

## VARIABILIDAD DE LOS APORTES A LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DURANTE UN CICLO ANUAL EN LOS BANCOS DE SALMEDINA

*Gladys Bernal<sup>1</sup>, Alejandro Velásquez<sup>1</sup>, Iván Vargas<sup>1</sup>, Ana Cristina Agudelo<sup>1</sup>, Carlos Alberto Andrade<sup>2</sup>, Juan Gabriel Domínguez<sup>2</sup>, Constanza Ricaurte<sup>2</sup> y Gisela Mayo<sup>2</sup>*

*1 Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. Universidad Nacional, Sede Medellín. AA 1027. Cra 80 No. 65-223. gbernal@unal.edu.co*

*2 Grupo GIO Escuela Naval Almirante Padilla*

### RESUMEN

Con el fin de entender los procesos de sedimentación en los Bancos de Salmedina durante el ciclo anual, tres trampas cilíndricas de sedimentos fueron instaladas sobre las mesetas arrecifales de los Bancos a una profundidad promedio de 8.5 m. Los cilindros fueron recolectados mensualmente entre julio de 2003 y septiembre de 2004. El contenido de las trampas fue analizado según su composición total y la composición de las partículas calcáreas biogénicas de la fracción arenosa. Los resultados fueron comparados con mediciones de parámetros ambientales en el área a lo largo del mismo período de tiempo. Se presenta un análisis de las variables sedimentológicas con énfasis en los aportes terrígenos y los porcentajes relativos de los componentes calcáreos, en relación con la localización y los parámetros físicos. Se encontró que la totalidad de la sedimentación, incluidos los aportes terrígenos, se concentró en la época seca. Tanto la temperatura como la sedimentación son factores de tensión para el desarrollo coralino en esta localidad.

**PALABRAS CLAVE:** Arrecifes, Caribe colombiano, Trampas de sedimentos, Ciclo anual.

### ABSTRACT

**Sediment supply variability during an annual cycle in Salmedina Reef Banks.** To understand sedimentation processes at Salmedina Reef Banks during the annual cycle, three cylindrical sediment traps were installed on the flat top of the reef Banks at mean depth of 8.5 m. Cylinders were collected monthly between July, 2003 and September, 2004. The trap content was analyzed by bulk composition and the composition of biogenic calcareous particles from the sand fraction. Results were compared with environmental parameters of the area through the same time span. Sedimentological variables were analyzed with emphasis on terrigenous supply and relative percentages of calcareous components related to location and physical parameters. It was found that the totality of sedimentation, terrigenous contribution included, was concentrated during the dry season. Both temperature and sedimentation are stress factors for coral development at this place.

**KEY WORDS:** Reefs, Colombian Caribbean, Sediment traps, Annual cycle.



## INTRODUCCIÓN

En general los arrecifes coralinos habitan zonas con alta visibilidad (Hoitink, 2004) y energía (James, 1983), ya que altos niveles de turbidez son nocivos para el crecimiento de los corales (Dodge y Vaisnys, 1980; Hoitink, 2004; Wolanski *et al.*, 2003). De hecho, una de las posibles explicaciones sobre la preferencia de los arrecifes coralinos por medios agitados de frente al oleaje es que el movimiento del agua ayuda al ecosistema a evacuar sedimentos finos (tanto autóctonos como alóctonos) que son intolerables para las especies constructoras del arrecife (James, 1983).

De acuerdo con Wolanski *et al.* (2003), aunque los corales tienen mecanismos de defensa contra la sedimentación, principalmente la producción de, cuando la sedimentación en cortos períodos de tiempo es muy alta (4-5 mg/cm<sup>2</sup>) o cuando los agregados de partículas por floculación son muy grandes (>200 $\mu$ ) los corales exudan gruesas capas de mucus y terminan muriendo. Los agregados por floculación se producen precisamente cuando el mucus exudado por los corales, que tiene una alta flotabilidad, atrapa partículas de lodo en suspensión que actúan como un lastre haciendo que los agregados se depositen sobre los corales y afecten principalmente a las colonias jóvenes y al reclutamiento de nuevas larvas. La presencia de nieve marina lodosa en el coral suele ser corta ya que resulta de eventos particulares (inundación de ríos o resuspensión en tormentas) y termina siendo consumida por el plancton o los organismos del mismo arrecife, o llevada fuera por olas y corrientes, pero deja atrás un arrecife degradado. El papel del mucus coralino no es únicamente como defensa para la sedimentación. Recientemente se ha encontrado que los corales exudan cerca de la mitad del carbono asimilado por su zooxantela como mucus, con el cual establecen un ciclo de nutrientes que soporta la vida bentónica dentro del ecosistema y reduce pérdidas de energía (Wild *et al.*, 2004).

La temperatura es otro factor físico que puede afectar la salud de los arrecifes coralinos. El principal efecto del aumento de temperatura es el rompimiento de la simbiosis entre el coral y su zooxantela, que origina blanqueamiento (Veron, 1995). Este blanqueamiento puede llegar a ser mortal por lo cual hay una alerta mundial sobre los efectos del calentamiento global en los arrecifes coralinos (Reyes-Bonilla, 1993; Lough, 2001).

Para entender los procesos de largo plazo en un ecosistema arrecifal es importante entonces analizar los efectos particulares de los dos principales tensores ambientales, la temperatura y la sedimentación. En los Bancos de Salmedina hay muy poca información sobre estos dos factores y por tanto, tras un análisis de las temperaturas a largo plazo, se trató de entender el efecto de la sedimentación en los corales. Con este fin se anclaron tres trampas cilíndricas de sedimentos que se recolectaron cada mes durante 15 meses entre julio de 2003 y septiembre de 2004. En este artículo se presentan los resultados obtenidos de los análisis del contenido de las trampas de sedimentos y su relación con los

parámetros oceanográficos de este ciclo anual. El estudio se concentró sobre el componente particulado mayor a  $125 \mu$  en las trampas, que permitió establecer la variabilidad anual de los componentes biogénicos arrecifales, de gran importancia en la ecología del arrecife y en la producción de sedimentos de la zona costera. También se intentó establecer el comportamiento de los sedimentos terrígenos sobre las mesetas arrecifales, con el fin de entender este componente, peligroso para la salud del ecosistema en Salmedina.

## ÁREA DE ESTUDIO

Los Bancos de Salmedina son formaciones arrecifales sobre un domo diapírico en la Plataforma Continental Caribe colombiana, conformados por tres bajos principales, denominados de Oeste a Este Burbujas, Salmedina e Ygio, y dos bajos menores separados del Bajo de Salmedina por canales poco profundos, denominados Ukura y Kubina (Ricaurte *et al.*, 2004; GIO, 2005). Están ubicados en una zona de transición sedimentológica de la plataforma, que pasa desde sedimentos netamente terrígenos al norte, hacia sedimentos con un componente calcáreo importante al sur (Verette, 1985). Se pueden identificar tres fuentes de sedimentos superficiales: (1) el propio arrecife, que genera principalmente sedimentos calcáreos; (2) los aportes continentales de los ríos que drenan al Caribe central (principalmente el Magdalena) y aportan sedimentos terrígenos; y (3) una fuente interna, del volcán de lodo del bajo Burbujas (Ricaurte *et al.*, 2004; GIO, 2005) que también aporta sedimentos terrígenos.

En los bancos de Salmedina la cobertura de coral vivo es variable. Durante esta investigación se determinó que en la meseta arrecifal de Salmedina es del 10%, en los cantiles 33%, en el volcán de lodo de Burbujas 0% y en los bancos Ukura y Kubina 55% (GIO, 2005). La cobertura de coral vivo puede estar afectada por un aumento en las temperaturas superficiales del mar, un aumento en la sedimentación terrígena continental o un efecto combinado de ambas. La zona de la plataforma continental central del Caribe colombiano ha sufrido un proceso de calentamiento intenso durante las últimas décadas. Para la plataforma continental al frente de Morrosquillo la serie de tiempo mensual de temperatura superficial del mar entre 1982 y 2000 de la base de datos de Reynolds y Smith (COADS No. 277, Reynolds y Smith, 1994), indica un aumento neto en la temperatura de  $0.6^{\circ}$ , (Bernal *et al.*, 2006), significativa al 95% según las pruebas T, Mann-Kendall y Sen, de tendencia lineal (Figura 1). Por su parte, los procesos de sedimentación no han sido estudiados en los Bancos de Salmedina, pero en las Islas del Rosario, 20 km al sur, se ha documentado cómo gran parte del proceso de degradación de los corales es debido a este factor, por los aportes del canal del Dique (Ramírez *et al.*, 1986; Leble y Cuignon, 1987; Díaz, 2000; Cendales *et al.*, 2002). Además, en los alrededores del volcán de lodo del bajo Burbujas la ausencia de corales puede ser atribuida completamente a la sedimentación de los lodos diapíricos en este lugar (Ricaurte *et al.*, 2004; GIO, 2005).

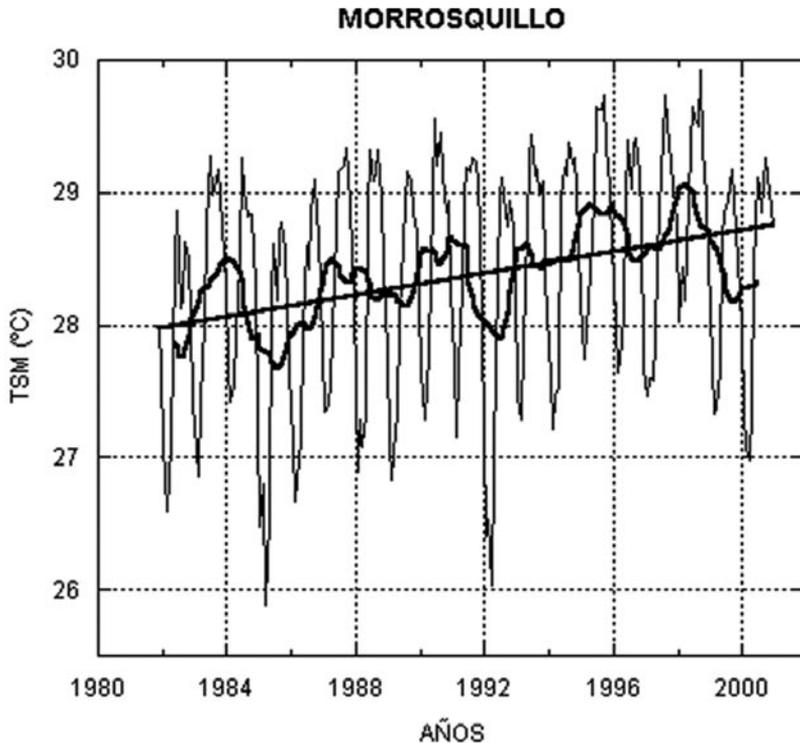


Figura 1. Serie de tiempo de temperatura superficial del mar (TSM) en un cuadrante de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  al frente del Golfo de Morrosquillo entre 1982 y 2000 según la base de datos de Reynolds y Smith (COADS, DS 277). Se presenta un promedio corrido de 12 meses para filtrar el ciclo anual y la tendencia de largo plazo (significativa al 95%).

La sedimentación sobre los Bancos de Salmedina es principalmente biogénica calcárea con excepción del volcán de lodo del bajo Burbujas y los sedimentos periarrecifales. En los sedimentos superficiales de las mesetas arrecifales de los Bancos el porcentaje de terrígenos es menor de 6% y se presenta principalmente en las fracciones finas ( $< 150 \mu$ ), siendo menor del 1% en las fracciones superiores. Entre los componentes calcáreos mayores a  $150 \mu$  los fragmentos de coral, algas y conchas constituyen la mayor parte del sedimento. También se presentan significativamente algas calcáreas, moluscos, foraminíferos, espículas de esponja y escleritos (GIO, 2005).

En términos generales el Caribe colombiano está sujeto a dos épocas climáticas bien definidas. Un período seco (diciembre-abril) caracterizado por fuertes vientos alisios del NE que generan fuerte oleaje en las costas, inhiben la contracorriente de Panamá, deflectan la pluma del Magdalena hacia el SW, generan fuerte transporte litoral hacia el SW e inhiben la salida de las aguas del canal del Dique hacia fuera de las bahías de Cartagena y Barbacoas. Y un período húmedo (mayo-noviembre) caracterizado por lluvias, la salida de aguas del canal del Dique hacia la plataforma continental y una

contracorriente de Panamá fuerte y superficial en toda la costa Caribe colombiana. (Leble y Cuignon, 1987; Andrade y Thomas, 1988; Orejarena *et al.*, 2004). En la mitad del período húmedo (julio-agosto) se presenta un pequeño período seco conocido como el veranillo de San Juan.

En Salmedina se midieron las condiciones climáticas y oceanográficas entre julio de 2003 y septiembre de 2004 (Orejarena *et al.*, 2004). Se encontró que la temperatura superficial del mar y la salinidad son contrarias. Entre junio y noviembre las aguas fueron cálidas y poco salinas. El veranillo se nota en la serie de temperaturas superficiales, que mostró un mínimo en junio del 2004 pero no se nota en la serie de salinidad. Los vientos medidos fueron muy irregulares, mientras que la altura de la ola si presentó un patrón estacional claro, con valores mayores a 1.2 m de noviembre a febrero (época seca) y menores el resto del año. La transparencia del agua no presentó patrón estacional. La nubosidad en cambio fue menor de 4 octas de octubre de 2003 a mayo de 2004 y mayor el resto del año. La turbidez y la clorofila estuvieron muy relacionadas y mostraron alta variabilidad con intervalos amplios de septiembre a marzo y estrechos de mayo a octubre.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Tres trampas de sedimento fueron instaladas sobre las mesetas arrecifales de los bajos Burbujas y Salmedina a profundidades promedio de 8.5 m. Las trampas son de tipo cilíndrico con una relación diámetro:largo de 1:5 (10 cm de diámetro por 50 de largo) que garantiza la permanencia del sedimento dentro de la trampa (Rodríguez-Ramírez y Garzón-Ferreira, 2003; Hodgson, 1993), están sujetas a una varilla y a un hexápodo de concreto a manera de muerto. La parte superior del cilindro queda a 2 m del piso oceánico con el fin de aislar las trampas de procesos de fondo.

Las trampas se ubicaron de la siguiente forma (Figura 2): una en el Bajo Burbujas (B: 10°22'52"N, 75°41'16"W) y dos en el Bajo Salmedina, una de ellas en la parte Norte (N: 10°22'58"N, 75°38'48"W) y la otra en la parte Sur (S: 10°22'15"N, 75°39'07"W). Las tres a profundidades similares con el fin de que las mediciones fueran comparables. Su distribución se escogió de tal forma que puedan contrastarse procesos sedimentarios al W y E en los dos Bajos principales (Burbujas y Salmedina) y al N y S en el Bajo de Salmedina.

Las trampas fueron instaladas el 28 de junio de 2003 y a partir de ahí se recogieron mensualmente. La recolección consistió en tapar el cilindro y reemplazarlo por uno nuevo. El material recogido se filtró y se secó a 50° durante 12-24 horas. Los organismos grandes que representarían una sobreestimación del peso de sedimento (moluscos mayores a 5 mm, algunos cangrejos y en uno de los casos un pez) fueron separados y se registró el peso de organismos y sedimento seco.

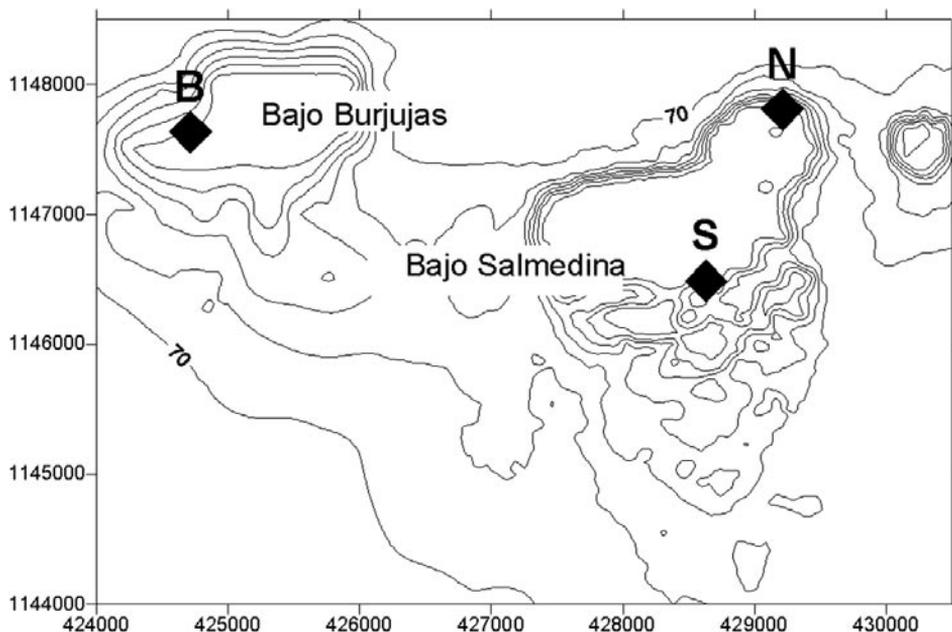


Figura 2. Ubicación espacial de las trampas de sedimentos en los Bajos de Salmedina y Burjujas (coordenadas UTM).

Del sedimento se separaron dos fracciones, una para análisis de composición química general y otra para análisis particulado. La fracción para análisis de composición química se maceró y fue analizada para obtener porcentaje de calcita y materia orgánica a través de ataques en secuencia con ácidos (Baba, 1991), con una precisión del 2%. La diferencia de estas dos fracciones para el 100% es el contenido de terrígenos más ópalo biogénico y quitina. La fracción para análisis particulado se tamizó en húmedo con malla de  $63 \mu$ , y se pesó en seco para calcular el porcentaje de arenas (índice granulométrico). La fracción arenas se separó en tamices de  $63$ ,  $125$ ,  $250$  y  $500 \mu$ . En las fracciones mayores a  $125 \mu$  se hicieron conteos de partículas. Se contaron entre 250 y 450 partículas por muestra para obtener los porcentajes de los tipos de material particulado total.

Se consideraron las siguientes partículas: terrígenos (cualquier mineral que representa aporte continental); fragmentos carbonatados; fragmentos de concha; algas calcáreas (*Halimeda*); briozoos; gastrópodos; bivalvos; foraminíferos planctónicos; foraminíferos béticos; ostrácodos; fragmentos de cangrejo; escleritos (espículas de octocorales); espículas de esponja, de erizo y otras; detritos vegetales; algas verdes; restos de copépodos y anfípodos (material quitinoso); cuarzos bipiramidales y otros. El material de algas verdes fue muy abundante y afectó los conteos, pues no es comparable con las demás partículas. Su contenido fue hasta de 30 % en algunas muestras y en

promedio 12%. Los fragmentos de cangrejo fueron importantes en algunos casos (6%), especialmente donde se había separado especímenes en la primera etapa del trabajo. Para evitar estas dos fuentes de error en los porcentajes, se tomaron todos los componentes biogénicos calcáreos y se llevaron al 100% para los análisis de variabilidad espacial y temporal.

Los datos obtenidos en las trampas fueron convertidos a flujos de material (en g/cm<sup>2</sup>día para flujo total y composición química; y en número/cm<sup>2</sup>día para las partículas), teniendo en cuenta el área de la trampa y el número de días entre cada recolección. A través de un monitoreo quincenal de parámetros físicos en los Bancos (Orejarena *et al.*, 2004) se obtuvieron las siguientes variables para ser comparadas con los contenidos sedimentarios de las trampas: transparencia del agua, nubosidad, velocidad del viento, altura de ola, turbidez, clorofila a, temperatura superficial del mar (TSM) y salinidad. Como las trampas recogieron material durante todo el mes, se promediaron los valores de los parámetros físicos recolectados en cada mes (2 por mes) para las comparaciones de las variables.

Finalmente se trabajaron 53 variables (series de tiempo): 8 variables ambientales para la zona en general y 15 variables del material sedimentario por cada trampa. Las variables sedimentológicas de cada trampa consideradas fueron: flujo total de sedimentos carbonato de calcio, materia orgánica, terrígenos más ópalo biogénico y quitina (TeOb), terrígenos > 125 $\mu$ ; y porcentaje del material biogénico calcáreo > 125 $\mu$ : fragmentos calcáreos, fragmentos de conchas, gastrópodos, bivalvos, ostrácodos, foraminíferos planctónicos, foraminíferos bénticos, briozoos y escleritos.

Para una primera aproximación de las relaciones entre las variables, se hizo una matriz de correlación de la que se seleccionaron las correlaciones estadísticamente significativas al 95%. Se hizo un análisis sobre cuáles son las relaciones significativas de cada variable y cómo se relacionan las variables medidas en las trampas con las ambientales. Es importante notar que para la matriz de correlación se tomaron valores para los espacios de las series de la siguiente manera: La altura de ola y clorofila del mes de julio de 2003 se consideraron iguales a las del mes de julio del 2004. Turbidez es la serie menos confiable, pues julio, agosto y septiembre de 2003 se consideraron iguales al 2004, y octubre de 2004 se consideró el valor interpolado entre septiembre y noviembre. Esta forma de completar las series se justifica debido a que no existen otros datos medidos en la zona, y se espera que haya unos valores medios mensuales según una climatología, cerca de los cuales estarían los medidos. En las muestras de trampas faltantes por condiciones oceánicas adversas durante la recolección (28-08-03N, 3-03-04N y S) el peso total se consideró la mitad del peso recolectado en el mes siguiente (donde quedaron registrados 2 meses), mientras que los porcentajes se consideraron iguales que los del mes siguiente. En estos casos se supone una sedimentación relativamente constante en esos meses consecutivos.

## RESULTADOS

El flujo de sedimentos a las mesetas arrecifales de los Bancos de Salmedina calculado como los miligramos acumulados por  $m^2$  por día (Figura 3) indica un aumento en el flujo de partículas de diciembre a marzo, especialmente en Salmedina Norte (N) y

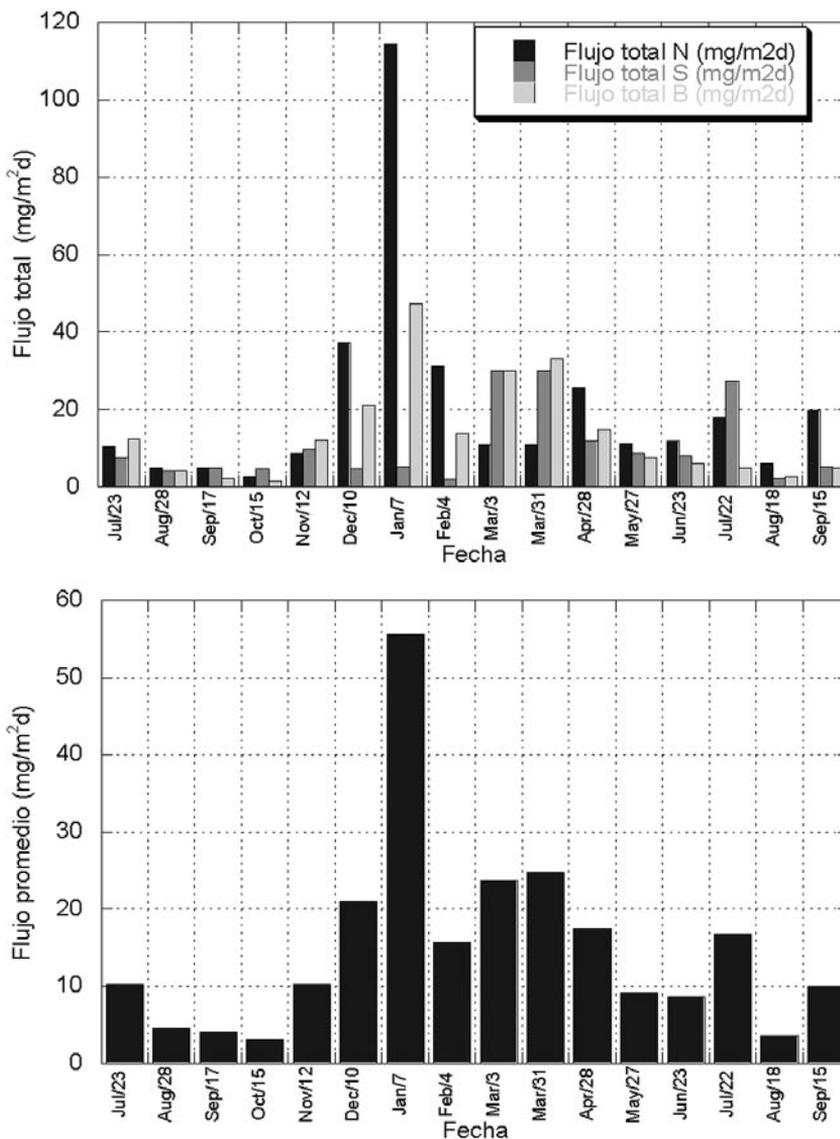


Figura 3. Flujo total de sedimentos (en  $mg/m^2$ día) sobre las mesetas arrecifales de los Bancos de Salmedina (superior) y flujo promedio de las tres trampas (inferior). En todos los casos N, S y B corresponden a las trampas localizadas en la figura 2.

Burbujas (B). En el Sur de Salmedina (S) el flujo aumentó en marzo y julio de 2004. El patrón temporal más claro y completo se midió en Burbujas. El flujo medio en las trampas fue de 20.6 mg/m<sup>2</sup>d para N, 10.45 mg/m<sup>2</sup>d para S y 13.7 mg/m<sup>2</sup>d para B.

Las variables ambientales que tuvieron mayor relación con el material particulado en las trampas fueron (Tabla 1): temperatura superficial del mar (mostró relaciones significativas con 9 variables sedimentológicas en las tres trampas), Viento (relaciones significativas con 7 variables sedimentológicas en las tres trampas), Salinidad (relaciones significativas con 7 variables sedimentológicas en las trampas S y B) y Altura de ola (relaciones significativas con 7 variables sedimentológicas en las tres trampas). La única variable ambiental no relacionada con los parámetros de sedimentación fue la clorofila.

Tabla 1. Principales correlaciones entre variables ambientales y variables sedimentológicas medidas en las trampas ( en negrilla los valores significativos al 95%).

	Transparencia	Nubosidad	Viento (nudos)	Altura ola	Turbidez	Clorofila a	TSM	Salinidad
Flujo total S (mg/m <sup>2</sup> d)	0.0	-0.3	0.5	0.3	0.3	-0.1	-0.5	0.4
Flujo total B (mg/m <sup>2</sup> d)	-0.4	-0.6	0.1	0.7	<b>0.5</b>	0.4	-0.7	<b>0.6</b>
Fte>125 N	-0.2	-0.4	0.6	<b>0.5</b>	0.4	0.0	-0.5	0.4
% Frag Concha N	0.2	0.1	0.6	0.1	-0.1	-0.5	0.0	0.1
% briozoos N	-0.1	-0.3	-0.5	0.1	0.4	0.4	-0.3	0.3
% escleritos N	-0.6	-0.3	-0.2	0.5	0.3	0.4	-0.3	0.2
F TeOb S	-0.1	-0.4	0.7	0.4	0.3	-0.1	-0.5	0.4
% FB S	0.5	0.2	-0.1	-0.3	0.0	-0.2	0.1	0.2
% briozoos S	0.2	-0.4	0.2	0.3	0.2	-0.1	-0.6	<b>0.6</b>
% escleritos S	-0.3	-0.5	0.4	0.5	0.4	0.4	-0.3	0.2
FArenas B	-0.4	-0.5	0.2	0.6	<b>0.7</b>	0.4	-0.6	<b>0.6</b>
F MO B	-0.4	-0.7	0.6	<b>0.7</b>	0.4	0.1	-0.6	<b>0.5</b>
F TeOb B	-0.1	-0.7	0.5	<b>0.6</b>	0.2	-0.1	-0.7	<b>0.6</b>
% Frag Concha B	0.5	0.2	0.0	-0.3	-0.3	-0.2	0.1	0.0
% ostracod B	0.1	-0.6	-0.1	0.1	0.2	0.1	-0.4	0.6
% briozoos B	-0.1	-0.6	0.1	0.6	0.0	0.0	-0.8	<b>0.6</b>
% escleritos B	-0.5	-0.3	0.0	0.4	0.1	0.1	-0.5	0.3

La trampa más relacionada con las variables ambientales fue la localizada en Burbujas (28 relaciones significativas). Presentó relación con todas las variables excepto clorofila. Le siguen la trampa del Sur de Salmedina, con 8 relaciones ambientales significativas y del Norte de Salmedina con 6.

El flujo total en B y S está relacionado negativamente con TSM (Figura 4). El flujo total en N no mostró ninguna relación significativa con las variables ambientales. Igualmente los flujos de terrígenos (TeOb en B y S, y Te>125 en N) presentaron una

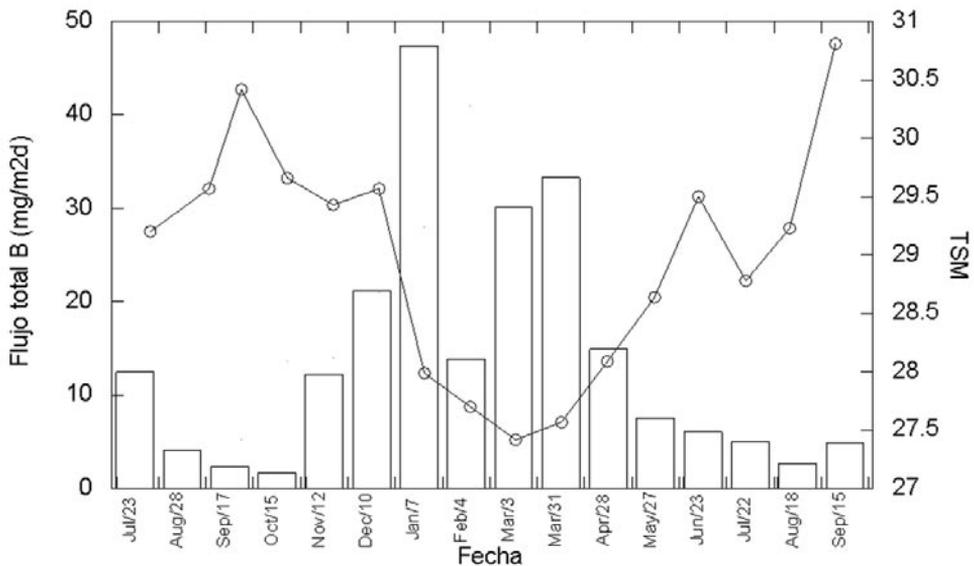


Figura 4. Flujo total en Burbujas (barras) comparado con la temperatura superficial del mar (línea).

correlación negativa con TSM y positiva con viento, altura de la ola y salinidad, mostrando que en el período seco (enero a abril) ocurrió el mayor aporte de terrígenos a los Bancos.

Los flujos diferenciados por componentes (arenas, calcita, materia orgánica y terrígenos) estuvieron relacionados positivamente con los flujos totales y entre sí. Esto significa que ninguno de estos componentes se incrementó respecto a los demás durante el período húmedo y toda la sedimentación estuvo concentrada en el periodo seco. En la figura 5 se presentan los flujos totales en cada localidad discriminados por el tipo de material: calcita, materia orgánica y terrígenos más ópalo biogénico. En la figura 6 se comparan los flujos de arena y de terrígenos más ópalo biogénico. Se nota que la estacionalidad de ambos componentes es clara, especialmente en B y está relacionada positivamente.

Durante la época seca algunos porcentajes de componentes calcáreos biogénicos presentaron un comportamiento definido, como son (Figura 7): mayores porcentajes de escleritos y briozoarios y menor porcentaje de gastrópodos.

Las trampas que presentaron mayor correlación fueron la S y la B. Presentaron correlaciones significativas positivas para Flujo de TeOb (0.62), Flujo de terrígenos > 125 (0.63), % gastrópodos (0.58), % de foraminíferos bentónicos (0.64) y % de briozoos (0.64). La trampa N se correlacionó con la B en las variables Flujo total (0.72), Flujo de arenas (0.7) y % de escleritos (0.64). Las trampas N y S no se correlacionaron en ninguna variable.

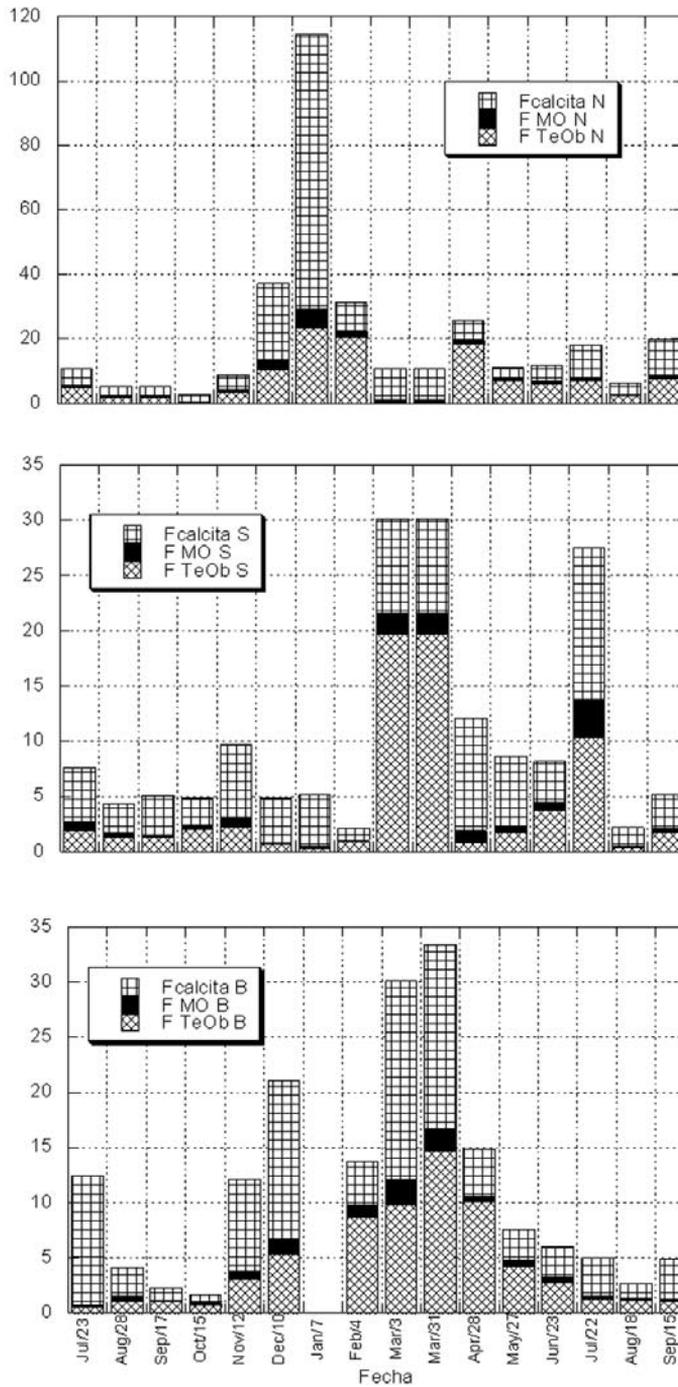


Figura 5. Flujos totales discriminados en los tres tipos: calcita, materia orgánica y terrígenos más ópalo biogénico. N superior, S al centro, B inferior.

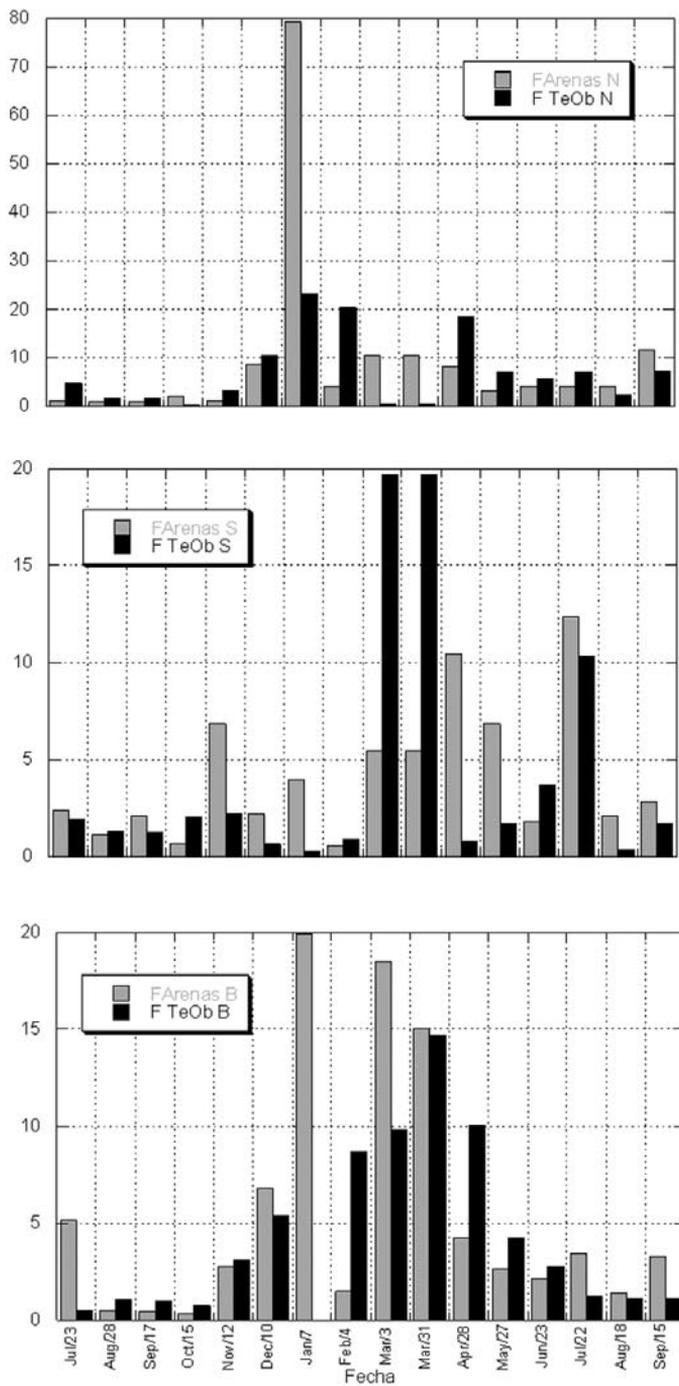


Figura 6. Comparación del flujo de arenas y el flujo de terrígenos en las trampas de las tres localidades. N superior, S al centro, B inferior.

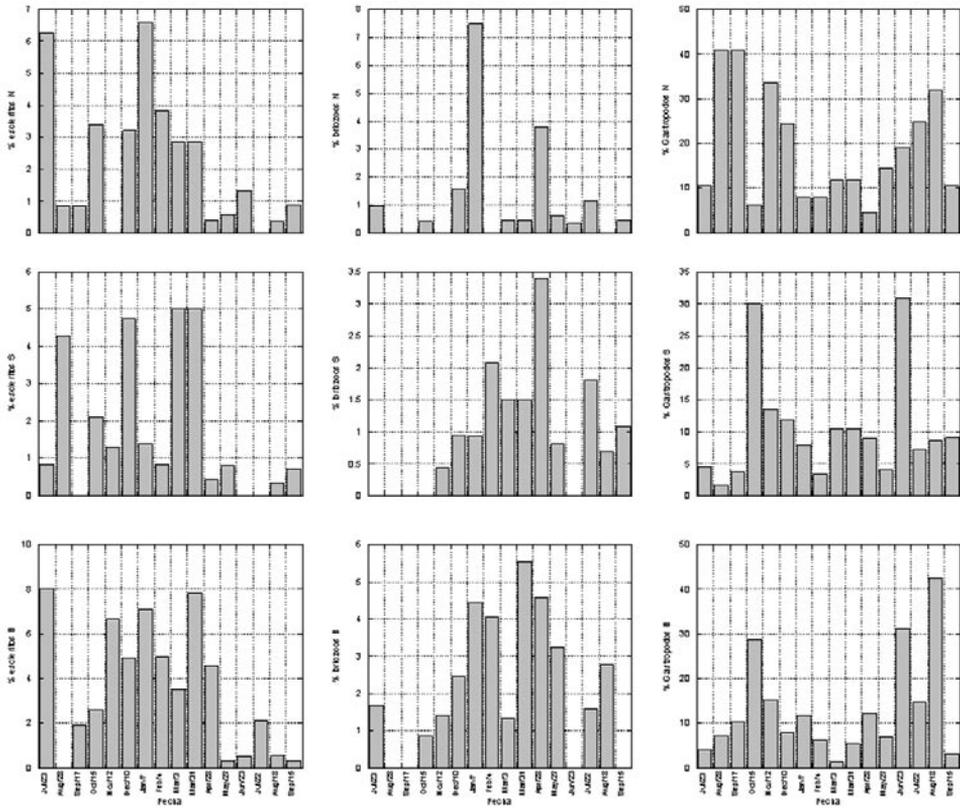


Figura 7. Porcentaje de escleritos (izquierda), briozoos (centro) y gasterópodos (derecha) en las tres localidades. N superior, S al centro, B inferior.

## DISCUSIÓN

El mayor flujo de sedimentos en las tres localidades de los Bancos de Salmedina durante diciembre de 2003 a marzo de 2004 coincidió con la época seca, la cual a su vez es la época de menor TSM, mayor salinidad, mayor altura de ola, variaciones extremas en turbidez y clorofila y menor nubosidad (Orejarena *et al.*, 2004). Los flujos de todos los tipos de partículas aumentaron durante esta época, incluidos los terrígenos. Se esperaba que el flujo de terrígenos aumentara en la época húmeda, contrario al flujo de arenas, debido a la mayor resuspensión de sedimento calcáreo de fondo en la época seca y a que los aportes de los ríos a esta zona de plataforma se consideraban principalmente finos y más abundantes durante la época húmeda.

Un aspecto a considerar en la variable de terrígenos es que el ópalo biogénico y la quitina no fueron separados en el laboratorio. Esta separación podría precisar mucho mejor el comportamiento de los terrígenos sobre los Bancos. Sin embargo, por

los resultados encontrados, es evidente que los tres componentes aumentaron durante la época seca.

El aumento del flujo de terrígenos durante la época seca indica que el oleaje y las corrientes litorales que ocurren en esta estación son los mayores responsables del aporte de terrígenos a los Bancos. Efectivamente, en la época seca la pluma del Magdalena es deflectada hacia el SW y se ha visto la llegada de una lengua turbia desde Punta Canoas hasta los Bancos (Andrade y Thomas, 1988). Por el contrario, durante la época húmeda, cuando las aguas aportadas por el Canal del Dique pueden inundar la plataforma continental al frente de Cartagena, ayudadas por la contracorriente de Panamá (Andrade y Thomas, 1988; Leble y Cuignon, 1987), los aportes de terrígenos disminuyeron en las trampas. Esto genera un interés de estudiar el frente de aguas continentales y su variabilidad anual, así como el comportamiento de los sedimentos aportados por el Canal del Dique. Es posible que éstos sean depositados antes de que las aguas del Canal alcancen los Bancos de Salmedina. En este caso podría generarse la hipótesis de que los principales aportes de sedimentos del Canal del Dique a la plataforma se quedan en las islas del Rosario y los Bancos de Salmedina reciben aportes de terrígenos principalmente desde el Norte.

Otro aspecto de los terrígenos es que el flujo fue mayor y semejante en las trampas de Salmedina, más cercanas al continente, que en Burbujas (Figuras 5 y 6). En la figura 5 además se observa cómo en Salmedina Sur el flujo de terrígenos fue proporcionalmente más importante que el de calcita, mientras que en las otras trampas, especialmente al N de Salmedina, no se presentó este patrón. Esto puede explicarse por la mayor exposición al oleaje de las últimas trampas, especialmente la N. En la figura 6 los flujos de terrígenos muestran un desfase en los máximos. El máximo ocurre primero en N de Salmedina, luego en el S de Salmedina y por último en Burbujas. Este desfase apoya la hipótesis presentada sobre los aportes de terrígenos a los Bancos desde el Norte.

El análisis de los aportes continentales de terrígenos, unido a la evidencia de vulcanismo de lodo activo en el bajo Burbujas, implica que los arrecifes de Salmedina están sujetos a una fuerte tensión por sedimentación, que unida al aumento de temperaturas superficiales del mar en la región podría resultar adversa para la supervivencia del ecosistema. Los efectos de la sedimentación se evidencian en las coberturas de corales. De acuerdo con observaciones realizadas durante esta investigación los tipos de coral vivo en los Bancos son principalmente masivos, costrosos y laminares (*Montastrea annularis*, *Siderastrea sp.*, *Agaricia sp.*, y *Diploria sp.*), mientras que los corales de tipo ramificado se encuentran muertos (*Porites porites* y *Acropora palmata*). Según las observaciones de Hodgson (1993) los corales menos resistentes al exceso de sedimentación son precisamente los ramificados. Para entender el impacto sobre los arrecifes es necesario profundizar en temas como el frente de aguas continentales y oceánicas en la región, la respuesta y adaptación de las especies de coral presentes en los Bancos a la sedimentación y mediciones directas de la sedimentación sobre las colonias coralinas (según Hodgson

(1993) la sedimentación directa sobre la colonia es más perjudicial que la turbidez del agua en sí).

En cuanto a los componentes calcáreos, aunque no se determinaron los flujos absolutos, los porcentajes mostraron que algunos de los componentes son indicativos de la resuspensión del sedimento en la época seca. Es el caso de los escleritos y briozoos. Estos componentes, especialmente los escleritos, son aportados directamente desde el fondo del arrecife. Otros componentes que no mostraron un comportamiento estacional, como los foraminíferos bentónicos y ostrácodos, pudieron desarrollarse en las trampas. De hecho las observaciones de las especies de foraminíferos bentónicos recolectados en las trampas son muy diferentes a las encontradas en el fondo del arrecife e indican una sucesión característica, que debe analizarse en detalle, pues aunque puede indicar mayor susceptibilidad de unas especies a la resuspensión, también puede indicar un desarrollo *in situ* de los mismos, que explicaría su falta de correlación con la estacionalidad.

No cabe duda que la mejor localidad en cuanto al registro de la sedimentación en los Bancos fue la de Burbujas. Esta localidad presentó fuerte relación con las variables ambientales y mostró un ciclo anual muy definido. Se propone como el lugar ideal para continuar los estudios de sedimentación sobre los Bancos.

Por último, a pesar de que los registros estuvieron dominados por la resuspensión del fondo durante la época seca y que la metodología utilizada requiere ajustes, tal como un mejor manejo de los organismos nadadores en las trampas y un mejor control de los pesos para determinar flujos absolutos de todas las variables, los resultados encontrados son de gran interés para la sedimentología de la plataforma continental colombiana. Este trabajo permitió definir hipótesis sobre la proveniencia de los sedimentos a los Bancos y su estacionalidad. Se recomienda continuar con monitoreos de sedimentos a más largo plazo en la zona, e implementar otros sistemas de trampas en los Bancos y otros arrecifes de la plataforma continental colombiana.

## CONCLUSIONES

El estudio de los contenidos de las trampas localizadas sobre las mesetas arrecifales de los Bancos de Salmedina permitió conocer parámetros de sedimentación sobre los Bajos durante un ciclo anual. La localidad donde los patrones durante el ciclo anual fueron más significativos fue el Bajo de Burbujas.

El mayor flujo de sedimentos a las trampas coincidió con la época seca. Todos los flujos sedimentarios aumentaron durante este período climático y también los porcentajes de algunos componentes calcáreos biogénicos como son los escleritos y los briozoos, los cuales son indicadores de fuentes autóctonas por resuspensión en condiciones de alta energía.

En cuanto a la sedimentación terrígena, los resultados indicaron que los aportes hacia los Bancos ocurren principalmente en la época seca. El comportamiento de los terrígenos durante el ciclo estudiado permitió formular la hipótesis de que los aportes de terrígenos a los Bancos provienen principalmente desde el Norte, traídos por filamentos que llevan materiales desde la celda de deriva litoral que se origina en el Magdalena. No se detectaron aportes desde el Canal del Dique en la época húmeda.

Algunos grupos biogénicos como los gastrópodos, foraminíferos bénticos y ostrácodos pudieron crecer dentro de las trampas y su estudio posterior sería muy importante en términos de ecología y biología.

El arrecife de los Bancos de Salmedina está expuesto a condiciones adversas tanto de aumento de temperatura como de exceso de sedimentación que limitan el óptimo desarrollo de los corales en la localidad.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Sena-Colciencias por los recursos que hicieron posible esta investigación. A la Escuela Naval Almirante Padilla por su apoyo en la logística, infraestructura y personal para el proyecto. Al CIOH por los laboratorios y apoyo logístico. A todas las demás instancias de la Armada Nacional que colaboraron con las salidas de campo y al personal que participó en el monitoreo de las trampas de sedimentos. A la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y el fondo de investigaciones DIME por su apoyo, soporte económico y el préstamo de los laboratorios que hicieron posible realizar los análisis sedimentológicos. A National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado, por las series de temperatura superficial del mar de Reynolds, Stoke and Smith.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, C.A. y Y.F. Thomas. 1988. Sedimentos en suspensión e hidrodinámica al suroeste del delta del río Magdalena, mar Caribe, Colombia. Bol. Cient. CIOH, 8: 27-34.
- Baba, J., C. Peterson, y H.J. Schrader. 1991. Fined Grained Terrigenous sediments Supply and Dispersal in the Gulf of California During the Last Century. En: Dauphin, J.P. and Simoneit, B. (Eds). The Gulf and Peninsular Province of the Californias, AAPG, 47: 589-601.
- Bernal, G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade. 2006. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la Costa Caribe colombiana. Rev. Acad. Colom. Cien., 30(115): 195-208.
- Cendales, M.H., S. Zea y J.M. Díaz. 2002. Geomorfología y unidades ecológicas del complejo de arrecifes de las islas del Rosario e isla Barú (mar Caribe, Colombia). Rev. Acad. Colomb. Cienc., 26 (101): 497-510.
- Díaz, J.M. (Ed.). 2000. Áreas coralinas de Colombia. Serie de Publicaciones Especiales INVEMAR, No. 5. 175 p.

- Dodge, R.E. y J.R. Vaisnys. 1980. Skeletal growth chronologies of recent and fossil corals. In: Rhoads and Lutz (Eds.). Skeletal growth of aquatic organisms: biological records of environmental change. Plenum Press, 750 p.
- Grupo de investigación en Oceanología (GIO). 2005. Estudio Oceanográfico de los Bancos de Salmedina, Caribe colombiano. Cartagena, Escuela Naval Almirante Padilla. 108 p.
- Hodgson, G. 1993. Sedimentation damage to reef corals. In: Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science (Ed.). Global aspects of coral reefs. University of Miami, pp 320-325.
- Hoitink, A.J.F. 2004. Tidally induce clouds of suspended sediment connected to shallow-water coral reefs. *Marine Geology*, 208: 13-31.
- James, N.P., 1983. Reef Environment. In: Scholle, P.A., D.G. Bebout and C.H. Moore (Eds.). Carbonate depositional environments. AAPG Memoir, 33: 346-462.
- Leble, S. y R. Cuignon. 1987. El archipiélago de las islas del Rosario, estudio morfológico, hidrodinámico y sedimentológico. *Bol. Cient., CIOH*, 7: 37-52.
- Lough, J.M. 2001. Climate variability and change on the Great Barrier Reef. En: Wolanski, E. (Ed.). Oceanographic processes of coral reefs: physical and biological links in the Great Barrier Reef. CRC Press. pp: 269-300.
- Orejarena, J.A., J.G. Domínguez, C. Ricaurte, G. Mayo y C.A. Andrade. 2004. Variaciones de la concentración de la clorofila a y su relación con los parámetros físicos medidos en los Bancos de Salmedina durante 2003-2004, Caribe colombiano. *Bol. Cient., CIOH*, 22: 56-63.
- Ramírez G., A., I.B. de Ramírez y J.E. Correal F. 1986. Ecología descriptiva de las madreporarias del Parque Nacional Los Corales del Rosario. Fondo para la protección del ambiente "José Celestino Mutis". FEN Colombia. 71p.
- Reyes-Bonilla, H. 1993. Coral reef bleaching at Cabo Pulmo Reef, Gulf of California, México. *Bulletin of Marine Science*, 52(2): 832-837.
- Reynolds, R.W. y T.M. Smith. 1994. Improved global sea surface temperature analysis. *J. Clim.*, 1:75-86.
- Ricaurte, C., J.G. Domínguez, G. Mayo, C.A. Andrade, H.M. Ospina y A.J. Gutiérrez. 2004. Nota sobre algunos rasgos geomorfológicos de los Bancos de Salmedina. *Bol. Cient., CIOH*, 22: 64-76.
- Rodríguez-Ramírez, A. y J. Garzón-Ferreira. 2003. Monitoreo de arrecifes coralinos, pastos marinos y manglares en la Bahía de Chengue (Caribe colombiano): 1993-1999. INVEMAR, Santa Marta, Serie Publicaciones Especiales 8: 170 p.
- Vernette, 1985. La Plate-Forme Continentale Caraibe de Colombie (du débouché du Magdalena au golfe de Morrosquillo). Importance du diapirisme argileux sur la morphologie et la sedimentation. Thèse de doctorat d'état ès Sciences presentee a l'Université de Bordeaux I. 381 p.
- Veron, J.E.N. 1995. Corals in space and time. The biogeography and evolution of the Scleractinia. Sotuhwood Press, Australia. 321 p.
- Wild, C., M. Huettel, A. Kluefer, S.G. Kremb, M.Y.M. Rashid y B.B. Jergensen. 2004. Coral mucus functions as an energy carrier and particle trap in the reef ecosystem. *Nature*, 428: 66-70.
- Wolanski, E., R. Richmond, L. McCook y H. Sweatman. 2003. Mud, marine snow and coral reefs. *Am. Sci.*, 91: 44-51.

FECHA DE RECEPCIÓN: 11/07/05

FECHA DE ACEPTACIÓN: 19/09/06

