

Textura, Composición y Foraminíferos Bentónicos de los Sedimentos Superficiales en los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano

Gladys Bernal Franco¹
 Ana Cristina Agudelo²
 Sandra Milena López³
 Juan Gabriel Domínguez⁴

¹⁻²⁻³ Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Facultad de Minas. UNAL, Sede Medellín
 Tél: (4) 425 51 00 Fax: (4) 425 51 03 AA. 1027, Medellín

¹e-mail: gbernal@unalmed.edu.co

²e-mail: acagudelo@universia.net.co

³e-mail: sandramilenal@hotmail.com

⁴ Grupo de Investigación en Oceanología (GIO), Escuela Naval de Cadetes 'Almirante Padilla', Cartagena

⁴ e-mail: gabrielhd76@yahoo.com

Bernal, G., A. Agudelo, S. López y J. Domínguez. 2005. Textura, Composición y Foraminíferos Bentónicos en los Sedimentos Superficiales de los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano. Boletín Científico CCCP, (12): 95-112.

Recibido en julio de 2005; aceptado en diciembre de 2005

RESUMEN

Los bancos de Salmedina, de origen diapírico, están formados por tres bajos principales y dos menores que conforman mesetas arrecifales. Un estudio sedimentológico detallado en la zona de las mesetas y espaciado en la zona periarrecifal consistió en el análisis granulométrico, contenido de carbonato de calcio y materia orgánica, composición de partículas > 150 µm y abundancia relativa de foraminíferos bentónicos. Con los datos obtenidos se elaboraron mapas de distribución y análisis de agrupación 'cluster', que permitieron diferenciar cuatro grupos de sedimentos: (1) arenas bioclásticas de meseta arrecifal; (2) gravas arenosas litoclásticas, derivadas del diapiro del bajo Burbujas; (3) limos litobioclásticos periarrecifales, y (4) arenas muy finas y limos biolitoclásticos periarrecifales. El bajo Burbujas es un volcán de lodo activo que comprende tres zonas de sedimentación: diapírica, transición y de meseta arrecifal. El bajo de Salmedina, en cambio, presenta dos tipos de sedimentos de meseta arrecifal (gránulos y arenas muy gruesas bioclásticas), y el bajo Ygio se caracteriza por un aporte significativo de algas calcáreas al sedimento. En los lodos periarrecifales se detectaron diferencias que pueden estar relacionadas con la influencia del río Magdalena, por el Norte, y los aportes desde las mesetas arrecifales hacia el Sur. *Amphistegina gibbosa* es la especie de foraminífero bentónico dominante cuya distribución es opuesta a la de *Anomalina globulosa*. La primera asociada con sedimentos predominantemente calcáreos y la segunda con sedimentos terrígenos.

Palabras clave: Arrecifes, Caribe colombiano, sedimentos arrecifales, foraminíferos bentónicos, Salmedina.

ABSTRACT

Salmedina reef banks are mud diapirs that include three main (and two smaller) shoals conforming true submarine mesas. A surface sediment study was performed with detailed sampling of the mesas and more spaced sampling of the peri-reefal zone. Granulometry of sediments, calcium carbonate content, organic matter, composition of particles > 150 micrometers, and relative abundance of benthonic foraminifera were measured. Distribution maps and cluster analysis enable us to differentiate four different sedimentary facies: (1) Bioclastic sands of reef mesas (2) Lithoclastic sand gravels of diapiric origin from the Burbujas shoal (3) Lithobioclastic perirreefal silts (4) Biolithoclastic peri-reefal very fine sands and silts. Burbujas shoal is an active mud volcano that presents a zone of lithoclastic sandy gravels caused by the degradation of the volcano cone structure, while westward sediments grades toward typical sediments of reef mesas. Salmedina shoal, by contrast, presents two kinds of reef mesa sediments (bioclastic granules and very coarse sands), and the Eastern Shoal (Ygio) is characterized by a significant supply of calcareous algae. Differences in peri-reefal mud sediments are possibly related to the northern influence of the Magdalena river, and the southern reefal mesas calcareous supply. *Amp* *istegina gibbosa* is the dominant specie of benthonic foraminifera and it is associated to the reef production. In contrast, *Anomalina globulosa* is associated to areas with terrigenous continental influence.

Key words: Reefs, Colombian Caribbean, reef sediments, benthonic foraminifera, Salmedina.

INTRODUCCIÓN

Los sedimentos superficiales en un ambiente arrecifal están dominados por componentes autóctonos, generalmente biogénicos calcáreos, con menor proporción de componentes alóctonos, generalmente terrígenos siliciclásticos. La producción de sedimentos calcáreos en el arrecife se da por la fragmentación y acumulación de esqueletos de organismos, que luego son redistribuidos por la energía del medio. Por su parte, los sedimentos terrígenos son llevados hacia el océano desde los deltas y la erosión costera. Su tamaño y composición varía de acuerdo con los aportes, la fuente, la distancia de la costa y la energía del medio.

Los sedimentos terrígenos afectan el crecimiento arrecifal ya que los altos niveles de turbidez limitan la penetración de la luz y el lodo en suspensión se adhiere a la nieve marina formando agregados que pueden ahogar los pólipos y afectar el nuevo reclutamiento de corales (Dodge y Vaisnys, 1980; Wolanski *et al.*, 2003; Hoitink, 2004). Por tanto los estudios sedimentológicos en plataformas carbonatadas y los modelos de crecimiento arrecifal tienen en cuenta: (1) el papel de los sedimentos terrígenos sobre las condiciones de crecimiento coralino; (2) la cantidad y calidad de sedimentos biogénicos calcáreos producidos por el arrecife, y (3) la distribución espacial de estos dos miembros extremos en los sedimentos (Larcombe *et al.*, 2001; Heap *et al.*, 2002; Wolanski *et al.*, 2003).

Estudios de facies sedimentarias en ambientes carbonatados recientes (Halfar *et al.*, 2000; Yamano *et al.*, 2002; Webster *et al.*, 2004) han permitido delimitar ambientes arrecifales, definir zonaciones y marcar provincias climáticas, con importantes aplicaciones para estudios ambientales y paleoambientales. Los análisis multivariados de los componentes biogénicos pueden revelar una imagen de la distribución de las microfacies más detallada que una distribución ambiental, basada en localización o cobertura (Halfar *et al.*, 2000).

Los arrecifes coralinos se han reconocido como una importante fuente de sedimentos en las zonas costeras y de plataforma. En un arrecife coralino la mayor parte de los sedimentos biogénicos son producidos por el mismo ecosistema y pueden estar dominados por corales o algas

calcáreas (Smith y Kinsey, 1976; Chevillon, 1996; Yamano *et al.*, 2002). Los foraminíferos bentónicos también pueden contribuir, significativamente, a la producción de sedimentos y pueden llegar a constituir hasta el 85 % del sedimento en algunas facies arrecifales (Phleger, 1960).

Los bancos de Salmedina, en la plataforma Caribe colombiana (Figura 1), son arrecifes de tipo banco o meseta que se originaron por la colonización coralina de domos diapíricos de lodo durante el ascenso del nivel del mar en el Holoceno (Verette, 1985). En el presente trabajo se analizó la distribución de los sedimentos superficiales de los bancos de Salmedina, desde el punto de vista de la composición y textura, con el fin de definir facies sedimentarias, separar los sedimentos terrígenos y biogénicos, y discutir el origen y los procesos que afectan su distribución. Con estos análisis pretendió dar respuesta a preguntas sobre las fuentes de los sedimentos, la zonación en relación con los procesos físicos, los efectos del diapirismo de lodo sobre el arrecife, y las diferencias entre los bajos. Igualmente, se presentan resultados de análisis granulométricos y de composición (microscópica y química). Entre los componentes biogénicos se analizaron los foraminíferos bentónicos presentes, ya que éstos han mostrado ser de los mejores indicadores ambientales en sedimentos arrecifales y una herramienta muy útil para la definición de facies en ambientes carbonatadas (Halfar *et al.*, 2000; Yamano *et al.*, 2002).

ÁREA DE ESTUDIO

Los bancos de Salmedina (Figura 1), formados por los bajos Salmedina, Burbujas e Ygio (Ricaurte *et al.*, 2004), son elevaciones sobre la plataforma continental en forma de meseta que van de 75 a 90 m hasta 2 m por debajo del nivel del mar. Las mesetas están rodeadas por taludes que llegan a profundidades cercanas a los 90 m y se encuentran separadas por canales con profundidades entre los 60 y 75 m. El bajo Salmedina está surcado por canales en el sector sur, con profundidades entre 30 y 50 m, que lo dividen formando otros dos bajos, denominados por Ricaurte *et al.* (2004) Ukura y Kubina (Figura 1). Hacia el norte los bajos terminan en cantiles abruptos, mientras que hacia el sur la pendiente disminuye considerablemente. La zona de las mesetas presenta acanaladuras, escalones y pináculos.

La formación de los bancos de Salmedina se debe al levantamiento de los domos diapíricos, debido a fuerzas tectónicas compresionales sobre acumulaciones sedimentarias de la edad Terciaria (Duque-Caro, 1984; Vernet *et al.*, 1992), colonizados por arrecifes coralinos. El diapirismo en forma de domos es característico de la región al sur de Punta Canoas, mientras que al norte de esta zona se presenta del tipo chimeneas (Vernet, 1985). Este cambio, que coincide con la falla de Punta Canoas, es importante desde el punto de vista morfológico, ecológico y sedimentológico. La falla separa dos regiones de la plataforma continental: el lóbulo de Galerazamba, al Norte, y la región plegada central, al Sur, donde los domos han permitido la formación de arrecifes (Vernet, 1985; Toussaint, 1995; Díaz, 2000).

Es posible que a finales del Terciario ya se presentaran las condiciones propicias para la formación de los domos. De acuerdo con Toussaint (1995), la formación del cinturón plegado del Caribe colombiano comenzó en el Mioceno-Plioceno, con un cambio del movimiento relativo de las placas Caribe y Suramericana. Asimismo, Molina *et al.* (1986) refieren una edad Plioceno (entre 5 y 1.6 millones de años) para la formación de los diapiros de lodo del Caribe colombiano. De esta manera, durante la última glaciación, hace unos 18 000 años, el domo de Salmedina habría sido un volcán de lodo emergido, similar a los que se encuentran en las planicies costeras del Caribe en la actualidad. Durante la trasgresión holocénica, el volcán quedó sumergido y fue colonizado por arrecifes coralinos. Es muy probable que todos los bajos en Salmedina estén conectados con una misma fuente diapírica, tal como se ha descrito para otras localidades del Caribe colombiano (Vernet, 1985), y que algunos de los pináculos que forman las mesetas sean de origen diapírico (Ricaurte *et al.*, 2004).

Los bancos de Salmedina son los domos arrecifales más septentrionales del cinturón plegado central y es en este lugar donde ocurre una transición importante en los sedimentos superficiales de la plataforma Caribe colombiana. Hacia el norte, los sedimentos sobre la plataforma son netamente terrígenos, con contenidos de carbonatos < 15 %; mientras que hacia el sur, los sedimentos pueden contener entre 15 y 100 % de carbonatos, exceptuando las áreas de influencia directa del río Sinú (golfo de Morrosquillo) y el canal del Dique (bahías de Cartagena y Barbacoas) (Vernet, 1985).

Las fuentes de sedimentos terrígenos hacia la región de los bancos de Salmedina pueden ser: (1) la de la pluma turbia del río Magdalena y la deriva litoral entre Barranquilla y Punta Canoas, que durante el período seco (diciembre a abril) es deflectada en su parte externa hacia el suroeste. Una cinta de agua turbia se extiende sobre la costa entre Barranquilla y Punta Canoas, formando lenguas en las salientes por efecto de cabo; la mayor, formada en Punta Canoas, llega hasta los bancos de Salmedina (Andrade y Thomas, 1988). (2) El canal del Dique y la bahía de Cartagena, cuyas aguas quedan contenidas en las bahías de Cartagena y Barbacoas durante la época seca (Andrade y Thomas, 1988; Leble y Cuignon, 1987), mientras que durante la época húmeda (junio a noviembre) el mayor caudal y la contracorriente de Panamá

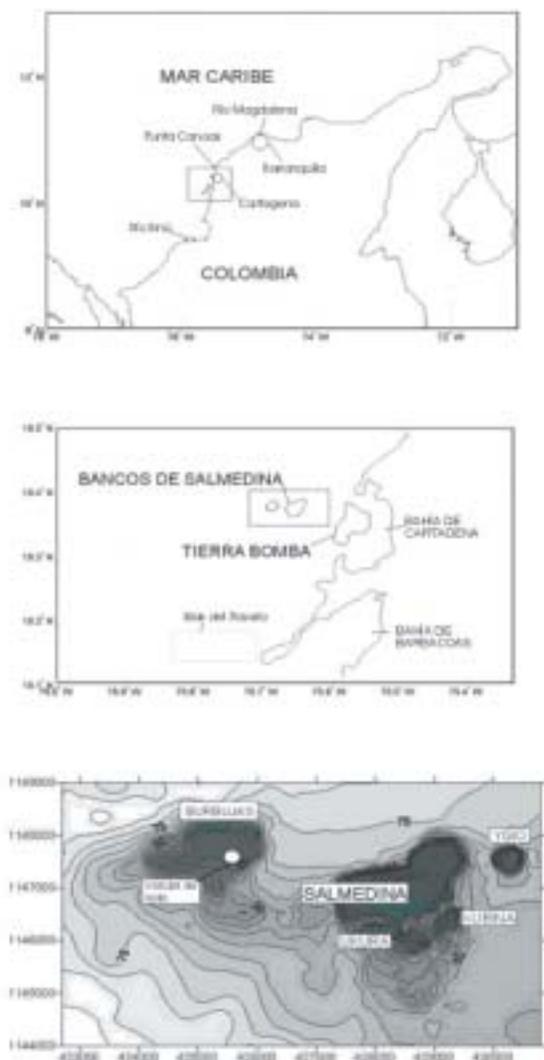


Figura 1. Localización del área de estudio y de los principales rasgos morfológicos mencionados.

(también conocida como del Darién), en dirección norte-noreste, permiten que las aguas del canal del Dique salgan de las bahías y lleguen hasta las islas del Rosario (Leble y Cuignon, 1987). (3) El río Sinú, cuyas aguas alcanzarían la zona de Cartagena durante la época húmeda, acarreadas por la contracorriente de Panamá. Esta fuente de sedimentos no ha sido documentada.

Los sedimentos autóctonos en los bajos son de dos tipos: (1) carbonatados, producidos por los organismos arrecifales. (2) terrígenos, provenientes de emanaciones de lodo actuales. Estos últimos se pudieron constatar durante esta investigación en el bajo Burbujas (volcán de lodo, figura 1). Esta fuente dificulta la separación de sedimentos alóctonos y autóctonos por el tipo de sedimento (terrígeno vs biogénico) y constituye un elemento más a considerar en la salud, evolución y crecimiento del ecosistema arrecifal.

La región está expuesta a pequeñas mareas (17 a 42 cm) y períodos largos de vientos fuertes. El viento predominante en el sector es del noreste, más intenso de diciembre a abril, y genera oleaje hacia el sur (Andrade, 2000). En los bancos se

encuentran la corriente superficial forzada por los vientos Alisios del Norte y la contracorriente de Panamá-Colombia, a nivel subsuperficial (Andrade *et al.*, 2003). Ecológicamente Díaz (2000) separa las zonas de los flancos caracterizados por la ocurrencia de corales mixtos (*Montastrea* y *Agaricia*) y de las mesetas, caracterizadas por octocorales y corales mixtos (*Porites*, *Siderastrea* y *Agaricia*).

METODOLOGÍA

El muestreo de los sedimentos superficiales se realizó del 19 al 28 de junio de 2003. Se recolectaron 54 muestras, ubicadas con un GPS 4000XR PRO. Las muestras de las estaciones con menos de 20 m de profundidad fueron tomadas manualmente, utilizando técnicas de buceo autónomo; las muestras profundas (9 en total) se colectaron utilizando una draga tipo Dietz La Fond del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, de la Dirección General Marítima, DIMAR. El muestreo resultante (Figura 2) fue detallado para las mesetas y más espaciado en la zona profunda (periarrecifal). Las muestras se secaron en el horno a 50 °C, durante 12 horas.

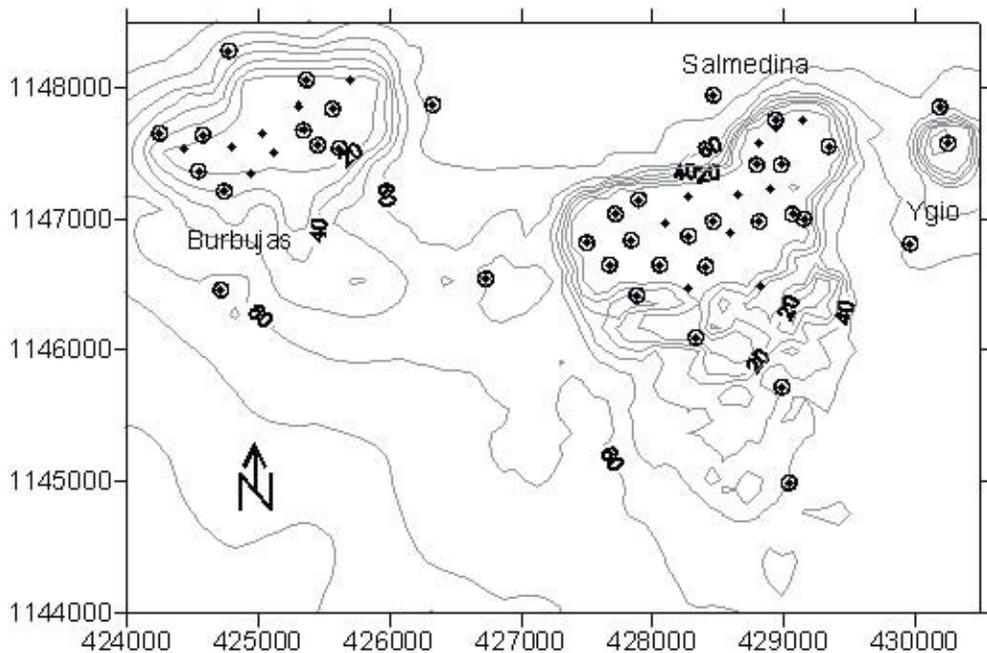


Figura 2. Mapa batimétrico de los bancos de Salmedina, con la ubicación de las muestras sedimentológicas (coordenadas UTM). Las muestras marcadas con círculo fueron utilizadas en el estudio microscópico de composición y foraminíferos. contornos batimétricos cada 10 m.

Los análisis granulométricos se realizaron por tamizado en seco para las muestras de arenas (con contenidos <5 % de finos), las fracciones de arena de las muestras de lodos y los lodos arenosos. La granulometría de los lodos (fracción < a 63 μm) se calculó por el método de la pipeta (McManus, 1988). La información de lodos y arenas se integró y se calcularon los principales parámetros granulométricos (media, mediana, moda, selección, asimetría y kurtosis), con el método de los momentos (McBride, 1971; McManus, 1988).

El porcentaje de carbonato de calcio y de materia orgánica se determinó a través de ataques en secuencia con ácido clorhídrico y peróxido de hidrógeno (Baba *et al.*, 1991). El método se probó en cuanto a su exactitud para CaCO_3 (carbonatos) y precisión para los dos componentes, por medio de un estándar fabricado en el laboratorio y réplicas sucesivas de las mediciones. En las pruebas de calibración, la exactitud para el CaCO_3 con respecto al estándar, fue del 95 %. La desviación estándar para la determinación del carbonato de calcio y la materia orgánica fue de 1.2 y 1.9 %, respectivamente. Estos resultados indican que el método es confiable para diferencias entre muestras del orden del 2 %, suficiente para los propósitos de este trabajo. Todos los análisis se realizaron por duplicado.

Se calculó el porcentaje de terrígenos como la diferencia para 100 % de los componentes del Carbono (carbonatos y materia orgánica). No se separó el ópalo biogénico de los terrígenos, ya que puede considerarse despreciable en los sedimentos superficiales arrecifales. En efecto, en el análisis microscópico del material particulado >150 μm no se detectaron componentes opalinos (<1 %).

De las 54 muestras colectadas, se eligieron 37 para realizar el análisis microscópico de composición y de foraminíferos bentónicos, tratando de cubrir la mayor parte del área (Figura 2). Se hizo una identificación del tipo de partículas presentes en la fracción >150 μm y, posteriormente, un conteo entre 700 y 3 800 granos por muestra. Para la composición microscópica del material particulado, se diferenciaron once tipos de partículas: (1) Terrígenos: incluyen fragmentos de roca, cuarzo, feldespato y minerales densos; (2) Fragmentos calcáreos: incluyen los fragmentos de carbonato de calcio no diferenciado o proveniente de corales; (3) Fragmentos de conchas: incluyen fragmentos de conchas (moluscos, principalmente); (4) Moluscos:

bivalvos y gasterópodos no fragmentados; (5) Algas calcáreas: del género *Halimeda*. (6) Foraminíferos bentónicos; (7) Foraminíferos planctónicos; (8) Espículas de esponjas; (9) Escleritos: espículas de octocorales (orden Gorgonácea); (10) Lodolitas: lodos consolidados en clastos redondeados, y (11) otros.

Para los foraminíferos bentónicos de las fracciones >150 μm se extrajeron un mínimo de 150 ejemplares, número representativo para realizar análisis estadísticos y determinar patrones de distribución (Fatela y Tabora, 2002). Únicamente en seis muestras no se completó el número mínimo y se contaron los especímenes totales. La identificación de las especies de foraminíferos bentónicos se realizó por medio de un análisis comparativo con las especies propuestas por Barker (1960), Parada y Pinto (1986), McCulloch (1981), Parada (1996) y Buzas *et al.* (1977). Para los análisis estadísticos y de distribución de especies se escogieron las 25 que presentaron frecuencias relativas >0.5 %, porcentaje considerado confiable para determinar biofacies en ambientes carbonatados (Halfar *et al.*, 2000), y las 14 >1 %, como las más representativas de éstas para combinar con otros indicadores. La abundancia relativa de los foraminíferos fue definida por el porcentaje total de productores de carbonato de calcio en cada muestra (Halfar *et al.*, 2000), lo cual indica el aporte de los foraminíferos al balance de sedimentos del arrecife.

Con los datos obtenidos en el análisis de textura y composición de los sedimentos (Agudelo, 2004; López, 2004), se elaboraron mapas de distribución y análisis de agrupación 'cluster'. Finalmente, de acuerdo con los resultados de los análisis estadísticos, se determinaron los subambientes sedimentarios dominantes en los bajos que permitieron establecer una zonación y proponer una distribución de facies para los bancos de Salmedina.

RESULTADOS

Análisis textural

El tamaño medio en los sedimentos recolectados varía entre 5 μm y 22 mm (-4.4 y 7.5 ϕ). La distribución espacial de la media, mediana (ϕ_{50}) y selección (Figura 3) indicaron arenas muy gruesas - guijarros en las mesetas y limos, y arcillas en la periferia. En el bajo Salmedina los tamaños medios

en la meseta fueron de 1 y 2 mm, con valores de selección entre 0.8 y 2.7, i.e. de moderadamente seleccionados a muy pobremente seleccionados, según la escala de McManus (1988). La meseta del bajo Burbujas se divide en dos sectores: el sector noroccidental presentó sedimentos con tamaños medios entre 1 y 2 mm, igual que la meseta de Salmedina, pero con un grado de selección pobre a muy pobre, con valores entre 1.1 y 3.1. En cambio, en el sector suroriental, cerca al volcán de Burbujas, el tamaño medio de grano fue de hasta 20 mm, con una mediana de 1 mm y muy mala selección con valores entre 3.1 y 3.2. Estos

sedimentos contuvieron partículas desde arcilla hasta tamaños grava. Las gravas son de clastos redondeados de lodolitas.

La muestra del bajo Ygio presentó una granulometría similar a los sedimentos arrecifales de las mesetas de los dos bajos mayores. En los tres bajos se presentaron muestras bimodales (Figura 3.b). En comparación con el bajo Salmedina, en el bajo Burbujas el carácter bimodal de los sedimentos es más marcado (el 44 % de las muestras son bimodales, comparado con el 11 % de Salmedina).

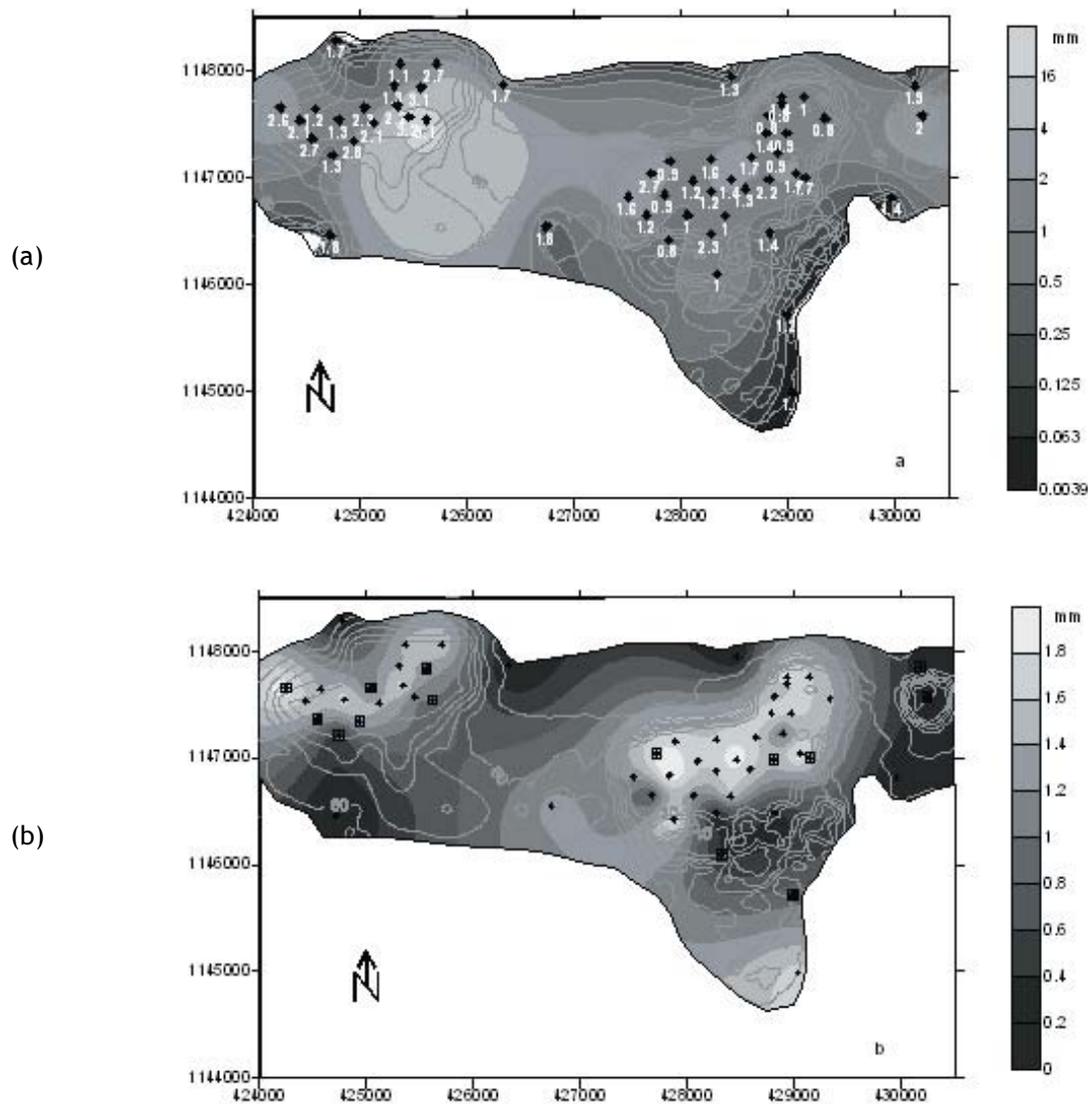


Figura 3. Granulometría de los sedimentos superficiales de los bancos de Salmedina. (a) Mapa de contornos del tamaño medio de grano (mm, los intervalos coinciden con los tamaños límite de clases en la escala de Wentworth), con los valores de selección de las muestras. (b) Mapa de contornos de la mediana (ϕ_{50} , en mm), con las muestras que presentaron bimodalidad (cuadrados). Contornos batimétricos cada 5 m.

Composición del sedimento

El contenido de carbonato de calcio estuvo entre el 10 y 96 % e indicó diferencias entre las mesetas arrecifales (>90 %), el sector suroriental de Burbujas (10 %) y las muestras profundas de plataforma continental o periarrecifales (22 a 65 %) (Figura 4a). El contenido de materia

orgánica en los sedimentos fue bajo (<4 %) (Figura 4b), como era de esperarse en medios arrecifales. Sin embargo, en el sector suroriental del bajo Burbujas se midieron valores considerados altos para sedimentos marinos (4 al 11 %), los cuales, aparentemente, provienen de los lodos diapíricos que afectan la zona.

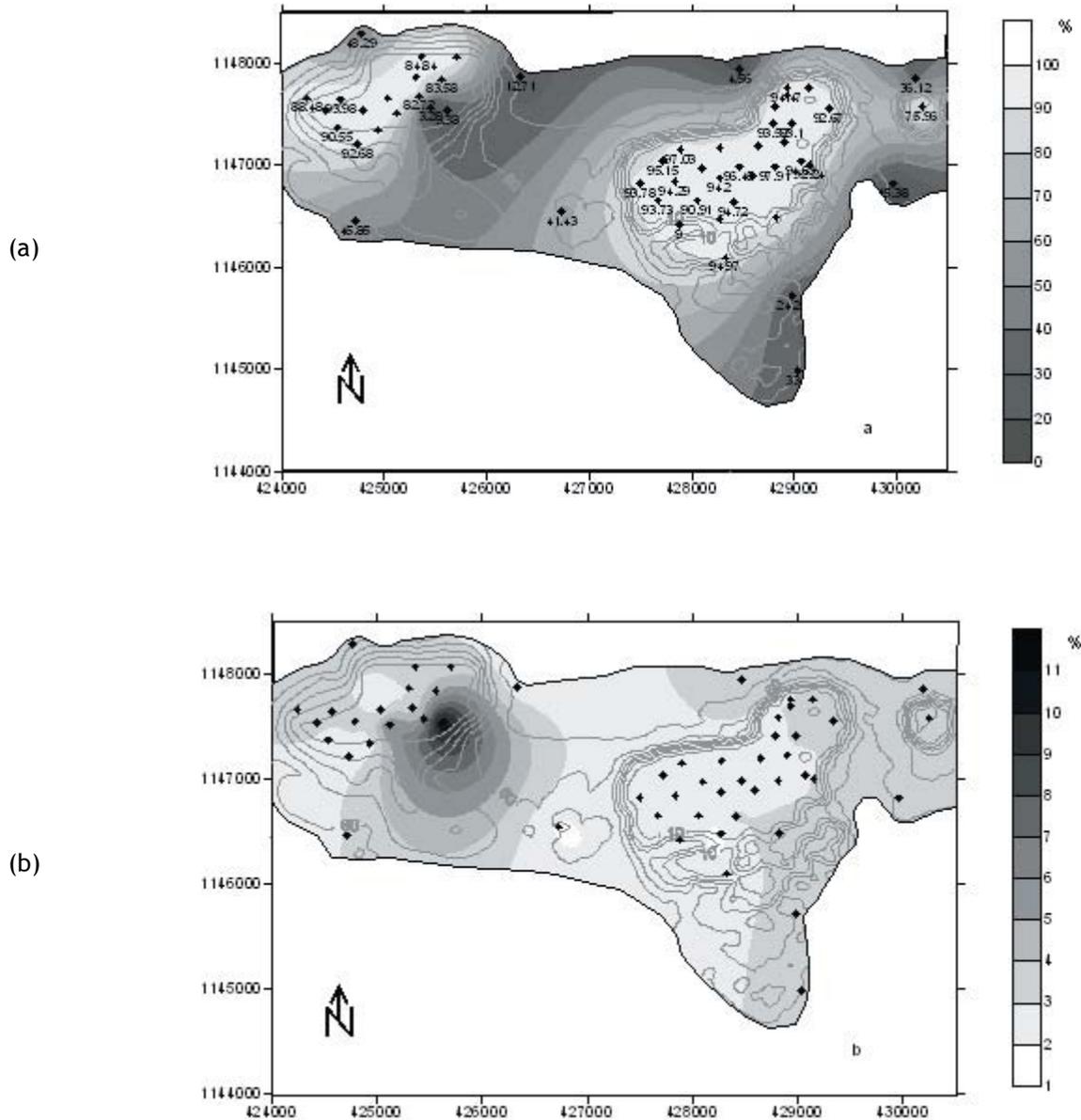


Figura 4. Contenidos (%) de carbonato de calcio esta (a) y materia orgánica (b) en los sedimentos superficiales de los bancos de Salmedina. En el mapa de contornos de carbonato de calcio se indica el porcentaje de fragmentos calcáreos >150 μm .

El mapa de contornos de la distribución de terrígenos (Figura 5) muestra cómo el porcentaje de terrígenos es <6 % en las mesetas arrecifales y aumenta hacia las zonas profundas (30 a 82 %) y el sector suroriental del bajo Burbujas (59 a 83 %).

La distribución del material particulado mayor a 150 micras mostró que: (1) Los terrígenos son más abundantes en los sedimentos periarrecifales y el sector suroriental de Burbujas. (2) Los fragmentos calcáreos son los principales constituyentes particulados en los bancos (Figura 4a) y más abundantes en las mesetas (>75 %) que en los sedimentos periarrecifales (4 a 50 %). En el volcán de lodo del bajo Burbujas los valores de bioclastos son menores del 10 %. (3) Los fragmentos de conchas son el segundo constituyente particulado y son más importantes en las muestras periarrecifales (30 a 70 %). (4) Las algas calcáreas del género *Halimeda* son abundantes en la terraza arrecifal del bajo Ygio (19 %) y en una muestra profunda del Sur de Salmedina (33 %), ambas hacia el continente. (5) Los moluscos son escasos (<1 %) en las mesetas y constituyen entre el 1 y 5 % de los sedimentos en la plataforma (periarrecifal). (6) Los foraminíferos

representan <2.5 % en las mesetas y entre el 1 y 6 % en la plataforma. (7) Los foraminíferos planctónicos son <1.1 % en las mesetas y entre el 1 y 15 % en la plataforma. (8) Espículas de esponjas se observan en las zonas de meseta arrecifal (<1 %) y en sedimentos periarrecifales (<10 %) y están ausentes en el volcán del bajo Burbujas. (9) Escleritos ocurren en toda la zona muestreada con valores de <2.5%. (10) Los clastos de lodolita ocurren especialmente en el volcán del bajo Burbujas, donde forman hasta el 90 % del sedimento (Figura 5).

El sector suroriental del bajo Burbujas, donde se localiza el volcán de lodo, es claramente un sector anómalo, caracterizado por la mala selección del sedimento y su carácter bimodal; la ocurrencia de clastos de lodolita y los altos contenidos de sedimento terrígeno y materia orgánica. Además, en las muestras de esta zona se encontraron óxidos de hierro hasta en un 17 % y cuarzo bipiramidal. También se observó recristalización de calcita hacia el borde de algunos granos, especialmente sobre lodolitas.

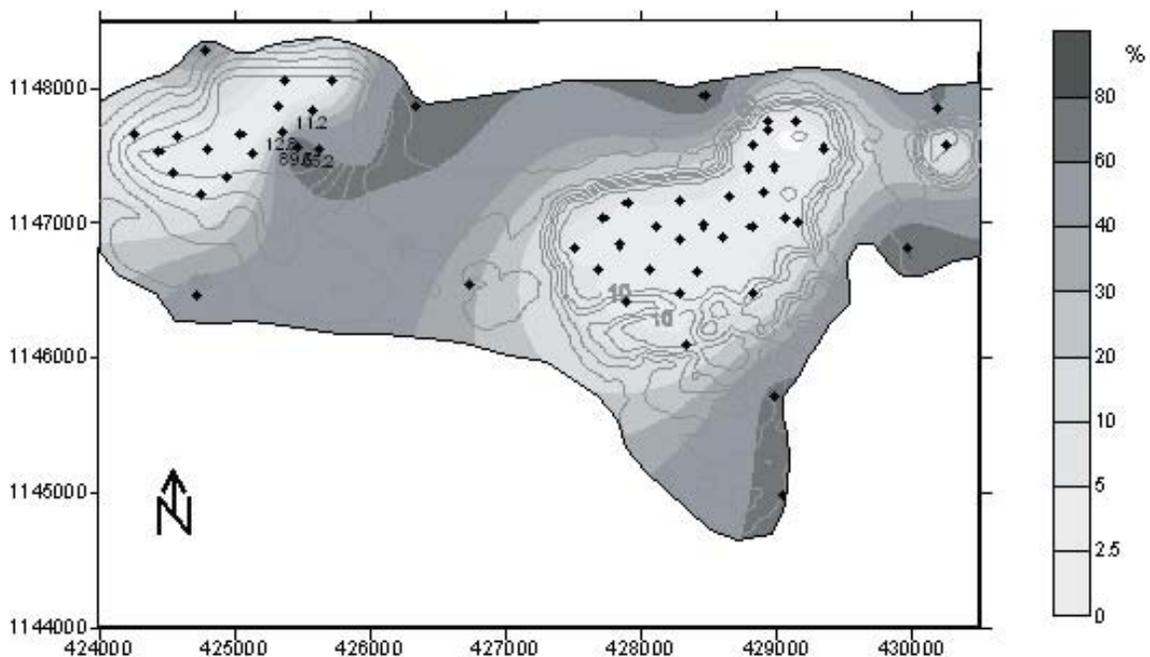


Figura 5. Diferencia para el 100 % de la suma de carbonato más materia orgánica. Corresponde a los terrígenos bajo la suposición de que el contenido de ópalo biogénico es cercano a 0 %. Están marcadas las muestras que presentaron clastos de lodolitas y su porcentaje en el material particulado >150 μm .

Asociación de foraminíferos

El análisis de foraminíferos bentónicos permitió identificar 68 especies donde domina el suborden Miliolina (foraminíferos calcáreo-aporcelanados), con el 57.35 %; le sigue el suborden Rotaliina (calcáreo-perforados), con el 35.29 % y, por último, el suborden Textulariina (aglutinados), con 7.35 %. La biocenosis no fue establecida. Los resultados que aquí se presentan, posiblemente, representan el promedio de la depositación de foraminíferos de varios años e incluso décadas.

La abundancia relativa de foraminíferos bentónicos (Figura 6) indica que en las mesetas arrecifales los foraminíferos fueron escasos en el sedimento respecto a otros componentes

calcáreos (<2 %), estos aumentaron en el sector suroriental de Burbujas y las zonas periarrecifales (hasta 6.5 %). En el sector periarrecifal sur el contenido de foraminíferos bentónicos fue mayor.

Las principales especies de foraminíferos bentónicos reportadas en los bancos de Salmedina (abundancia relativa >1 %), con su distribución espacial, se resumen en la Tabla I. *A. gibbosa* es la especie más abundante en los bajos, *A. angulatus*, *Rosalina sp.*, *Eponides sp.* y *B. pulchra* son típicas de la meseta arrecifal, mientras que *A. globulosa*, *G. broeckiana* y *Hanzawaia sp.* son típicas de la zona periarrecifal. *A. angulatus* es la especie más asociada con el volcán de lodo de Burbujas.

Tabla I. Especies de foraminíferos bentónicos en los bancos de Salmedina. Porcentaje total en los sedimentos analizados y características generales de su distribución.

| Especie | Porcentaje Total | Distribución |
|--|------------------|---|
| <i>Amphistegina gibbosa</i> d'Orbigny | 52.42 % | Distribución relativamente uniforme, excepto en los lodos periarrecifales del N, donde su proporción es significativamente menor (0 a 20%, comparado con 40 a 80% en el resto de sedimentos). |
| <i>Anomalina globulosa</i> Chapman and P | 5.56 % | Únicamente se presenta en las muestras de lodos periarrecifales siendo más abundante en los del Norte (4 a 60%) que en los del sur (2 a 8%). |
| <i>Archaias angulatus</i> Fitchel and Mol | 3.96 % | Característica de las mesetas arrecifales (1 a 13%), pero además ocurre en el volcán de Burbujas (4 a 18%) y los lodos periarrecifales del Norte (0a &%). Su mayor abundancia relativa ocurre en el volcán de Burbujas. |
| <i>Rosalina sp</i> | 3.96 % | Exclusiva de las mesetas arrecifales con porcentajes de hasta el 20%. Ausente en el volcán de Burbujas. |
| <i>Eponides sp</i> | 3.75% | Exclusiva de las mesetas arrecifales con porcentajes de hasta el 20%. Ausente en el volcán de Burbujas. |
| <i>Gyroidina broeckiana</i> Karrer | 3.21 % | Significativamente más abundante en los lodos periarrecifales (3 a 22%) que en las mesetas (0a 5%). |

| Especie | Porcentaje Total | Distribución |
|---|------------------|---|
| Hanzawaia sp | 2.12 % | Presenta, prácticamente, el mismo patrón que <i>A.globulosa</i> , pero aparece esporádicamente en algunas muestras de la meseta de Salmedina (2%) y es muy variable en los lodos periarrecifales (0 a 34%). |
| <i>Quinqueloculina granulocostata</i> Germeraad | 1.77 % | Más abundante en las mesetas arrecifales, con porcentajes hasta del 5%. |
| <i>Quinqueloculina auberiana</i> d'Orbigny | 1.72 % | No se presenta en las mesetas arrecifales de Salmedina y Burbujas, pero sí en el Bajo del Este (Ygio) con 4%. En los lodos periarrecifales y el volcán de Burbujas esta entre 0 y 8%. |
| <i>Borelis pulchra</i> d'Orbigny | 1.38 % | Exclusiva en las mesetas arrecifales. Asente en el volcán de Burbujas. |
| <i>Quinqueloculina lamarckiana</i> d'Orbigny | 1.34 % | Alcanzar su mayor abundancia (3.5%) en las mesetas de Salmedina y Burbujas. |
| <i>Textularia agglutinans</i> d'Orbigny | 1.27 % | Su mayor abundancia (6.5%) se da en los lodos periarrecifales orientales. |
| <i>Cibicides tenuimargo</i> Brady | 1.15 % | Su mayor abundancia (7.5 %) se da en los lodos periarrecifales al Norte de Ygio. |
| <i>Planorbulina mediterraneensis</i> d'Orbigny | 1.07 % | Su mayor abundancia (6 %) se presenta en el volcán de Burbujas y al Sur de Salmedina. |

Análisis de agrupación y definición de zonas sedimentológicas

Para establecer la zonación sedimentológica se realizaron pruebas de agrupación (*cluster*) con diferentes grupos de variables (Figura 6). Las agrupaciones fueron: (a) Análisis con variables de textura (media y selección) y componente sedimentario (carbonato, materia orgánica, terrígenos) en la totalidad de las muestras superficiales (cinco variables en 54 muestras); (b) Análisis con composición del material particulado (doce variables en 37 muestras); (c) Análisis con los foraminíferos bentónicos que presentaron un porcentaje promedio mayor a 0.5 % (25 variables en 37 muestras); (d) Análisis combinando variables, para un total de 29 (media, mediana, calcita, % de

foraminíferos bentónicos en calcáreos, once componentes particulados y catorce especies de foraminíferos). Los mapas de distribución espacial de los grupos se presentan en la Figura 8.

El análisis basado en textura y componentes sedimentarios (figuras 7a y 8a) evidenció la diferencia entre los sedimentos gruesos de la meseta arrecifal y los de lodos (diapíricos y periarrecifales). El análisis basado en la composición de partículas >150 µm (figuras 7b y 8b) diferenció tres zonas: la meseta arrecifal, dominada por fragmentos calcáreos; los lodos diapíricos, dominada por lodolitas, y los lodos periarrecifales, dominada por fragmentos de conchas.

El análisis basado en las especies de foraminíferos bentónicos (figuras 7c y 8c) mostró una

zonación en dirección norte-sur. Finalmente, el análisis con todo tipo de variables (figuras 7d y 8d) permitió diferenciar cuatro grupos (distancia de corte de 80), de los cuales el grupo (1) se compone por 4 subgrupos (distancia de corte 25). Cada uno de estos grupos se caracterizó por su composición y textura, y

cuentan con una distribución espacial característica en los bancos, constituyendo facies sedimentarias.

Su descripción se presenta en la Tabla II y su distribución espacial en la Figura 8.d, indicada por la numeración de las facies.

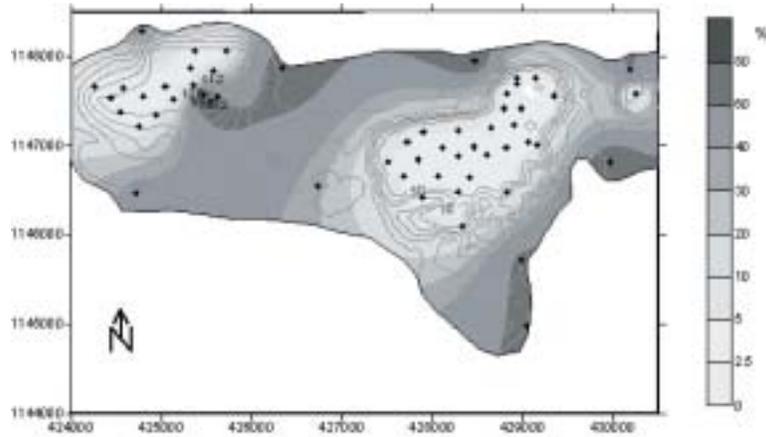


Figura 6. Porcentaje de foraminíferos bentónicos en los sedimentos superficiales de los bancos de Salmedina, respecto a las partículas carbonatadas totales, como indicador de abundancia relativa de foraminíferos bentónicos.

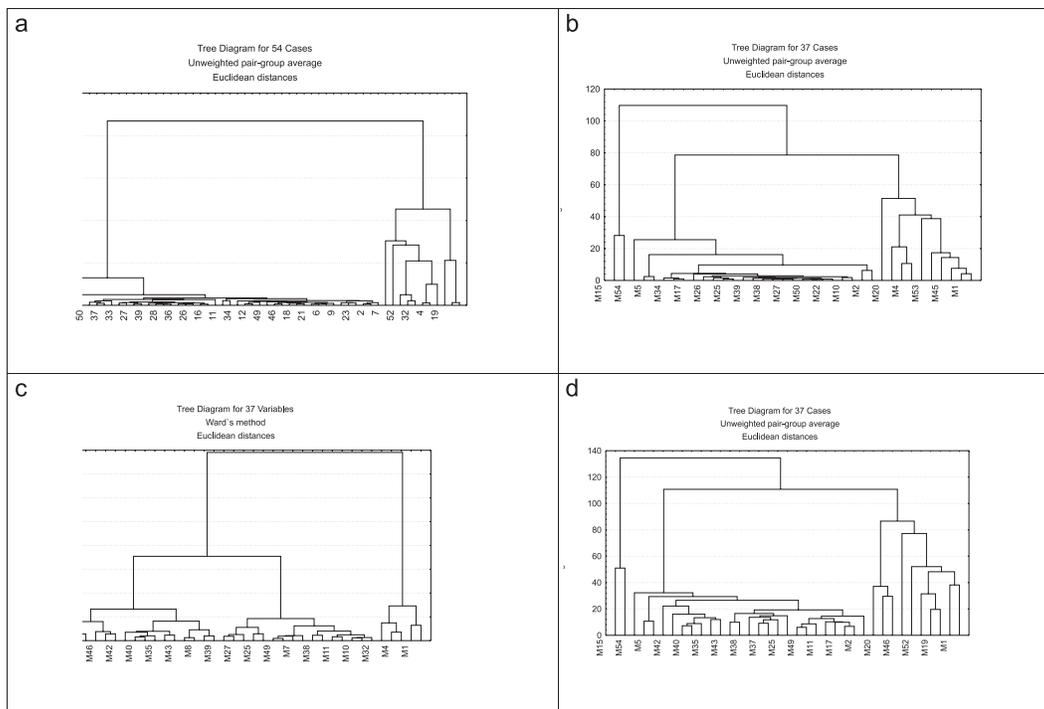


Figura 7. Análisis de agrupación (*cluster*) para diferentes grupos de variables en los sedimentos superficiales de los bancos de Salmedina: (a). Textura y composición (b). Composición particulada (c). Foraminíferos bentónicos (d). Combinación de variables. En todos los casos se utilizó la distancia euclidiana, como medida de similitud, y la agrupación de datos se hizo con el método de promedio de grupo pareado no ponderado, excepto para los foraminíferos donde se utilizó el método de Ward.

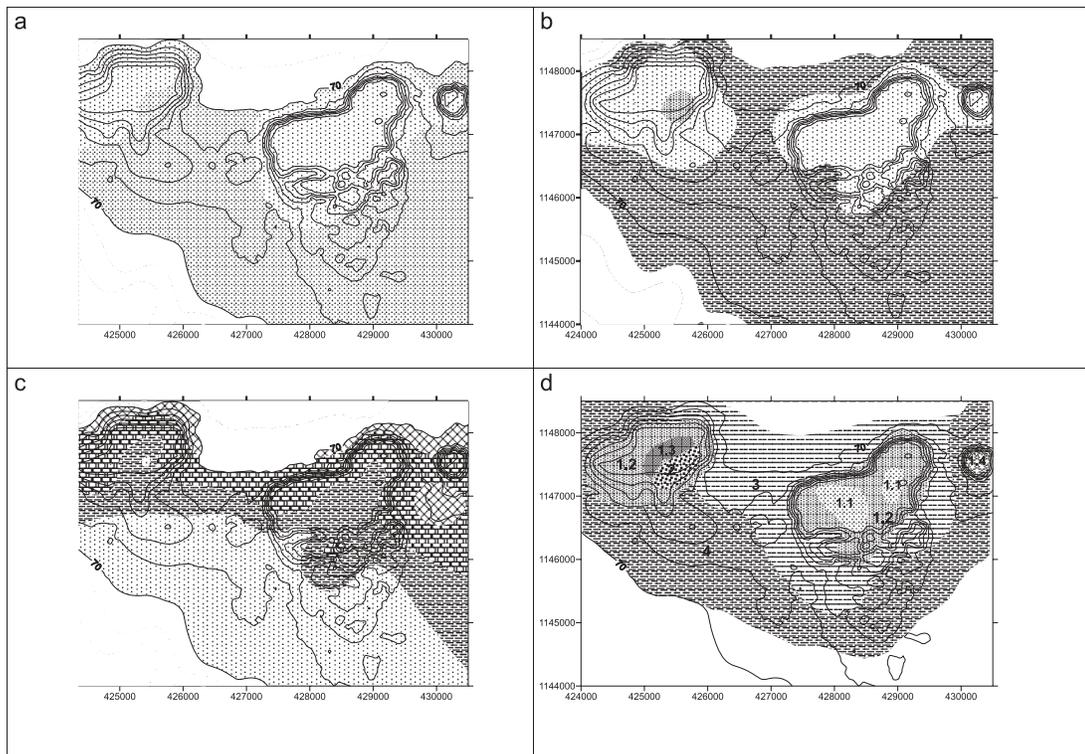


Figura 8. Representación de la distribución espacial de los grupos definidos por los análisis multivariados (a-d corresponden a las mismas letras en la Figura 7). Los números en d corresponden a las facies descritas en el texto y en la Tabla II.

Tabla II. Zonas sedimentarias en los bancos de Salmedina, definidas por textura, composición y distribución geográfica (los números corresponden a la distribución espacial de la Figura 8d).

| Facies | Subfacies | Distribución | Descripción |
|---------------------------------|---|--|---|
| 1. Arenas y gravas bioclásticas | 1.1. Gránulos y arenas muy gruesas bioclásticas | Meseta arrecifal interna del bajo Salmedina | Media 2.1 mm, pobremente seleccionados, > 90% de carbonato de calcio. Partículas compuestas por fragmentos calcáreos (93.5%) y de conchas (2.7%). Foraminíferos bentónicos <1% de los componentes calcáreos y se caracterizan por <i>Amphistegina gibbosa</i> (50%) y <i>Rosalina</i> sp (13%). |
| | 1.2. Arenas muy gruesas bioclásticas | Meseta arrecifal del bajo Burbujas y Meseta arrecifal externa del bajo Salmedina | Media 1.8 mm, pobremente seleccionadas, > 90% de carbonato de calcio. Partículas compuestas por fragmentos calcáreos (93%) y fragmentos de conchas (4%). Foraminíferos bentónicos <1% de los componentes calcáreos y se caracterizan por una mayor abundancia relativa de <i>Amphistegina gibbosa</i> (70%), seguido por <i>Archaias angulatus</i> y <i>Eponides</i> sp. (4.3% cada uno). |

| Facies | Subfacies | Distribución | Descripción |
|----------------------------------|---|--|--|
| | 1.3. Gránulos y arenas muy gruesas transicionales | Meseta arrecifal del bajo Burbujas | Media 2.2 mm, muy pobremente seleccionados, con 85% de carbonato de calcio y 11% de terrígenos. Partículas compuestas por fragmentos calcáreos (83%) y lodolitas (12%). Foraminíferos bentónicos < 1% de los componentes calcáreos y se caracterizan por una mayor abundancia relativa de <i>Amphistegina gibbosa</i> (54%), seguido por <i>Archaias angulatus</i> (17%). |
| | 1.4. Gravas bioclásticas | Meseta arrecifal del bajo Ygio | Media 4 mm, pobremente seleccionadas, con 95% de carbonato de calcio. Partículas compuestas por fragmentos calcáreos (76%) y algas calcáreas (19%). Foraminíferos bentónicos < 0.5% de los componentes calcáreos y se caracterizan por una mayor abundancia relativa de <i>Amphistegina gibbosa</i> (65%), seguido por <i>Planorbulina mediterraneensis</i> y <i>Quinqueloculina granulocostata</i> (5.2% cada uno). |
| 2. Gravas arenosas litoclásticas | | Sector suroriental del bajo Burbujas (volcán de lodo) | Media 22 mm, muy pobremente seleccionadas, compuestas principalmente de material terrígeno (71%) y carbonato de calcio (19%). Partículas compuestas por lodolitas (77%), fragmentos calcáreos (6%) y materiales exóticos (10%) como son óxidos de hierro y cuarzos bipiramidales. Los foraminíferos bentónicos constituyen en promedio el 3.2% de los componentes calcáreos y se caracterizan por una mayor abundancia relativa de <i>Amphistegina gibbosa</i> (60%), seguido por <i>Archaias angulatus</i> (7%). |
| 3. Limos litobioclásticos | | Zona periarrecifal interna (bordea el bajo Salmedina y alcanza el sector norte del muestreo) | Media 0.01 mm, pobremente seleccionados, compuestos principalmente de material terrígeno (80%) y carbonato de calcio (17%). Partículas compuestas por fragmentos de conchas (61%), foraminíferos planctónicos (14%) y fragmentos calcáreos (11%). Los foraminíferos bentónicos constituyen 2.4% en promedio de los componentes calcáreos y se caracterizan por la ausencia de <i>Amphistegina gibbosa</i> y una mayor abundancia relativa de <i>Anomalina globulosa</i> (50.5%) seguido por <i>Hanzawaia sp.</i> (18%) y <i>Gyroidina broeckhiana</i> (9% cada uno). |

| Facies | Subfacies | Distribución | Descripción |
|---|-----------|---|--|
| 4. Arenas muy finas y limos biolitolásticos | | Zona periarrecifal externa (bordea el bajo Burbujas, el sector sur del muestreo y el bajo Ygio) | Media 0.09 mm, pobremente seleccionados, compuestos principalmente de carbonato de calcio (51%) y material terrígeno (46%). Partículas compuestas por fragmentos de conchas (34%), fragmentos calcáreos (34%) y algas calcáreas (5.3%). Los foraminíferos bentónicos constituyen 3.6% en promedio de los componentes calcáreos y se caracterizan por una mayor abundancia relativa de <i>Amphistegina gibbosa</i> (37%), seguido por <i>Gyroidina broeckhiana</i> (11%), <i>Anomalina globulosa</i> (7.7%) y <i>Quinqueloculina auberiana</i> (6.7% cada uno). |

DISCUSIÓN

Las variables estudiadas en los sedimentos de los bancos de Salmedina y el análisis de agrupación permitieron diferenciar cuatro facies sedimentológicas dentro del área: (1) arenas y gravas bioclásticas de meseta arrecifal, (2) gravas arenosas litoclásticas del volcán de lodo del bajo Burbujas, (3) limos litobioclásticos periarrecifales internos y (4) arenas muy finas y limos biolitolásticos periarrecifales externos. A su vez, las arenas bioclásticas de meseta arrecifal pudieron dividirse en cuatro subfacies.

En Salmedina las unidades de meseta arrecifal interna y externa, dominadas por fragmentos calcáreos y de conchas, se diferenciaron, principalmente, por un mayor tamaño de grano en la meseta interna y por las especies de foraminíferos bentónicos que acompañan a *A. gibbosa* (*Rosalina sp.*, en la meseta interna, y *A. angulatus* y *Eponides sp.*, en la meseta externa). El sedimento de la meseta arrecifal de Burbujas es del mismo tipo que la meseta externa de Salmedina, en cambio la meseta de Ygio se caracterizó por un mayor tamaño de grano, componentes calcáreos dominados por fragmentos calcáreos y algas calcáreas y los foraminíferos que acompañan a *A. gibbosa* son *P. Mediterraneanensis* y *Q. granulocostata*.

En Burbujas se encontró una zona de transición entre la meseta arrecifal y la zona diapírica. Sus características fueron más similares a la meseta arrecifal, pero presentaron una mayor abundancia en terrígenos, ocurrencia de clastos de lodolita (en promedio 12 %) y una asociación de foraminíferos más parecida a la zona del volcán de lodo.

En la zona del volcán de Burbujas se encontraron características anómalas que merecen ser discutidas. En primer lugar, el origen de las lodolitas: Diversos autores mencionan la existencia de brechas de lodolita en los flancos de volcanes de lodo submarinos (Milkov, 2000; Yin *et al.*, 2003; Grevemeyer *et al.*, 2004). Es decir, los clastos de lodolitas son típicos de los flancos de los volcanes de lodo y, especialmente, ocurren cerca de los cráteres. En el banco de Burbujas la mayor parte de los lodos que emanan, actualmente, se dispersan con la corriente marina y se depositan en los fondos de la plataforma continental.

Otros aspectos anómalos son el crecimiento de cristales de calcita y la presencia de óxidos de hierro y cuarzo bipiramidal. La depositación de minerales autigénicos carbonatados masivos son otra característica reportada en los fondos de los volcanes de lodo submarinos y es típica de las emanaciones de metano (Sassen *et al.*, 2003; Grevemeyer *et al.*, 2004). La presencia de óxidos de hierro puede explicarse por la oxidación de sulfuros de hierro como la pirita, mineral común en sedimentos ricos en materia orgánica, como los que emanan en el bajo Burbujas, que se oxida en contacto con el agua de mar. El cuarzo bipiramidal ha sido reportado en núcleos de sedimentos en la cuenca de Colombia (Ledbetter, 1982). La depositación de tefras en el Caribe aumentó a finales del Mioceno y en el Cuaternario, y, aparentemente, está relacionada con el arco volcánico de América Central o con cambios importantes en la dirección del viento (Ledbetter, 1982). En los bancos de Salmedina es difícil establecer si éstos fueron traídos por los lodos desde sedimentos terciarios o llegan actualmente como depósitos de tefras de erupciones plinianas.

La zona periarrecifal se dividió en dos unidades diferentes denominadas interna y externa. La diferencia sedimentológica es que los lodos internos son más finos y con mayor abundancia relativa de componentes terrígenos (80 % contra 46 %). Los componentes particulados sobresalientes en los lodos internos son fragmentos de concha, foraminíferos planctónicos y fragmentos calcáreos; mientras que en los lodos externos sobresalen las algas calcáreas, en vez de foraminíferos planctónicos. En las abundancias de foraminíferos bentónicos hay una diferencia esencial. En los lodos internos no hay presencia de *Amphistegina gibbosa*, especie dominante en las mesetas arrecifales, mientras que en los lodos externos ésta es la especie dominante con un 37 %. *Anomalina globulosa* y *Gyroldina broeckhiana* son importantes en ambas unidades, pero en los lodos internos hay alta abundancia relativa de *Hanzawaia sp.*, mientras que en los externos no, apareciendo allí *Quinqueloculina auberiana*.

Por sus características, los lodos externos tienen mayor similitud con los sedimentos de meseta arrecifal que los lodos internos. Según James (1983), la mayor parte del sedimento generado en la parte superior del frente del arrecife y la cresta es transportado episódicamente por tormentas y se acumula en la parte trasera de la cresta arrecifal. Por su parte, los sedimentos de la parte intermedia y baja del frente arrecifal son llevados a la parte inferior del frente arrecifal. Esto explicaría que en Salmedina los sedimentos de plataforma externa, donde se encontraron más elementos de la meseta arrecifal, tengan su mayor extensión hacia el Sur, ya que el oleaje en Salmedina proviene principalmente desde el Norte. En este sentido, los lodos periarrecifales internos, más ricos en terrígenos y con pocos elementos de meseta arrecifal, podrían ser similares a los sedimentos de la plataforma continental al Norte de Salmedina, netamente influenciados por los aportes del río Magdalena; mientras que los lodos periarrecifales externos indicarían una mayor influencia del arrecife hacia el Sur.

El primer factor que domina la zonación sedimentológica es la profundidad y ubicación respecto a las mesetas. Además de la diferenciación ecológica por la presencia de corales mixtos y octocorales en las mesetas (Díaz, 2000), la principal diferencia física entre éstas y el piso de la plataforma es la energía del medio. Las mesetas están sometidas a un fuerte oleaje que no permite

la depositación de sedimentos finos, los cuales se depositan, preferencialmente, en los fondos periféricos de la plataforma continental. Los efectos del viento mantienen gran cantidad de sedimento resuspendido. Por tanto, los sedimentos que se encuentran en las mesetas del arrecife son, predominantemente, gruesos y se depositan en canales y hondonadas, dentro de la estructura coralina.

En el área de estudio la separación entre sedimentos alóctonos y autóctonos no coincide con la separación general entre terrígenos y biogénicos, debido a la presencia de una fuente interna de sedimentos terrígenos en el bajo Burbujas. Sin embargo, lodos típicamente diapíricos se depositan alrededor del volcán, mientras que en la zona periarrecifal gran parte de los terrígenos parecen provenir del Norte (río Magdalena).

La mayor parte de las especies de foraminíferos bentónicos encontrados en los bancos de Salmedina, *i.e.* Miliólidos (57.3 %), Rotálidos (35.3 %) y Textuláridos (7.4 %), es característica de ambientes carbonatados y arrecifales (López, 2004). Muchos de los géneros y especies encontrados en los bancos de Salmedina han sido reportados, anteriormente, en el Caribe colombiano (Parada y Londoño, 1983; Parada y Pinto, 1986; Parada, 1996) y otras áreas del Caribe y el trópico (Javaux y Scott, 2003). *Amphistegina gibbosa*, la especie dominante en las mesetas de Salmedina, es la equivalente ecológica en el Caribe y Atlántico occidental de *A. lessonii* en el Pacífico (Hallock, 1995), uno de los foraminíferos más típicos de ambientes arrecifales (Boltovskoy, 1965). El género *Amphistegina* vive en el sustrato de los arrecifes coralinos adaptado a ambientes oligotróficos, cálidos y someros. En Salmedina, su ausencia en la zona periarrecifal interna ayuda a soportar la idea de una fuente al Norte para estos sedimentos y de los aportes hacia el Sur desde el arrecife. Las asociaciones de foraminíferos en Salmedina permiten definir, con mayor detalle, las zonas sedimentológicas; muestran una clara zonación en sentido norte-sur consistente con la llegada de energía del oleaje desde el Norte.

CONCLUSIONES

El análisis de los sedimentos superficiales en los bancos de Salmedina permitió diferenciar cuatro facies sedimentológicas: (1) arenas

bioclásticas de meseta arrecifal, (2) gravas arenosas litoclásticas de origen diapírico del volcán de lodo del bajo Burbujas, (3) lodos litobioclásticos periarrecifales internos y (4) lodos biolitoclásticos periarrecifales externos.

A su vez, se identificaron cuatro subfacies de sedimentos en las mesetas arrecifales (facies 1): (1.1) gránulos y arenas muy gruesas bioclásticas de la meseta interna de Salmedina, (1.2) arenas muy gruesas bioclásticas de la meseta de Burbujas y zona externa de Salmedina, (1.3) gránulos y arenas muy gruesas de transición, entre las facies 1 y 2 de la meseta de Burbujas, y (1.4) gravas bioclásticas de la meseta de Ygio.

Los componentes particulados del sedimento $>150 \mu\text{m}$ muestran distribuciones espaciales, de acuerdo con esta zonificación: los terrígenos se presentan, preferencialmente, en la fracción fina del sedimento y son abundantes en el volcán de Burbujas y en los lodos periarrecifales; los fragmentos calcáreos son los constituyentes particulados principales en las mesetas sobre los bancos, mientras que su porcentaje es bajo en el volcán de Burbujas y en algunos lodos periarrecifales; los fragmentos de concha son más importantes en las muestras periarrecifales, mientras que las algas calcáreas son importantes en la meseta de Ygio y en los lodos periarrecifales externos, y parecen aumentar hacia el continente; el porcentaje relativo de los moluscos y foraminíferos aumenta en la zona periarrecifal; los clastos de lodolita ocurren, principalmente, asociados con las emanaciones de lodo en la zona diapírica de Burbujas; los escleritos (espículas de octocorales) se presentan en toda el área, siendo más abundantes respecto a otros componentes en la meseta arrecifal de Burbujas.

Amphistegina gibbosa es la especie de foraminífero bentónico dominante en los bancos de Salmedina, particularmente en las zonas someras de los domos; mientras que está ausente en la zona periarrecifal interna. La especie contraria es *Anomalina globulosa*, que no se presenta en las zonas someras de los domos, pero es abundante en los fondos de la plataforma continental y domina en la zona periarrecifal interna.

El patrón establecido con el muestreo y análisis realizados en este trabajo parecen indicar que los componentes calcáreos de las mesetas

arrecifales son llevados, preferencialmente, hacia el sector sur de los bancos (externo), mientras que en el Norte (interno) dominan sedimentos de plataforma continental propios de la zona norte de Salmedina y provenientes del río Magdalena.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo expresan sinceras manifestaciones de agradecimiento 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 Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas, CIOH, por brindar las facilidades de uso de sus equipos y laboratorios, además del apoyo logístico.

A todas las instancias de la Armada Nacional, que colaboraron con las salidas de campo y al personal que participó en la recolección de las muestras sedimentológicas.

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.

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo, A. 2004.** Estudio de los sedimentos superficiales de los bancos de Salmedina, litoral Caribe colombiano. Trabajo de grado (Ingeniería Geológica). Universidad Nacional de Colombia. 79 pp.
- Andrade, C. 2000.** The circulation and variability of the Colombian Basin in the Caribbean Sea. Ph.D. Thesis, University of Wales, England. 248 pp.
- Andrade, C. y Y. Thomas. 1988.** Sedimentos en suspensión e hidrodinámica al suroeste del delta del río Magdalena, mar Caribe, Colombia. Bol. Cient. CIOH, 8: 27-34.
- Andrade, C., E. Barton y C. Mooers. 2003.** Evidence of an Eastward flow along the Central

and South America Caribbean Coast. *Journal of Geophysical Research*, 108(C6): 3185 pp.

Baba, J., C. Peterson y H. Schrader. 1991. Fine grained terrigenous sediment supply and dispersal in the Gulf of California during the last century. In: Dauphin, J.P. and Simoneit, B. (eds). *The Gulf and Peninsular Province of the Californias*, AAPG, 47: 589-601.

Barker, R. 1960. Taxonomic notes on the species figured by H.B. Brady in his report on the foraminifera dredged by H.M.S. Challenger during the Years 1873-1876. Special Publication. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists # 9. Oklahoma. 238 pp.

Boltovskoy, E. 1965. Los Foraminíferos Recientes. *Biología, Métodos de Estudio, Aplicación Oceanográfica*. Ed. Universitaria de Buenos Aires, Argentina. 501 pp.

Buzas, R., K. Smith y K. Been. 1977. Ecology and systematic of foraminifera in two *Thalassia* habitats, Jamaica, West Indies. *Smithsonian Contribution to Paleobiology*. Number 31. Smithsonian Institution Press. Washington. 139 pp.

Chevillon, C. 1996. Skeletal composition of modern lagoon sediments in New Caledonia: coral a minor constituent. *Coral Reefs*, 15: 199-207.

Díaz, J. (ed.). 2000. Áreas Coralinas de Colombia. Serie de Publicaciones Especiales INVEMAR, No. 5. 175 pp.

Dodge, R. y J. Vaisnys. 1980. Skeletal growth chronologies of recent and fossil corals. *En*: Rhoads, M. and Lutz, R. (eds.). *Skeletal Growth of Aquatic Organisms: Biological Records of Environmental Change*. Plenum Press, 750 pp.

Duque-Caro, H. 1984. Structural style, diapirism, and accretionary episodes of the Sinú-San Jacinto terrane, southwestern Caribbean borderland. *Geological Society of America, Memoir* 162: 303-316.

Fatela, F. y R. Taborda. 2002. Confidence limits of species proportions in microfossil assemblages. *Marine Micropaleontology*, 45: 169-174.

Grevemeyer, I., A. Kopf, N. Fekete, N. Kaul, H. Villinger, M. Heesemann, K. Wallmann, V. Spies,

H. Gennerich, M. Müller y W. Weinrebe. 2004. Fluid flow through active mud dome Mound Culebra offshore Nicoya Peninsula, Costa Rica: evidence from heat flow surveying. *Marine Geology*, 207: 145-157.

Halfar, J., L. Godínez-Orta y J. Ingle jr. 2000. Microfacies analysis of recent carbonate environments in the Southern Gulf of California, México: A model for warm-temperate to subtropical carbonate formation. *Palaios*, 15: 323-342.

Hallock, P. 1995. *Amphistegina* (Foraminiferida) densities as a practical, reliable, low cost indicator of coral reef vitality. *Coral Reef Symposium*. (<http://www.epa.gov/owow/oceans/coral/symposium/hallock.html>). [Consulta: 26 y 27 de enero de 1995].

Heap, A., G. Dickens, L. Stewart y J. Woolfe. 2002. Holocene storage of siliciclastic sediment around islands of the middle shelf of the Great Barrier Reef Platform, north-east Australia. *Sedimentology*, 49(3): 603-618.

Hoitink, A. 2004. Tidally induced clouds of suspended sediment connected to shallow - water coral reefs. *Marine Geology*, 208: 13-31.

James, N. 1983. Reef Environment. In: Scholle, P.A., D.G. Bebout and C.H. Moore (eds). *Carbonate Depositional Environments*. AAPG Memoir, 33: 346-462.

Javaux, E. y D. Scott. 2003. Illustration of modern benthic foraminifera from Bermuda and remarks on distribution in other subtropical / tropical areas. *Palaeontologia Electronica*, 6(4): 29pp. (http://palaeo-electronica.org/paleo/2003_1/benthic/issue1_03.htm).

Larcombe, P., A. Costen y K. Woolfe. 2001. The hydrodynamic and sedimentary setting of nearshore coral reefs, central Great Barrier Reef shelf, Australia: Paluma shoals, a case study. *Sedimentology*, 48(4): 811-820.

Leble, S. y R. Cuignon. 1987. El archipiélago de las islas del Rosario, estudio morfológico, hidrodinámico y sedimentológico. *Bol. Cient. CIOH*, 7: 37-52.

Ledbetter, M. 1982. Tephrochronology at sites 502 and 503. In: Amidei, R. and M. Lee (eds). *Initial*

Reports of the Deep Sea Drilling Project, volume LXVIII. Pp. 403-408.

López, S. 2004. Foraminíferos bentónicos recientes de los bancos de Salmedina, Caribe colombiano. Trabajo de grado (Ingeniería Geológica). Universidad Nacional de Colombia. 53 pp.

McBride, E. 1971. Mathematical Treatment of size Distribution data. En: Carver R.E (ed). Procedures in Sedimentary Petrology. Wiley Interscience. New York: pp. 109-127.

McCullock, I. 1981. Qualitative Observations on Recent Foraminiferal Tests. Part IV with emphasis on the Alan Hancock Atlantic Expedition Collections. University of Southern California. Los Ángeles, California. 363 pp.

McManus, J. 1988. Grain size determination and interpretation. En: Tucker, M. (ed.). Techniques in Sedimentology. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London. Pp. 63-85.

Milkov, A. 2000. World wide distribution of submarine mud volcanoes and associated gas hydrates. Marine Geology, 167: 29-42.

Molina, J., H. Cáceres, P. Ruge y L. Castillo. 1986. Análisis deposicional y geohistórico del noroccidente colombiano. Geología Colombiana, 15: 5-33.

Parada, C. 1996. Foraminíferos del Pleistoceno - Holoceno en el Caribe Colombiano. Editora Guadalupe. Bogotá. 392 pp.

Parada, C. y C. Londoño de Hoyos. 1983. Foraminíferos Bentónicos Recientes del Norte de Cartagena. Editora Guadalupe. Bogotá. 156 pp.

Parada, C. y J. Pinto. 1986. Foraminíferos Bentónicos Recientes de Isla Barú. FEN COLOMBIA. Bogotá. 212 pp.

Phleger, F. 1960. Ecology and Distribution of Recent Foraminifera. The Johns Hopkins Press, Baltimore. 297 pp.

Ricaurte, C., J. Domínguez, G. Mayo, C. Andrade, H. Ospina y A. Gutiérrez. 2004. Nota sobre algunos rasgos geomorfológicos de los bancos de Salmedina. Boletín Científico del CIOH, 22: 64-76.

Sassen, R., A. Milkov, H. Roberts, S. Sweet y D. De Freitas. 2003. Geochemical evidence of rapid hydrocarbon venting from a seafloor-piercing mud diapir: Gulf of Mexico continental shelf. Marine Geology, 198: 319-329.

Smith, S. y D. Kinsey. 1976. Calcium carbonate production, coral reef growth and sea level change. Science, 194: 937-939.

Toussaint, J. 1995. Megaestructuras del Caribe Colombiano y de la parte septentrional del Bloque Andino. Dyna, 120: 49-59.

Vernette, G. 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 pp.

Vernette, G., A. Mauffret, C. Bobier, L. Briceño y J. Gayet. 1992. Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. Tectonophysics, 202: 335-349.

Webster, J., L. Wallace, E. Silver, D. Potts, J. Braga, W. Renema, K. Riker-Coleman y C. Gallup. 2004. Coralgall composition of drowned carbonate platforms in the Huon Gulf, Papua New Guinea; implications for lowstand reef development and drowning. Marine Geology, 204: 59-89.

Wolanski, E., R. Richmond, L. McCook y H. Sweatman. 2003. Mud, marine snow and coral reefs. American Scientist, 91: 44-51.

Yamano, H., H. Kayanne, F. Matsuda y Y. Tsuji. 2002. Lagoonal facies, ages, and sedimentation in three atolls in the Pacific. Marine Geology, 185: 233-247.

Yin, P., S. Berné, P. Vagner, B. Loubrieu y Z. Liu. 2003. Mud volcanoes at the shelf margin of the East China Sea. Marine Geology, 194: 135-149.