

# Clasificación de unidades del fondo marino a partir de la distribución espacial de los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz, Golfo de California

## Classification of seafloor units based on the spatial distribution of superficial sediments in La Paz Bay, Gulf of California

Francisco J. Urcádiz-Cázares<sup>1</sup>, Víctor H. Cruz-Escalona<sup>1</sup>, Enrique H. Nava-Sánchez<sup>2</sup> y Alfredo Ortega-Rubio<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Pesquería y Biología Marina, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. Avenida Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur, 23096. México

<sup>2</sup> Departamento de Oceanología, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional. Avenida Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, La Paz, Baja California Sur, 23096. México

<sup>3</sup> Planeación Ambiental y Conservación, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. Avenida Instituto Politécnico Nacional 195, Col. Playa Palo de Santa Rita, 23090. México  
e-mail: javier.urcadiz@gmail.com

**Recibido:** 13 de marzo de 2017.

**Aceptado:** 2 de agosto de 2017.

Urcádiz-Cázares F. J., V. H. Cruz-Escalona, E. H. Nava-Sánchez y A. Ortega-Rubio. 2017. Clasificación de unidades del fondo marino a partir de la distribución espacial de los sedimentos superficiales de la Bahía de La Paz, Golfo de California. *Hidrobiológica* 27 (3): 399-409. DOI:10.24275/uam/izt/dcbs/hidro/2017v27n3/Urcadiz

### RESUMEN

**Antecedentes.** El mapeo del fondo marino genera información útil para estudios ecológicos y de conservación en zonas marinas. Sin embargo, las metodologías para la delimitación de unidades en los fondos dominados por sedimentos no consolidados son escasas. **Objetivos.** Clasificar y caracterizar unidades en el fondo marino a partir de la distribución espacial de cuatro variables: el contenido de carbonato de calcio, el tamaño medio de grano, la clasificación del sedimento y la profundidad en la bahía de La Paz. **Métodos.** La distribución espacial de las cuatro variables mencionadas fue generada a partir de modelos de interpolación. Los modelos se elaboraron con base en los datos de 85 muestras de sedimento superficial y utilizando un sistema de información geográfica. La clasificación de unidades se determinó agrupando polígonos construidos a partir de los modelos e implementando un análisis de agrupamiento jerárquico. La caracterización se obtuvo con los valores predichos en los modelos. **Resultados.** Los modelos presentaron valores entre 2.7 a 95% de contenido de carbonato de calcio,  $-0.9$  a  $7.8 \Phi$  de tamaño medio de grano (donde  $\Phi$  es una transformación logarítmica del diámetro de sedimento),  $0.1$  a  $4 \Phi$  de clasificación y  $0$  a  $680$  m de profundidad. El análisis jerárquico determinó 14 unidades en el fondo marino. Cuatro unidades conforman el 91% del área de estudio. La unidad 4a se caracteriza por un alto contenido de  $\text{CaCO}_3$  ( $72 \pm 20\%$ ); la unidad 3a, por una mala clasificación ( $2.2 \pm 0.7 \Phi$ ); la unidad 2a, por una clasificación moderada ( $1.1 \pm 0.3 \Phi$ ), y la unidad 1a, por la presencia de sedimentos finos ( $4.5 \pm 0.6 \Phi$ ). **Conclusiones.** Este estudio representa una de las primeras propuestas de clasificación de unidades del fondo marino sobre sedimentos no consolidados en la BLP. La metodología empleada permitió separar cuatro principales unidades que reflejan condiciones ambientales con características propias. También se establecen los primeros modelos de distribución por medio del cálculo de la media del error y la raíz cuadrada del error cuadrático medio, que contrasta un conjunto de observaciones independientes contra los valores modelados de las variables citadas. Esta propuesta se puede utilizar como línea base en estudios de zonas costeras y plataformas continentales del Golfo de California y otras regiones marinas, en tanto dicha distribución no se vea afectada por eventos hidrometeorológicos extremos, en cuyo caso se requeriría un estudio similar.

**Palabras clave:** Carbonato de calcio, clasificación, fondo marino, interpolación, sedimentos, tamaño de grano.

### ABSTRACT

**Background.** Seafloor mapping provides valuable information for ecological studies and conservation of marine areas; however, the methods used to delimit seafloor units in areas dominated by unconsolidated sediments are scarce. **Goals.** To classify and characterize seafloor units based on the spatial distribution of four variables: calcium carbonate content, mean grain size, sorting, and the depth in La Paz Bay (LPB). **Methods.** The spatial distribution of the four variables mentioned above was obtained from interpolation models. The models were created with the data of 85 samples of superficial sediment and by using a geographic information system. The classification of units was determined by grouping polygons that were constructed based on models and by implementing a hierarchical cluster analysis. Characterization was obtained from values predicted by the models. **Results.** The models produced values between 2.7 to 95% of  $\text{CaCO}_3$ ,  $-0.9$  to  $7.8 \Phi$  (mean grain size),  $0.1$  to  $4 \Phi$  (sorting), and depth values ranging from  $0$  to  $680$  m. The hierarchical cluster analysis

found 14 units on the seafloor. Four units comprise 91% of the study area. Unit 4a stands out for its high content of  $\text{CaCO}_3$  ( $72 \pm 20\%$ ). Unit 3a shows poor sorting ( $2.2 \pm 0.7 \Phi$ ), whereas unit 2a had moderate sorting ( $1.1 \pm 0.3 \Phi$ ). Finally, unit 1a includes fine sediments ( $4.5 \pm 0.6 \Phi$ ). **Conclusions.** This study is one of the first seafloor-unit-classification proposals of unconsolidated sediments in LPB. The methodology allowed us to separate four main units reflecting environmental conditions with intrinsic properties. In addition, it establishes the first distribution models by calculating the mean error and the root mean square error contrasting a set of independent observations versus the modelling values of the variables mentioned previously. This proposal can be used as a baseline for studies of coastal areas and continental shelves in the Gulf of California and other sea areas, if such distribution is not affected by extreme hydro-meteorological events, in which case a similar study would be required.

**Key words:** Calcium carbonate, grain size, interpolation models, marine sediments, seafloor mapping, sorting.

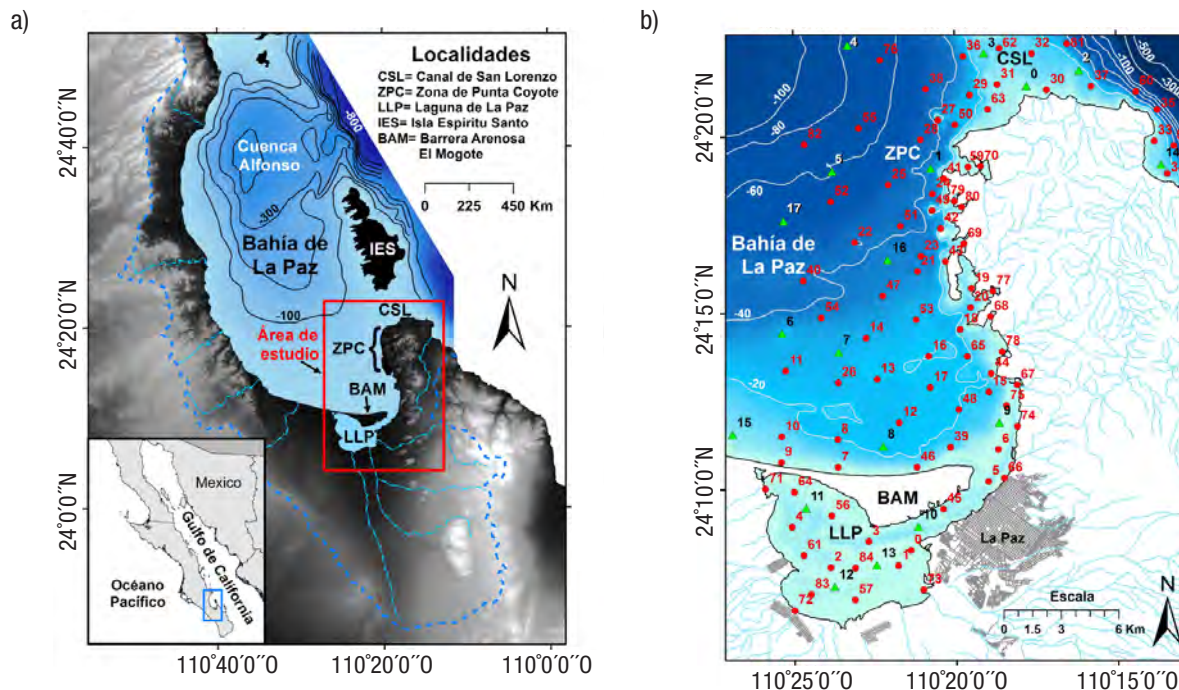
### INTRODUCCIÓN

El mapeo del fondo marino genera información indispensable para la conservación y el manejo de los recursos marinos. Es fundamental para la zonificación y planeación de ordenamientos ecológicos marinos y áreas naturales protegidas. Estos instrumentos de conservación cuentan con amplias referencias metodológicas en el medio terrestre, pero son muy escasas en el medio marino (Colenutt *et al.*, 2013; Espinoza-Tenorio *et al.*, 2014).

El Golfo de California es reconocido por su elevada biodiversidad y productividad (Brusca, 2010). Particularmente, el sureste de la bahía de La Paz (BLP) (Fig. 1a) ha sido denominado como una Región Marina Prioritaria e incorpora un Área de Importancia para la Conservación de Aves (Arriaga-Cabrera *et al.*, 2009), dos sitios Ramsar, un parque nacional y 23 zonas con manglar. También incluye el Área de Protección de Flora y Fauna "Islas del Golfo" y el área de Balandra, ambas consideradas por la UNESCO como Patrimonio Natural de la Humanidad.

La BLP registra un ambiente bentónico con sedimentos mixtos (siliciclásticos-carbonatados) y carbonatados (Halfar *et al.*, 2004). Los ambientes carbonatados (>90% de  $\text{CaCO}_3$ ) son poco comunes en las costas orientales del océano Pacífico (Halfar *et al.*, 2004). Estos ambientes se asocian a organismos como corales y rodolitos, que pueden formar colonias en el fondo y concentrar una biodiversidad relativamente elevada (Reyes-Bonilla, 1992; Steller *et al.*, 2003). A pesar de las declaratorias y la presencia de estos ambientes sedimentarios, no se han propuesto mapas que clasifiquen y caractericen unidades en el fondo marino de la BLP.

Para realizar un mapeo en el fondo marino se han propuesto metodologías con base en componentes bióticos y abióticos, como la clasificación de biotopos (Sergej & Ducrotot, 2006) y hábitats bentónicos (Sheppard *et al.*, 1995; Cerdeira-Estrada *et al.*, 2008). Estas clasificaciones generalmente se desarrollan con ayuda de sensores remotos sobre costas carbonatadas someras con estructuras de arrecifes corales (Giardino *et al.*, 2016). En estas zonas es posible capturar infor-



Figuras 1a-b. a). La Bahía de La Paz y localidades. El área de estudio se muestra en el recuadro rojo, y las cuencas hidrológicas, con líneas azules. Batimetría de Nava-Sánchez *et al.* (2001). b) Área de estudio. Sitios de muestreo del fondo marino (puntos) y muestra independiente (triángulos). Las líneas azules representan el drenaje de las pequeñas cuencas hidrológicas.

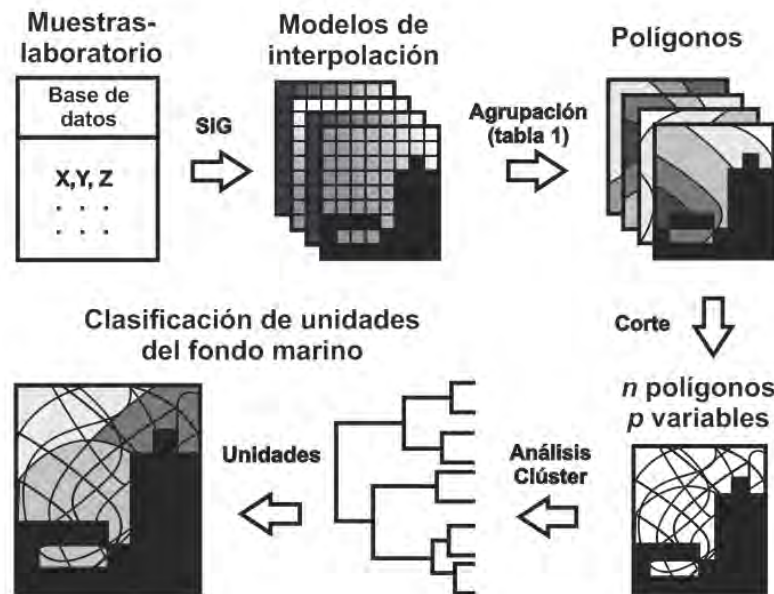


Figura 2. Procedimientos para la clasificación de unidades del fondo marino a partir de la distribución espacial de cuatro variables (contenido de  $\text{CaCO}_3$ , tamaño medio de grano, clasificación del sedimento y profundidad).

mación escénica; sin embargo, en las plataformas continentales como la BLP o cualquier zona alejada de la costa (más allá de los 20-30 m), el uso de sensores ópticos pasivos está limitado por la profundidad y la transparencia del mar (Hamylton, 2011). Para zonas más profundas se han hecho clasificaciones basadas en componentes abióticos como la determinación de geoformas y estructuras del fondo (Walker *et al.*, 2008; FGDC, 2012; Haris *et al.*, 2012; Micallef *et al.*, 2012). Sin embargo, cuando el fondo marino carece de geoformas o estructuras bien definidas, y está compuesto principalmente por sedimentos no consolidados, la identificación y delimitación de unidades no es sencilla. En fondos con sedimentos no consolidados se han utilizado clasificaciones basadas en un análisis textural en el que sólo se incluye el porcentaje de arena, limo y arcilla (FGDC, 2012; Jeroch, 2013). No obstante, otras variables, como el contenido de  $\text{CaCO}_3$ , el tamaño medio de grano (Verfaillie *et al.*, 2006), la clasificación del sedimento (Ma *et al.*, 2010) y la profundidad de la columna de agua (FGDC, 2012; Jeroch, 2013; Harris *et al.*, 2014; Snickars *et al.*, 2014), pueden aportar información para delimitar zonas o unidades en el fondo marino.

El contenido porcentual de  $\text{CaCO}_3$  y la composición de bioclastos indican el origen y la asociación de organismos marinos (Morse & Mackenzie, 1990), así como la relación entre ambientes sedimentarios mixtos. El tamaño medio de grano se asocia a los niveles de energía de las condiciones hidrodinámicas del ambiente marino (Middleton, 1976; Syvitski, 1991). La clasificación del sedimento ayuda a interpretar procesos de ambientes sedimentarios (Boggs, 2012), y la profundidad de la columna de agua es una variable frecuentemente utilizada en estudios ecológicos marinos (Sheppard *et al.*, 1995; McLachlan & Brown, 2006; Snickars *et al.*, 2014). En este sentido, este trabajo propone un método multivariante para clasificar unidades en el fondo marino de zonas costeras y plataformas continentales donde se incorpora la va-

riabilidad espacial del contenido de  $\text{CaCO}_3$ , el tamaño medio de grano, la clasificación del sedimento y la profundidad de la columna de agua. Particularmente, en este estudio: 1) se modela la distribución espacial de las cuatro variables citadas con base en un algoritmo de interpolación y 2) se clasifica y caracteriza las unidades del fondo marino a partir de la distribución espacial de dichas variables utilizando un análisis de agrupamiento jerárquico.

**Marco geológico y sedimentos marinos.** El fondo de la BLP (Fig. 1a) está conformado por plataformas estrechas con depresiones y bloques elevados (Nava-Sánchez *et al.*, 2001). La porción noroeste de la BLP es más profunda e incluye a la cuenca Alfonso, con 420 m de profundidad (Cruz-Orozco *et al.*, 1996). La depresión recibe sedimentos terrígenos, eólicos y hemipelágicos (Silverberg *et al.*, 2014). Hacia el sureste de la BLP la profundidad disminuye desde los 220 m hasta la línea de costa, configurando una plataforma con pendiente suave donde el fondo marino contiene arenas finas de origen terrígeno (Cruz-Orozco *et al.*, 1996). Sobre la línea de costa, el transporte litoral se lleva a cabo principalmente en dirección sur-sureste hasta configurar una barra arenosa conocida como El Mogote (Nava-Sánchez & Cruz-Orozco, 1989). Esta barra disminuye la energía del mar enmarcando a la laguna de La Paz, la cual está conectada con la BLP por medio de un canal de mareas donde se registra la profundidad máxima de 10 m. La laguna recibe sedimentos por aporte fluvial (arroyos) y por transporte litoral y eólico (Nava-Sánchez & Cruz-Orozco, 1989; Choumiline *et al.*, 2009). Los sedimentos de la laguna de La Paz se clasifican como arenas gruesas hasta limos muy finos (Álvarez-Arellano *et al.*, 1997). En el canal de San Lorenzo (Fig. 1b) los sedimentos tienen un tamaño de arenas gruesas a muy gruesas, con una composición mineralógica mayor que 90% de  $\text{CaCO}_3$ . Los bioclastos corresponden a fragmentos de moluscos, corales, rodolitos y foraminíferos (Halfar *et al.*, 2000; 2004).

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Trabajo de campo y laboratorio.** Dentro del área de estudio (Fig. 1b), se programaron 85 sitios de muestreo (70 aleatorios y 15 dirigidos) a través del sistema de información geográfica (SIG) Esri ArcGIS 10.3. También se generó una muestra independiente de 18 sitios para evaluar los modelos de interpolación. El trabajo de campo se realizó mediante embarcaciones equipadas con sistema de navegación satelital y con dragas de tipo Van Veen, desde febrero hasta mayo de 2016. Este periodo se eligió previo a la temporada de ciclones tropicales para evitar que las muestras estuvieran bajo la influencia del efecto hidrodinámico que éstos ocasionan. Las muestras se tomaron del sedimento superficial del fondo marino y fueron trasladadas al Laboratorio de Geología del IPN-CICIMAR. Adicionalmente, en cada sitio se tomó video submarino SCUBA y videos asistidos con una carcasa desde la borda para registrar la presencia de organismos conspicuos y estructuras bentónicas. Tanto las muestras de sedimento como los videos se obtuvieron en un intervalo entre 1 a 70 m de profundidad. Para determinar el origen biogénico de los sedimentos gruesos, se realizaron observaciones con microscopios estereoscópicos directamente sobre las muestras.

En el laboratorio, con una balanza analítica se pesaron entre 3 y 4 g de cada muestra, las cuales fueron tratadas con ácido clorhídrico diluido al 10%. Luego, por diferencias de pesos se calculó el contenido porcentual del  $\text{CaCO}_3$  (Halfar *et al.*, 2000). Por otro lado, una muestra de aproximadamente 27 g fue fraccionada en tres grupos: sedimento muy

grueso ( $-2.25$  a  $-0.75 \Phi$ ), grueso ( $-0.75$  a  $4 \Phi$ ) y fino ( $>4 \Phi$ ), con tamices estandarizados. La unidad  $\Phi$  es una transformación del diámetro de las partículas del sedimento ( $\Phi = -\log_2 d$ , donde  $d$  es el diámetro de la partícula en mm)(Blott & Pye, 2001). La fracción muy gruesa fue tratada por método de tamizado ro-tap, con intervalos de  $1/4 \Phi$ . Las fracciones gruesa y fina se trataron mediante un módulo seco y otro húmedo utilizando un analizador de partículas de difracción láser, modelo Beckman Coulter LS13320, en intervalos de  $1/8 \Phi$ . Con los datos se calculó el tamaño medio de grano y la clasificación según el método logarítmico de los momentos con el programa Gradistat (Blott & Pye, 2001). A partir de los datos obtenidos para cada sitio y sus coordenadas, se procedió a modelar la distribución espacial de cada variable.

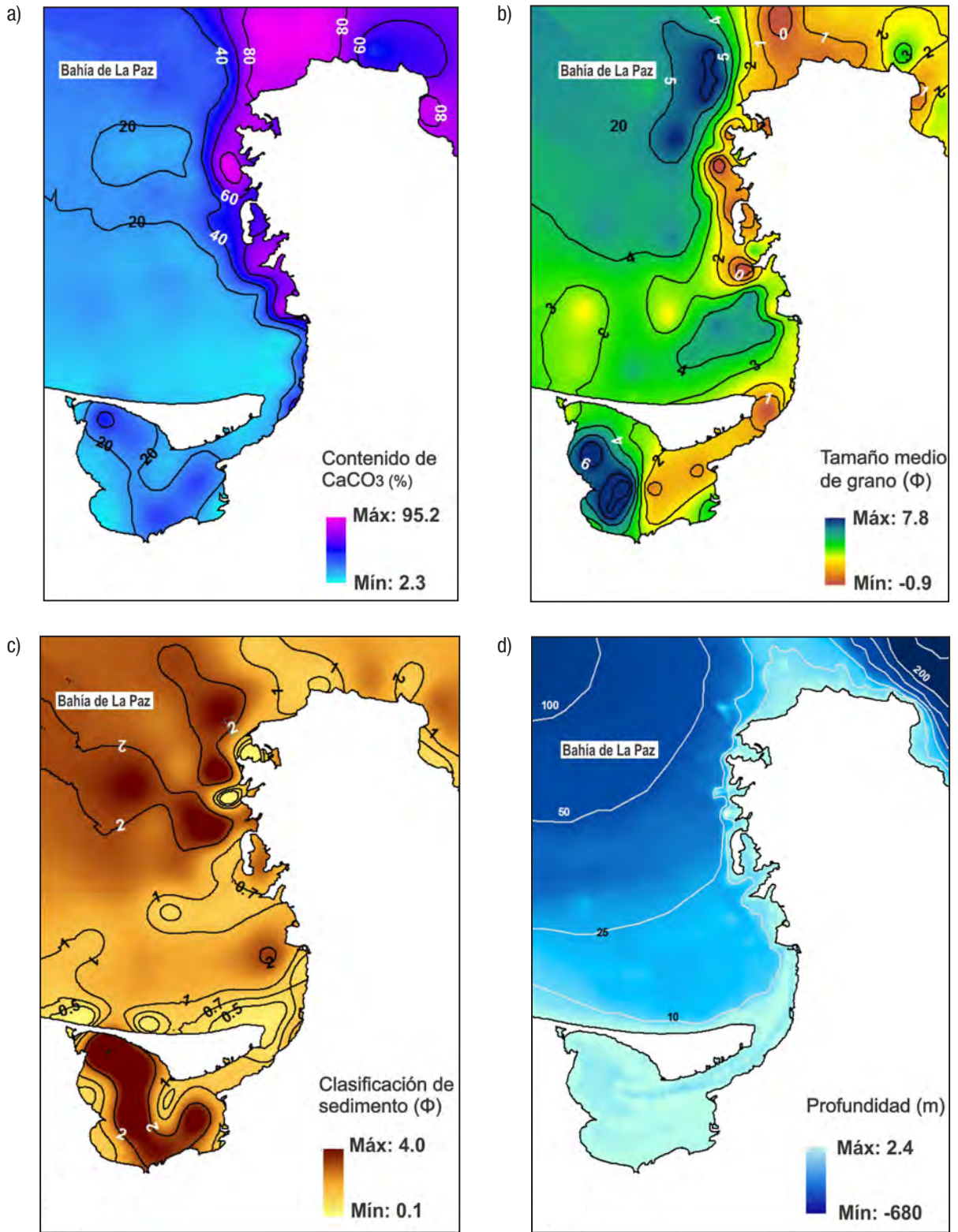
**Modelación de la distribución espacial (interpolaciones).** Los modelos se construyeron con el algoritmo de funciones de base radial del SIG (Buhmann, 2003). Los modelos fueron evaluados mediante la comparación de los valores pronosticados contra los medidos en la muestra independiente. En la comparación se calculó la media del error (ME) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCEC), (Luo *et al.*, 2008). Adicionalmente, se estimó un intervalo de confianza de la diferencia de medianas entre cada modelo y las observaciones de la muestra independiente, basado en la prueba de rango con signo de Wilcoxon (Hollander *et al.*, 2014). El modelo de profundidad se elaboró con la información disponible en cartas batimétricas escala 1:20,000 (DGID, 1996; 2008). Todas las variables se manejaron en formato ráster y tienen la misma alineación y tamaño de pixel, de  $100 \times 100$  m. El formato de los modelos permite caracterizar el comportamiento espacial de cada variable en el fondo de la BLP.

**Clasificación y caracterización de unidades del fondo marino.** Los procedimientos para la clasificación de unidades del fondo marino se resumen en la figura 2. Para cada modelo, los valores de los pixeles fueron agrupados según los intervalos reportados en la literatura (tabla 1). Para el tamaño medio de grano y la clasificación se utilizaron los límites de Folk y Ward (1957) y Friedman y Sanders (1978). Para la profundidad se utilizaron los contornos usados por Harris *et al.* (2014), donde el límite de 100 m representa la profundidad máxima de la plataforma continental (Nava-Sánchez *et al.*, 2001). El modelo de  $\text{CaCO}_3$  se dividió en cinco clases equidistantes con base en los siguientes criterios: 1) el número de clases debe ser similar al resto de las variables para evitar sesgo, 2) todos los valores posibles fueron incorporados, esto es de 0 a 100% de  $\text{CaCO}_3$ , y 3) los valores de los límites de las cinco clases y su distribución geográfica coinciden razonablemente con los valores del método de rupturas naturales Jenks (De-Smith *et al.*, 2015). Estas divisiones permitieron establecer los límites espaciales en el área de estudio. Los límites se editaron en el SIG para generar polígonos con los valores clasificados. Los polígonos de cada modelo se sobrepusieron y se cortaron unos con otros para obtener una matriz de  $n$  polígonos con  $p$  variables. Posteriormente, se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico (multivariado) con el *software* Minitab v.17. El análisis requiere que las variables tengan el mismo rango para evitar sesgos; por lo tanto, se utilizaron los valores transformados entre 1 y 5 (tabla 1). En el análisis se utilizó la distancia euclidiana al cuadrado y el método de aglomeración de Ward (Kaufman & Rousseeu, 2005). A continuación, se agruparon los polígonos en clases (conglomerados), en función de la distancia multivariada. Las unidades del fondo marino se determinaron por medio de la inspección de los conglomerados en el dendrograma y, según la configuración espacial de los mismos, en diferentes niveles de agrupación. Finalmente, el perímetro de cada unidad agrupó un conjunto de pixeles de cada modelo. Los valores de los pixeles permitieron caracterizar numéricamente las unidades.

Tabla 1. Límites de los intervalos de clases de las variables utilizadas para la clasificación de unidades del fondo marino.

VARIABLES	Límites	T	Clases
$\text{CaCO}_3$ (%)	0-20	1	Muy Bajo
	20-40	2	Bajo
	40-60	3	Medio
	60-80	4	Alto
	80-100	5	Muy Alto
Tamaño medio de grano ( $\Phi$ )	-1 - 0	5	Arena muy gruesa
	0 - 1	4.5	Arena gruesa
	1 - 2	4	Arena media
	2 - 3	3.5	Arena fina
	3 - 4	3	Arena muy fina
	4 - 5	2.5	Limo muy grueso
	5 - 6	2	Limo grueso
	6 - 7	1.5	Limo Medio
7 - 8	1	Limo fino	
Clasificación ( $\Phi$ )	0.3-0.5	1	Bien
	0.5-0.7	2	Moderadamente Bien
	0.7-1	3	Moderadamente
	1-2	4	Pobremente
	2-4	5	Muy Pobremente
Profundidad (m)	0-10	5	Contorno inferior
	10-25	4	Costa afuera
	25-50	3	Contorno medio
	50-100	2	Contorno alto/LMP
	>100	1	Talud

T=variables transformadas jerárquicamente de 1 a 5. LMP= límite máximo de plataforma.



Figuras 3a-d. Modelos de distribución espacial. a) Contenido de  $\text{CaCO}_3$ . b) Tamaño medio de grano. Los valores mínimos representan los tamaños gruesos, y los máximos, los tamaños finos. c) Clasificación del sedimento. Los valores mínimos representan una buena a moderada selección (baja variabilidad), y los valores máximos representan una mala a muy mala selección (alta variabilidad). d) Profundidad (batimetría). Las líneas representan los límites de la Tabla 1.

## RESULTADOS

**Modelos de distribución espacial y cálculos del error.** La distribución del contenido de  $\text{CaCO}_3$ , el tamaño medio de grano, la clasificación del sedimento y la profundidad (batimetría) se presentan en la figura 3. El modelo de  $\text{CaCO}_3$  presenta valores entre 2.7 y 95% (Fig. 3a). Los valores menores que 20% se distribuyen ampliamente sobre la plataforma interna de la BLP, al norte de la barra arenosa El Mogote. Los valores mayores que 60% se encuentran bordeando estrechamente la zona de Punta Coyote. En el canal de San Lorenzo se reportan valores mayores al 80%. Los valores mínimos y máximos del modelo de tamaño medio de grano (Fig. 3b) fueron de  $-0.9$  a  $7.8 \Phi$ , esto es, entre arena muy gruesa hasta limo fino. Los valores bajos (tamaños gruesos) se presentan en el canal de mareas de la Laguna de La Paz ( $-0.5$  a  $1.6 \Phi$ ) y en algunas áreas bordeando la zona de Punta Coyote, sobre todo en el canal de San Lorenzo, donde alcanza el tamaño de arena muy gruesa. Los valores más altos (tamaños finos) se encuentran en la parte interna de la laguna de La Paz y al noroeste del área de estudio. La clasificación del sedimento varía desde 0.1 hasta  $4 \Phi$  (Fig. 3c). Los valores bajos se distribuyen a lo largo de la línea de costa, al norte de la barra arenosa El Mogote ( $0.5$  a  $0.7 \Phi$ ), en la plataforma interna y también en el canal de San Lorenzo ( $0.7$  a  $1 \Phi$ ). Los valores altos se ubican en la parte central de la laguna de La Paz y al noroeste del área de estudio.

La evaluación de los modelos a través de la media del error (ME) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RCEC) se muestra en la figura 4. La estimación de la diferencia de medianas entre los valores pronosticados y los medidos con la muestra independiente fue de 0.5 a 6.4% (contenido de  $\text{CaCO}_3$ ),  $-0.5$  a  $0.2 \Phi$  (tamaño medio de grano) y  $-0.4$  a  $0.0 \Phi$  (clasificación del sedimento) para intervalos de confianza del 95%.

**Clasificación y caracterización de unidades del fondo marino.** Al sobreponer los límites de los cuatro modelos de distribución (Fig. 3, tabla 1) se estableció un total de 413 polígonos. Los polígonos se agruparon como se muestra en la figura 5a. Se eligió la agrupación para cuatro clases (conglomerados) con base en el nivel de distancia euclidiana, con valores de 77.8, 108.7, 175.8 y 197.5. Las cuatro clases fueron sub-divididas, a su vez, en 14 unidades, según su separación geográfica (Fig. 5b). La agrupación de polígonos estableció cuatro principales unidades (1a, 2a, 3a y 4a), que representan el 91% del área de estudio en el fondo marino de la BLP. Los valores de los píxeles agrupados para cada variable dentro de cada unidad se resumen en la tabla 2.

La unidad 1a se caracteriza por tener una profundidad promedio de  $61 \pm 25$  m y un tamaño medio de grano de  $4.5 \pm 0.6 \Phi$ , correspondiente a limo grueso y limo muy grueso. La unidad 2a presenta una profundidad de  $19 \pm 10$  m, una pobre a moderada clasificación del sedimento ( $1.1 \pm 0.3 \Phi$ ) y muy bajo contenido de  $\text{CaCO}_3$  ( $13 \pm 4.2\%$ ). En las unidades 1a y 2a es común observar orificios en el sedimento realizados por organismos de la infauna bentónica. La unidad 3a se caracteriza por una muy mala clasificación del sedimento ( $2.2 \pm 0.7 \Phi$ ) y baja profundidad ( $2.2 \pm 1.9$  m). En el fondo marino se observaron sitios con algas (*Sargassum* spp.) adheridas a valvas de moluscos bivalvos o rocas (guijarros) y, en ocasiones, sobre corales muertos. Algunos bivalvos observados en el fondo fueron *Chione californiensis*, *Chione* sp., *Abra tepocana*, *Laevicardium* sp., *Nuculana* sp. y los gasterópodos *Nassarius luteostoma* y *Cerithium stercusmuscarum*. La unidad 4a se encuentra a  $13 \pm 10$  m de profundidad y presenta el mayor contenido de  $\text{CaCO}_3$  ( $72 \pm 20\%$ ) y el mayor tamaño medio de grano, con arenas finas a gruesas ( $1.4 \pm 0.8 \Phi$ ). La unidad 4a presenta una pobre a moderada clasificación del sedimento ( $1 \pm 0.3 \Phi$ ). Dentro de la unidad, en los sitios 62, 18 y 0-independiente (Fig. 1b) se observó la presencia de mantos de rodolitos, mientras que en los sitios 30, 43 y 49 se observaron colonias de corales.

Tabla 2. Caracterización de unidades. Valores del conjunto de píxeles obtenidos en los modelos dentro de cada unidad clasificada.

ID	Área (km <sup>2</sup> )	CaCO <sub>3</sub> (%)			Tamaño medio de grano (Φ)			Clasificación (Φ)			Profundidad (m)		
		μ	σ	R	μ	σ	R	μ	σ	R	μ	σ	R
1 a	157	29	13	68	4.5	0.6	5.4	1.9	0.3	2.1	61	25	126
1 b	19	62	5.5	26	2.1	0.4	2.6	1.3	0.2	1.0	286	199	633
1 c	0.8	49	5.2	20	3.5	0.3	1.1	1.6	0.2	0.8	17	2.1	7.2
2 a	123	13	4.2	35	3.1	0.8	5.5	1.1	0.3	1.8	19	10	47
2 b	0.4	8.3	2.4	8.0	2.7	0.1	0.5	0.6	0.3	0.7	0.1	0.3	1.4
2 c	1.9	11	0.8	3.5	5.7	0.5	2.2	0.8	0.1	0.4	2.2	1.9	5.3
2 d	1.8	5.8	1.4	5.8	4.7	0.6	3.0	0.8	0.1	0.3	1.1	0.9	3.3
2 e	0.4	5.2	1.6	6.2	3.4	0.1	0.5	0.9	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
2 f	3.9	52	3.9	16	1.6	0.7	2.7	1.3	0.3	1.0	29	13	49
3 a	38	24	7.8	41	3.5	1.8	7.1	2.2	0.7	3.1	2.2	1.9	10
3 b	0.3	27	6.7	28	4.1	0.6	2.7	1.7	0.4	1.1	19	1.6	12
3 c	1.8	54	2.9	13	1.6	0.6	2.0	1.3	0.2	0.7	6.9	4.0	16
4 a	55	72	20	76	1.4	0.8	4.3	1.0	0.3	2.0	13	10	58
4 b	6.3	78	4.0	22	1.8	0.6	2.2	1.0	0.3	1.2	15	13	52

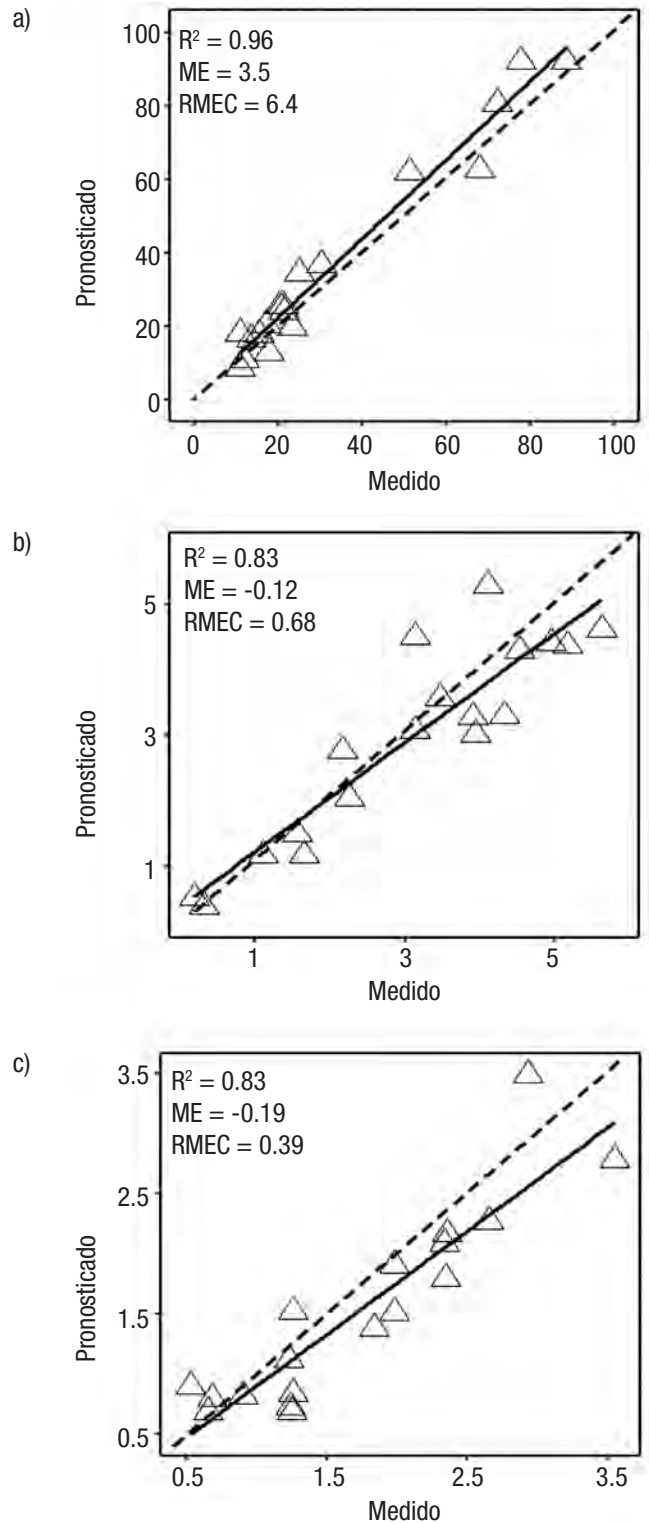
ID= identificador de la unidad del fondo marino (ver Fig. 5); se presenta el promedio (μ), la desviación estándar (σ) y el rango (R) del conjunto de píxeles agrupados según los límites espaciales de cada clase.

### DISCUSIÓN

**Evaluación de los modelos de distribución espacial.** En la BLP es escasa la información publicada relacionada con las variables modeladas en este estudio; sin embargo, se pueden hacer comparaciones con estudios puntuales. En el canal de San Lorenzo (Fig. 1b), Halfar *et al.* (2000; 2004) reportan que los valores de  $\text{CaCO}_3$  en el sedimento marino fueron mayores a 90% a lo largo de dos transectos. Estos valores son parcialmente consistentes con los resultados de este estudio, el cual reporta entre 75 y 95%. Las diferencias pueden ser atribuidas a los diferentes enfoques metodológicos utilizados, aunque los autores mencionados utilizaron transectos y no propiamente un mapeo (variabilidad espacial). La ventaja de los modelos basados en interpolaciones es que predicen valores entre puntos conocidos en el espacio, lo que permite determinar una distribución. Por otro lado, el tamaño medio de grano y la clasificación en cuatro sitios muestreados por Cruz-Orozco *et al.* (1996) dentro del área de estudio son consistentes con los modelos desarrollados. Los autores presentan un esquema conceptual basado en una densidad de muestreo de 0.01 muestras  $\text{km}^{-2}$ , mientras que el presente estudio, basado en 0.2 muestras  $\text{km}^{-2}$ , aporta mayor detalle de la variabilidad espacial y utiliza un algoritmo de interpolación.

La información generada en los modelos y el uso de un SIG permiten establecer los límites o intervalos numéricos (tabla 1) en el espacio geográfico. La calidad de estos límites depende del tamaño de muestra y del análisis del error de los modelos. En este aspecto, el error de los modelos propuestos ha sido calculado mediante una muestra independiente. Esto permite la comparación de futuros modelos, incluso con diferentes algoritmos de interpolación. El modelo del contenido de  $\text{CaCO}_3$  sobreestima a los valores observados con un promedio de 3.5% (ME). En valores absolutos, cada punto tiene una diferencia promedio de 6.4% (RCEC, Fig. 4). Los modelos del tamaño medio de grano y clasificación subestimaron a los valores observados con  $\text{ME} = -0.12 \Phi$  y  $-0.19 \Phi$ , respectivamente. En valores absolutos de cada punto contrastado, se estima una diferencia promedio (RCEC) de 0.68  $\Phi$  (tamaño medio de grano) y 0.39  $\Phi$  (clasificación del sedimento). Los modelos predicen valores cercanos en promedio a las observaciones realizadas con la muestra independiente. Este trabajo aporta los primeros modelos de la distribución espacial y el cálculo de su error (ME, RCEC) del contenido de  $\text{CaCO}_3$ , tamaño medio de grano y clasificación del sedimento en el fondo de la BLP, con base en algoritmos de interpolación.

**Unidades del fondo marino.** El análisis de agrupamiento jerárquico permitió agrupar los 413 polígonos en 14 unidades; sin embargo, cuatro unidades representan el 91% del área estudiada. La agrupación geográfica preferencial de los polígonos en cuatro unidades se debe a que la distancia multivariante (o similitud) entre éstos es próxima. Una posible explicación es que en el fondo de la BLP prevalecen principalmente cuatro conjuntos de condiciones ambientales, las cuales se infieren a partir de la caracterización de los valores de las cuatro variables modeladas y su distribución espacial. La unidad 4a agrupó polígonos con píxeles de alto contenido en  $\text{CaCO}_3$  ( $72 \pm 20\%$ ). Los valores elevados pueden ser atribuidos a la tasa baja de aporte de sedimentos siliciclásticos en la zona de Punta Coyote y, por consiguiente, a la alta producción de exoesqueletos carbonatados de los organismos que habitan dicha unidad (Halfar *et al.*, 2004). El aporte de terrígenos proviene de la erosión de rocas en la línea de costa y, principalmente, por aporte de sedimentos desde las cuencas hidrológicas adyacentes (Halfar *et al.*, 2000, 2004; Velasco-García, 2009) (Fig. 2b). Estas cuen-



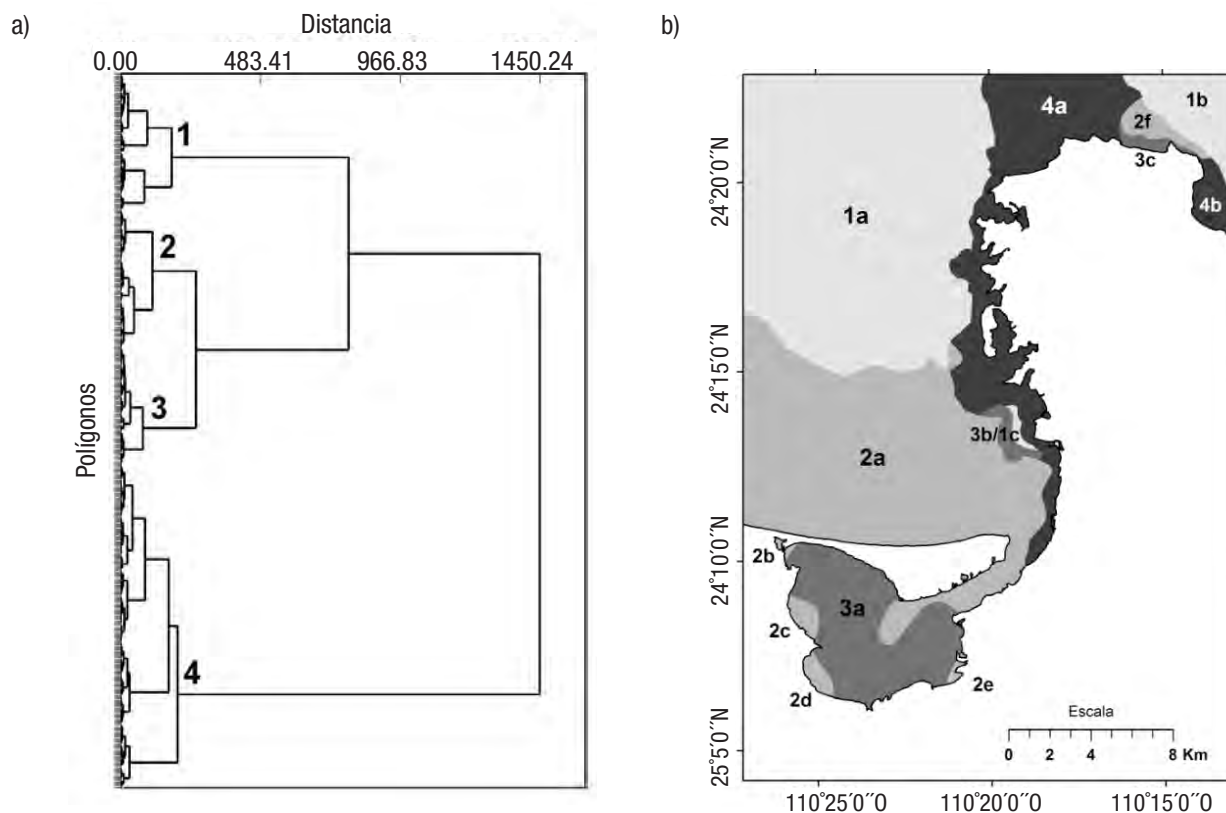
Figuras 4a-c. Evaluación de los modelos. Comparación entre los valores pronosticados y los medidos con la muestra independiente. a) Contenido de  $\text{CaCO}_3$ . b) Tamaño medio de grano (en  $\Phi$ ). c) Clasificación del sedimento (en  $\Phi$ ).  $R^2$ = coeficiente de determinación. ME= media del error, RCEC= raíz cuadrada del error cuadrático medio. La línea discontinua representa una estimación no sesgada 1:1.

cas son pequeñas y sólo en eventos de precipitación alta (asociado con ciclones tropicales) se consigue un aporte de sedimentos siliciclásticos. El aporte de carbonatos en el fondo marino de la unidad 4a se deriva de los bioclastos de fragmentos de conchas (moluscos), corales, algas rojas (rodolitos), foraminíferos y balanos. Estos componentes han sido reportados previamente por Halfar *et al.* (2000). Específicamente en el canal de San Lorenzo se ha reportado que el sedimento marino está dominado por mantos de rodolitos (Halfar *et al.*, 2004); sin embargo, en la inspección del sedimento en el fondo, se observaron mantos de rodolitos sólo en los sitios 62 y 0-independiente. Adicionalmente, se encontró un manto de rodolitos en el sitio 18, no reportado en la literatura, en una zona con valores entre 65 y 70% de  $\text{CaCO}_3$ . El tamaño de grano de arenas finas a gruesas ( $1.4 \pm 0.8 \Phi$ ) en el fondo indica niveles de energía en el ambiente (por corrientes, oleaje y marea) más altos que el resto de las unidades estudiadas. La moderada a pobre clasificación del sedimento ( $1 \pm 0.3 \Phi$ ) se asocia al poco aporte de terrígenos y dominancia de bioclastos carbonatados, los cuales mantienen una dispersión moderada del tamaño medio de grano. La unidad 4a por su contenido alto en  $\text{CaCO}_3$  asociado a moluscos, corales y mantos de rodolitos podría destacar en biodiversidad sobre el resto de las unidades estudiadas.

Los polígonos agrupados en la unidad 3a coinciden, en su mayor parte, con la zona de la laguna de La Paz (Fig. 5b). La unidad registra una muy mala clasificación del sedimento ( $2.2 \pm 0.7 \Phi$ ); es decir, una amplia variabilidad del tamaño medio de grano, que se ve reflejada en una variedad de tipos de sedimento (desde limos gruesos hasta arenas

medias). La variabilidad es consistente con la reportada por Álvarez-Arellano *et al.* (1997) y se puede explicar por las diferentes fuentes de partículas que llegan a la unidad. La laguna de La Paz recibe el aporte de materiales limosos y arenosos a través de los arroyos, desde diferentes cuencas hidrológicas (Fig. 1a) y diferentes fuentes litológicas, así como por aporte litoral y eólico (Nava-Sánchez & Cruz-Orozco, 1989; Choumiline *et al.*, 2009). Las descargas hacia la laguna traen consigo materiales finos y nutrientes que son distribuidos en la ensenada (Mendoza-Salgado *et al.*, 2005) y el fondo marino (Green-Ruiz & Páez-Osuna, 2003; Pérez-Triboullier, 2014). La poca profundidad de la unidad 3a ( $2.2 \pm 1.9$  m) permite que el efecto de la energía del viento (el oleaje interno) en la laguna tenga una fuerte influencia sobre ella. Este fenómeno genera la redistribución y suspensión de los sedimentos. Aunque la unidad contiene en promedio  $24 \pm 7.8$  de  $\text{CaCO}_3$ , los moluscos (bivalvos y gasterópodos) que habitan en el sedimento aportan bioclastos mayores que 4 mm. Estos bioclastos tienen un efecto en el incremento del tamaño medio y en la dispersión del tamaño de grano. La amplia variedad de tipos de sedimento en el fondo de la unidad 3a establece las condiciones para el hábitat de diversos macromoluscos, como bivalvos y gasterópodos (Pérez-Nevarez, 1995; Holguín-Quiñones & García-Domínguez, 1997; Félix-Pico *et al.*, 2011). En la laguna de La Paz (unidad 3a) se ha reportado la presencia de diversos grupos de moluscos; algunos son más comunes en esta zona lagunar, en comparación con el resto de la bahía de La Paz.

La unidad 2a forma parte de la plataforma interna de la BLP y el canal de marea de la laguna de La Paz. La unidad está influenciada por la



Figuras 5a-b. Clasificación de unidades del fondo marino. a) Agrupación de polígonos. b) Configuración espacial de las 14 unidades del fondo marino. Las cuatro clases fueron divididas en unidades según el análisis de agrupamiento y su configuración geográfica.



energía del oleaje, sobre todo en la parte próxima hacia la barra arenosa El Mogote. En esta franja el transporte litoral distribuye el sedimento con el nivel de energía necesario para sostener el tamaño de grano de arenas muy finas (Nava-Sánchez & Cruz-Orozco, 1989). La moderada clasificación del sedimento ( $1.1 \pm 0.3 \Phi$ ) sugiere que las condiciones hidrodinámicas se mantienen regulares a lo largo de la barra. El tamaño medio de sedimento (Fig. 3b) incrementa en relación con la alta energía hidrodinámica de las corrientes de marea hacia el canal que conecta la BLP con la ensenada de la laguna de La Paz (Gómez-Valdés *et al.*, 2003). Los valores bajos (<20%) de  $\text{CaCO}_3$  en esta unidad indican la poca producción de bioclastos. Esto contribuye a que el sedimento marino esté dominado por material siliciclástico aportado por las cuencas hidrológicas de la margen occidental de la BLP (Fig. 1a), de acuerdo con Nava-Sánchez y Cruz Orozco (1989) y Cruz-Orozco *et al.* (1996). La arena muy fina permite el desarrollo de organismos bentónicos infaunales, los cuales generan orificios y galerías en el fondo marino. Por lo tanto, esta unidad es potencialmente un hábitat para comunidades de macrofauna bentónica (Gray, 2002).

Los polígonos agrupados en la unidad 1a corresponden a la parte profunda ( $61 \pm 25$  m) de la plataforma de la BLP dentro del área de estudio. Es la unidad con menor tamaño medio de grano ( $4.5 \pm 0.6 \Phi$ ) y se puede atribuir a que la zona tiene la menor o nula influencia de la energía del oleaje. Por consiguiente, representa un área para el depósito de sedimentos terrígenos (Nava-Sánchez *et al.*, 2001) o por hundimiento de partículas en suspensión en la columna de agua (Silverberg *et al.*, 2014). La unidad 1a registra un contenido de  $\text{CaCO}_3$  entre 20 y 40% influenciado por la proximidad de la unidad 4a, el aporte de bioclastos de foraminíferos, fragmentos de conchas de moluscos bentónicos y nanoplancton calcáreo (Urcádiz-Cázares, 2005). En esta unidad también se observaron orificios y galerías hechas por organismos de la infauna bentónica, pero sólo hacia la parte más profunda. La unidad representa un hábitat para micro y macroinvertebrados marinos típicos de una plataforma continental (Gray, 2002).

Este estudio representa una de las primeras propuestas metodológicas para la clasificación de unidades en el fondo marino dominado por sedimentos no consolidados en la BLP. A diferencia de otros métodos, se toma en cuenta la distribución espacial de cuatro variables, las cuales son indicadores directos e indirectos de condiciones ambientales del fondo marino. Los resultados, aunque no definitivos, permiten establecer para la BLP 14 unidades en el fondo marino, de las cuales cuatro corresponden al 91% de la superficie estudiada. Estas unidades sugieren que el fondo de la BLP está dominado por al menos cuatro principales conjuntos de condiciones ambientales que se ven reflejados en la distribución y las características propias de cada unidad.

Una de las limitaciones de este estudio es que los organismos que habitan en cada una de las unidades no fueron considerados de forma sistemática. Por lo tanto, fue asumido que algunos grupos marinos podrían asociarse a las unidades propuestas, como lo muestran las observaciones puntuales realizadas durante la toma de muestras de sedimento. Por ello, recomendamos estudios ecológicos específicos, para validar si existen grupos de organismos marinos relacionados con las unidades y sus condiciones ambientales, considerando una escala espacial apropiada (1:20,000 a 1:50,000) y la variación estacional de la abundancia de cada especie. De igual manera, debe ser evaluado el efecto de los ciclones tropicales sobre la distribución de las variables estudiadas y en su caso, las correspondientes unidades del fondo marino.

Finalmente, esta propuesta debe tomarse como una alternativa robusta respecto a las metodologías utilizadas en el mapeo de hábitats bentónicos, tipos desedimento y geomorfología del fondo marino. Se recomienda como línea base en estudios relacionados con ordenamientos ecológicos marinos y planes de manejo. La propuesta es accesible económicamente y puede utilizarse en las zonas costeras y las plataformas continentales del Golfo de California y otras regiones marinas.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a José M. Borges S. y Janette M. Murillo J. por el apoyo en campo y trabajo de laboratorio; asimismo, a Atzcalli E. Hernández C., Luis J. Cota V., Ana M. Cortez O., Adriana M. Coronel G., Karen Pabón A., Max A. González G. y Paul A. Preciado G. Gracias al apoyo incondicional del Departamento Académico de Ciencias de la Tierra de la UABCS y del Departamento de Ciencias Básicas del TNM-ITLP. VHCE y EHNS son becarios de los programas EDI y COFAA del IPN. VHCE, EHPS y AOR son miembros del Sistema Nacional de Investigadores. Este trabajo se desarrolló con la beca 333364 (CONACyT, México) y gracias al apoyo de los proyectos IPN-SIP/20171069; 280030 de Redes Temáticas y 251919 de Ciencia Básica del CONACyT.

La base de datos y mapas (\*.xls, \*.shp) están disponibles para los usuarios que lo soliciten con el debido crédito a la revista HB.

## REFERENCIAS

- ÁLVAREZ-ARELLANO, A. D., H. ROJAS-SORIANO & J. J. PRIETO-MENDOZA. 1997. Geología de La Bahía de La Paz y áreas adyacentes. *In: Urbán-Ramírez, J. & M. Ramírez-Rodríguez* (Eds.). *La Bahía de La Paz: Investigación y Conservación*. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS, La Paz, BCS, México, pp. 13-30.
- ARRIAGA-CABRERA, L., V. AGUILAR-SIERRA & J. MANUEL ESPINOZA. 2009. Regiones prioritarias para la conservación de la biodiversidad. *In: CONABIO* (Ed.). *Capital Natural de México. Vol. II. Estado de conservación y tendencias de cambio*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, pp. 433-457.
- BLOTT, S. J. & K. PYE. 2001. Gradistat: A Grain Size Distribution and Statistics Package for the Analysis of Unconsolidated Sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 1237-1248. DOI: 10.1002/esp.26.
- BOGGS J. S. 2012. *Principles of Sedimentology and Stratigraphy*. Pearson, Estados Unidos de América. 600 p.
- BRUSCA, R. C. 2010. *The Gulf of California Biodiversity and Conservation*. Arizona University Press, Tucson, AZ. 354 p.
- BUHMANN, M. D. 2003. *Radial Basis Functions: Theory and Implementations*. Cambridge University Press, Cambridge. 272 p.
- CERDEIRA-ESTRADA, S., S. LORENZO-SÁNCHEZ, A. ARECES-MALLEA & C. MARTÍNEZ-BAYÓN. 2008. Mapping of the spatial distribution of benthic habitats in the Gulf of Batabanó. *Ciencias Marinas* 34 (2): 213-222.
- CHOUMILINE, K., L. GODÍNEZ-ORTA, N. NIKOLAEVA, A. ALEXANDER DERKACHEV & E. SHUMILIN. 2009. Evaluation of contribution sources for the sediments of the La Paz Lagoon based on statistical treatment of the mine-

- ralogy of their heavy fraction and surrounding rock and drainage basin characteristics. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61 (1): 97-109.
- COLENUTT, A., T. MASON, A. COCUCCHIO, R. KINNEAR & D. PARKER. 2013. Nearshore substrate and marine habitat mapping to inform marine policy and coastal management. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 65 (International Coastal Symposium) 2: 1509-1514. DOI: 10.2112/SI65-255.1.
- CRUZ-OROZCO, R., C. MARTÍNEZ-NORIEGA & A. MENDOZA-MARAVILLAS. 1996. Batimetría y sedimentos de la Bahía de La Paz, BCS, México. *CICIMAR Oceanides* 11: 21-27.
- DE-SMITH, M. J., GOODCHILD, M. F. & LONGLEY P. A. 2015. *Geospatial Analyst. A comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador Publishing Ltd. 749 p.
- DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (DGID). 1996. *Levantamiento hidrográfico La Paz y Proximidades*. Secretaría de Marina, México.
- DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO (DGID). 2008. *Levantamiento hidrográfico Canal de San Lorenzo, BCS*. Secretaría de Marina, México.
- ESPIÑOZA-TENORIO, A., M. MORENO-BÁEZ, D. PECH, G. J. VILLALOBOS-ZAPATA, L. VIDAL-HERNÁNDEZ, J., RAMOS-MIRANDA, M. MENDOZA-CARRANZA, J. A. ZEPEDA-DOMÍNGUEZ, G. ALCALÁ-MOYA, J. C. PÉREZ-JIMÉNEZ, F. ROSETE, C. LEÓN & I. ESPEJEL. 2014. El ordenamiento ecológico marino en México: un reto y una invitación al quehacer científico. *Latin American Journal of Aquatic Research* 42 (3): 386-400. DOI: 10.3856/vol42-issue3-fulltext-1.
- FEDERAL GEOGRAPHIC DATA COMMITTEE (FGDC). 2012. FGDC-STD-18-2012. *Coastal and Marine Ecological Classification Standard*. Federal Geographic Data Committee. USA. 343 p.
- FÉLIX-PICO, E. F., HOLGUÍN-QUIÑONES, O. E. & ESCAMILLA-MONTES, R. 2011. Macroinvertebrados marinos asociados al manglar. In: Félix-Pico, E. F., Serviere-Zaragoza, E., Riosmena-Rodríguez, R. & León-De-La-Luz, J. L. (Eds.). *Los manglares de la península de Baja California Sur*. Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. y Universidad Autónoma de Baja California Sur, pp. 203-252.
- FOLK, R. L. & W. C. WARD. 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27:3-26.
- FRIEDMAN, G. M. & J. E. SANDERS. 1978. *Principles of sedimentology*. Wiley. Nueva York. 792 p. DOI: 10.1002/esp.3290040317
- GIARDINO, C., M. BRESCIANI, F. FAVA, E. MATTA, V.E. BRANDO & R. COLOMBO. 2016. Mapping submerged habitats and mangroves of Lampi Island Marine National Park (Myanmar) from in situ and satellite observations. *Remote Sensing* 8 (2): 1-13. DOI: 10.3390/rs8010002.
- GÓMEZ-VALDÉS, J., J. A. DELGADO & J. A. DWORAK. 2003. Overtides, compound tides, and tidal residual current in Ensenada de La Paz, Baja California Sur, México. *Geofísica Internacional* 42: 623-634.
- GRAY, J. S. 2002. Species richness of marine soft sediment. *Marine Ecology Progress Series* 244: 285-297. DOI: 10.3354/meps244285.
- GREEN-RUIZ, C. & F. PÁEZ-OSUNA. 2003. Heavy metal distribution in surface sediments from a subtropical coastal lagoon system associated with an agricultural basin. *Bulletin Environment Contamination and Toxicology* 71: 52-59.
- HALFAR, J., J. INGLE-JR & L. GODÍNEZ-ORTA. 2004. Modern non-tropical mixed carbonate-siliciclastic sediments and environments of the southwestern Gulf of California, Mexico. *Sedimentary Geology* 165: 93-115. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2003.11.005.
- HALFAR, J., L. GONDÍNEZ-ORTA & J. C. INGLE. 2000. Microfacies Analysis of Recent Carbonate Environments in the Southern Gulf of California, Mexico - A Model for Warm-Temperate to Subtropical Carbonate Formation. *Palaos* 15: 323-342. DOI: 10.1669/0883-1351(2000)015<0323:MAORCE>2.0.CO;2.
- HAMILTON, S. 2011. An evaluation of waveband pairs for water column correction using band ratio methods for seabed mapping in the Seychelles. *International Journal of Remote Sensing* 32 (20): 9185-9195. DOI: 10.1080/01431161.2010.550648.
- HARIS, K., B. CHAKRABORTHY, B. INGOLE, A. MENEZES & R. SRIVASTAVA. 2012. Seabed habitat mapping employing single and multi-beam backscatter data: a case study from the western continental shelf of India. *Continental Shelf Research* 48: 40-49. DOI: 10.1016/j.csr.2012.08.010.
- HARRIS, P. T., M. MACMILLAN-LAWLER, J. RUPP & E. K. BAKER. 2014. Geomorphology of the oceans. *Marine Geology* 352: 4-24. DOI: 10.1016/j.margeo.2014.01.011.
- HOLGUÍN-QUIÑONES, O. E. & GARCÍA-DOMÍNGUEZ F. A. 1997. Lista anotada de las especies de moluscos recolectados en la Bahía de La Paz, B.C.S. In: Urbán-Ramírez, J. & M. Ramírez-Rodríguez (Eds.). *La Bahía de La Paz: Investigación y Conservación*. UABCS-CICIMAR-SCRIPPS, La Paz, BCS, México, pp. 93-118.
- HOLLANDER, M., D. A. WOLFE & E. CHICKEN. 2014. *Nonparametric statistical methods*. Third edition. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 848 p.
- JEROSCH, K. 2013. Geostatistical mapping and spatial variability of surficial sediment types on the Beaufort Shelf based on grain size data. *Journal of Marine and Systems* 127: 5-13. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2012.02.013.
- KAUFMAN, L., P. J. ROUSSEEUW. 2005. *Finding groups in data an introduction to cluster analysis*. Wiley-Interscience, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey. 342 p.
- LUO, W., M. C. TAYLOR & S. R. PARKER. 2008. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregular distributed data from England and Wales. *International Journal of Climatology* 28: 947-959. DOI: 10.1002/joc.1583.
- MA, F., Y. WANG, Y. LI, C. YE, Z. XU & F. ZANG. 2010. The application of geostatistics in grain size trend analysis: A case study of eastern Beibu Gulf. *Journal of Geographical Sciences* 20 (1): 77-99. DOI: 10.1007/s11442-010-0077-1.
- McLACHLAN, A. & BROWN, A. C. 2006. *The ecology of sandy shores*. Elsevier, San Diego. 373 p.
- MENDOZA-SALGADO, R. A., C. H. LECHUGA-DEVÉZE & A. ORTEGA-RUBIO. 2005. Identifying rainfall effects in an arid Gulf of California coastal lagoon. *Journal of Environment Management* 75:183-187.

- MICALLEF, A., T. P. LE BAS, V. A. I. HUENNE, P. BLONDEL, V. HUHNERBACH & A. DEIDUN. 2012. A Multi-method approach for benthic habitat mapping of shallow coastal areas with high-resolution multibeam data. *Continental Shelf Research* 39-40: 14-26. DOI: 10.1016/j.csr.2012.03.008.
- MIDDLETON G. V. 1976. Hydraulic interpretation of sand size distributions. *Journal of Geology* 84: 405-426.
- MORSE, J. W., & F. T. MACKENZIE. 1990. *Developments in sedimentology 48 Geochemistry of Sedimentary Carbonates*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. 707 p.
- NAVA-SÁNCHEZ, E. H. & R. CRUZ-OROZCO. 1989. Origen y evolución geomorfológica de la Laguna de La Paz, Baja California Sur, México. *Investigaciones Marinas CICIMAR* 4 (1): 49-58.
- NAVA-SÁNCHEZ, E. H., D. S. GORSLINE & A. MOLINA-CRUZ. 2001. The Baja California peninsula borderland: structural and sedimentological characteristics. *Sedimentary Geology* 144: 63-82. DOI: 10.1016/S0037-0738(01)00135-X.
- PÉREZ-NEVAREZ, V. 1995. Zonación y estructura de la comunidad de moluscos bivalvos en la Ensenada de La Paz, B.C.S., México. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, México. 91 p.
- PÉREZ-TRIBOULLIER, H. U. 2014. Niveles actuales e historia de acumulación de elementos de origen natural y antropogénico en los sedimentos de la Laguna de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, México. 110 p.
- REYES-BONILLA, H. 1992. New records for hermatypic corals (Anthozoa: Scleractinia) in the Gulf of California, Mexico, with an historical and biogeographical discussion. *Journal of Natural History* 26: 1163-1175. DOI: 10.1080/00222939200770671.
- SERGEJ, O. & DUCROTOY, J. P. 2006. The concept of biotope in marine ecology and coastal management. *Marine Pollution Bulletin* 53: 20-29.
- SHEPPARD, C. R. C., K. MATHESON, J. C. BYTHELL, P. MURPHY, C. BLAIR-MYERS & B. BLAKE. 1995. Habitat mapping in the Caribbean for management and conservation: use and assessment of aerial photography. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 5: 277-298. DOI: 10.1002/aqc.3270050404.
- SILVERBERG, N., F. AGUIRRE-BAHENA & A. MUCCI. 2014. Time-series measurements of settling particulate matter in Alfonso Basin, La Paz Bay, southwestern Gulf of California. *Continental Shelf Research* 34: 169-187. DOI: 10.1016/j.csr.2014.05.005.
- SNICKARS, M., GULLSTRÖM, M., SUNDBLAD, G., BERGSTRÖM, U., DOWNIE, A. L., LINDEGARTH M. & MATTILA, J. 2014. Species-environment relationships and potential for distribution modelling in coastal waters. *Journal of Sea Research* 85:116-125.
- STELLER, D. L., R. RIOSMENA-RODRÍGUEZ, M. S. FOSTER & C. A. ROBERTS. 2003. Rhodolith bed diversity in the Gulf of California: the importance of rhodolith structure and consequences of disturbance. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 13: 5-20. DOI: 10.1002/aqc.564.
- SVYTSKI J. P. M. 1991. *Principles, methods, and applications of particle size analysis*. Cambridge University Press. Cambridge 368 p. DOI: 10.1017/CB09780511626142.
- URCÁDIZ-CÁZARES, F. J. 2005. Flujos de coccolitos (cocolitóforos) y su aporte de CaCO<sub>3</sub> evaluado con trampa de sedimentos en la Cuenca Alfonso (Bahía de La Paz), Golfo de California, México. Tesis de Licenciatura en Geología (Marina), Departamento de Geología, UABCS. 62 p.
- VELASCO-GARCÍA, J. A. 2009. Ambientes geológicos costeros del litoral de la Bahía de La Paz, Baja California Sur, México. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, México. 70 p.
- VERFAILLIE, E., V. VAN-LANCKER & M. VAN-MEIRVENNE. 2006. Multivariate geostatistics for the predictive modelling of the surficial sand distribution in shelf seas. *Continental Shelf Research* 26: 2454-2468. DOI: 10.1016/j.csr.2006.07.028.
- WALKER, B. K., B. RIEGL & R. E. DODGE. 2008. Mapping Coral Reef Habitats in Southeast Florida Using a Combined Technique Approach. *Journal of Coastal Research* 24 (5): 1138-1150. DOI: 10.2112/06-0809.1.