

PROPIUESTA METODOLÓGICA PARA EL MAPEO DE COMUNIDADES ARRECIFALES

Carlos F. Candelaria -Silva^{1,2}, Norma A. Corado-Navá¹,
 J. Manuel Oseguera-Cruz¹, Emmanuel Teyssier-Teutli¹,
 Brian Urbano-Alonso¹, Magali Honey-Escandón¹,
 Andrés Ocampo-Palacios¹, Silvia Hinojosa-Álvarez¹ y
 Alejandra Martínez-Melo¹

¹Equipo de Buceo y ²Herbario, Facultad de Ciencias, UNAM. Av. Universidad 3000,
 Coyoacán 04510, México D.F. e-mail: cfcs@hp.ciencias.unam.mx

RESUMEN

La cartografía de arrecifes coralinos se ha constituido en una valiosa herramienta para conocer diversos fenómenos y procesos biológicos que ocurren en estas comunidades, relacionados con su dimensión espacial. Los mapas se han empleado para representar la conformación topográfica de la formación arrecifal, los patrones de distribución de los corales y otras especies, como referentes para estudios de sucesión y para propósitos aplicados relacionados con programas de conservación y desarrollo sustentable.

En este trabajo se presenta una propuesta metodológica de mapeo subacuático, aplicada a la comunidad arrecifal de Bahía San Agustín, Huatulco, Oaxaca, que puede ser utilizada en otros sitios del Pacífico Tropical Mexicano.

El protocolo de mapeo consiste en cuatro fases generales: 1) planeación y organización; 2) levantamiento topográfico; 3) procesamiento de la información; y, 4) cartografía.

Se obtuvieron dos mapas batimétricos, uno de representación bidimensional (2D) y otro tridimensional (3D), que muestran características del relieve complementarias.

Palabras Clave: *Comunidades arrecifales, Huatulco, mapeo de arrecifes, Pacífico Tropical Mexicano, propuesta metodológica de mapeo subacuático.*

ABSTRACT

The cartography of coral reefs has been constituted in a valuable tool to know diverse biological phenomena and processes that happen in these communities, related with its space dimension. Maps have been used to represent topographical conformation of the reefs, distributional patterns of corals and other species, as referential for succession studies and for applied purposes related with conservation programs and sustainable development.

In this study a methodological proposal of underwater mapping is presented, applied to the reef community of San Agustín Bay, Huatulco, Oaxaca, that can be used in other places of the Mexican Tropical Pacific.

The mapping protocol consists of four general phases: 1) planning and organization; 2) topographical survey; 3) data processing; and, 4) cartography.

Two bathymetric maps were obtained, one two-dimensional representation (2D) and other three-dimensional (3D), showing complementary relief features.

Key Words: *Reef communities, Huatulco, reefs mapping, Mexican Tropical Pacific, methodological proposal of underwater mapping.*

INTRODUCCIÓN

El mapeo para propósitos biológicos usualmente involucra la representación gráfica, en dos o tres dimensiones, de los patrones o mosaicos de comunidades, hábitats o características ambientales de un área dada. La utilidad de un mapa de este tipo se relaciona con diversos aspectos involucrados en una investigación o monitoreo, como lo es el que proporciona un marco espacial de referencia de los fenómenos observados, ayuda a clasificar tipos de comunidades, da una representación detallada de la estructura espacial de un patrón o mosaico comunitario, se emplea como referente para estudios sucesionales y se utiliza para propósitos aplicados^{1,2}.

En comunidades arrecifales los mapas se han empleado con propósitos similares y se han constituido como una valiosa herramienta metodológica para adquirir información relevante respecto a las características de los arrecifes, tales como la estructura y morfología general, abundancia y patrones de distribución del coral vivo, y la distribución y tipos de sedimentos^{3,4}. Estos datos se han utilizado para establecer estudios de línea base sobre la cual se puedan detectar objetivamente cambios en el estado de conservación de los arrecifes.

Para la elaboración de mapas en arrecifes se han usado diversas técnicas^{5,6}. Con cada técnica se producen mapas a una cierta escala de resolución. Mientras mayor sea la escala mejor será la representación espacial que se tenga y por lo tanto de las características biológicas o ambientales. Entre las técnicas comúnmente empleadas están los sensores satelitales, la fotografía aérea, los sensores montados en embarcaciones y los mapeos directos realizados por buzos⁷⁻¹⁰. Mediante esta última técnica se obtienen las mayores escalas y una representación más detallada de las comunidades.

En México se han aplicado diversas técnicas de mapeo arrecifal, principalmente de tipo indirecto, como son: el sensor hiperespectral aerotransportado CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*)¹¹, los sensores satelitales Landsat TM (*Landsat Thematic Mapper*)¹², y los sensores remotos activos (escáner de barrido lateral)¹³. Estas técnicas se han utilizado exclusivamente en arrecifes del Golfo de México y del Caribe mexicano, no habiendo antecedentes similares para el caso de las formaciones arrecifales del Pacífico mexicano.

La propuesta metodológica que se describe en este trabajo ha sido diseñada para el mapeo de comunidades arrecifales que son típicas de los litorales del Pacífico tropical mexicano, utilizando como estudio de caso particular la localizada en Bahía de San Agustín, Huatulco, Oaxaca.

Objetivo

Diseñar e establecer un protocolo de mapeo subacuático aplicable al tipo de comunidades coralinas del Pacífico tropical mexicano.

Área de estudio

La formación coralina de Bahía San Agustín se localiza a los 15°41'09" N y 96°13'46" W, en el extremo SW del complejo de bahías del Parque Nacional Huatulco, en el Estado de Oaxaca (Fig. 1). De manera similar a otras comunidades arrecifales del Pacífico tropical mexicano, se le considera como un arrecife bordeante o de franja, ya que se encuentra cercano a la costa, orientado de manera paralela¹⁴.



Figura 1. Ubicación geográfica de Bahía San Agustín, Huatulco, Oaxaca.

Es una estructura bien consolidada, que debido a su nivel de desarrollo, el crecimiento coralino cubre en su mayor parte el sustrato rocoso original, alcanzando espesores hasta de 4 metros. El paisaje arrecifal está dominado por 3 especies del género *Pocillopora* (*P. damicornis*, *P. capitata* y *P. verrucosa*), que se encuentran desde las porciones más someras hasta las más profundas, siendo en gran medida responsables de la construcción del arrecife. La cobertura coralina sobre el fondo varía entre el 20% y hasta el 100%.

Protocolo de mapeo

La propuesta metodológica consiste de cuatro fases generales, cada una con procedimientos particulares, tal como se muestra en la Fig. 2. El trabajo de campo, que corresponde a las dos primeras fases, se desarrolló utilizando lo que se ha denominado como técnicas de buceo científico^{15,16}, donde se requiere una capacitación previa para poder introducirse al medio subacuático. Las otras dos fases comprenden todo lo que tiene que ver con el trabajo de gabinete.

En la primera fase, se considera lo relacionado con los aspectos logísticos y de organización del trabajo subacuático. El estudio en terreno se realizó del 4 al 8 de agosto de 2004. Se llevó a cabo una prospección general del sitio de estudio lo cual posibilitó obtener una visión panorámica de las características del crecimiento coralino que puedan influir en el levantamiento

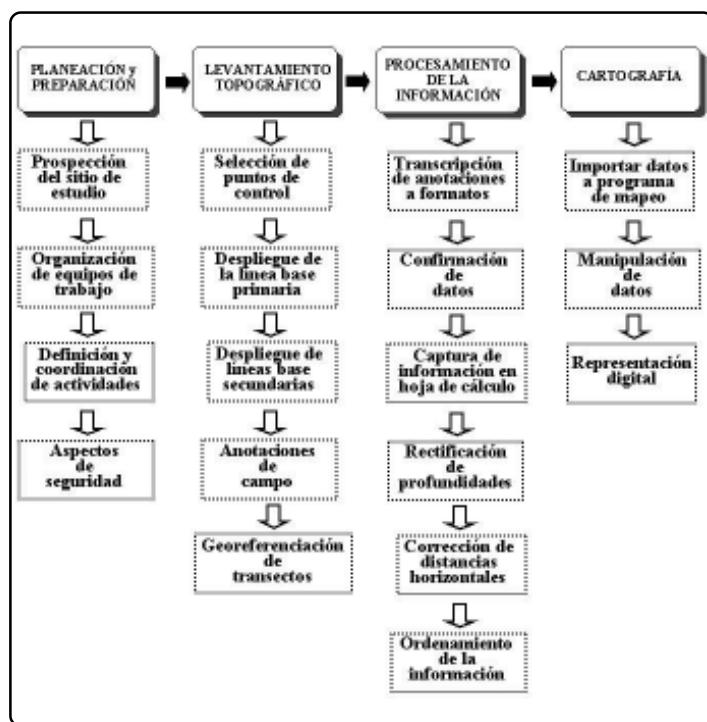


Figura 2. Principales fases del protocolo de mapeo del canal de corrientes.

topográfico, como son su extensión, orientación y profundidad. Es indispensable definir un esquema óptimo de funcionamiento y de coordinación de actividades entre los buceadores, que posibilite realizar eficientemente el levantamiento topográfico, sin dejar de considerar los aspectos de seguridad durante las inmersiones.

Durante la fase del levantamiento topográfico, es esencial establecer un sistema de referencia espacial mediante el cual se puedan ubicar las particularidades tanto del relieve submarino, como de la comunidad arrecifal. El primer aspecto es definir sitios de referencia permanentes, denominados *puntos de control*. En este caso se tomó como punto de control inicial un cubo de concreto (“muerto”), situado en la parte norte del arrecife. A partir de este punto se estableció una *línea base primaria*, siguiendo un eje norte-sur paralelo a la línea de costa, para lo cual se utilizó una cuerda con marcas cada metro. Esta cuerda es delgada, del tipo piola usada en cortineros, en el que las marcas van lastradas para facilitar que la línea se asiente en el fondo. Para el despliegue de la cuerda se usaron carretes de plástico, donde va enrollada, y conforme se va desplazando un buzo, se va colocando sobre el sustrato, cuidando de no maltratar los corales, orientándose con una brújula subacuática. Una vez que esta línea primaria estuvo extendida, se usaron como puntos de control adicionales las marcas señaladas cada 10 metros, a partir de los cuales se establecieron *líneas base secundarias*, a uno y otro lado de dicha línea primaria, con una orientación este-oeste transversales a la línea de costa, siguiendo

el mismo procedimiento (Fig. 3).

A lo largo de cada línea base secundaria, se registraron en cada marca datos del número de metro, profundidad y hora, anotándose sobre una tablilla sumergible con base a un formato preestablecido (Fig. 4). Para medir la profundidad se utilizaron profundímetros electrónicos de buceo, considerando el nivel del mar como el plano de referencia de control vertical. Dado que ocurren variaciones de este nivel debido a la marea, fue necesario considerar la hora de registro para compensar este valor. Usando un receptor GPS marca Garmin®, el cual se mantuvo flotando sobre la superficie del agua contenido en un estuche hermético, se registró la geoposición al inicio y término de cada línea base secundaria.

La tercera fase consistió en el procesamiento de la información. Se hizo el registro y transcripción de las anotaciones hechas en los formatos de campo a formatos en limpio definitivos, a la vez que se verificaba la confiabilidad de los mismos. Posteriormente, esta información se capturó y organizó en una base de datos empleando la hoja de cálculo Excel de Microsoft®, considerando las correcciones de profundidad en relación a la marea y las transformaciones de distancias horizontales. Para las correcciones de profundidad, en relación a la marea, se utilizaron tablas de marea, considerando la hora de la medición. En cuanto a las transformaciones de distancias, se realizaron cálculos trigonométricos mediante la siguiente fórmula^{17,18}:

$$x = \sqrt{z^2 - y^2}$$

donde: z = distancia entre dos marcas (es una constante de 1 metro); y = diferencia de profundidad entre dos marcas de la línea; x = distancia horizontal.

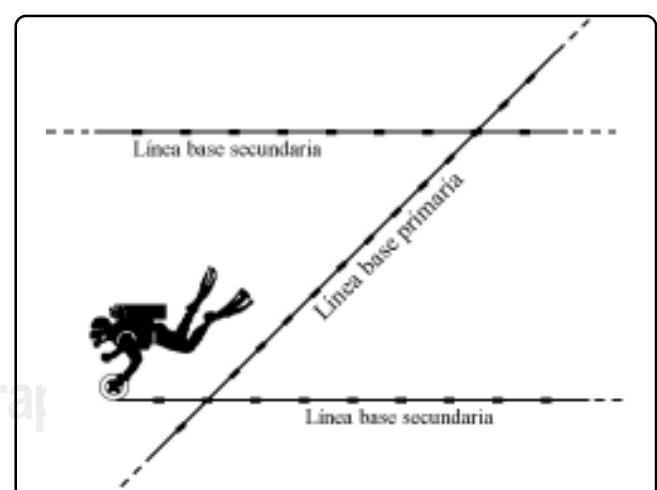


Figura 3. Despliegue de las líneas base primarias y secundarias.

Figura 4. Formato de campo para el registro de datos.

Para la fase de cartografía se utilizó el programa Surfer® (versión 8.0; Golden Software, Inc.), mediante el cual es posible elaborar y trazar de manera relativamente sencilla distintos tipos de mapas y planos de contorno, de imagen y de relieve, reduciendo grandes conjuntos complejos de datos en un formato de imagen fácilmente interpretable (Biesterfeld *et al.*¹⁹). La información con la que trabaja Surfer se transfirió a partir de la base de datos de Excel.

RESULTADOS

Se registraron datos de un total de 28 líneas de base secundarias. La porción mapeada corresponde aproximadamente al 70% de la comunidad arrecifal.

Se obtuvieron dos mapas batimétricos, uno de representación bidimensional (2D) (Fig. 5) y otro tridimensional (3D) (Fig. 6), que muestran características del relieve complementarias.

En el mapa batimétrico bidimensional se muestran las isobatas mediante líneas de nivel continuas, con una equidistancia de 0.5 metros. En el mapa tridimensional se representa la configuración espacial del arrecife en una proyección en perspectiva.

Según se puede apreciar en ambos mapas, la comunidad arrecifal se distribuye casi desde la orilla, a una profundidad aproximada de 50 cm, hasta una distancia que varía de 200 metros en su eje más ancho, con 9.5 metros de profundidad, y de 80 metros en su extremo norte, con una profundidad de 5.5 metros.

Se trata de una formación arrecifal con una estructura relativamente compacta, si bien con algunas irregularidades y discontinuidades. Entre los rasgos topográficos más relevantes destaca la presencia de una pequeña cañada que surca a la comunidad arrecifal de este a oeste, casi por completo. La porción noroeste es la más heterogénea, en la que se presentan varias hondonadas y donde se apreció *in situ* una mayor fragmentación del arrecife.

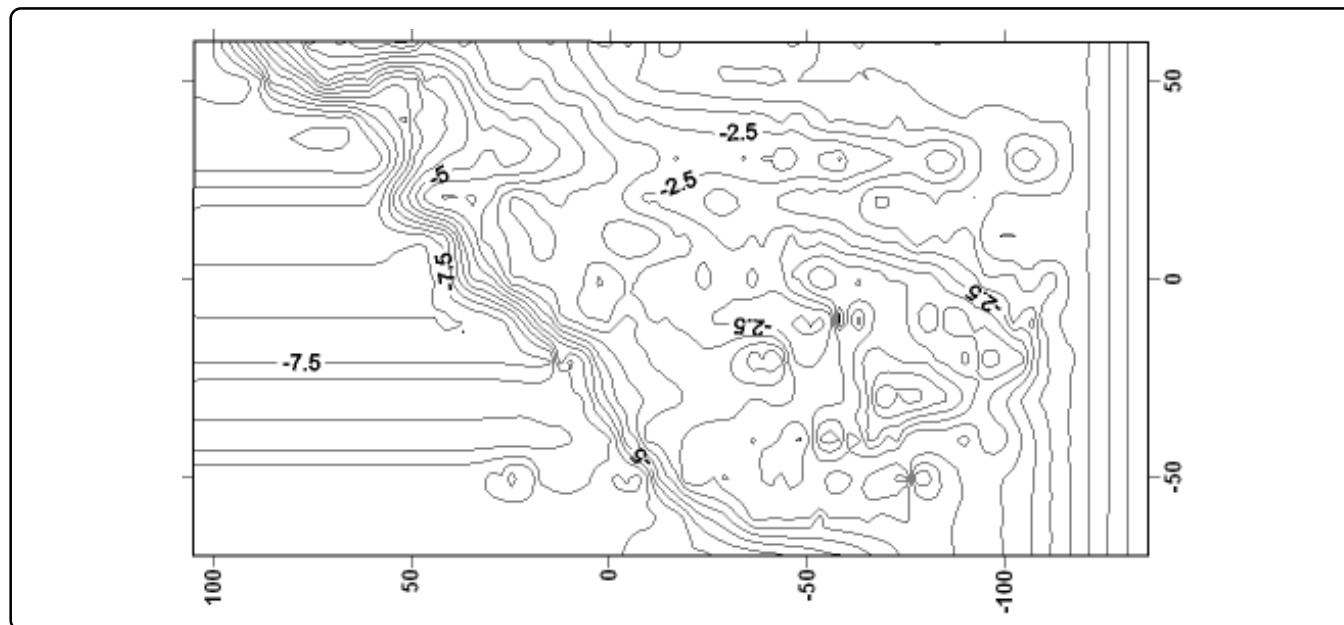


Figura 5. Mapa batimétrico bidimensional (2D) con Isobatas (distancias en metros).

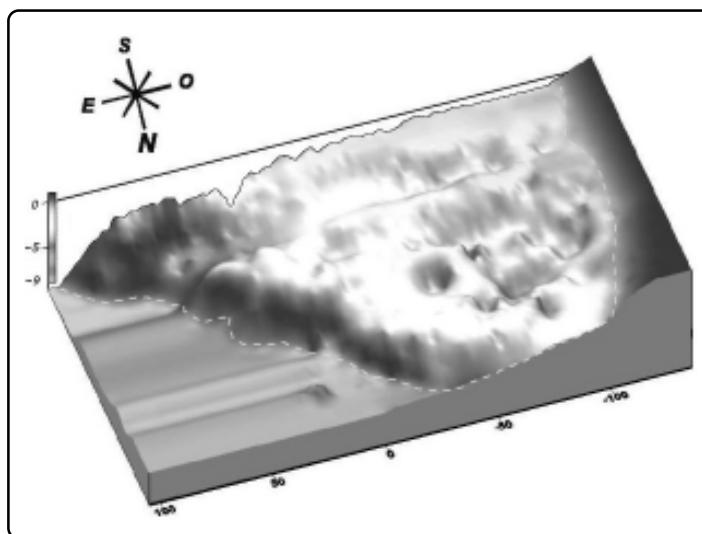


Figura 6. Mapa batimétrico tridimensional (3D) con relieve en perspectiva.

En cuanto al relieve, se nota que la pendiente presenta una tendencia general a disminuir de modo gradual desde la orilla y en dirección este, hasta la profundidad de 5 metros, donde se incrementa notoriamente, con un declive de alrededor de 45°. Esto se puede observar de manera clara en la parte superior del mapa tridimensional (Fig. 6), que corresponde al borde sur de la zona mapeada del arrecife, y donde se distingue su perfil longitudinal por debajo de la línea que marca el nivel 0 del plano de referencia horizontal.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La elaboración de mapas se considera esencial para la adecuada planificación y gestión de los recursos marinos. Conforme aumenta la demanda de bienes y servicios a partir de estos recursos, mayor es la necesidad de información exacta geográficamente referenciada. Un mapa es mucho más que una representación gráfica del área que está siendo estudiada; es un instrumento que posibilita registrar, analizar y mostrar los elementos interrelacionados de dicha área²⁰.

Con el desarrollo turístico de nuestros litorales se ha incrementado notablemente la presión antropogénica sobre la biodiversidad marina. Tales es el caso de las comunidades arrecifales del Pacífico Tropical Mexicano, que están siendo sujetas a impactos directos ocasionados por prácticas ambientales inadecuadas, como son el acceso no planificado de turistas, buceadores con falta de entrenamiento, guías que remueven organismos del fondo para mostrárselos a los turistas, pescadores furtivos o maltrato físico por anclaje inapropiado.

La situación de la comunidad coralina de Bahía San Agustín no es la excepción, la cual está siendo afectada principalmente en sus partes someras por el contacto directo de las pisadas de turistas que desconocen que se trata de organismos vivos. Sin

embargo, existe un claro interés por parte de sus pobladores de proteger este recurso, y han establecido diferentes iniciativas en colaboración con las autoridades del Parque Marino de Huatulco, como han sido carteles informativos y un boyado periférico a la comunidad arrecifal. Este último funciona como señalamiento para que las embarcaciones que llegan con turistas se ancinen por fuera de él.

En este contexto, el desarrollo de este mapeo responde a las necesidades de producir y utilizar mapas como una apoyo para el desarrollo sustentable de la zona costera y la ordenación de los recursos marinos. La intención de generar este mapa es que sirva como documento base, aportando los elementos técnicos y científicos para la toma de decisiones respecto a las formas más adecuadas de conservación de esta comunidad arrecifal y que permita establecer un programa de monitoreo a largo plazo³.

Los resultados obtenidos muestran, en términos generales, que la metodología utilizada es adecuada para el mapeo de comunidades arrecifales como las de Bahía San Agustín, que son de tipo bordeante cercanas a las costa y más o menos someras. En Zihuatanejo, Guerrero, también se está empleando esta propuesta con resultados similares.

El objetivo de los mapas generales o de referencia, como es el presente caso, es reflejar, de una manera lo más exacta y representativa posible, la batimetría y el relieve de la comunidad arrecifal. El diseño metodológico propuesto ha permitido reconocer estas características con un nivel de precisión razonablemente satisfactorio, utilizando una técnica relativamente sencilla que puede denominarse como *isométrica*, dado que se mantienen constantes las distancias a medir (1 metro) a lo largo de las líneas de referencia, variando tan solo la profundidad.

Otra ventaja es que los procedimientos de campo utilizados no son complicados, ya que, adicionalmente a un nivel intermedio de capacitación de buceo, tan solo se requiere un manejo adecuado de cuerdas y de toma de datos. Un equipo de ocho buzos estaría en condiciones de realizar el mapeo de una comunidad arrecifal como la de este estudio en un periodo de 4-6 días, dependiendo de las condiciones ambientales.

Los mapas tienen un efecto catalítico sobre el desarrollo e impiden la principal fuente de planificación al azar, como lo es la falta de información fácilmente comprensible¹⁹. Contar con una metodología estandarizada de mapeo que pueda ser aplicable a otros sitios del Pacífico Tropical Mexicano, posibilitará ampliar el conocimiento geoecológico de nuestras comunidades arrecifales y proponer nuevas aproximaciones de estudios biológicos. En relación con el desarrollo sustentable, un programa de cartografía puede dirigirse a necesidades críticas de información relacionadas, por ejemplo, con estrategias de

conservación adecuadas, gestión y uso de recursos costeros, la planificación y desarrollo de actividades turísticas y con la educación ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó parcialmente con el apoyo logístico de los estudiantes del 19º Curso de Buceo, nivel intermedio, impartido por el Equipo de Buceo de la Facultad de Ciencias, UNAM, como parte de su práctica de buceo científico.

Los autores agradecen a Heriberto Jijón Moreno y familia, quienes desinteresadamente han brindado su apoyo en el desarrollo del trabajo de campo en la Bahía de San Agustín, Oaxaca.

REFERENCIAS

1. Müller-Dombois, D. & Ellenberg, H. Aims and methods of vegetation ecology (Wiley, New York, 1974) 547 pp.
2. Mosby, H.S. Mapas de reconocimiento y uso de mapas. In: Manual de técnicas de gestión de vida silvestre (ed. Schemnitz, S.D.) (Wildlife Society, Maryland, USA, 1980) 703 pp.
3. Hill, J. & Wilkinson, C. Methods for ecological monitoring of coral reefs. A resource for managers (Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia, 2004) 117 pp.
4. English, S., Wilkinson, C. & Baker, V. (eds.). Survey manual for tropical marine resources (Australian Institute of Marine Science, Townsville, Australia, 1994) 204 pp.
5. Bryant, D., Burke, L., McManus, J. & Spalding, M. Reefs at risk. A map-based indicator of threats to the world's coral reefs. (World Resources Institute, USA, 1998) 57 pp.
6. Andréfouët, S. & Riegl, B. Remote sensing: a key tool for interdisciplinary assessment of coral reef processes. *Coral Reefs* **23**, 1-4 (2004).
7. Stoddart, D.R. Mapping reefs and islands. In: Coral reefs: Research methods (eds. Stoddart, D.R. & Johannes, R.E.) (Monographs on Oceanographic Methodology, UNESCO, Paris, 1978) 581 pp.
8. Hopley, D. Aerial photography and other remote sensing techniques. In: Coral reefs: Research methods (eds. Stoddart, D.R. & Johannes, R.E.) (Monographs on Oceanographic Methodology, UNESCO, Paris, 1978) 581 pp.
9. Milne, P.H. Underwater engineering surveys (Gulf Publishing Company, U.K., 1980) 366 pp.
10. Kobluk, D. Mapping deep reefs (Earthwatch, Watertown, M.A., USA, 1992) 59 pp.
11. Aguirre-Gómez, R. & Morales, M.L.M. Análisis espectral del arrecife coralino de Cayos Arcas, Campeche, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* **27**, 7-20 (2005).
12. Liceaga-Correa, M.A. & Euán-Ávila, J.I. Assessment of coral reef bathymetric mapping using visible landsat thematic mapper data. *Int. J. Remote Sensing* **23**(1), 3-14 (2002).
13. Iturbe, P.I. Increasing training and technique exchange for siting MPAs in remote coral reef environments in the Caribbean. (Elaborando cartografía del fondo marino de la zona de buceo en la Reserva Banco Chinchorro, para el conocimiento y análisis de los hábitats marinos) (Notas de Curso, 2005) 60 pp.
14. CONANP. Programa de manejo Parque Nacional Huatulco. (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, México, 2003) 205 pp.
15. Heine, H.N. Scientific diving techniques. A practical guide for the research diver (Best Publishing Co., Flagstaff, Arizona, USA, 1999) 225 pp.
16. Flemming, N.C. & Max, M.D. Scientific diving. A general code of practice (Best Publishing Company/UNESCO Publishing, 2nd revised edition, 1996) 278 pp.
17. Burge, J. Basic Underwater Cave Surveying (National Speleological Society, Cave Diving Section, Pensacola, Florida, USA, 1987) 127 pp.
18. NOAA. NOAA Diving Manual. Diving for science and technology (National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, USA, 3º edición, 1991).
19. Biesterveld, A.C., Wane, S.R. & Marsh, R.W. Using surfer 8 to interpret light non-aqueous phase liquid monitoring data: a case study. *Environmental Practice* **6**, 316-321 (2004).
20. Butler, M.J.A., LeBlanc, C., Belbin, J.A. & MacNeill, J.L. Cartografía de recursos marinos: un manual de introducción (FAO Documento Técnico de Pesca, No. 274, Roma, FAO, 1990) 281 pp.