, \text{ con } q=1, 2, 3... \quad (3)$$

se concluye que el escalamiento simple de un campo aleatorio, $X(t)$, implica que

$$E[X^q(rt)] = r^{q\theta} E[X^q(t)], \text{ con } q = 0, 1, 2, 3..., \quad (4)$$

$$\text{ó} \quad \log E[X^q(rt)] = q\theta \log r + E[X^q(t)]$$

La ecuación (4) implica que el escalamiento simple debe satisfacer dos condiciones: (i) linealidad en el espacio log-log, y (ii) crecimiento lineal de la pendiente en el espacio log-log, de tal forma que $s(q)=q\theta$, mientras que escalamiento múltiple implica que el crecimiento de la pendiente es no lineal con el orden del momento, q . En nuestro caso, el valor esperado en la ecuación (4) proviene de la ecuación que define el escalamiento de momentos estadísticos de un campo S_r , la cual se calcula para un rango de escalas espaciales, r , en donde los valores mayores de r significa que se examina el fenómeno a una escala espacial con mayor resolución espacial. Por lo tanto,

$$M_q(r) = \langle |\Omega_r(x, y)|^q \rangle \quad (5)$$

en donde S_r representa los valores del campo aleatorio a la escala r , q es el orden del momento estadístico, y $\langle \dots \rangle$ denota el valor esperado de la variable sobre todos los píxeles de escala r . Típicamente, la escala del campo se reduce diadicamente desde su resolución mas alta original, $r=1/(1 \text{ píxel})$ mediante promediado sucesivo del campo de precipitación en el espacio por un factor de dos en cada paso, a la manera de $r=1/(2 \text{ píxeles})=0.5$, $r=1/(4 \text{ píxeles})=0.25, \dots, r=1/(256 \text{ píxeles})=3.9 \times 10^{-3}$. El escalamiento de los momentos significa que

$$M_q(r) \sim r^{-\tau(q)} \quad (6)$$

en donde $J(q)$ es el exponente de escalamiento de la función de momentos, el cual se estima mediante la regresión lineal en el espacio log-log de la relación entre $M_q(r)$ y r , para cada valor del momento estadístico, q .

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Espectro de Fourier y Función de Escalamiento de Momentos

En la Figura 2 se muestra la distribución de la intensidad de la precipitación y su ubicación espacial en dos sistemas convectivos de mesoescala (SCM), desarrollados sobre océano y continente, durante los días 27 y 28 de mayo de 1998, respectivamente. A partir de esta información se estimó el espectro espacial de Fourier y la función de momentos sobre un rango determinado de escalas, que oscila entre los números de onda $k = 1/4,3 \text{ km}$ y $1/138 \text{ km}$. El espectro de potencias estimado para cada uno de estos eventos es mostrado en la Figura 3. El valor estimado para el exponente de escalamiento del espectro de Fourier de los eventos mostrados en la Figura 3 es de $\hat{\alpha}=3.0$ (océano) y $\hat{\alpha}=2.69$ (continente), en el rango de escalas entre 4.3 km y 69 km . Estos altos valores de b son consistentes con los valores estimados para tormentas dominadas fundamentalmente por la convección profunda (Harris et al., 1996). Es notable la diferencia entre ambos exponentes de escalamiento, lo que sugiere la existencia de una diferente dinámica en la organización de la convección sobre el océano, con mayor correlación espacial, en comparación con la dinámica sobre el continente, menos correlacionada espacialmente. Esto sugiere que el campo de precipitación sobre el océano exhibe mayor organización espacial que sobre tierra, lo cual se explica en términos de la mayor homogeneidad de la superficie oceánica, y una capa límite menos profunda en comparación con la influencia del terreno que es mas heterogéneo y rugoso, lo cual impone una condición mas irregular a la convección profunda, dando lugar a campos de precipitación mas irregulares (aleatorios) en el espacio.

En la parte superior de la Figura 4 se muestran los resultados de la estimación de la función de escalamiento de momentos para los dos eventos mostrados en la Figura 2. En la parte inferior de la Figura 4 se muestra el valor de los exponentes $\tau(q)$ contra el orden q . Es claro que $\tau(1) = 0$ ya que la media incondicional del campo entero es independiente de la escala. Los valores empíricos de $\tau(q)$ se contrastan contra la línea teórica que define el escalamiento simple. Para la casi totalidad de los eventos con SCM estudiados se encontró que los valores empíricos se desvían significativamente (intervalos de

confianza del 95%) de la línea teórica que denota escalamiento simple, a partir del momento de orden $q=3$. Por tanto, es posible rechazar esta hipótesis, y sugerir la presencia generalizada de escalamiento múltiple en la variabilidad espacial de los eventos asociados con SCM. Los intervalos de confianza fueron estimados a partir de

los valores de la cola de la distribución *t-student* para cada uno de los momentos de orden q y la escala espacial con una confiabilidad del 95%. Una conclusión generalizada indica que los eventos sobre el continente muestran más desviación respecto a la línea teórica que los eventos que suceden sobre el océano.

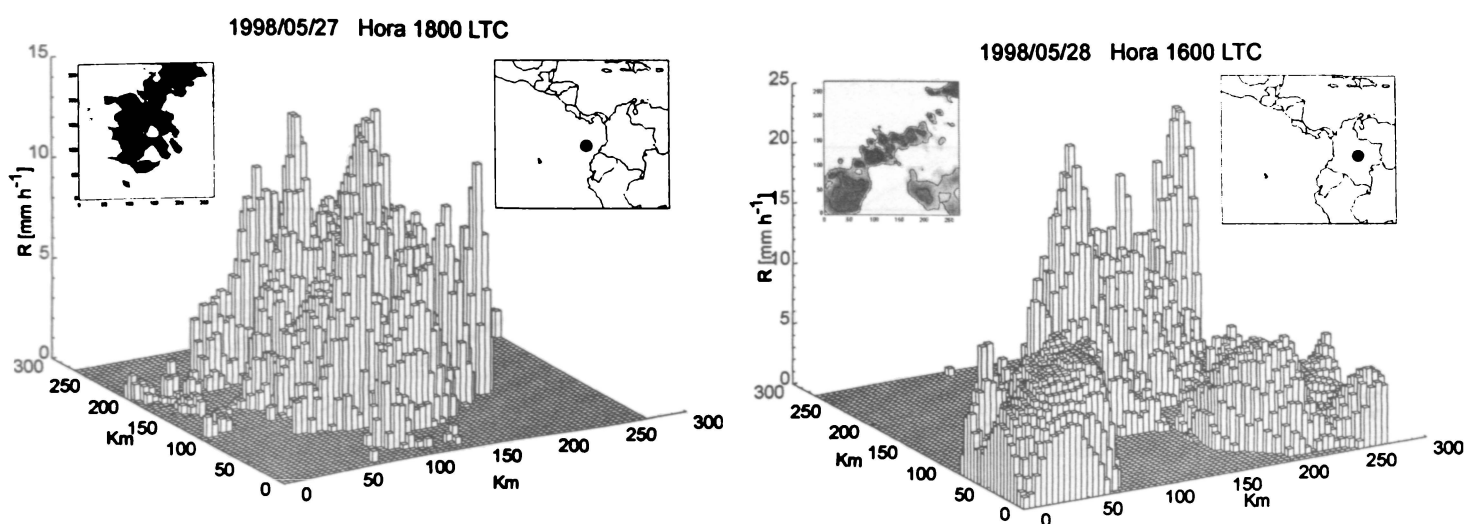


FIGURA 2. Distribución bi y tri-dimensional de la intensidad de la lluvia (R) en SCM y su localización en la región de estudio, para dos sistemas ocurridos sobre el océano (arriba) y continente (abajo), ocurridos durante los días 27 y 28 de mayo de 1998, respectivamente

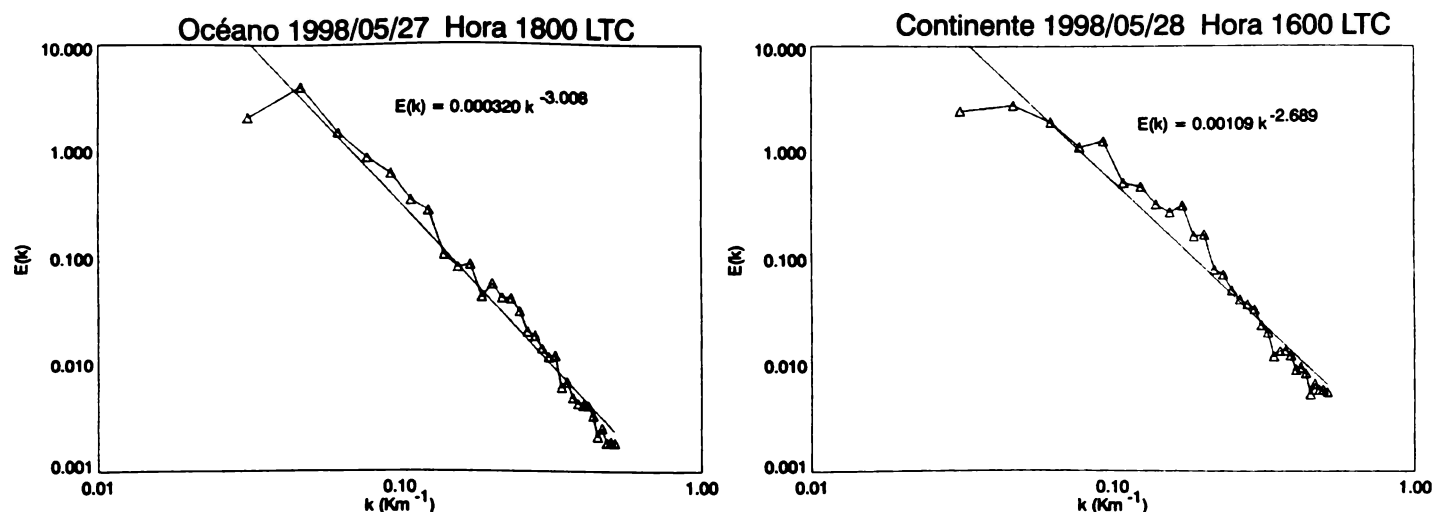


FIGURA 3. Espectro de potencias isotrópico de Fourier para los eventos mostrados en la Figura 2. A la izquierda para el evento sobre el océano y, a la derecha, sobre tierra. Los valores estimados de α son 3.008 y 2.689, respectivamente.

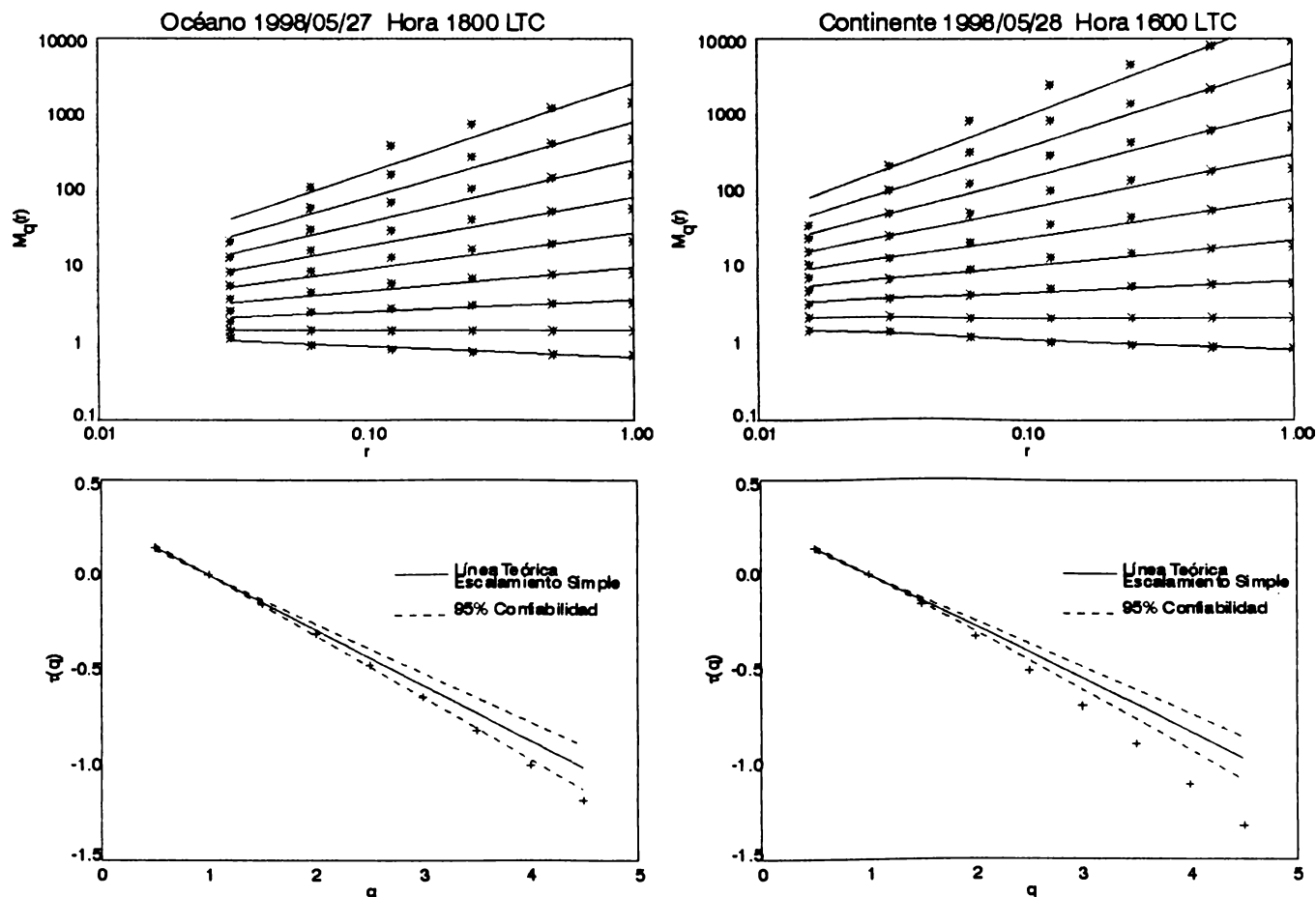


FIGURA 4. (Arriba) Escalamiento de la función marginal de momentos ($q = 0.5, 1, \dots, 4.5$) para los eventos sobre océano (izquierda) y sobre tierra (derecha), mostrados en la Figura 1. La línea sólida es ajustada mediante regresión de mínimos cuadrados. (Abajo) Función $t(q)$ vs. q para los valores empíricos y predichos suponiendo escalamiento simple, las líneas a rayas indican el ajuste de escalamiento simple con sus intervalos de confianza de 0.95.

3.2. Relación con la teoría de cascadas aleatorias

Como lo sugieren Over y Gupta (1994), es posible establecer una relación entre los patrones espaciales de la lluvia y el forzamiento de gran escala a partir de un solo parámetro, p , que aparece en el contexto de la teoría de cascadas aleatorias. Aquí se utiliza la intensidad promedio (R) de cada imagen de 64×64 píxeles, como el parámetro de gran escala, el cual resume las condiciones del ciclo diurno de calentamiento y humedad (Cotton y Antes, 1989). El parámetro p representa la distribución espacial de la fracción del SCM que presenta píxeles con intensidad de lluvia mayor que cero (con lluvia) o sin lluvia, y está más relacionado con la tasa promedio del

crecimiento de la fracción con lluvia o sin lluvia en las diferentes escalas espaciales analizadas. Los menores valores de p se asocian a menores tasas de crecimiento de las regiones sin lluvia o ceros. El parámetro p puede estimarse mediante la función (Over y Gupta, 1994),

$$\hat{p} = 1 - b^{-s/d}$$

donde b es el número de particiones de la cascada multiplicativa (4 en este caso), d la dimensión del espacio del campo aleatorio (2 en este caso) y s es el valor estimado de la pendiente en la regresión lineal entre $\log f(r)$ vs. $\log r$, y siendo $f(r)$ la fracción de área con lluvia para la escala r .

En la Figura 5 se muestra la fracción de área con lluvia para las diferentes escalas de los eventos mostrados en la Figura 2. Para cada SCM se estimó un valor de $p=0,17$ sobre el océano y $p=0,237$ sobre el continente. Los resultados encontrados para p y b sugieren que a menor

valor de p , los campos de lluvia son más correlacionados. La relación estimada entre p y R para todos los eventos con SCM encontrados para 1998 se muestra en la Figura 6. Allí se denota la relación lineal inversa existente entre p y R .

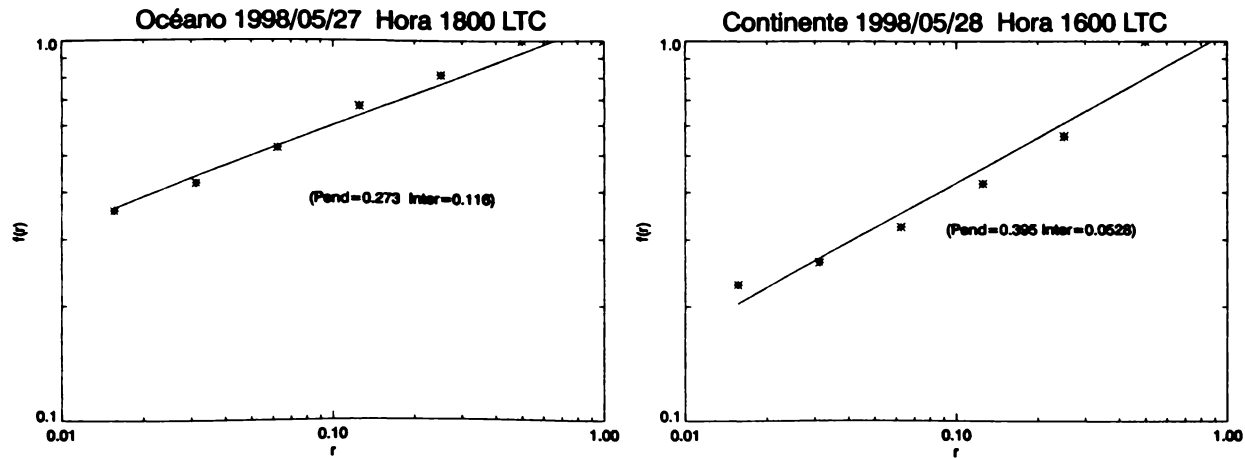


FIGURA 5. Escalamiento de la función de área con lluvia, $f(r)$, para los SCM mostrados en la Figura 1.

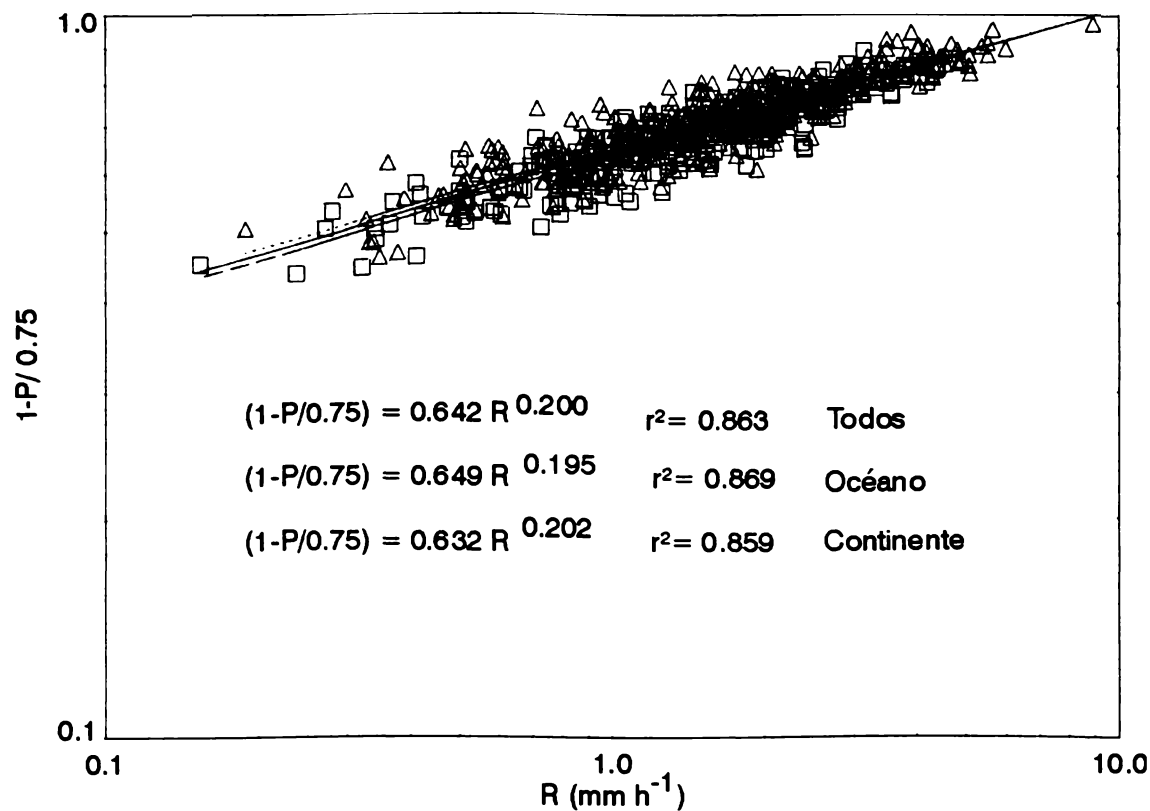


FIGURA 6. Relación entre el parámetro p y el valor de la intensidad promedio de la precipitación, R . Las funciones representan el ajuste lineal entre $\log(1-p/0.75)$ vs. $\log R$. Se muestran los ajustes para todos los SCM, así como para los ocurridos sobre océano y continente.

En la Tabla 1 se distinguen diferencias sustanciales entre los eventos ocurridos sobre el océano y sobre el continente. Aunque p no mide directamente la fracción promedia de área sin lluvia a una escala determinada, tal parámetro indica que la tasa de crecimiento regiones sin lluvia es mayor en promedio sobre el continente que sobre el océano. Esto confirma nuevamente la gran diferencia existente entre los procesos tierra-atmósfera, fuertemente influenciados por la topografía y la vegetación, en comparación con la interacción de los procesos océano-atmósfera. Al mismo tiempo las pendientes del espectro isotrópico de potencias de los SCM formados sobre el océano sugiere que los campos de precipitación son sutilmente menos rugosos en el espacio bidimensional y

que poseen una estructura espacial más correlacionada que los campos de los SCM ocurridos sobre el continente.

El ciclo anual promedio de los valores de p , b y R para 1998 se muestra en la Figura 6 (a), (b) y (c), respectivamente. Allí se observa que los valores de p son mayores sobre el continente que sobre el océano y los valores de b son mayores para el océano que para la lluvia sobre tierra, en casi todo el año. No es clara la relación con la variación anual de la intensidad promedio de los eventos con SCM. Sin embargo, se destaca la fuerte fluctuación de p sobre el océano en las épocas de mayo-junio y de septiembre-octubre.

TABLA 1. Valores de la media y la desviación estándar de la intensidad media en los eventos con SCM, tasa promedio de la tasa de crecimiento de la fracción con lluvia, p , y la pendiente promedio del espectro de potencias isotrópico, b , para eventos ocurridos sobre el océano y el continente.

	Todos		Sobre Océano		Sobre Continente	
	Media	Desv. Est.	Media	Desv. Est.	Media	Desv.Est.
R	1.776	1.036	1.878	1.118	1.608	0.860
p	0.222	0.068	0.212	0.068	0.239	0.065
β	-2.871	0.336	-2.873	0.328	-2.867	0.350

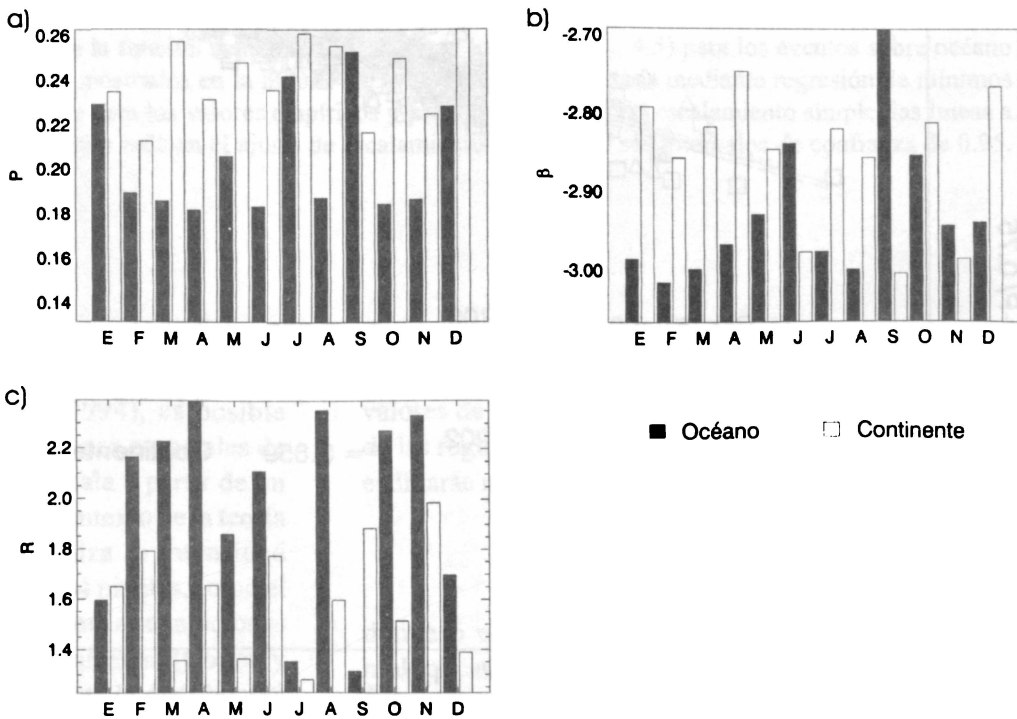


FIGURA 7. Ciclo anual durante 1998 de: (a) parámetro p , (b) exponente de escalamiento ($-b$), y (c) intensidad promedio de la precipitación, R , para los eventos clasificados con SCM. Las barras negras muestran los promedios mensuales de los eventos ocurridos sobre el océano y blancas para los ocurridos sobre el continente.

4. CONCLUSIONES

Basados en la información de la misión TRMM se estudian propiedades de escalamiento espacial de los campos de precipitación con Sistemas Convectivos de Mesoescala sobre Colombia y el Pacífico oriental. Para la cuantificación se emplea el espectro de Fourier bidimensional y el análisis de la función de escalamiento de los momentos estadísticos. Se encuentra que los campos de intensidad de precipitación exhiben espectros de Fourier con ley de decaimiento potencial, $E(k) = ck^{-\hat{a}}$, donde k es el número de onda, c es el prefactor y \hat{a} es el exponente de escalamiento. Los valores promedio de los estimados de \hat{a} exhiben valores ligeramente mayores sobre el océano ($\hat{a}=2,87$) que sobre el continente ($\hat{a}=2,867$), lo cual refleja las diferencias de la dinámica de organización espacial de la convección sobre océano y tierra, con mayor correlación espacial sobre el océano. La estructura espacial de los campos de precipitación exhibe propiedades de escalamiento múltiple de la función de momentos, y se observan diferencias en los patrones de escalamiento estadístico de la convección profunda de los eventos ocurridos sobre océano y sobre el continente. Una conclusión general indica que los eventos sobre el continente muestran una mayor desviación con respecto al escalamiento simple, que los eventos que se desarrollan sobre el océano. Se identifican diferencias significativas en los valores promedio de la intensidad espacial de las tormentas, R , con valores de de 1,878 y 1,608, sobre océano y continente, respectivamente. En forma similar, se encuentran diferencias significativas en el parámetro p , el cual relaciona la tasa promedio del crecimiento de la fracción del área cubierta por las regiones con lluvia o sin lluvia dentro de la tormenta, en las diferentes escalas espaciales, con valores promedio de 0,21 (océano) y 0,24 (continente). La relación estimada entre p y R es inversamente lineal entre océano y continente. El ciclo anual promedio de los valores de p , b y R permite concluir que el valor de p es mayor sobre el continente que sobre el océano, y que el valor de b es menor sobre el continente que sobre el océano a lo largo de todo el año. No es clara la relación con la variación anual de la intensidad promedio de los eventos con SCM. El valor de p sobre el océano exhibe fuertes fluctuaciones en las épocas de mayo-junio y de septiembre-octubre.

Las propiedades de escalamiento espacial de los SCM examinadas a partir de la tasa de crecimiento de zonas sin lluvia, tanto sobre el océano y el continente, sugieren

que los análisis de desagregación a partir de modelos de cascadas multifractales son totalmente dependientes de las condiciones existentes de gran escala, así como de la naturaleza oceánica o terrestre de los SCM y de la época del año. Las diferencia existente entre los procesos tierra-atmósfera y océano atmósfera causan una dinámica de organización diferente de la precipitación dentro de los SCM.

Los métodos estadísticos usados en este trabajo y en particular los exponentes de escalamiento estimados para los campos de lluvia con SCM, pueden ser usados para construir una metodología de desagregación de la lluvia usando procesos de cascadas multiplicativas que reproduzcan la función de estructura de los datos obtenidos mediante percepción remota.

Los análisis mostrados en este trabajo proveen un diagnóstico importante de las características estadísticas de la distribución espacial de tormentas en SCM. Estos resultados estadísticos deberán servir de campo de prueba para modelos de precipitación en la meso-escala y para la desagregación de modelos hidrológicos de gran escala, para la parametrización de procesos hidrológicos de superficie.

Un problema abierto muy importante en este análisis tiene que ver con la interpretación física de las propiedades de multiescalamiento e intermitencia encontrados en los campos bidimensionales de Sistemas Convectivos de Mesoescala. Los resultados obtenidos deben servir de base para el desarrollo de una gran variedad de análisis de escalamiento de la lluvia oceánica y terrestre sobre América tropical. Estos análisis proporcionarán una herramienta de diagnóstico para probar modelos dinámicos, tales como el desarrollado por Mapes et al. (2003a y b) y por Nordstrom y Gupta (2003). Otra aplicación práctica se relaciona con el uso de los campos de precipitación en los modelos numéricos de predicción como variable de entrada para los modelos hidrológicos distribuidos de lluvia-escurrentía. Estos modelos hidrológicos presentan los mayores problemas en cuencas pequeñas y en esta dirección lo primero por resolver es como atar los resultados obtenidos separadamente acerca de las propiedades estadísticas en el tiempo (Deidda et al., 1999; Wilchez, 2001) y en el espacio y poder así aplicar el modelo de desagregación espacio-temporal de la precipitación.

La influencia del flujo sinóptico sobre la topografía podría ser explicada con los campos resultantes de precipitación. Sin embargo, existen diversos y complejos mecanismos que perturban este análisis y comúnmente, la circulación de viento local y sinóptico, son variables dependientes en los análisis y predicciones. Muchos mecanismos pueden ser propuestos para explicar la influencia del flujo sinóptico sobre las circulaciones locales y la topografía pero estos efectos son difíciles de cuantificar si no se cuenta con herramientas observacionales para investigar los detalles de su interacción. La asociación de los SCM con los ambientes atmosféricos de gran escala que favorecen y propician su formación, proporciona un cuadro más claro de los procesos implicados y revela las características fundamentales del sistema climático.

Debido a la resolución temporal y espacial de la información atmosférica de gran escala, el análisis aquí presentado está condicionado a la calidad de la información y de la clasificación de organización convectiva basada en la información de la misión TRMM. Se espera que los resultados obtenidos en el presente trabajo sean de utilidad en el desarrollo de modelos de circulación tropical y en la interacción entre la convección y la dinámica.

5. RECONOCIMIENTOS

Los datos usados en este trabajo provienen de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical («Tropical Rainfall Measuring Mission», TRMM), cuyos algoritmos fueron desarrollados por el Equipo Científico de TRMM. Los datos fueron procesados por el Sistema de Información y Datos Científicos de TRMM (TSDIS), los cuales son almacenados y distribuidos por el Goddard Distributed Active Archive Center (DAAC). TRMM es un proyecto internacional apoyado conjuntamente por la Agencia de Desarrollo Espacial de Japón (NASDA) y por la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA), Oficina de Ciencias Terrestres. Esta investigación contó con el apoyo de la Dirección de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín (DIME), de Colciencias, y del Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Climático (IAI). Se agradecen los aportes de V. K. Gupta y B. Mapes, así como del personal de DAAC de NASA.

6. BIBLIOGRAFIA

- Austin P. H. y Houze R. A., 1972. Analysis of the structure of precipitation patterns in New England, *Journal of Applied Meteorology*, 11, 926-35.
- Barry R. y Carleton A., 2001. *Synoptic and Dynamic Climatology*, Routledge.
- Cotton W. y Anthes R., 1989. *Storm and Cloud Dynamics*, International Geophysics Series, Vol. 44.
- Deidda R., Benzi R. y Siccaldi F., 1999. Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall, *Water Resources Research*, 35, 1853-1867.
- Frisch, U., 1995. *Turbulence. The Legacy of A. N. Kolmogorov*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Gupta V. K. y Waymire E. C., 1990. Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions, *Journal of Geophysical Research*, 95 (D3), 1999-2010.
- Gupta V. K. y Waymire E. C., 1993. A statistical analysis of mesoscale rainfall as a random cascade, *Journal of Applied Meteorology*, 32, 251-267.
- Harris D., Foufoula-Georgiou E., Droegemeier K. y Levitt J., 2000. Multi-Scale statistical properties of a high-resolution precipitation forecast, *Journal of Hydrometeorology*, 2, 406-418.
- Kolmogorov A. N., 1941. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluids for very large Reynolds numbers, *Doklady Akademii des Sciences de l'URSS*, 30, 301-305.
- Korvin G., 1992. *Fractal Models in the Earth Sciences*, Amsterdam, Elsevier.
- Kummerow C. W., Barnes W., Kosu T., Shiue J. y Simpson J., 1998. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 15, 809-817.
- Lovejoy S., y Schertzer D., 1987. Physical modeling and analysis of rain and clouds by anisotropic scaling multiplicative processes, *Journal of*

- Geophysical Research, 92 (D8), 9693-714.
- Mandelbrot B. B., 1998. Multifractals and $1/f$ noise. Wild self-affinity in Physics (1963-1976), Selecta Volume N, Springer-Verlag, New York, 442 pp.
- Mapes B. E., Warner T. T., Xu M. y Negri A., 2003a. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part I: Observations and context, Monthly Weather Review, 131, 799-812.
- Mapes B. E., Warner T. T., Xu M. y Negri A., 2003b. Diurnal patterns of rainfall in Northwestern South America. Part III: Diurnal gravity waves and nocturnal convection offshore, Monthly Weather Review, 131, 830-844.
- Menabde M., Veitzer S. A., Gupta V. K. y Sivapalan M., 2001. Tests of peak flow scaling in simulated self-similar river networks, Advances in Water Resources, 24, 991-999.
- Mesa O. J. y Poveda G., 1993. The Hurst effect: The scale of fluctuation approach, Water Resources Research, 29, 3995-4002.
- Nordstrom K. M. y Gupta V. K., 2003. Scaling statistics in a critical, nonlinear physical model of tropical oceanic rainfall, Nonlinear Processes in Geophysics, 10, 1-13.
- Olsson J. y Niemczynowicz J., 1996. Multifractal analysis of daily spatial rainfall distributions, Journal of Hydrology, 187 29-43.
- Over T. y Gupta V. K., 1994. Statistical analysis of mesoscale rainfall: Dependence of a random cascade generator on large-scale forcing, Journal of Applied Meteorology, 33, 1526-1542.
- Poveda G. y Salazar L. F., 2004. Annual and interannual (ENSO) variability of spatial scaling properties of a vegetation index (NDVI) in Amazonia, Remote Sensing of Environment, En imprenta.
- Theon J. S., 1992. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). The global role of tropical rainfall, Hampton, International Symposium on Aqua and Planet, Tokai University, Virginia (USA).
- Turcotte D. L., 1997. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics, Cambridge, Cambridge University Press.
- Waymire E., Gupta V. K. y Rodriguez-Iturbe I., 1984. A spectral theory of rainfall intensity at the meso-b scale, Water Resources Research, 20, 1453-65.
- Wilchez S., 2001. Tesis de Grado. Magíster en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos.
- Yano J.-I., Fraedrich K. K. y Blender R., 2001. Tropical convective variability as $1/f$ noise, Journal of Climate, 14, 3608-3616.
- Zuluaga M. D. y Poveda G., 2004. Sistemas convectivos de mesoescala en Colombia y el Pacífico oriental durante 1998-2002 según la misión TRMM, Avances en Recursos Hidráulicos, En este número.

