



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

Caracterización y mapeo de hábitat
bentónicos en Bahía Magdalena, B.C.S.
mediante Sistemas de Información Geográfica
(SIG) y sensores remotos.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADO EN MANEJO SUSTENTABLE DE ZONAS
COSTERAS

PRESENTA:
ERICK BARRERA FALCÓN

DIRECTOR DE TESIS:
DR. RODOLFO RIOJA NIETO



2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

1. Datos del alumno.

Barrera

Falcón

Erick

9991813339

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ciencias

Manejo Sustentable de Zonas Costeras

407043264

2. Datos del Asesor.

Dr

Rodolfo

Rioja

Nieto

3. Datos del sinodal 1

Dr

Joaquín

Rodrigo

Garza

4. Datos del sinodal 2

Dr

Gustavo

Hinojosa

Arango

5. Datos del sinodal 3

Dr

Jorge

López

Rocha

6. Datos del sinodal 4

M en C

David

Romero

3. Datos de la tesis.

Caracterización y mapeo de hábitat bentónicos en Bahía Magdalena, B.C.S. mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos.

70 p.

2012

CONTENIDO

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 11 |
| 2 | MARCO TEÓRICO..... | 14 |
| 2.1 | PERCEPCIÓN REMOTA:..... | 14 |
| 2.1.1 | TELEDETECCIÓN PASIVA:..... | 14 |
| 2.1.2 | TELEDETECCIÓN ACTIVA:..... | 15 |
| 2.2 | IMÁGENES SATELITALES..... | 15 |
| 2.3 | RESOLUCIÓN DE SENSORES REMOTOS..... | 15 |
| 2.4 | EFFECTOS ATMOSFÉRICOS Y DE COLUMNA DE AGUA EN IMÁGENES SATELITALES..... | 16 |
| 2.4.1 | CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA..... | 16 |
| 2.4.2 | CORRECCIÓN EN LA COLUMNA DE AGUA..... | 17 |
| 2.5 | MAPEO TEMÁTICO..... | 19 |
| 2.5.1 | CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA..... | 19 |
| 2.5.2 | CLASIFICACIÓN SUPERVISADA..... | 20 |
| 2.5.3 | CLASIFICACIÓN HÍBRIDA..... | 20 |
| 2.6 | SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA..... | 20 |
| 2.6.1 | MODELO VECTORIAL..... | 21 |
| 2.6.2 | MODELO RASTER..... | 22 |
| 2.7 | ÁREAS DE CONSERVACIÓN MARINAS..... | 22 |
| 3 | ANTECEDENTES..... | 24 |
| 4 | ÁREA DE ESTUDIO..... | 26 |

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

| | | |
|-------|---|----|
| 5 | OBJETIVO GENERAL..... | 27 |
| 5.1 | OBJETIVO ESPECÍFICOS..... | 27 |
| 6 | METODOLOGÍA..... | 29 |
| 6.1 | OBTENCIÓN DE DATOS EN CAMPO..... | 29 |
| 6.2 | ESTIMACIÓN DEL PORCENTAJE DE COBERTURA DEL SUBSTRATO. 29 | |
| 6.2.1 | CARACTERIZACIÓN DEL TIPO DE HÁBITAT..... | 30 |
| 6.3 | IMÁGENES SATELITALES | 30 |
| 6.3.1 | PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES..... | 30 |
| 6.4 | CONSTRUCCIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS..... | 31 |
| 6.5 | DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PAISAJE. 32 | |
| 6.6 | SELECCIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN..... | 33 |
| 6.6.1 | CÁLCULO DE BETA-DIVERSIDAD..... | 33 |
| 6.6.2 | ELECCIÓN DE SITIOS PRIORITARIOS..... | 33 |
| 7 | RESULTADOS..... | 36 |
| 7.1 | ANÁLISIS DE COBERTURAS Y CARACTERIZACIÓN DEL HÁBITAT..... | 36 |
| 7.2 | PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES..... | 41 |
| 7.2.1 | MOSAICO..... | 42 |
| 7.2.2 | CORRECCIÓN COLUMNA DE AGUA..... | 43 |
| 7.3 | CONSTRUCCIÓN DE MAPAS TEMÁTICOS..... | 45 |
| 7.4 | PRECISIÓN DE LA CLASIFICACIÓN..... | 53 |
| 7.5 | CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PAISAJE..... | 54 |
| 7.6 | CÁLCULO DE LA BETA-DIVERSIDAD..... | 58 |

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

| | | |
|-----|---|----|
| 7.7 | UBICACIÓN DE ZONAS PRIORITARIAS PARA SU CONSERVACIÓN..... | 59 |
| 8 | DISCUSIÓN..... | 61 |
| 8.1 | MAPEO TEMÁTICO..... | 61 |
| 8.2 | SELECCIÓN DE ÁREAS PRIORITARIAS DE CONSERVACIÓN..... | 62 |
| 9 | CONCLUSIONES..... | 65 |
| 10 | REFERENCIAS..... | 67 |

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

ÍNDICE DE FIGURAS.

| | |
|---|----|
| FIGURA 1. BAHÍA MAGDALENA B. C. S. | 27 |
| FIGURA 2. DENDOGRAMA DEL ANÁLISIS DE CLUSTER CON UN CORTE AL 80%..... | 37 |
| FIGURA 3. DENDOGRAMA DE FIRMAS ESPECTRALES BASADO EN LA DISTANCIA EUCLIDIANA ENTRE CLASES..... | 39 |
| FIGURA 4. A) SIN CORRECCIÓN, B) CON CORRECCIÓN..... | 41 |
| FIGURA 5. MOSAICO DEL AOI BASADO EN 8 ESCENAS SATELITALES DEL SENSOR GEOEYE- 1 (RGB) DE BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 42 |
| FIGURA 6. CONTRASTE ENTRE BANDAS Y SUS DN PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TIPO DE FONDO. | 43 |
| FIGURA 7. EJEMPLO DE LA CORRECCIÓN DE COLUMNA DE AGUA | 44 |
| FIGURA 8. DISTRIBUCIÓN DE HÁBITAT BENTÓNICOS SOMEROS DE BAHÍA MAGDALENA B.C.S. | 45 |
| FIGURA 9. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 1 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 46 |
| FIGURA 10. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 2 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 47 |
| FIGURA 11. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 3 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 48 |
| FIGURA 12. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 4 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 49 |
| FIGURA 13. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 5 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 50 |
| FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 6 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 51 |
| FIGURA 15. DISTRIBUCIÓN DE LA CLASE 7 EN BAHÍA MAGDALENA B.C.S..... | 52 |
| FIGURA 16. PORCENTAJE DE COBERTURA DE LOS TIPOS DE HÁBITAT BENTÓNICOS SOMEROS CARACTERIZADOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S..... | 54 |
| FIGURA 17. NO. DE POLÍGONOS (FRAGMENTACIÓN) POR CLASE EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. | 55 |
| FIGURA 18. DIAGRAMA DE CAJA CON BIGOTES DE LA COMPACTACIÓN (ÁREA/PERÍMETRO) DE LOS POLÍGONOS PARA CADA CLASE.. | 56 |
| FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA BETA-DIVERSIDAD EN BAHÍA MAGDALENA B. C. S., UTILIZANDO UNA VENTANA DE BARRIDO DE 100 X 100 PÍXELES. | 58 |
| FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE VALORES OBTENIDOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA UTILIZANDO TIPO DE HÁBITAT (PONDERACIÓN 50%), BETA-DIVERSIDAD (PONDERACIÓN 30%) Y COMPACTACIÓN DEL HÁBITAT | |

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

(PONDERACIÓN 20 %). LAS REGIONES CON MAYOR INTENSIDAD DE COLOR
REPRESENTAN ÁREAS CON VALORES MÁS ALTOS..... 59

FIGURA 21. PORCENTAJE DEL TERRITORIO CON DENOMINACIÓN DE PROTECCIÓN, LOS
NÚMEROS EN ORDEN ASCENDENTE REPRESENTAN EL VALOR DE PRIORITARIO PARA SU
CONSERVACIÓN 1=BAJO 2=MEDIO 3=ALTO 60

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

ÍNDICE DE TABLAS.

| | |
|---|----|
| TABLA 1. ESCALA DE VALORES ESTÁNDAR ASIGNADO A LAS CAPAS DE TIPO DE HÁBITAT, BETA-DIVERSIDAD Y COMPACTACIÓN DEL HÁBITAT UTILIZADAS EN EL ANÁLISIS DE SUPERPOSICIÓN PONDERADA. | 34 |
| TABLA 2. TIPOS DE SUBSTRATOS IDENTIFICADOS A PARTIR DEL ANÁLISIS DE 1440 FOTOGRAFÍAS OBTENIDAS EN 60 ESTACIONES DE MUESTREO EN BAHÍA MAGDALENA, B. C. S. | 36 |
| TABLA 3. TIPOS DE HÁBITAT BENTÓNICO SOMERO CARACTERIZADO PARA EL ÁREA DE BAHÍA MAGDALENA. COBERTURAS: ≤ 5 % SE MENCIONAN COMO PRESENCIA, ≤25 >5 % COMO COBERTURA BAJA, ≤ 50 >25 % COMO COBERTURA MEDIA, ≤75 > 50% ALTA COBERTURA Y ≥ 75% MUY ALTA COBERTURA. | 38 |
| TABLA 4. TIPOS DE HÁBITAT BENTÓNICO SOMERO CARACTERIZADO PARA EL ÁREA DE BAHÍA MAGDALENA. COBERTURAS: ≤ 5% SE MENCIONAN COMO PRESENCIA, ≤ 25 > 5 % COMO COBERTURA BAJA, ≤ 50 > 25 % COMO COBERTURA MEDIA, ≤75 > 50 % ALTA COBERTURA Y ≥ 75 % MUY ALTA COBERTURA. | 40 |
| TABLA 5. MATRIZ DE ERROR EN LA CLASIFICACIÓN..... | 53 |
| TABLA 6. PRUEBA DE MULTI-COMPARACIÓN DE MEDIAS PARA DATOS NO PARAMÉTRICOS DE TUKEY. LOS PARES DE CLASES QUE NO PRESENTAN DIFERENCIAS SIGNIFICATIVA SE MUESTRAN EN NEGRITAS (P < 0.05). | 57 |

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

ÍNDICE DE ECUACIONES.

| | |
|--|----|
| ECUACIÓN 1. FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE ATENUACIÓN..... | 18 |
| ECUACIÓN 2. CÁLCULO DE VARIANZA POR PAR DE BANDAS. | 18 |
| ECUACIÓN 3. CÁLCULO DE LA COVARIANZA POR PAR DE BANDAS..... | 18 |
| ECUACIÓN 4 CÁLCULO DEL ÍNDICE DE TIPO DE FONDO. | 19 |
| ECUACIÓN 5. CÁLCULO DEL GRADO DE COMPACTACIÓN POR POLÍGONO. | 32 |

Agradecimientos.

De manera especial agradezco al fondo sectorial SEMARNAT- CONACYT No. 108464 por la beca otorgada, al Dr. Rodolfo Rioja por permitirme sumarme a su equipo de trabajo. Esto me permitió crecer profesionalmente con cada una de sus observaciones y enseñanzas tanto en los trabajos de campo como de laboratorio. A mis sinodales de tesis Dr. Joaquín Rodrigo Garza, Mtro. David Romero, Dr. Jorge López Rocha y Dr. Gustavo Hinojosa por cada una de sus observaciones que permitieron que este trabajo tomara forma.

Todas aquellas personas que participaron directa o indirectamente en la realización de los trabajos de campo dentro los que destacan Alfonso, Chilaco, Braulio, Bayo entre otros. Al M. en C. Eduardo Pacheco Góngora por la ayuda con los scripts escritos en matlab.

Mi familia que me ha apoyado a lo largo de todo este proceso de formación, sin su ayuda simplemente no hubiese estado aquí. Mis padres por creer en mí y apoyarme en todas las decisiones que he tomado por buenas o malas que hayan sido.

A todos mis compañeros de la licenciatura por los momentos y experiencias compartidas tanto dentro como fuera de las aulas (David, Oscar, Dalia, Pao, Zzabi, Isabel, Miguel, Mariana, Lalo, Yazmin y Alex)

Por último a la Universidad Nacional Autónoma de México por la educación brindada por sus excelentes académicos, sus instalaciones, programas de becas etc. Me siento orgulloso de formarme en esta Universidad que es uno de los pilares en la educación en México.

POR MI RAZA HABLARA MI ESPIRITU.

Resumen.

Este trabajo describe la caracterización y mapeo de hábitat bentónicos someros de Bahía Magdalena Baja California Sur México mediante el uso de percepción remota y Sistemas de Información Geográfica (SIG), así como la utilización de estas herramientas para la selección de sitios prioritarios de conservación en el área considerando las características del paisaje bentónico. A partir de un análisis clúster utilizando las coberturas de substratos bentónicos muestreados en la bahía en 2011 su afinidad espectral y ecológica entre grupos, se identificaron 7 tipos de hábitat, los cuales de manera general se caracterizaron por una mezcla de arena, pastos marinos, macroalgas y substrato rocoso. Los hábitat caracterizados fueron utilizados para llevar a cabo una clasificación supervisada en un mosaico de 8 escenas satelitales de alta resolución (RGB) del sensor Geoeye-1 y generar un mapa temático del paisaje bentónico somero de la bahía con una precisión general del 80% y un coeficiente Kappa de 0.69. El mapa temático obtenido se exportó a un SIG para su análisis. Los hábitat dominados por arena son las más dominantes y el de menor presencia es el hábitat dominado por rubble (pedacería de roca). Se utilizaron algoritmos escritos en Matlab y el SIG para generar mapas de beta-diversidad y compactación del hábitat, respectivamente. Con los mapas construidos, se realizó un análisis de superposición ponderada a partir del cual se identificaron 4 sitios con alta prioridad de conservación. Este estudio propone una metodología flexible y a su vez robusta para la identificación, selección y/o zonificación de áreas naturales protegidas, ya que considera la ecología, estructura y susceptibilidad a la perturbación del paisaje, características que determinan los procesos ecológicos que ocurren en los ecosistemas y por lo tanto influyen en su biodiversidad.

1 Introducción.

Las regiones costeras del planeta constituyen la interface entre los océanos y los continentes. Estas zonas son únicas en conformación geológica, ecológica e importancia biológica y proveen de hábitat único a miles de especies animales y vegetales. Las zonas costeras proporcionan distintos servicios ambientales. Por ejemplo, los recursos pesqueros que se extraen de éstas representan una porción importante en la dieta de la población humana alrededor del mundo (FAO, 2012), funcionan como barreras naturales de protección ante el viento y oleaje turbulento asociado a las tormentas y en ellas se desarrollan actividades recreacionales y culturales (Chee, 2004).

Las zonas costeras tienen un carácter dinámico; el oleaje, el viento, mareas y tormentas constantemente modifican la línea costera. Así mismo, alrededor del 70% de la población mundial habita en estas zonas (SEMARNAT, 2007), por lo que el desarrollo de actividades antropogénicas (ej. turismo, pesquerías, construcción de hoteles y carreteras) en ocasiones dan como resultado la pérdida de los servicios ambientales que estas zonas proporcionan (Beatley, 1994).

Con el objetivo de mitigar la perturbación causada por las actividades antropogénicas sobre la zona costera, la cual se espera incrementará en los próximos años (Cogan, 2009) se ha propuesto el Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC), este concepto se define como “un proceso dinámico en el cual es desplegada y desarrollada la coordinación estratégica para la distribución de los recursos medioambientales, socioculturales e institucionales, que permitan alcanzar la conservación y el uso múltiple sostenido de la zona costera” (Network, 1989).

Por otro lado, el Grupo Mixto de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP) ha discutido en varios informes las prioridades de una acción global para el manejo de ambientes costeros y marinos, y las contribuciones que la ciencia puede hacer a esta importante tarea. De manera general establece lo siguiente (GESAMP, 1999):

- El concepto de desarrollo sustentable implica que la utilización presente del ambiente marino y sus recursos, no debe perjudicar su uso y disfrute para las

futuras generaciones. Las prácticas pasadas que han negado este principio son la causa fundamental de muchos de los problemas ambientales actuales.

- El desarrollo implica inevitablemente cambios ambientales. El reto para el manejo de la zona costera y marina es el de poner en balance las necesidades del desarrollo en el corto plazo, con la sustentabilidad a largo plazo de los ecosistemas, hábitat y recursos, de forma tal que, el rango de alternativas y oportunidades disponibles para las generaciones futuras no se vea disminuido por las consecuencias de las decisiones de desarrollo.
- El manejo y la planificación comprensiva de las áreas marinas son esenciales para mantener en el largo plazo la integridad ecológica, la productividad y el beneficio económico de las regiones costeras.

El análisis y el conocimiento científico son indispensables para evaluar la efectividad de las acciones de manejo con las cuales se buscan proteger las regiones costeras y marinas. De acuerdo con esto, una estrategia comprensiva de protección debe incorporar principios científicos. Sin embargo, dado que las decisiones frecuentemente involucran consideraciones adicionales, resulta esencial que se logre una interacción cercana entre los científicos y los tomadores de decisiones (FAO, 1999).

La gestión de los ecosistemas costeros implica procedimientos de monitoreo y modelación, los cuales requieren una base de información fiable y tecnologías analíticas robustas. Los métodos convencionales de mapeo pueden ser útiles, pero logísticamente a menudo limitados. Una alternativa son los sensores remotos y las tecnologías geoespaciales, que por su costo-beneficio y solidez tecnológica, cada vez se utilizan en mayor medida para desarrollar fuentes útiles de información como apoyo en la toma de decisiones para una amplia gama de problemáticas costeras (Yang, 2009).

Diversos gobiernos nacionales y locales han adoptado políticas de conservación de costas a lo largo de todo el mundo. La forma más común ha sido la creación de áreas naturales protegidas (Rioja-Nieto y Sheppard, 2008a), aunque éstas no llegan al 1% de las costas actuales (Marine, 2012). Se sabe que el adecuado manejo de las áreas

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

naturales protegidas (en sus distintas categorías) tiende a tener un efecto positivo sobre el recurso de interés (ej. aumento en la biomasa y abundancia de peces) (Leisher C, 2007).

Bahía Magdalena ha sido considerada como una de las bahías socio-económicamente más notables del noroeste mexicano, por su considerable extensión y elevada productividad, que la han convertido en el centro de varias pesquerías importantes para la región (Morales-Zarate, 2006). Sin embargo, algunas pesquerías (ej. callo de hacha, almeja generosa, almeja chocolata, camarón, entre otras.) que por su naturaleza de captura, causan una alta perturbación del paisaje bentónico y ya han comenzado a mostrar signos de disminución en la captura de organismos objetivo.

Hasta hace poco las características y distribución de los hábitat bentónicos eran desconocidas en forma, para así adaptarlas a las distintas modalidades de manejo. Esta información es indispensable, además, de la que se tiene por parte de la comunidad, para el manejo de los recursos costeros sobre todo considerando la importancia de la bahía en el desarrollo económico de la región. Por lo anterior, este estudio se enfocó en el mapeo y caracterización de hábitat bentónicos someros mediante SIG y sensores remotos, para proponer áreas prioritarias de conservación con base a las características del paisaje.

2 Marco Teórico.

2.1 *Percepción remota:*

La Percepción Remota o Teledetección se define como la ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto (Martinez, 2005).

De manera general, la percepción remota depende de fuentes de radiación naturales (ej. el Sol, radiación termal) y artificiales (ej. microondas generadas por satélites). En la región del espectro visible al infrarrojo de onda corta (0.4-1.1 μm), la radiación captada por un sensor remoto es generada por el Sol. A mayores longitudes de onda y en la región del infrarrojo de longitud media, la radiación térmica emitida por el objeto de interés tiene una mayor importancia y a mayores longitudes de onda la percepción remota dependerá de fuentes artificiales de radiación (Schowengerdt, 2007).

La percepción remota se basa en la relación de la emisión-reflexión de la energía. Por ejemplo, en la región del espectro visible, el sol ilumina la superficie terrestre, la cual refleja esa energía en función del tipo de cubierta presente y las características estructurales, químicas y cromáticas de ésta (ej. Áreas de cultivo, áreas urbanas). El porcentaje de energía reflejada con respecto a la energía incidente (reflexión) es medida por el sensor y enviada a una estación receptora para su análisis y presentación (Chuvieco, 1995).

La percepción remota incluye de manera general 2 técnicas para obtener información de un objeto de interés, teledetección pasiva y activa (Jensen, 2005).

2.1.1 Teledetección pasiva:

El Sol es la fuente más conocida de energía, la mayoría de los sensores existentes operan en esta categoría, captando la señal del espectro electromagnético (EEM) emitida o reflejada de manera natural del objeto o área de interés (Siamak Khorram, 2012).

2.1.2 Teledetección activa:

Estas plataformas generan una señal la cual es reflejada por el objeto de interés y medida por la misma plataforma, es decir, la plataforma es el emisor y receptor de la energía electromagnética. Estos sistemas no dependen de la energía externa del sol y de manera general pueden operar a cualquier hora del día, un ejemplo de este tipo de percepción es el radar LIDAR entre otros (Mather, 2011).

2.2 Imágenes satelitales.

Al igual que una cámara digital, una plataforma satelital no posee película fotográfica, en su lugar cuenta con miles de detectores, los cuales miden la cantidad de radiación electromagnética que es reflejada por los objetos de interés en la superficie terrestre. Dependiendo de la plataforma, los detectores obtienen mediciones en distintos intervalos del espectro electromagnético (ej. luz visible-infrarrojo de onda corta), como resultado de la radiancia y los valores son grabados como un número digital (ND) (Gui, 2009). La radiancia se refiere a cualquier tipo de radiación que emite la superficie terrestre (ej. luz reflejada, radiación térmica), por lo tanto, los ND son los valores de radiancia medida por el sensor, en unidades arbitrarias (Green, et al., 2000). Estos números se transmiten a una estación receptora en tierra donde un ordenador los convierte en colores o matices de gris para crear una imagen que se asemeja a una fotografía (Martínez, 2005). Cada ND se almacena en una matriz dimensional de datos (raster) en el que cada celda o elemento se conoce como pixel, el número de pixeles en un set de datos y está en función de la resolución espacial (Gui, 2009).

2.3 Resolución de sensores remotos.

Existen cuatro tipos de resolución que definen las características de una imagen tomada por un sensor remoto (Mather, 2011).

- 1) Resolución espacial: corresponde al tamaño mínimo de un pixel en un set de datos. Se mide en unidades de longitud (ej. metros) y depende de la longitud focal del sensor, de su altura respecto a la superficie y de la

velocidad de escaneado del sensor (Martinez, 2005).

- 2) Resolución radiométrica: se refiere a la capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe el sensor, es decir, el número posible de valores o niveles de gris en que se divide la radiación recibida y procesada por píxel (Hester, et al., 2008).
- 3) Resolución espectral: consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor (Chuvienco, 1995). Por ejemplo Landsat 7 ETM+ tiene una resolución espectral de 7 bandas mientras que SPOT 5 tiene 4 bandas.
- 4) Resolución temporal: indica la frecuencia de visita de la plataforma a un mismo punto de la superficie terrestre (Siamak Khorram, 2012).

2.4 Efectos atmosféricos y de columna de agua en imágenes satelitales.

2.4.1 Corrección atmosférica.

La atmósfera ejerce influencia en la respuesta espectral de los objetos a través de la absorción de gases y dispersión por moléculas de aerosoles, afectando la energía electromagnética que es recibida por un sensor (Salter, 1980; Chavez jr, 1988). La absorción resta valores de brillo, mientras la dispersión y refracción suman valores de brillo a la respuesta original de los objetos presentes en la imagen. La dispersión es el efecto con mayor influencia, ya que reduce el contraste de la escena y dificulta la detección de detalles, confundiendo la interpretación de las características espectrales del(los) objeto(s) de interés (Slater, 1980). La mayor parte de los métodos de corrección atmosférica se enfocan principalmente a minimizar el efecto de la dispersión (bruma o haze, cobertura de nubes), estos son inversamente proporcionales a la longitud de onda, es decir, la influencia de la atmósfera es mayor en longitudes de onda más cortas (Slater, 1980; Chavez jr, 1988). Esta forma de interferencia también conocida como path radiance, depende de la longitud de onda de la radiación electromagnética y puede

comprometer seriamente la interpretación de procesamientos tales como operaciones aritméticas entre bandas (ej. índices de vegetación y clasificación espectral).

La modelación de las condiciones atmosféricas para eliminar el efecto de la dispersión y absorción en las imágenes satelitales es matemáticamente muy complejo; además demanda datos auxiliares, tales como, humedad relativa, visibilidad, entre otros, los cuales no siempre están disponibles.

Existen métodos alternativos, por ejemplo Chávez Jr. (1996) propone el método de substracción del pixel más oscuro, este método asume que en algún lugar de la imagen existen pixeles con reflectancia (proporción entre la radiación e irradiación) cero por lo que la radiancia detectada en el sensor corresponde solamente a efectos atmosféricos. El método consiste en extraer el valor mínimo de ND de cada banda como medida de la radiancia debida a la dispersión atmosférica, que se denomina corrección del histograma por sus valores mínimos (Campbell, 1987) y restarlo a todos los valores digitales (ND) de cada banda situando el origen del histograma en cero.

2.4.2 Corrección en la columna de agua.

Cuando la luz penetra el agua su intensidad disminuye exponencialmente con el aumento de la profundidad (Spitzer y Dirks, 1987), este proceso se conoce como atenuación y ejerce profundos efectos sobre los datos obtenidos de ambientes acuáticos. La severidad de la atenuación está en función de la longitud de onda de la radiación electromagnética. En la región del espectro de luz visible, la banda roja (de longitud de onda más larga) se atenúa más rápidamente que la banda del azul (con longitud de onda más corta), por lo tanto, conforme la profundidad aumenta la posibilidad de separación de las características espectrales de los hábitat disminuye (Spitzer y Dirks, 1987).

Para eliminar la influencia de la profundidad en la reflectancia de fondos se requeriría: a) una medida de la profundidad para cada píxel en la imagen, b) conocimiento de las características de la atenuación de la columna del agua (e.j. concentración de materia orgánica disuelta) c) modelos batimétricos (M. Zainal, 1994), datos y procesos que son complejos de llevar a cabo y/o difíciles de obtener. Lyzenga (1981) propone un método simple basado en imágenes modificado por Green, et al (2000), compensando el efecto

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

de la variable profundidad para mapear fondos marinos con el cual las imágenes son procesadas. La técnica fue probada para aguas en las Bahamas y se recomienda donde la claridad del agua es buena. De manera general el método consiste en:

1. Selección de muestras de píxeles con el mismo sustrato y diferente profundidad.
2. Cálculo del coeficiente de atenuación por par de bandas.

La pendiente lineal no se calcula usando el método tradicional de regresión por mínimos cuadrados ya que el resultado depende de cual banda es escogida como variable dependiente, por lo tanto, en vez de calcular la desviación estándar de la línea de regresión en dirección de la variable dependiente, la línea de regresión es colocada donde la desviación estándar es reducida al mínimo (perpendicular al medio de la línea).

Se calcula el coeficiente de atenuación (ec.1) varianza de cada banda (ec. 2) y la covarianza (ec.3) por par de bandas;

$$\frac{k_i}{k_j} = a + \sqrt{(a^2 + 1)}$$

Ecuación 1. Fórmula para el Cálculo del coeficiente de atenuación.

Donde k_i/k_j es el coeficiente de atenuación y a es:

$$a = \frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2\sigma_{ij}}$$

Ecuación 2. Cálculo de varianza por par de bandas.

$$\sigma_{ij} = \overline{X_i X_j} - (\bar{X}_i \times \bar{X}_j)$$

Ecuación 3. Cálculo de la covarianza por par de bandas.

3. Generación del índice para tipos de fondo (ec. 4), independiente de la profundidad. En aguas relativamente claras, la intensidad de la luz decae exponencialmente con el aumento de la profundidad. Si los valores de la

intensidad de la luz (radiancia) se transforman usando logaritmo natural (ln) ésta relación con la profundidad llega a ser lineal, por lo tanto, los valores de radiancia transformados disminuirán linealmente con el aumento de la profundidad.

$$\text{Indice de tipo de fondo}_{ij} = \ln(L_i) - \left[\frac{k_i}{k_j} * \ln(L_j) \right]$$

Ecuación 4 Cálculo del índice de tipo de fondo.

L_i = radiancia para la banda i ; L_j = radiancia para la banda j ; k_i/k_j = el coeficiente de atenuación para el par de bandas $i - j$.

2.5 Mapeo Temático.

Muestra la distribución espacial de características identificables en la superficie terrestre, estos mapas proveen información descriptiva de áreas identificadas en imágenes, las cuales son categorizadas de acuerdo a sus características espectrales (Schowengerdt, 2007).

La generación de mapas temáticos se lleva a cabo en base a la clasificación de imágenes, es decir mediante el reconocimiento de patrones de pixeles en éstas. La interpretación de estos patrones puede hacerse visualmente, sobre reproducciones fotográficas de las imágenes; o digitalmente, empleando la potencia y rapidéz de cálculo que proporcionan los equipos de cómputo. La clasificación de pixeles en base a sus características espectrales se puede realizar mediante métodos de clasificación no supervisados y supervisados (Mather, 2011).

2.5.1 Clasificación no supervisada.

Este método define (segmenta) grupos de pixeles en base a las características espectrales de éstos en n número de bandas presentes en una imagen. La clasificación no implica necesariamente conocimiento previo del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en el proceso de interpretación posterior a la clasificación. Este tipo de clasificación asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (clusters). Estos grupos equivalen a pixeles con

un comportamiento espectral homogéneo y por tanto definen clases temáticas de interés definidas por el usuario (Gui, 2009).

2.5.2 Clasificación supervisada.

Este tipo de clasificación se basa en las estadísticas espectrales en n bandas de las áreas de formación que representan diferentes objetos seleccionados de la superficie subjetivamente por los usuarios con base a su experiencia o conocimiento. La clasificación es controlada por el conocimiento del usuario pero esta puede estar afectada por el punto de vista subjetivo del mismo (Siamak Khorram, 2012).

La clasificación por lo tanto puede ser errónea por el entrenamiento inapropiado, información errónea del área y/o conocimiento insuficiente del usuario. Dadas las limitaciones de estos dos métodos de clasificación, se ha propuesto la combinación de ambas, es decir una clasificación híbrida (Schowengerdt, 2007).

2.5.3 Clasificación híbrida.

En la clasificación híbrida de una imagen multi-espectral, en primer lugar se realiza una clasificación no supervisada donde se reconocen sitios con patrones generales de asociación de píxeles (Sandham y Leggett, 2003). Estos sitios son posteriormente visitados para conocer la identidad de la superficie de interés y reclasificar la imagen original mediante una clasificación supervisada. Este método utiliza la clasificación no supervisada en conjunto con el conocimiento sólido existente como un procedimiento de formación integral y por lo tanto, proporciona resultados más objetivos y fiables.

2.6 *Sistemas de Información geográfica.*

La ciencia de la información geográfica es un nuevo campo interdisciplinario basado en el conocimiento de geografía, cartografía, informática, matemáticas, entre otras ciencias.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se pueden definir como "un sistema de Integración de hardware y software para capturar, almacenar, comprobar, integrar, manipular, analizar y mostrar datos referenciados espacialmente a la tierra por los usuarios" (Manishika, 2009).

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

Los SIG proporcionan las teorías, métodos y aplicaciones de manera eficaz en el apoyo a las siguientes tareas:

- Producción y mantenimiento de información geográfica.
- Integración de información espacial y de otro tipo en un único sistema que ofrece un marco coherente para el análisis de datos geográficos.
- Permite representar mapas y otros tipos de información espacial en formato digital, permitiendo manipular y mostrar el conocimiento geográfico con nuevas directrices.
- Solución a problemas espaciales (análisis, modelado espacial y ambiental)
- Apoyo y colaboración en la toma de decisiones.

En la gestión, planificación y toma de decisiones pueden considerarse como una de las herramientas disponibles más avanzadas para hacer frente a problemas complejos, ofreciendo apoyo efectivo a la ordenación del territorio y la toma de decisiones (Gomarasca, 2009).

De manera general los SIG utilizan dos modelos principales de representación de datos:

2.6.1 Modelo vectorial.

Es una estructura de datos utilizada para almacenar datos geográficos. Estos datos constan de líneas o arcos, definidos por puntos de inicio y fin, además de puntos de intersección donde se cruzan varios arcos o nodos. La localización de los nodos y la estructura topológica se almacena de forma explícita. Las entidades quedan definidas por sus límites solamente y los segmentos curvos se representan como una serie de arcos conectados (UAH, 2010).

2.6.2 Modelo raster.

En este modelo, cada superficie a representar se divide en filas y columnas, formando una malla o rejilla regular, cada celda de la rejilla guarda tanto las coordenadas de la localización como el valor asociado. La localización de cada celda es implícita, dependiendo directamente del orden que ocupa en la rejilla, a diferencia de la estructura vectorial en la que se almacena de forma explícita la topología (Albrecht, 2007).

2.7 Áreas de conservación marinas.

Los ecosistemas costeros se consideran entre los más amenazados por la actividad antropogénica, debido a las perturbaciones causadas de la actividad industrial, agrícola, turística, pesquera, minera y descargas de desechos urbanos entre otros (Odum, 1989; Morris, et al., 2002; Jensen, 2007; Parimal, 2009). Estas perturbaciones han causado una pérdida de servicios ambientales de gran importancia para la sociedad entre los que se pueden mencionar la protección ante fenómenos de tormenta, recreación, fuente de alimento, origen de sustancias para la fabricación de medicamentos, asimilación de contaminantes y pesquerías (Jackson, et al., 2001; Adger, et al., 2005; Donner y Potere, 2007).

Lara-Lara (2008) menciona que el deterioro de los ecosistemas costeros va en aumento y las medidas tomadas para prevenir esta degradación aún son insuficientes. Esta problemática no es reciente ya que desde 1968 Garrett Hardin publica la tragedia de los comunes, en la que detalla el estado y causas de la crisis ambiental.

Una herramienta comúnmente utilizada para conservar, proteger y mejorar los recursos costeros frágiles ha sido la designación de Áreas Naturales Protegidas (ANP's). Estas áreas son cada vez más populares como herramientas de gestión ambiental en el contexto de un enfoque ecosistémico (Gell y Roberts, 2003).

Un Área Natural Protegida (ANP) es una porción del territorio (terrestre o acuático) cuyo fin es conservar la biodiversidad representativa de los distintos ecosistemas para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos y cuyas características no han sido esencialmente modificadas (SEMARNAT, 2010), estas zonas son manejadas bajo un instrumento político con mayor definición jurídica para la

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

conservación. En México, las ANP se regulan bajo el marco normativo de la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), estando sujetas a regímenes especiales de protección, conservación, restauración y desarrollo, según categorías establecidas en la ley (CONANP, 2011).

Las ANP's tienen como objetivo vigilar que el aprovechamiento de los recursos dentro de la zona se realice de manera sustentable, preservando la flora y fauna particular del ecosistema, permitir y propiciar la investigación y estudio de los ecosistemas con el fin de generar conocimiento y transmitir aquellas prácticas o tecnologías que permitan el aprovechamiento sustentable de los mismos y, a su vez, proteger el entorno de las zonas históricas, arqueológica y turísticas de valor e importancia cultural y recreativa (CONANP, 2011).

Debido a la acelerada pérdida y modificación de los sistemas naturales que ha presentado México durante las últimas décadas se requiere, con urgencia, el fortalecimiento de los esfuerzos de conservación en las regiones con alta biodiversidad.

En este contexto, surge el programa regiones prioritarias para la conservación (RPC) de la Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). Este programa se orienta a la detección de áreas, cuyas características físicas y bióticas favorezcan condiciones particularmente importantes desde el punto de vista de la biodiversidad (CONABIO, 2008) y que por lo tanto sea indispensable su adecuado manejo y conservación.

Como resultado de las actividades encaminadas al MIZC, entre ellas la creación de ANP's, existe cada vez más un mayor consenso en que el mapeo de la distribución espacial de los recursos costeros es indispensable para elaborar estrategias adecuadas para su protección, conservación, e implementación de medidas de control (MESH, 2008).

En México, la mayoría de los casos, la selección de áreas de conservación y zonificación no ha tomado en consideración las características espaciales (ej. distribución) del(los) recurso(s) a proteger, por lo que este trabajo se plantea con las características antes mencionadas.

3 Antecedentes.

El mapeo de hábitat bentónicos es una actividad fundamental para la creación de líneas base, usadas en la gestión de los recursos costeros y el MIZC. A menudo la creación de ésta información de referencia es costosa bajo los métodos tradicionales, sin embargo, el uso de distintas plataformas de sensores remotos y SIGs, ofrecen alternativas a menor costo en comparación con las técnicas tradicionales. Como resultado del auge de las tecnologías de la información, distintos estudios demuestran la eficacia y versatilidad del uso de éstas.

Entre las distintas plataformas y técnicas que se han usado para el mapeo de hábitat bentónicos figuran los trabajos de Ferguson, et al. (1993), que analizaron la distribución espacio-temporal (1985-1988) de pastos marinos en Carolina del Norte; por otro lado Sheppard, et al. (1995), relacionan la naturaleza y la distribución de los hábitat marinos y costeros poco profundos de Anguila en el Caribe con el fin de crear metodologías para la gestión de los recursos; posteriormente Mumby et al. (1997 a,b), evalúan la capacidad de mapeo en arrecifes de coral con sensores satelitales y sensores aerotransportados. En 1999 Mumby & Harborne hacen uso de los sensores remotos para desarrollar y estandarizar una metodología de mapeo bentónico para el desarrollo de modelos de la dinámica en arrecifes de coral y así identificar zonas del alto valor ecológico para facilitar el desarrollo de estrategias de manejo o conservación, permitiendo un manejo integrado a gran escala.

Durante el 2002 Mumby y Edwards, evalúan la factibilidad de mapeo bentónico con distintos sensores Landsat TM, Ikonos, CASI (Compact Airborne Spectrographic Imager), concluyendo que el uso de imágenes a alta resolución (Ikonos) son más sensible en la detección a detalle (tipos de hábitat) en comparación con los otros sensores.

Cerdeira-Estrada, et al. (2008), usaron imágenes satelitales para la cartografía de la distribución de hábitat bentónicos en el Golfo de Batabanó Cuba. En México, Ward, et al., 2004, utilizaron videografía multiespectral digital (DMSV por sus siglas en inglés) aéreas para mapear la distribución de pasto marino en Bahía San Quintín, Baja

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

California, México. Garza Pérez, et al., 2004, hacen predicciones espaciales de arrecifes de coral mediante la vinculación de sensores remotos y modelado ecológico. Bello-Pineda, et al., 2005, hacen uso de escenas aéreas para su posterior uso en una clasificación supervisada en imágenes Landsat para el mapeo de hábitat coralinos en arrecife Alacranes Yucatán, México.

Rioja y Sheppard (2008) hacen uso de un SIG para comparar comunidades bentónicas bajo un esquema de protección y sin protección en Cozumel México. Rioja-Nieto, et al., 2012, hacen una comparación de hábitat bentónico antes del Huracán Emily y después de éste, con el uso de un SIG's de los distintos hábitat en Cozumel México.

Con respecto a Bahía Magdalena éste estudio constituye uno de los primeros trabajos sobre la distribución espacial de hábitat bentónico mediante el uso de SIG y sensores remotos. Así mismo, establece la primer propuesta para la designación de áreas prioritarias de conservación de la región utilizando la beta-diversidad del hábitat y características del paisaje bentónico.

4 Área de estudio.

Bahía Magdalena posee una extensión de 883 km², pertenece al complejo lagunar Bahía Magdalena Almejas (Álvarez, et al., 1975) el cual está localizado en la costa sur-occidental de la península de Baja California Sur (Fig. 1). En esta bahía se encuentra la población de Puerto San Carlos, con 4,716 habitantes (censo INEGI 2005), la cual cuenta con una terminal portuaria que sirve para el desembarque de especies capturadas en altamar y de combustóleo para la planta termoeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad. Es importante mencionar que la principal actividad económica de Puerto San Carlos se basa en la captura, procesamiento y comercio de productos obtenidos del mar (Funes, 2007) y en menor medida del turismo que llega a visitar el área durante la temporada de reproducción de la ballena gris.

Bahía Magdalena ha sido considerada como una de las bahías socio-económicamente más notables del noroeste Mexicano por su considerable extensión y elevada productividad que la ha convertido en el centro de varias pesquerías importantes para la región (Morales-Zarate, 2006). Dado las características anteriores se tiene considerada como una región marina prioritaria para conservar (CONABIO, 1998). Sin embargo, recientemente se ha observado una disminución considerable en los volúmenes de captura de algunas especies. Por ejemplo, la captura de la almeja chocolata ha pasado de 457 toneladas en 2001 a 73 toneladas en 2006 (López-Rocha, 2010).

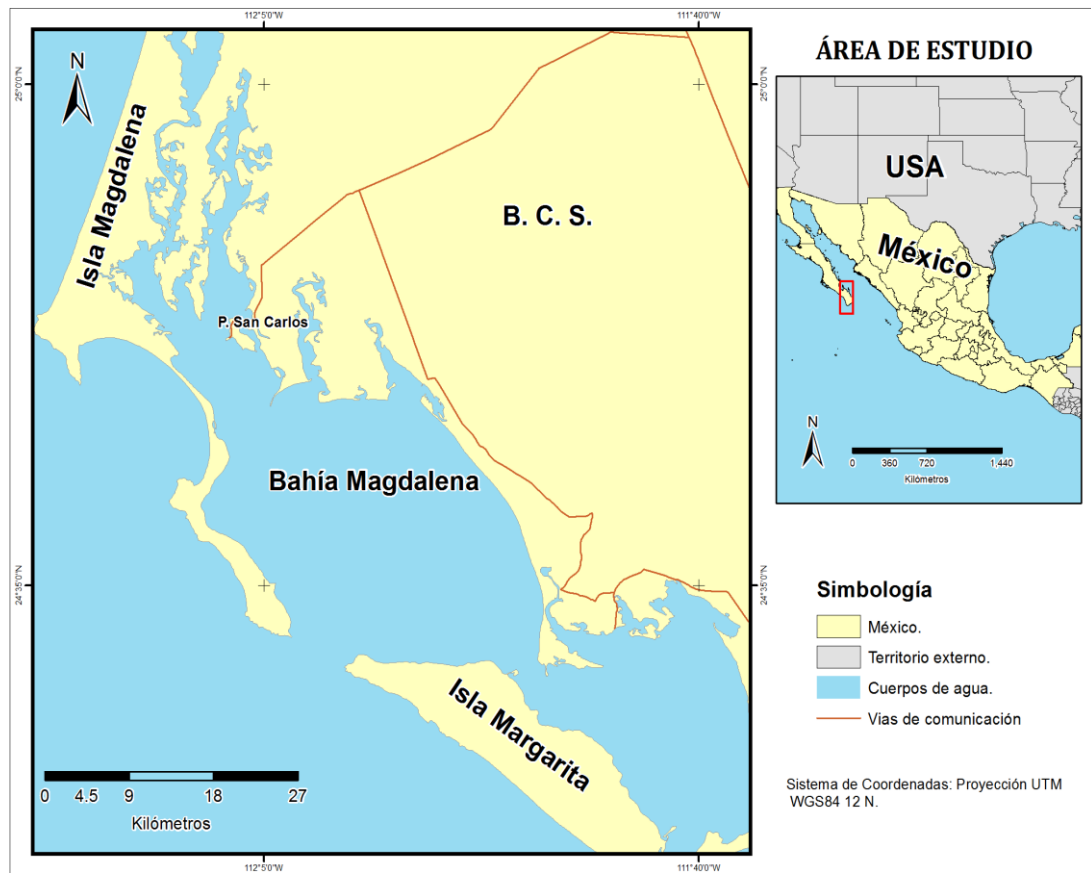


Figura 1. Bahía Magdalena B. C. S.

Dado que las características del paisaje bentónico en Bahía Magdalena no eran conocidas, y de la importancia de esta información para el manejo sustentable del área, en el presente trabajo se propusieron los siguientes objetivos:

5 Objetivo general.

- Generar información basada en datos cuantitativos sobre la cobertura de substratos bentónicos, sensores remotos y SIG para identificar zonas prioritarias de conservación y por lo tanto coadyuvar en el manejo de los recursos costeros en la región.

5.1 Objetivo específicos.

- Caracterizar los distintos tipos de hábitat bentónicos someros mediante la obtención y análisis de datos cuantitativos de cobertura de los distintos substratos.

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

- Construir mapas temáticos de distribución de los hábitat bentónicos someros en el área de estudio.
- Generar un mapa de beta-diversidad considerando el tipo y distribución de los hábitat caracterizados.
- Identificar zonas prioritarias para la conservación considerando la beta-diversidad, tipo y distribución del hábitat.

6 Metodología.

6.1 Obtención de datos en campo.

Se generó una matriz de puntos georeferenciados separados a una distancia de 500 m uno de otro, abarcando la totalidad del área de estudio usando como mapa base una imagen Spot 5 georeferenciada (WGS84). Utilizando el modelo General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO 08) y una carta de navegación con isóbatas de la Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR) se seleccionaron aquellos sitios que se encontraban a una profundidad ≤ 10 m. Se escogió esta profundidad ya que las condiciones de turbidez en la columna de agua no permiten obtener información a mayores profundidades. A partir de éstos puntos se escogieron aleatoriamente 60 estaciones de muestreo que fueron visitadas entre febrero y agosto de 2011. Las estaciones de muestreo se localizaron en campo mediante la utilización de un GPS (Garmin 60CSx). Al encontrar la posición geográfica se verificó la profundidad con un profundímetro manual Hawke h22px. Si esta rebasaba los 10 metros de profundidad, la embarcación se movía con dirección hacia la costa más cercana hasta alcanzar la profundidad adecuada. En cada sitio visitado se anotó la latitud, longitud y profundidad, utilizando el protocolo de monitoreo de ReefCheck (Reef Check California, 2011), mediante el uso de buceo SCUBA y/o snorkel se estableció un transecto de 30 m de longitud orientado hacia el Norte, se tomaron 4 fotografías cada 5 m, a lo largo de todo el transecto, utilizando una cámara subacuática Canon G12 y un cuadrante de PVC de 0.25 m^2 (área total $\sim 1\text{m}^2$). En aquellas estaciones dominadas por un solo tipo de sustrato (cobertura $\sim 100\%$) solamente se tomaron las fotografías en el primer punto y la estimación del porcentaje de cobertura se realizó in situ, considerando la presencia ($<5\%$) de otro tipo de sustratos.

6.2 Estimación del porcentaje de cobertura del sustrato.

En el laboratorio cada cuadrante se analizó con el software Vidana (Plymouth Marine Spatial Ecology Lab) para calcular el porcentaje de cobertura de los tipos de sustratos bióticos y abióticos. Los valores obtenidos se promediaron para estimar el porcentaje de cobertura de los sustratos encontrados para cada estación de muestreo. La identificación de los organismos se realizó hasta el máximo nivel taxonómico posible

utilizando la experiencia de los miembros del grupo de trabajo y/o textos especializados para la identificación de macroalgas (Abbott y Hollenberg, 1976; Readdie, et al., 2006; Mondragon y Mondragon, 2010).

6.2.1 Caracterización del tipo de hábitat.

Utilizando los porcentajes de cobertura observados de los sustratos en las estaciones de muestreo, se llevó a cabo un análisis cluster mediante el índice de similitud de Bray-Curtis con el método de agrupamiento promedio ponderado al tamaño del cluster (Green, et al., 1998; Rioja-Nieto y Sheppard 2008). Los datos fueron previamente transformados con el logaritmo natural para minimizar la distancia numérica entre los porcentajes de cobertura (Gorley, 2005). Se utilizó un nivel de similitud del 80% para caracterizar los principales tipos de hábitat bentónicos someros en el área de estudio.

6.3 Imágenes Satelitales.

Se obtuvieron 8 escenas multiespectrales de alta resolución (2 m por píxel) en color natural (RGB) de la plataforma Geoeye-1. Dado que era necesario contar con imágenes que cubrieran la totalidad del área de estudio se utilizaron escenas obtenidas en los años 2009 (2 escenas), 2010 (3 escenas) y 2011 (3 escenas).

6.3.1 Pre-procesamiento de imágenes.

6.3.1.1 Corrección geométrica.

Para la corrección geométrica de las imágenes se siguió la guía para mapeo de hábitat bentónicos (NOAA, 2001). Se eligieron entre 4 y 5 puntos de control (PC), con posición geográfica conocida, distribuidos en lo posible en las 4 esquinas de cada imagen. Se eligieron como PC objetos que no presentaran desplazamiento en el tiempo (ej. árboles, construcciones, cruces de camino).

Posteriormente se utilizó un polinomio de primer grado para georeferenciar la imagen en proyección UTM (datum WGS84 12 N).

6.3.1.2 Mosaico y generación de máscara.

Para generar el área de interés (AOI area of interest) en cada una de las escenas, se utilizaron cartas marinas digitalizadas (Propiedad de SEMAR) para eliminar aquellas áreas con una profundidad > 10 m. Esto debido a las condiciones de visibilidad de la columna de agua las cuales limitan la información obtenida de los fondos marinos a través de imágenes satelitales. Así mismo, se generó un archivo vectorial, basado en imágenes de Google Earth georeferenciadas, digitalizando la línea de costa para excluir el área terrestre del análisis.

El AOI obtenida se utilizó para construir un mosaico del área de estudio. Al generar el mosaico, las zonas de traslape entre imágenes se sometieron a una ponderación de línea en las fronteras. Posteriormente se hizo un ajuste de histograma, usando como base el histograma de la imagen que presentó mejores características en cuanto a color y cobertura nula de nubosidad. Por último se discriminaron las áreas no activas (sin datos) por imagen (ERDAS, 2012).

6.3.1.3 Corrección atmosférica y de columna de agua.

Al mosaico obtenido se le aplicó una corrección atmosférica mediante el método propuesto por Chávez, (1996) y una corrección de columna de agua propuesta por Lyzenga (1981) modificada por Green, et al. (2000).

Finalmente con el objetivo de mejorar el contraste de la imagen y eliminar el ruido se utilizó un filtro de circunvolución lineal low pass con una ventana de 7x7 píxeles (Schowengerdt, 2007).

6.4 Construcción de mapas temáticos.

La ubicación geográfica de las estaciones de muestreo, agrupadas con base a los resultados obtenidos del análisis cluster, se usó para definir los sitios de entrenamiento en el mosaico procesado. Dada la alta confusión espectral entre algunos de los sitios de entrenamiento así como características inherentes a la imagen (nubosidad o haze), se utilizaron 35 sitios de muestreo para la generación del archivo de firmas espectrales y clasificación supervisada del mosaico con la regla de máxima similitud. El archivo de firmas espectrales se construyó mediante el método de sembrado de píxeles (Green, et.

al., 2000) (Green et al., 2000b) con un radio de 100 píxeles y una similitud euclidiana de 10. Este método permite la agrupación de píxeles circunvecinos con características espectrales similares. Se aplicó edición contextual al mapa temático siguiendo una regla aplicable a toda la imagen la cual se basó en corregir los datos incorrectos de la clasificación, en base a conocimiento del área de estudio, por efecto de la profundidad (ej. borde de los canales) (Green, et al., 2000).

Una manera de evaluar el mapeo temático es el reporte de la precisión general cuando se hacen trabajos en los que se hace un tipo de clasificación, sin embargo, este no es suficiente ya que no permite entender la confusión entre clases, por lo que en este estudio se calculó la precisión por usuario y la precisión de producción (Story, 1986), la cual nos indica el grado de probabilidad de que un hábitat se clasifica como tal en la imagen (precisión de producción) y que realmente corresponda en campo (precisión de usuario), una manera más para evaluar es el cálculo del estadístico kappa en el que explicamos si nuestros datos corresponden realmente al proceso evaluado o corresponden en parte al azar.

La clasificación se evaluó utilizando las firmas espectrales de los sitios de entrenamiento como referencia mediante el uso de una matriz de error y cálculo del coeficiente Kappa, precisión general, de usuario y de producción (Congalton, 1991; Green, et al., 2000).

6.5 Descripción general de las características del paisaje.

El mapa temático obtenido se agregó a un SIG (ArcMap v10) en el cual el archivo raster fue vectorizado. Mediante el SIG se calculó el área de cobertura, perímetro y relación área/perímetro (compactación) de cada uno de los polígonos (Ec. 5). Así mismo, se estimó el número total de polígonos (fragmentación) y área total para cada clase.

$$Ra = \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}}$$

Ecuación 5. Cálculo del grado de compactación por polígono.

La relación área/perímetro de los polígonos no presentó una distribución normal (Kolmogorov-Smirnof, $p < 0.05$), condición que se mantuvo al aplicar distintas transformaciones a los datos.

Se aplicó una prueba de Kruskal-Wallis y una prueba de comparación múltiple de Tukey no paramétrica (Zar, 2010) para contrastar la compactación entre los distintos tipos de hábitat.

Los análisis estadísticos se llevaron a cabo con el software Matlab (v.2011).

6.6 Selección de áreas prioritarias de conservación.

6.6.1 Cálculo de beta-diversidad.

El término beta-diversidad de manera implícita señala áreas en las que coexisten comunidades diferentes, de esta manera a valores altos se tiene mayor complejidad como resultado de una serie de condiciones medioambientales que auspician su coexistencia. Para la modelación de la beta-diversidad de los hábitat bentónicos, se utilizó la metodología propuesta por Harborne, et al. (2006) y modificada por Rioja y Sheppard (2008). Se utilizaron valores promedio por clase para el cálculo del índice de disimilitud entre hábitat y códigos escritos en Matlab (v.2011) para el cálculo del valor de beta-diversidad por pixel con un tamaño de ventana de 100 x 100 pixeles (200 x 200 m). Como resultado final se generó un archivo raster proyectado en el sistema de coordenadas WGS84 UTM 12N. El tamaño de ventana se escogió en función de la capacidad del hardware reflejado en el tiempo de cálculo.

Los análisis de datos del porcentaje de cobertura se llevaron a cabo utilizando los programas PRIMER v.6.0 y Excel v.2010. El pre-procesamiento de imágenes y clasificación del mosaico se realizó con el programa ERDAS v.2011. El programa ArcMap v.10 se utilizó para la generación de los mapas temáticos.

6.6.2 Selección de sitios prioritarios.

Con el objetivo de permitir el uso de la información generada en este trabajo, se construyó un SIG del hábitat bentónico de la bahía, el cual puede ser utilizado por los tomadores de decisiones en el manejo costero. Esto a su vez permitió llevar a cabo un análisis de superposición ponderada (Center, 2012) para la identificación y selección de sitios prioritarios para la conservación tomando en cuenta características del paisaje. Se utilizaron 3 capas: mapa temático de hábitat bentónicos, raster de beta-diversidad y se generó un raster de la compactación de los parches (Bogaert, et al., 2000) , a partir del cálculo de la relación área perímetro para cada uno de los polígonos.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

Se decidió utilizar estas tres capas ya que: hay ciertos tipos de hábitat con dominancia de especies particularmente importantes para otras especies como sitios de refugio y reproducción (ej. pastos marinos y bosques de *Sargassum spp.*). Estas especies se conocen como especies fundadoras (Bologna y Heck, 2000; Crowder, 2005). La beta-diversidad considera indirectamente la variedad de procesos naturales que ocurren en distintos tipos de hábitat y que mantienen la diversidad (Harborne, et al., 2006; Rioja-Nieto y Sheppard, 2008) y la compactación del hábitat es un indicador de la susceptibilidad a alguna perturbación ambiental (Wang, 2011).

Debido a que este tipo de análisis considera una escala de valores estándar (Center, 2012), los valores de las tres capas fueron transformados a una escala común entre 1-5 donde el valor de 1 indica una condición poco adecuada y 5 una condición muy adecuada. En el caso del mapa temático de los tipos de hábitat, los grupos 3 y 4 (dominados por pastos marinos) y los grupos 5 y 6 (dominados por arenas) se unieron para formar dos nuevas clases, respectivamente. De esta manera se obtuvieron 5 clases finales para este análisis. En la tabla 1 se presenta la escala de valores asignada para cada una de las capas utilizada en el análisis de superposición.

Tabla 1. Escala de valores estándar asignado a las capas de tipo de hábitat, beta-diversidad y compactación del hábitat utilizadas en el análisis de superposición ponderada.

| Valores asignados | Tipos de hábitat | Beta-diversidad | Compactación |
|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| 1 | clases 5 y 6 | 0 | 0.043 - 29.8344 |
| 2 | clase 2 | 0.1 - 1 | 29.8345 - 59.6258 |
| 3 | clase 1 | 1.1 - 2 | 59.6259 - 89.4172 |
| 4 | clase 7 | 2.1 - 3 | 89.4173 - 119.2086 |
| 5 | clases 3 y 4 | 3.1 - 4 | 119.2087 - 149 |

Por último, para finalizar el proceso se ponderaron las capas de acuerdo a los siguientes porcentajes 30 % (beta-diversidad), 50 % (tipo de hábitat) y 20 % (compactación del hábitat). La asignación del nivel de ponderación es definida por el usuario. En este caso, los valores de ponderación se asignaron considerando una mayor importancia del tipo

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

de hábitat y su heterogeneidad para la identificación de los sitios prioritarios de conservación.

7 Resultados.

7.1 Análisis de coberturas y caracterización del hábitat.

A partir del análisis de las coberturas bentónicas en 60 estaciones visitadas, se identificaron 12 tipos de sustrato (Tabla 2)

Tabla 2. Tipos de sustratos identificados a partir del análisis de 1440 fotografías obtenidas en 60 estaciones de muestreo en Bahía Magdalena, B. C. S.

| Sustratos | |
|---------------------|----------------------------|
| | Macroalgas |
| | Corales duros |
| | Corales blandos |
| | Pastos marinos |
| Sustratos bióticos | Algas calcareas |
| | Turf (Algas filamentosas) |
| | <i>Sargassum spp.</i> |
| | Rodolitos |
| | Esponjas |
| | Rubble (pedacería de roca) |
| Sustratos abióticos | Roca |
| | Arena |

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

Entre las especies de macroalgas encontradas destacaron los géneros: *Gracilaria spp.*, *Enteromorpha spp.*, *Caulerpa spp.*, *Hypnea spp.*, y *Colpomenia spp.*. Así mismo, *Zoostera marina* fue la especie de pasto marino dominante.

Utilizando los porcentajes de cobertura de los substratos para un análisis de clúster (índice de similitud de Bray-Curtis) con un criterio de corte al 80% se identificaron un total de 9 tipos de hábitat o clases (Fig. 2).

Análisis de cluster Bahía Magdalena.

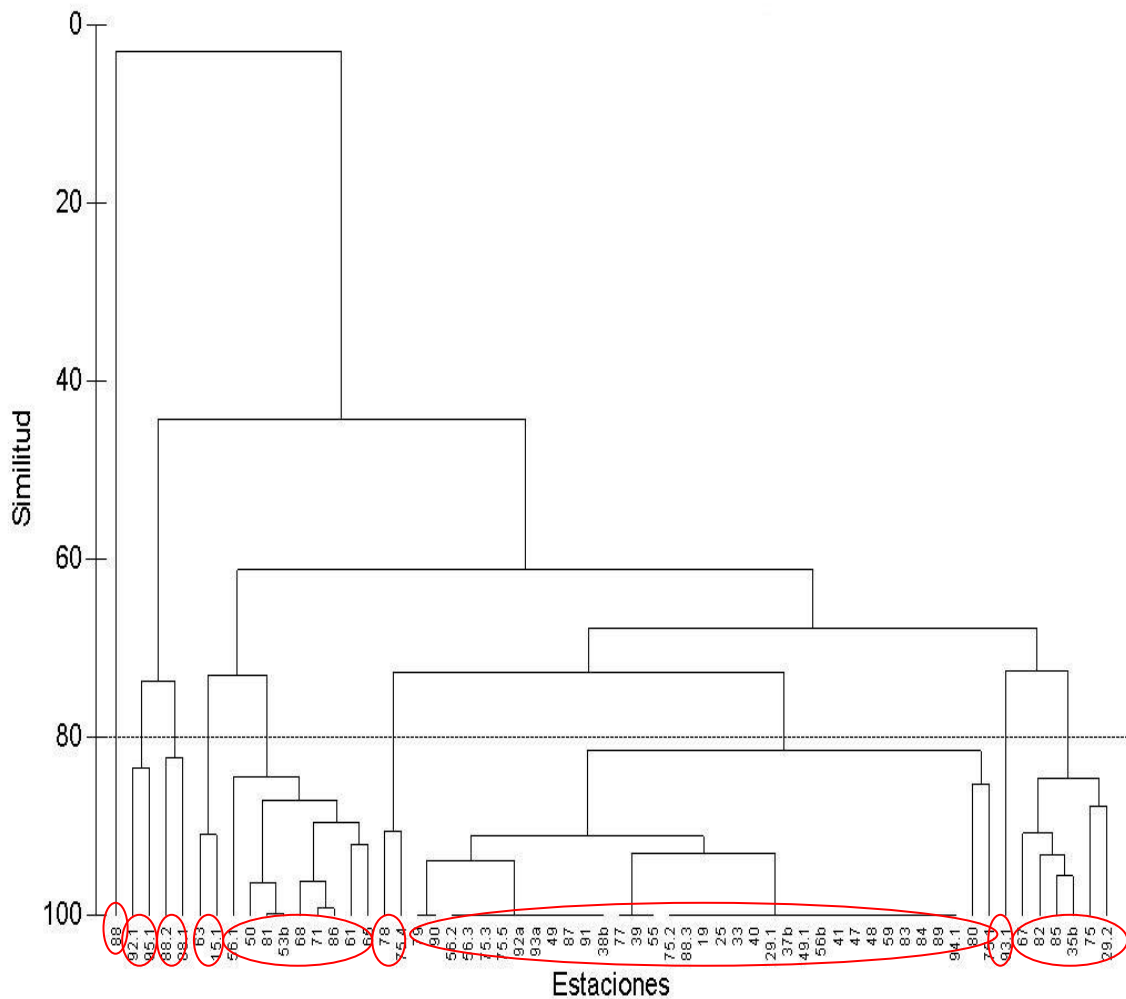


Figura 2. Dendrograma del análisis de cluster con un corte al 80%. Los círculos rojos indican la agrupación de las estaciones en las distintas clases con una similitud al 80%.

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

En la Tabla 3 se presentan la descripción de las clases identificadas a partir del análisis de cluster.

Tabla 3. Tipos de hábitat bentónico somero caracterizado para el área de Bahía Magdalena. Coberturas: ≤ 5 % se mencionan como presencia, ≤25 >5 % como cobertura baja, ≤ 50 >25 % como cobertura media, ≤75 > 50% alta cobertura y ≥ 75% muy alta cobertura.

| <i>Número de clase</i> | <i>Características principales del hábitat</i> |
|------------------------|---|
| 1 | Muy alta cobertura de rubble. |
| 2 | Presencia de algas calcáreas, presencia de <i>Sargassum spp.</i> , presencia de coral duro, baja cobertura de rubble, baja-media cobertura de macroalgas, baja-media cobertura de roca y baja-alta cobertura de arena |
| 3 | Presencia de macroalgas, presencia de algas calcáreas, presencia de <i>Sargassum spp.</i> , presencia de coral duro, baja cobertura de roca, baja-alta cobertura de arena y baja-alta cobertura de rubble. |
| 4 | Baja cobertura de arena y muy alta cobertura de pasto marino. |
| 5 | Presencia macroalgas, presencia de turf, baja alta cobertura de pasto marino y media-muy alta cobertura de arena. |
| 6 | Presencia de pasto marino, presencia de macroalgas, baja cobertura turf y muy alta cobertura de arena. |
| 7 | Presencia de pastos marinos, presencia de macroalgas, presencia de turf, presencia de <i>Sargassum spp.</i> , presencia de tunicados y muy alta cobertura de arena. |
| 8 | Baja cobertura de macroalgas, media cobertura de arena y media cobertura de rubble. |
| 9 | Presencia de pasto marino, presencia de tunicados, baja-alta cobertura de macroalgas y media-muy alta cobertura de arena. |

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

Debido a características de la imagen (cobertura de nubosidad) y ubicación geográfica de algunas estaciones (en pendiente y adyacentes a zonas con una profundidad > 10 m), solamente fue posible utilizar 35 estaciones como sitios de entrenamiento para la clasificación de la imagen.

La firma espectral de las clases se evaluó mediante el uso de un dendograma de distancia euclidiana entre clases y una matriz de error. Dada la alta confusión encontrada entre las clases 6 y 9 (Fig.3) y considerando las características ecológicas de los substratos, éstas se unieron para conformar una sola clase.

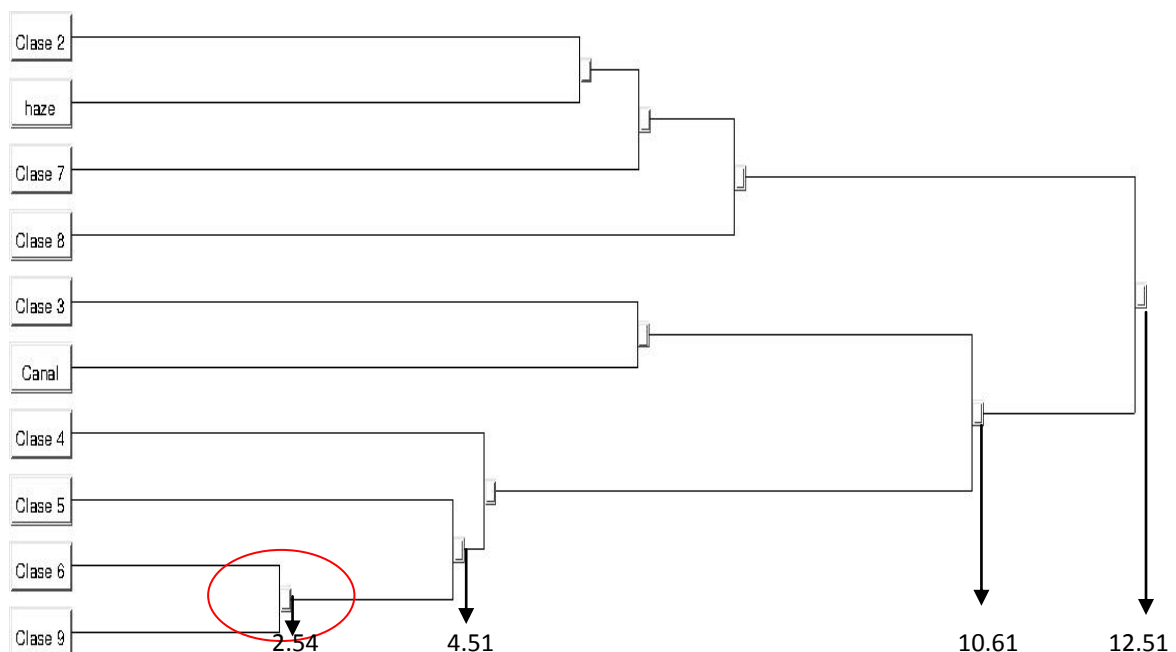


Figura 3. Dendrograma de firmas espectrales basado en la distancia euclidiana entre clases. El círculo de color rojo muestra la similitud espectral entre la clase 6 y la clase 9 y los números en la línea inferior muestra los valores de la distancia entre clases.

Así mismo, se decidió no incluir en el análisis a la clase 1. Esta clase, poco común, está representada por un solo sitio de entrenamiento localizado en la imagen en una zona cubierta por “haze”, lo cual causaba una alta confusión espectral con la clase 7 que es espacialmente dominante aumentando el error en la clasificación.

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

Por lo anterior, se caracterizaron un total de 7 clases o tipos de hábitat bentónicos someros en Bahía Magdalena (Tabla 4).

Tabla 4. Tipos de hábitat bentónico somero caracterizado para el área de Bahía Magdalena. Coberturas: $\leq 5\%$ se mencionan como presencia, $\leq 25 > 5\%$ como cobertura baja, $\leq 50 > 25\%$ como cobertura media, $\leq 75 > 50\%$ alta cobertura y $\geq 75\%$ muy alta cobertura.

| <i>Número de clase</i> | <i>Características principales del hábitat</i> |
|------------------------|--|
| 1 | Presencia de algas calcáreas, presencia de <i>Sargassum spp.</i> , presencia de coral duro, baja cobertura de rubble, baja-media cobertura de macroalgas, baja-media cobertura de roca y baja-alta cobertura de arena. |
| 2 | Presencia de macroalgas, presencia de algas calcáreas, presencia de <i>Sargassum spp.</i> , presencia de coral duro, baja cobertura de roca, baja-alta cobertura de arena y baja-alta cobertura de rubble. |
| 3 | Baja cobertura de arena y muy alta cobertura de pasto marino. |
| 4 | Presencia macroalgas, presencia de turf, baja-alta cobertura de pasto marino y media-muy alta cobertura de arena. |
| 5 | Presencia de pasto marino, presencia de tunicados, baja cobertura turf, presencia-alta cobertura de macroalgas y media-muy alta cobertura de arena. |
| 6 | Presencia de pasto marino, presencia de macroalgas, presencia de turf, presencia de <i>Sargassum spp.</i> , presencia de tunicados y muy alta cobertura de arena. |
| 7 | Baja cobertura de macroalgas, media cobertura de rubble y media cobertura de arena. |

El tipo de substrato rodolitos se excluyó de la descripción ya que al agrupar los sitios de entrenamiento, este se presentaba en clases espacialmente dominantes y sin embargo se encontró con coberturas < 5 % en un pequeño parche de la región del Noreste dominado por arena (clase 6).

7.2 Pre-procesamiento de imágenes.

Como ejemplo de la aplicación de la corrección atmosférica se muestra una escena de la parte norte de la Bahía (Fig. 4), se puede apreciar un realce en las características de la superficie captada por el sensor. Esto se aplicó a cada imagen por separado debido a la

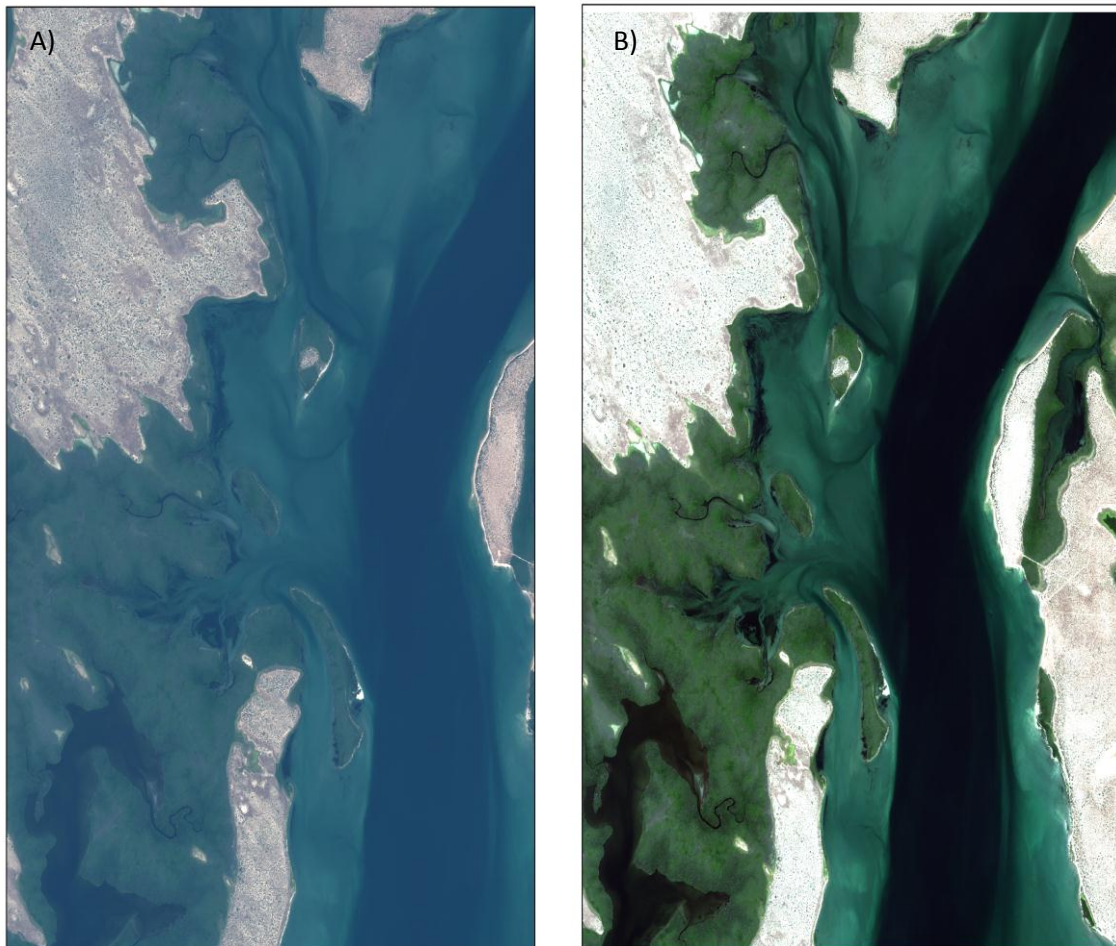


Figura 4. A) Sin corrección, B) Con corrección

diferencia temporal de las imágenes. Aunque este método no corrige en términos absolutos, es de gran utilidad para estudios de este tipo, en el que la perturbación es en su mayoría causada por vapor de agua.

7.2.1 Mosaico.

La imagen resultante del mosaico se presenta en la figura 5. Se observa que la parte sur del AOI presenta un patrón de zigzag, esto se debe al área cubierta por las imágenes o área activa y el rango de profundidad 0-10 m.

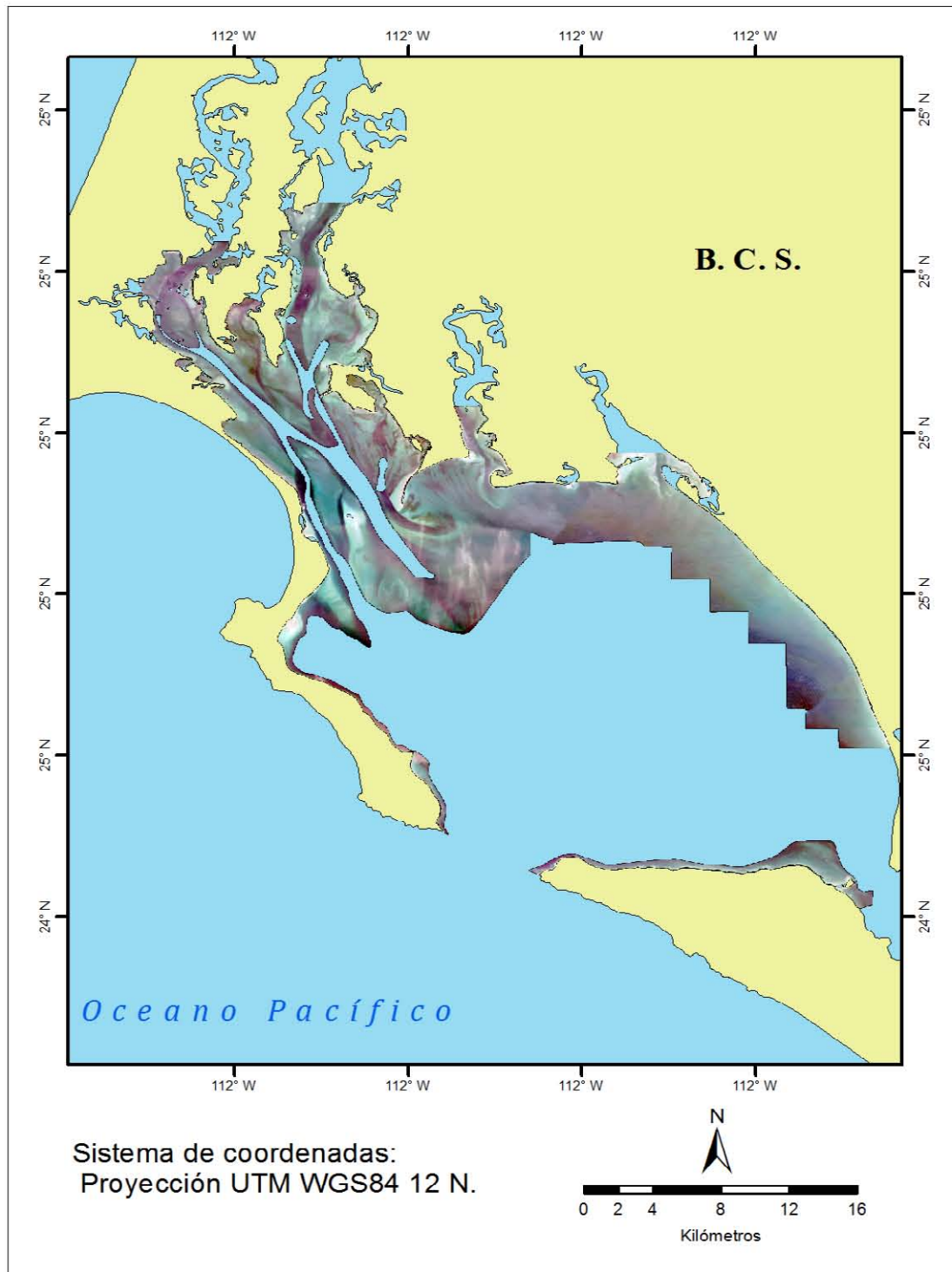


Figura 5. Mosaico del AOI basado en 8 escenas satelitales del sensor Geoeye-1 (RGB) de Bahía Magdalena B.C.S.

7.2.2 Corrección columna de agua.

Para el cálculo del factor de corrección, se usaron 31 sitios de entrenamiento homogéneos con una cobertura aproximada del 100 % de arena pero a diferentes profundidades. En las Figura 6 se presenta la relación de los DN entre las bandas roja y verde (6a), roja y azul (6b) y verde y azul (6c) (Fig. 6), se puede apreciar claramente la correlación entre los valores de las bandas a distintas profundidades. No se presenta la

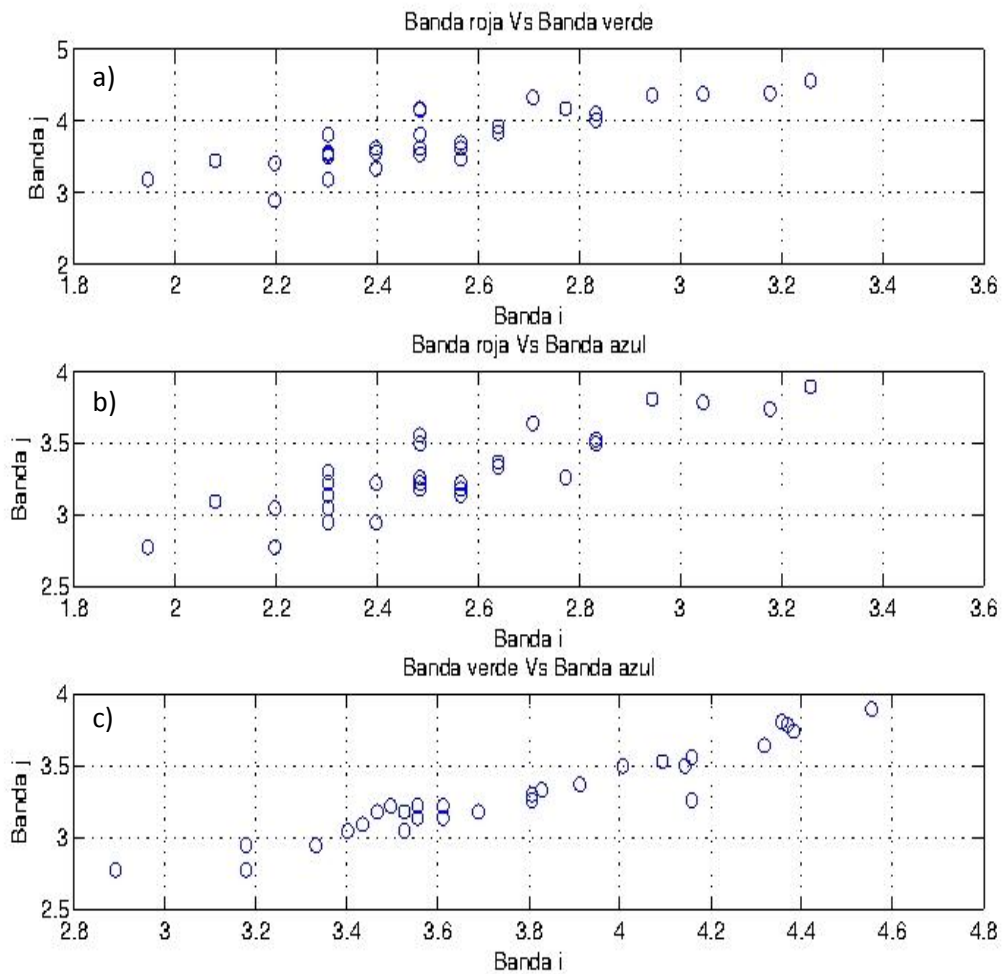


Figura 6. Contraste entre bandas y sus DN para el cálculo del coeficiente de tipo de fondo. Los valores obtenidos como coeficiente de atenuación en este trabajo fueron 1.41 para el par de bandas Rojo vs Verde, 0.95 para Rojo Vs Azul y 0.58 para las bandas Verde Vs Azul.

línea de tendencia ya que el cálculo de los coeficientes se realizó mediante el método de covarianzas donde el valor obtenido es independiente del eje en donde se asignen los valores de cada banda (variable dependiente e independiente) (Green, et al., 2000).

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

Como ejemplo de esta corrección se muestra una escena de la parte Noreste de la bahía (Figura 7 A y B) en el que se aprecia el realce de las características del substrato bentónico.

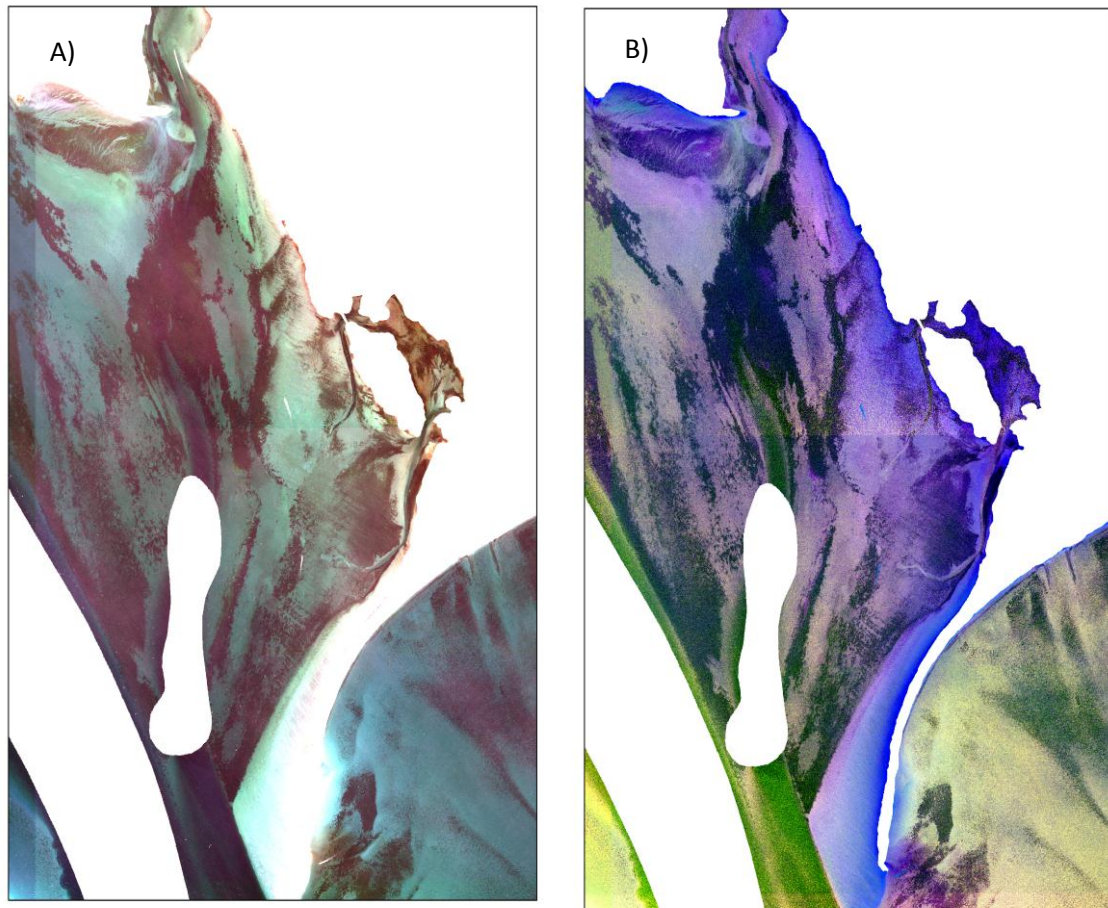


Figura 7. Ejemplo de la corrección de columna de agua, A) Sin corrección de columna de agua B) Con corrección de columna de agua.

7.3 Construcción de mapas temáticos.

Utilizando las firmas espectrales obtenidas de los sitios de entrenamiento agrupados en 7 clases de hábitat se llevó a cabo la clasificación supervisada del mosaico de alta resolución. Así mismo se aplicó edición contextual, considerando conocimiento del área en donde se cambiaron clases que se sabe no correspondían al patrón de distribución presentado. En la Figura 8 se muestra la clasificación general de los 7 tipos de sustrato.

La clase más dominante en la bahía es la clase 6 (Muy alta cobertura de arenas) y la que

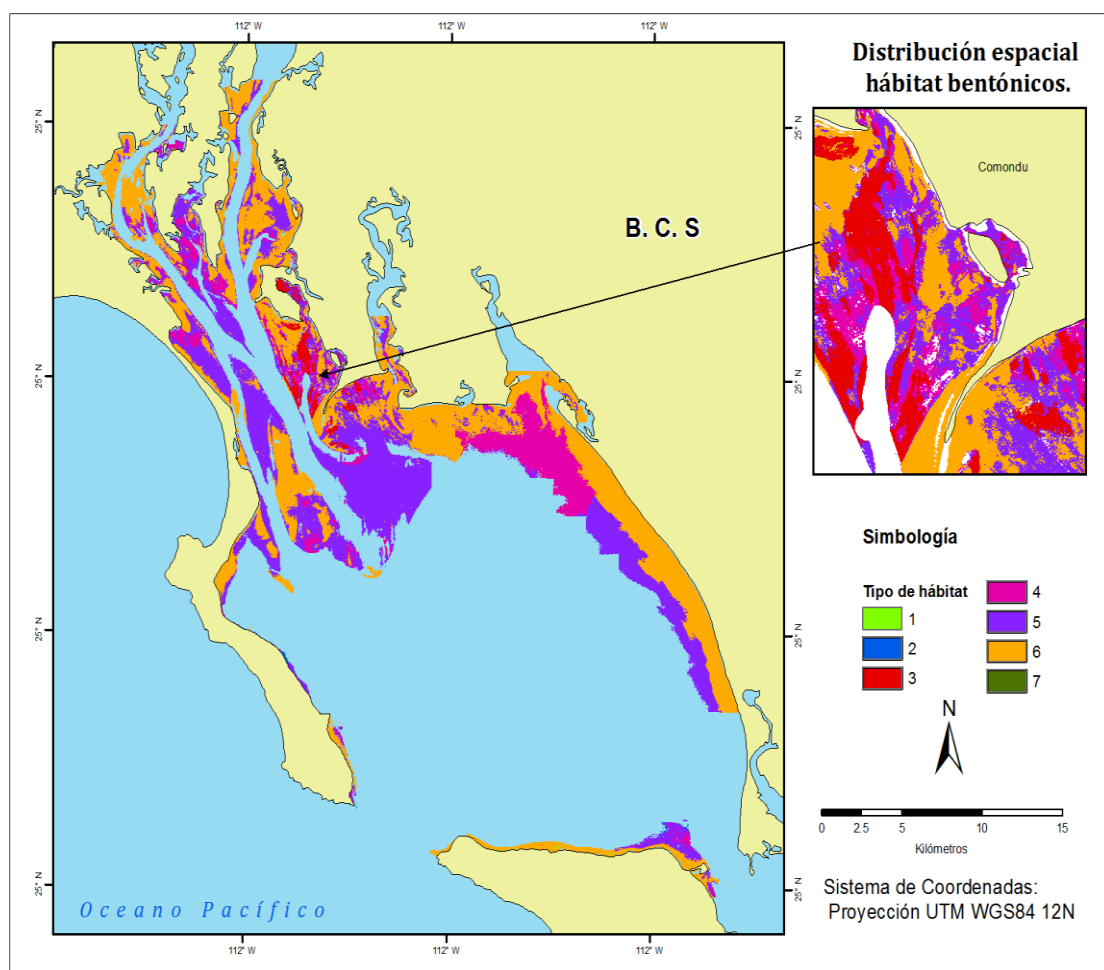


Figura 8. Distribución de hábitat bentónicos someros de Bahía Magdalena B.C.S.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La distribución espacial de la clase 1, caracterizada por la dominancia de arenas y macroalgas además por la presencia de rocas, presentó una distribución centrada en la parte sur de la bahía y norte de isla Margarita (Figura 9).

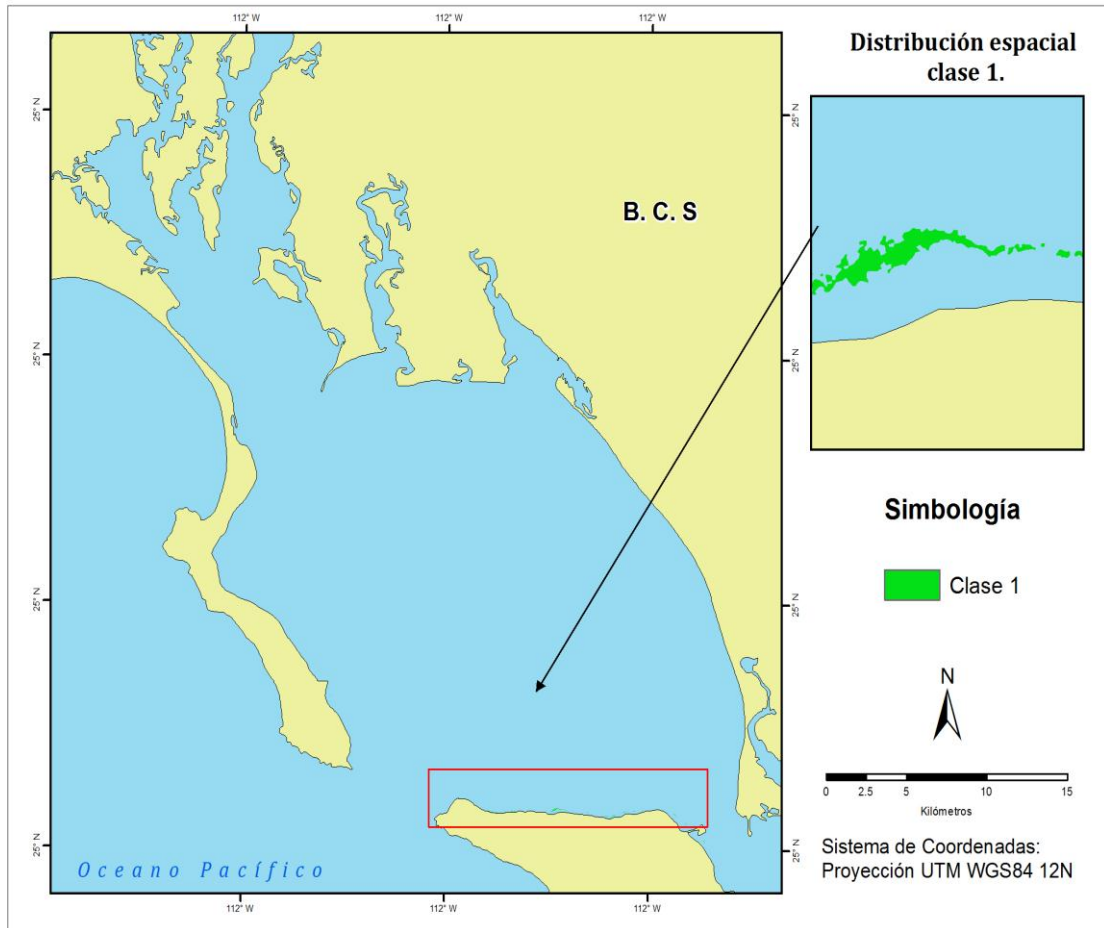


Figura 9. Distribución de la clase 1 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra la zona de distribución de la clase.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La clase 2 caracterizada por un alta cobertura de arena y baja alta cobertura de rubble se distribuyó en 2 sectores principalmente: parte sureste de la isla y parte suroeste de la Bahía (Figura 10).

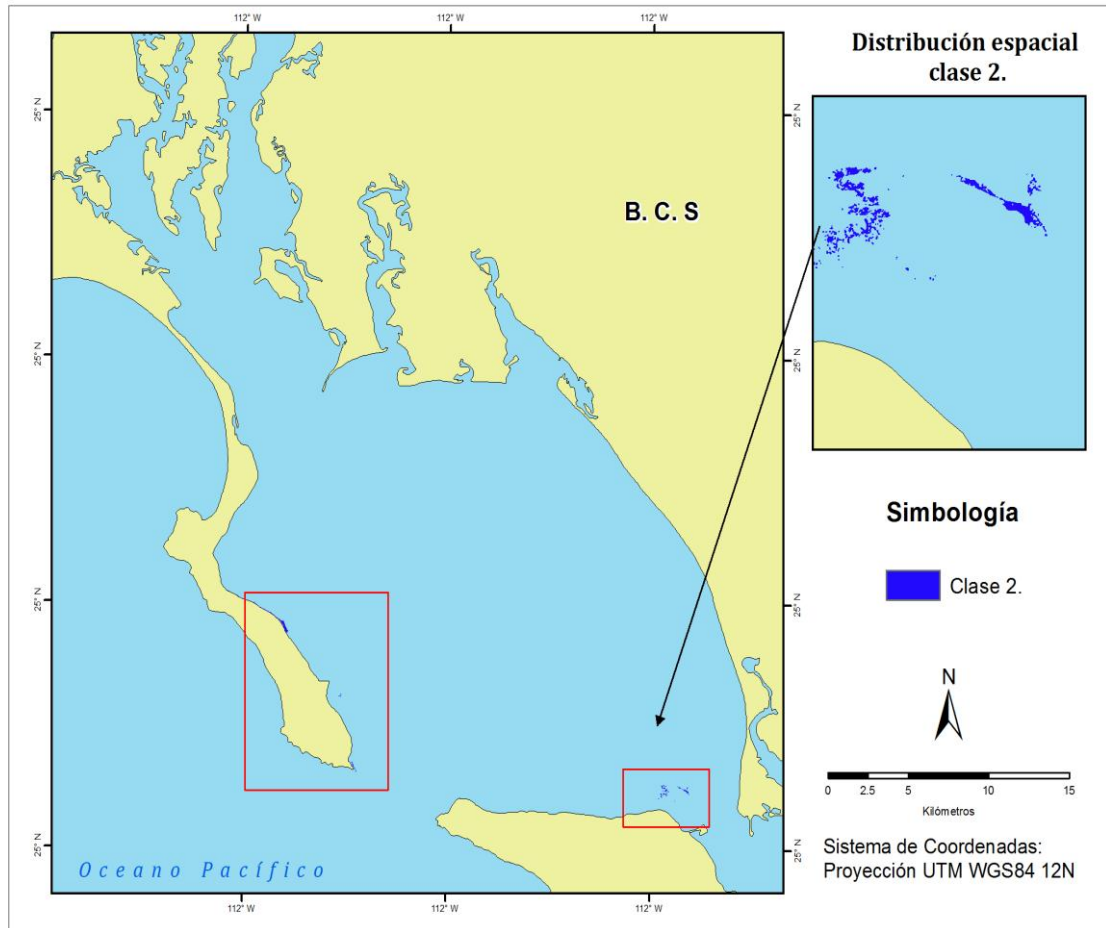


Figura 10. Distribución de la clase 2 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra las zonas de distribución de la clase.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La clase 3 caracterizada por la presencia de praderas de pasto marino se ubicó en 2 zonas principalmente de las que sobresale la parte centro-suroeste de la bahía y la parte noroeste (Figura 11).

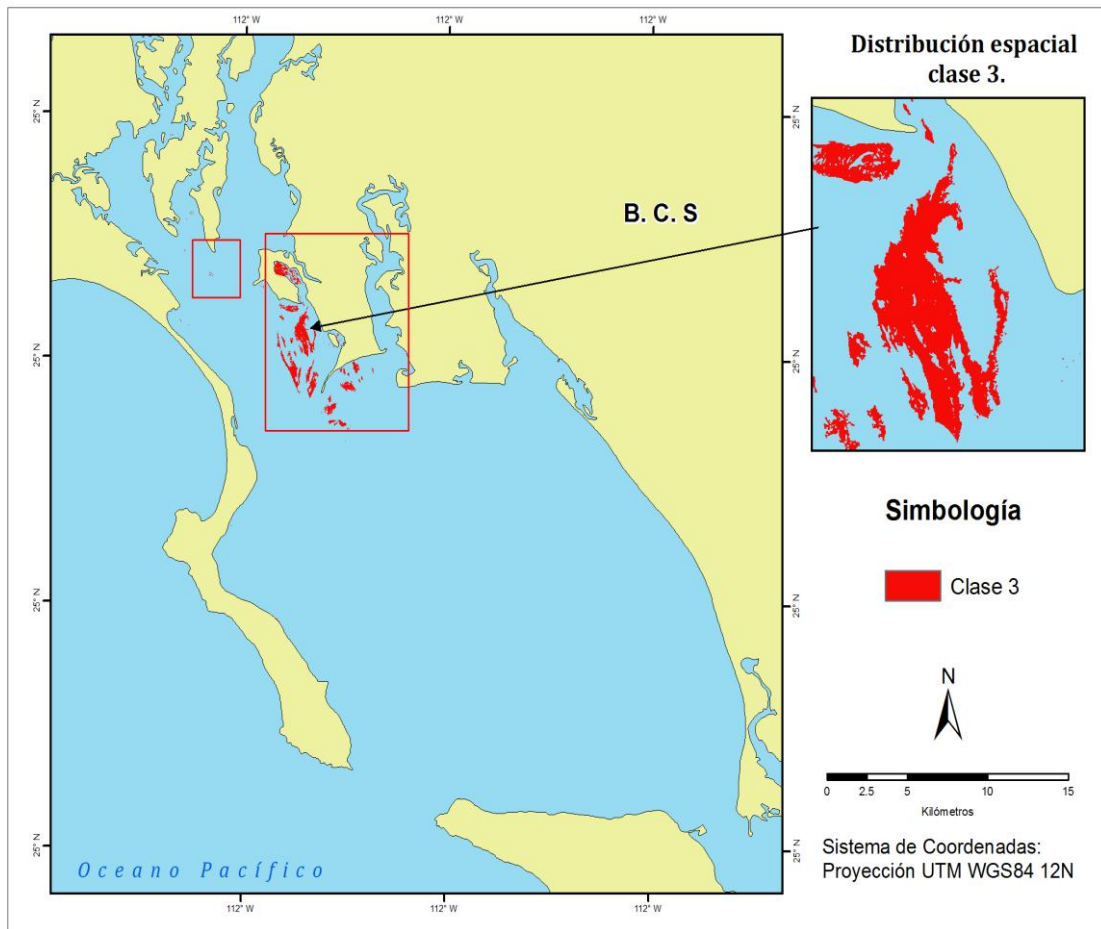


Figura 11. Distribución de la clase 3 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra las zonas de mayor densidad de polígonos.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La clase 4 caracterizada por arena y pasto marino con presencia de macroalgas, presenta una distribución de la parte sur al norte de la Bahía. En la parte sur tiene poca presencia, concentrándose principalmente en la parte central (Figura 12).

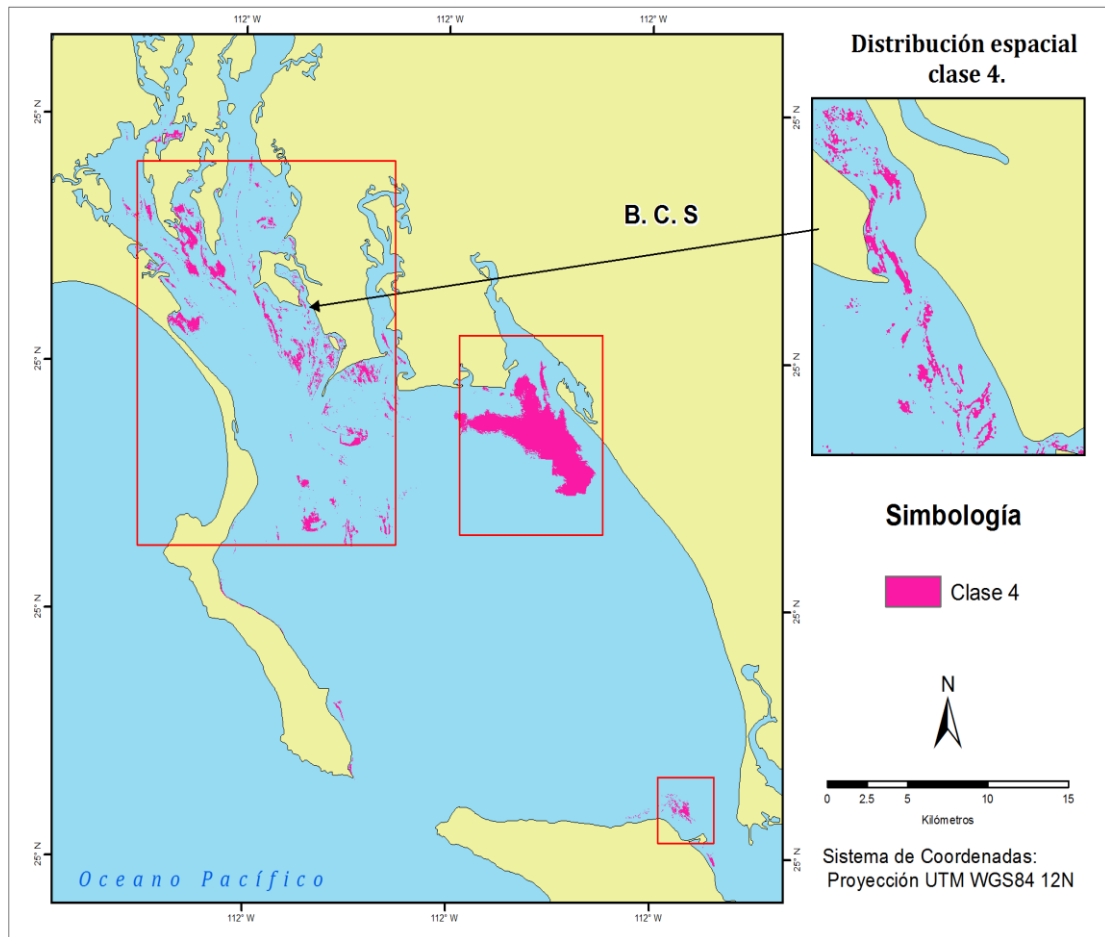


Figura 12. Distribución de la clase 4 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra las zonas de distribución en las que se presenta mayor densidad de polígonos.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La clase 5, caracterizada por alta cobertura de arena, alta cobertura de macroalgas baja de cobertura de turf, presencia de pasto marino y tunicados, tiene presencia en toda la bahía (Figura 13).

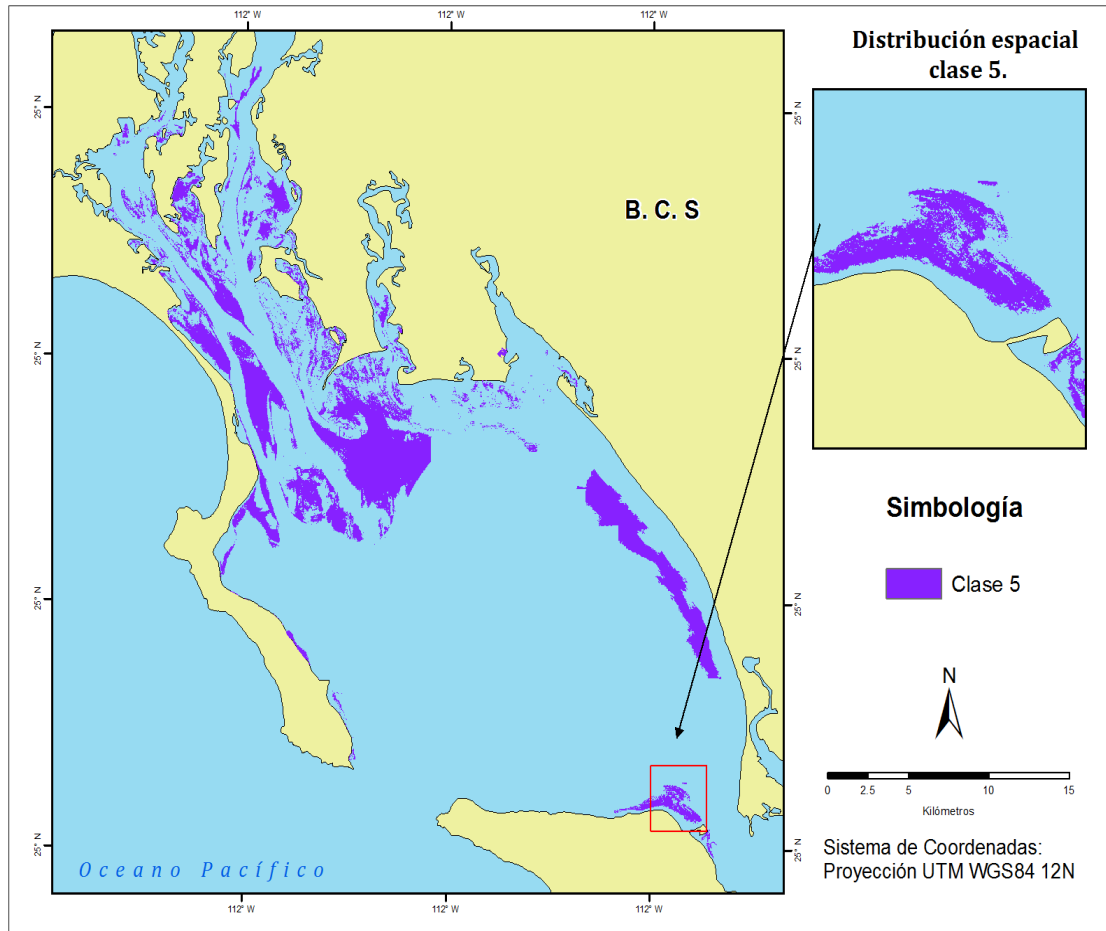


Figura 13. Distribución de la clase 5 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra un acercamiento en la parte sur de la bahía en la que se muestra la distribución del hábitat.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La clase 6 se caracteriza por muy alta cobertura de arena y presencia de algunos tipos de sustrato como macroalgas tiene presencia en toda la bahía (Figura 14).

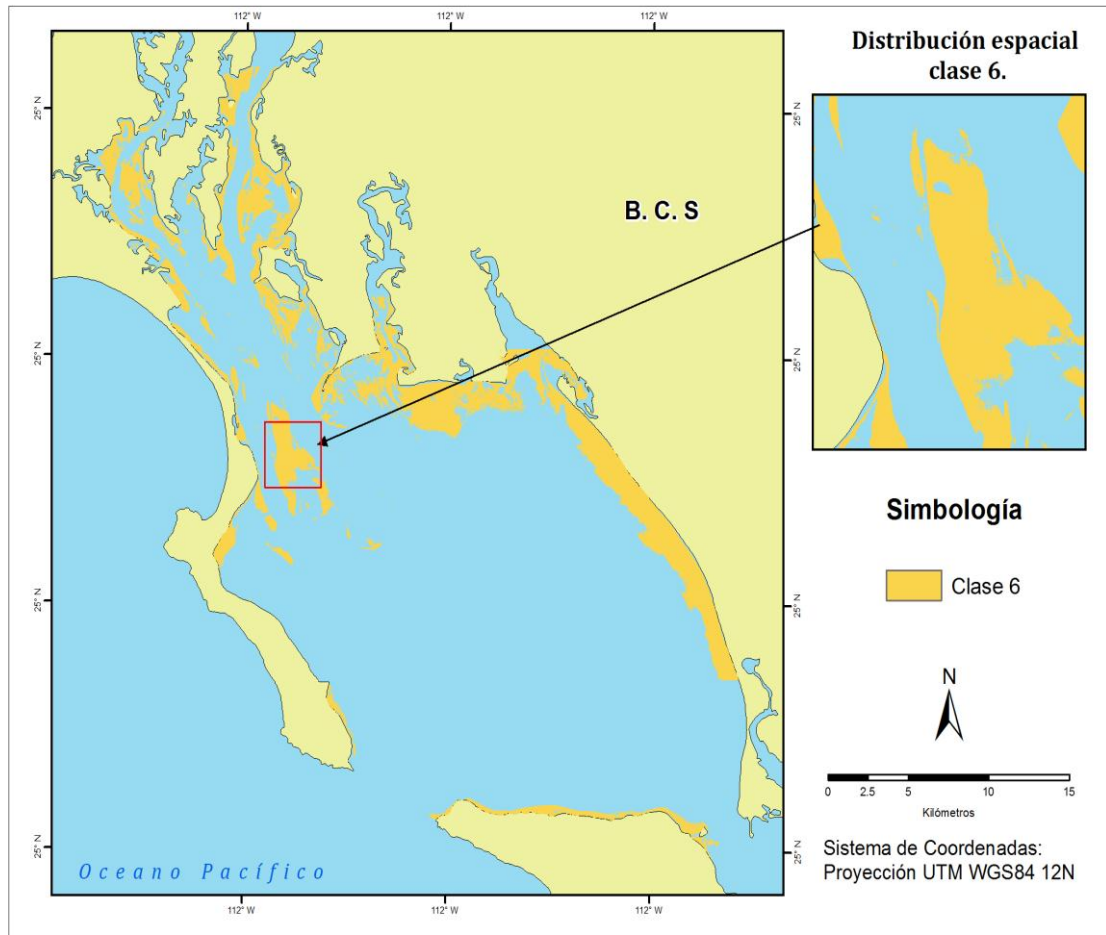


Figura 14. Distribución de la clase 6 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra un acercamiento en una de las partes centrales en las que presenta alta densidad de polígonos.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

La clase 7 se caracteriza por tener media cobertura de rubble, media cobertura de arena y baja cobertura de macroalgas, se encuentra en dos áreas principalmente: parte sureste de la Bahía y parte centro-oeste (Figura 15).

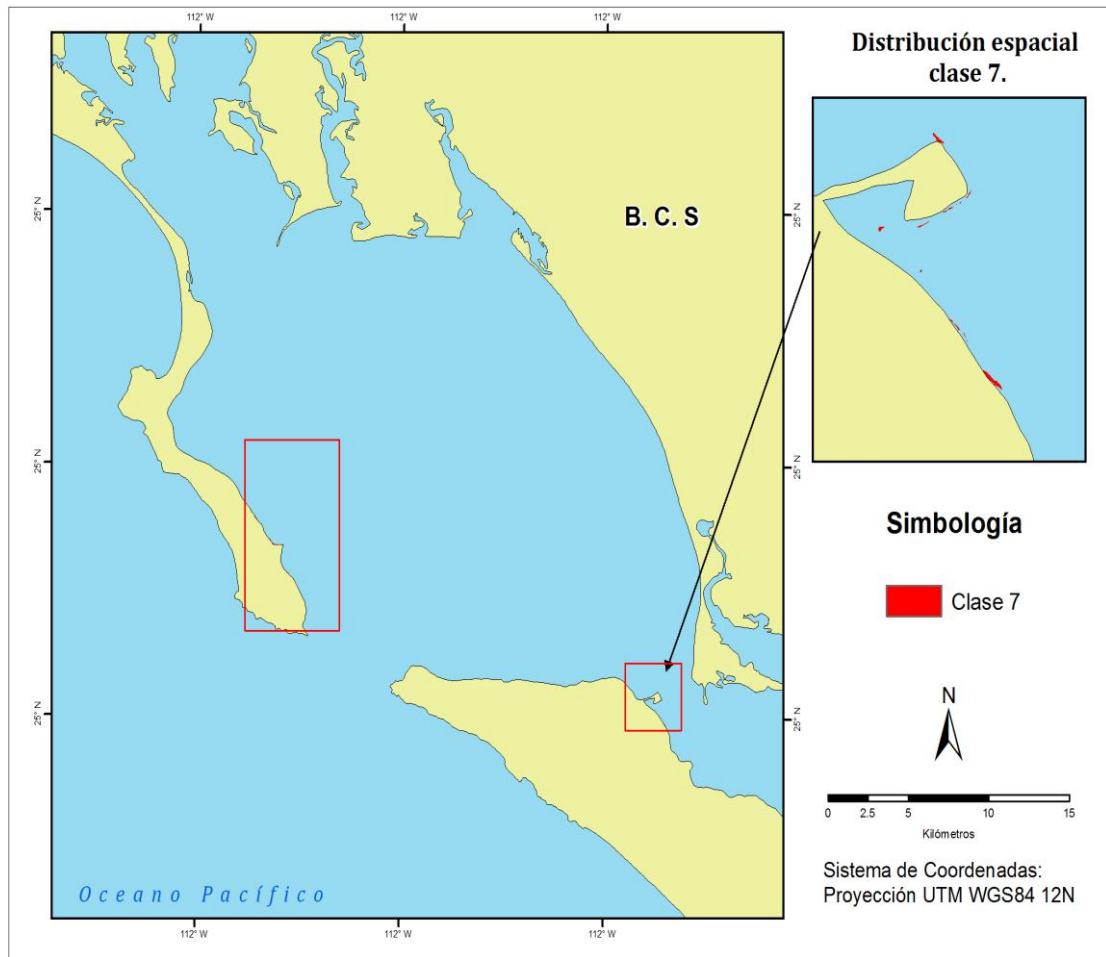


Figura 15. Distribución de la clase 7 en Bahía Magdalena B.C.S. El cuadro de color rojo muestra las zonas en las que se concentra la distribución espacial.

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

7.4 Precisión de la clasificación.

La incertidumbre de la clasificación se evaluó mediante una matriz de confusión también denominada matriz de error o tabla de contingencia (Tabla 5)

Tabla 5. Matriz de error en la clasificación.

| | Clase 1 | Clase 2 | Clase 3 | Clase 4 | Clase 5 | Clase 6 | Clase 7 | Total | Precisión de utilización |
|--------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|--------------------------|
| Clase 1 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 100 |
| Clase 2 | 0 | 100 | 0 | 3 | 0 | 2 | 0 | 105 | 95.2 |
| Clase 3 | 0 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 |
| Clase 4 | 0 | 0 | 0 | 258 | 25 | 0 | 0 | 283 | 91.1 |
| Clase 5 | 0 | 0 | 0 | 209 | 520 | 272 | 0 | 1001 | 51.9 |
| Clase 6 | 19 | 0 | 0 | 3 | 155 | 1615 | 0 | 1792 | 90.1 |
| Clase 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 100 | 100 | 100 |
| Total | 99 | 100 | 100 | 473 | 700 | 1889 | 100 | 3461 | |
| Precisión de producción | 80.8 | 100 | 100 | 54.5 | 74.2 | 85.4 | 100 | | |

De manera general la precisión de utilización y producción para las clases es buena (Congalton y Green, 2009) con una precisión general del 80.1 % y un valor kappa de 0.69. Sin embargo, dos clases presentan valores medios en la precisión de producción y utilización, respectivamente: la clase 4 presenta un valor del 54.5% ya que tiene una alta confusión con la clase 5 y la clase 5 tiene un valor del 51.9% al tener una alta confusión con las clases 4 y 6.

7.5 Características generales del paisaje.

El porcentaje de cobertura total de los hábitat bentónicos caracterizados en la bahía se presenta en la figura 16.

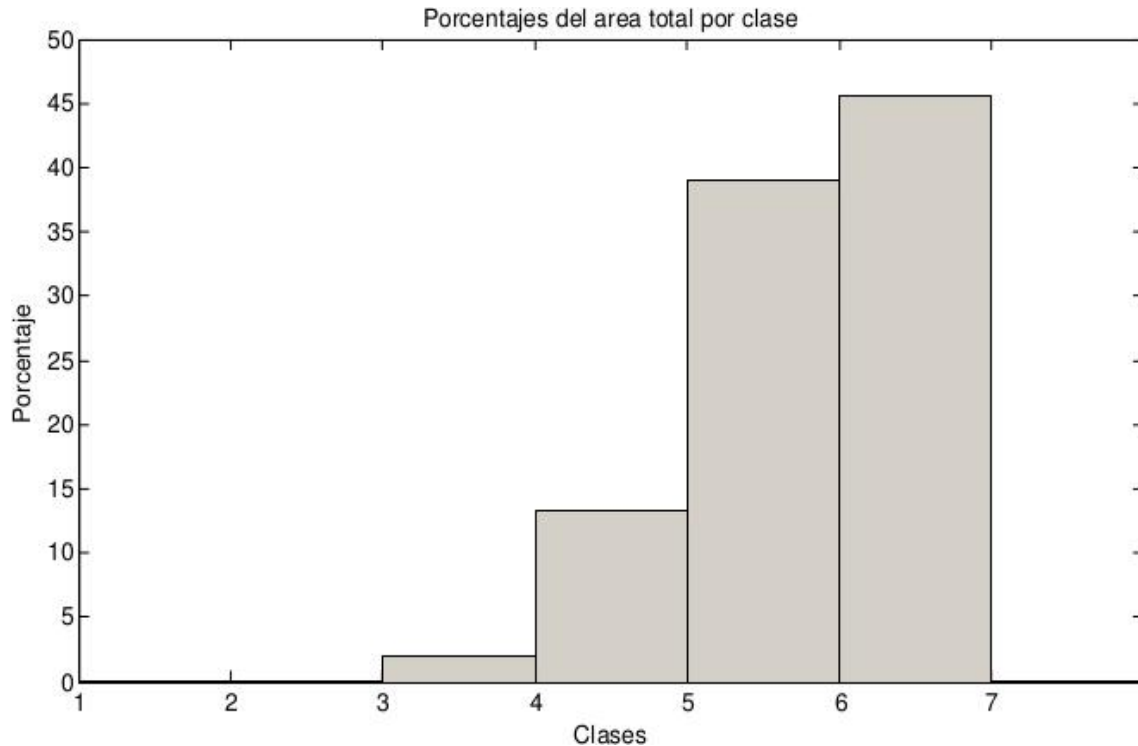


Figura 16. Porcentaje de cobertura de los tipos de hábitat bentónicos someros caracterizados en Bahía Magdalena, B.C.S.

Se observa que la clase 6 (dominada por arena) tiene mayor presencia con un porcentaje de cobertura del 45.55 %, mientras que las clases 1, 2 y 7 tienen la menor cobertura en la bahía con valores de 0.04, 0.1, 0.02 %, respectivamente.

La figura 17 muestra la fragmentación (no. de polígonos) para cada clase. Se observa que la clase 5 tiene la mayor fragmentación (7092 polígonos), mientras que la clase 7 es la que presenta el valor más bajo (49 polígonos).

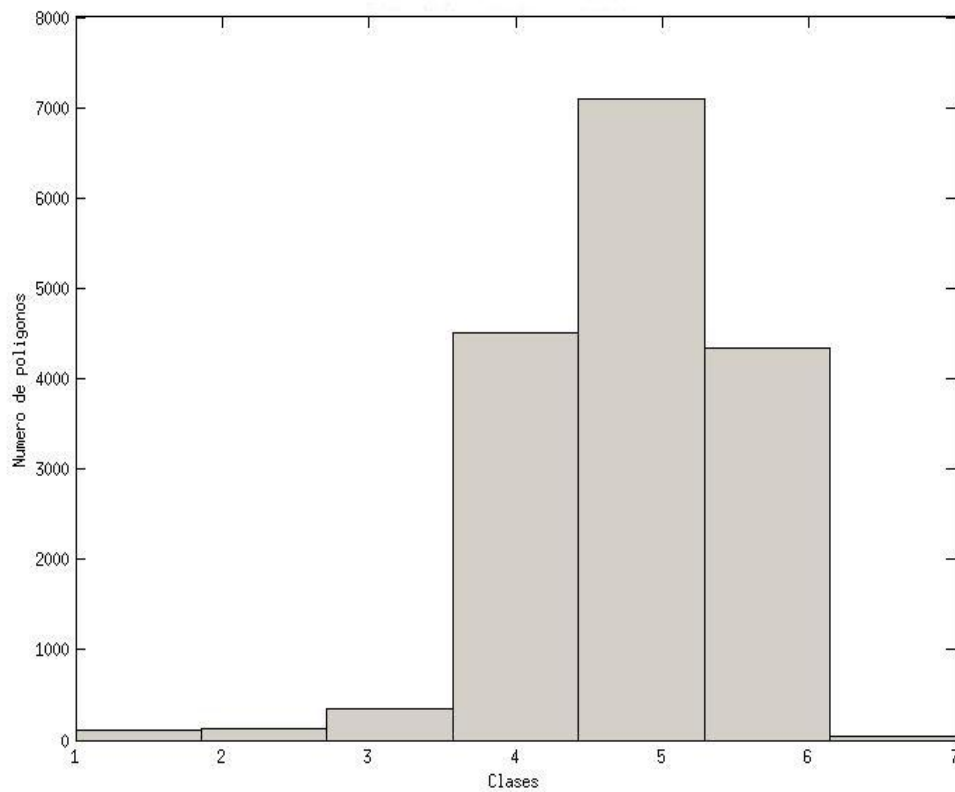


Figura 17. No. de polígonos (fragmentación) por clase en Bahía Magdalena, B.C.S.

Considerando el área y fragmentación de los hábitat, destacan las clases 5 y 6. La clase 6 presenta el valor más alto de cobertura mientras la clase 5 tiene el valor más alto de fragmentación.

La figura 18 muestra un diagrama de caja de bigotes de los valores de compactación de los polígonos en cada clase.

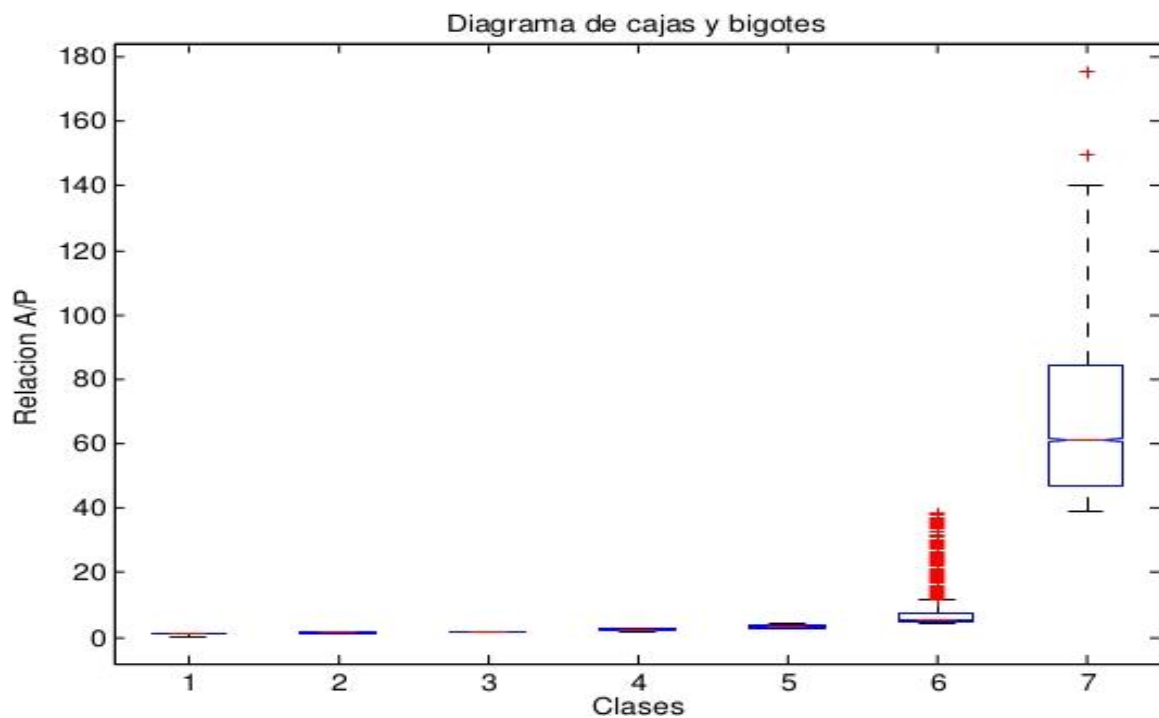


Figura 18. Diagrama de caja con bigotes de la compactación (área/perímetro) de los polígonos para cada clase. Las cruces rojas representan datos extremos.

La clase que presenta el valor más alto de compactación es la clase 7 (arenas, rubble y roca) y la clase que presentó el valor más bajo es la clase 1 (macroalgas, roca y arena).

La compactación de los parches entre al menos un par de clases es significativamente distinta (Kruskal-Wallis Chi-sq 14657.66, $p < 0.01$). Al comparar la compactación entre cada uno de los pares (Tabla 6), todas las combinaciones a excepción de las clases 1 (roca y arena) - 2 (roca, arena y rubble), y 1 (roca y arena) - 3 (praderas de pastos marinos) presentan diferencias significativas ($p < 0.05$).

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

Tabla 6. Prueba de multi-comparación de medias para datos no paramétricos de Tukey. Los pares de clases que no presentan diferencias significativa se muestran en negritas ($p < 0.05$).

| Pares de clases comparadas | Valor estimado | Intervalo de confianza al 95% |
|----------------------------|----------------|-------------------------------|
| 1-2 | -124 | -1919.7 - 1671.7 |
| 1-3 | -363 | -1872.2 - 1146.2 |
| 1-4 | -2792 | -4113.9 - -1470.1 |
| 1-5 | -8593.5 | -9909.3 - -7277.1 |
| 1-6 | -14309 | -15632 - -12986 |
| 1-7 | -16503 | -18905 - -14101 |
| 2-3 | -239 | -1686.6 - 1208.6 |
| 2-4 | -2668 | -3919.2 - -1416.8 |
| 2-5 | -8469.5 | -9714.2 - -7224.8 |
| 2-6 | -14185 | -15437 - -12933 |
| 2-7 | -16379 | -18743 - -14015 |
| 3-4 | -2429 | -3215.4 - -1642.6 |
| 3-5 | -8230.5 | -9006.7 - -7454.3 |
| 3-6 | -13946 | -14734 - -13158 |
| 3-7 | -16140 | -18294 - -13986 |
| 4-5 | -5801.5 | -6070.3 - -5532.7 |
| 4-6 | -11517 | -11817 - -11217 |
| 4-7 | -13711 | -15739 - -11683 |
| 5-6 | -5715.5 | -5987.6 - -5443.4 |
| 5-7 | -7909.5 | -9933.2 - -5885.8 |
| 6-7 | -2194 | -4222.1 - -165.95 |

7.6 Cálculo de la beta-diversidad.

En la figura 19 se presenta la distribución de los valores obtenidos a partir del modelo de beta-diversidad en el AOI. Los valores varían entre 0 - 4, utilizando una ventana de 100 píxeles que es equivalente a un barrido de 40,000 m².

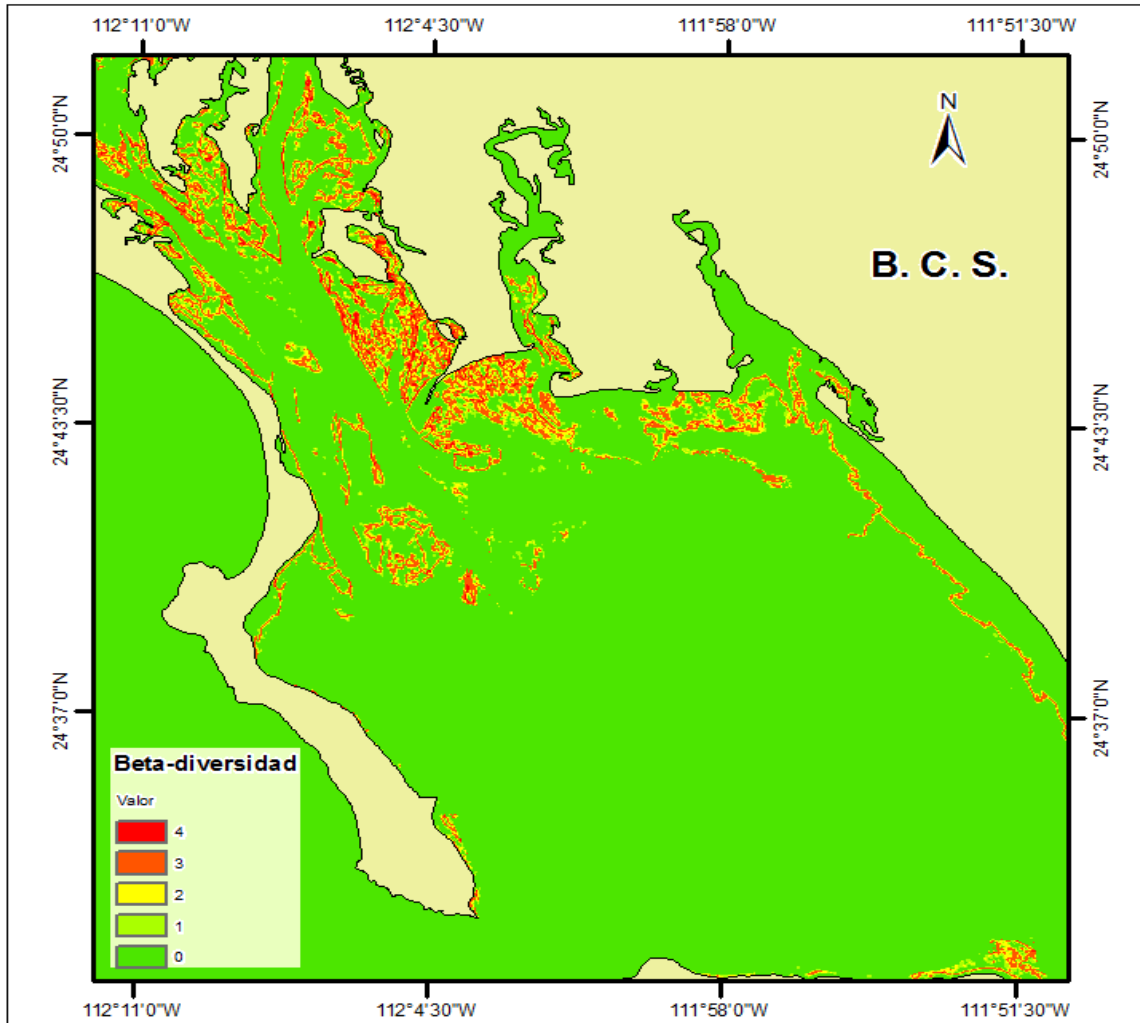


Figura 19. Distribución espacial de la beta-diversidad en Bahía Magdalena B. C. S., utilizando una ventana de barrido de 100 x 100 píxeles.

7.7 Ubicación de zonas prioritarias para su conservación.

La figura 20 presenta los resultados obtenidos a partir del análisis de superposición ponderada y muestra la denominación del sitio.

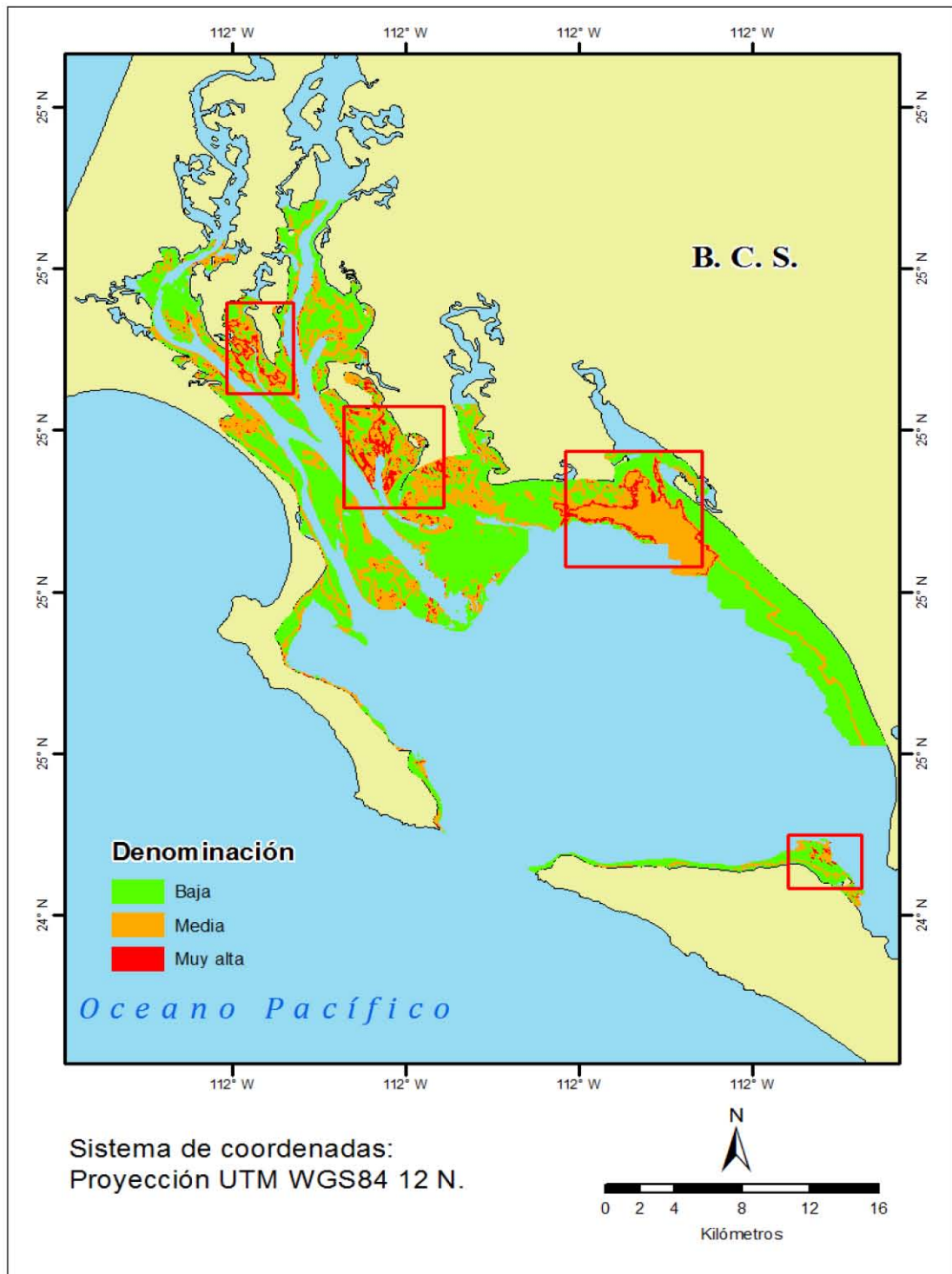


Figura 20. Distribución espacial de valores obtenidos a partir del análisis de superposición ponderada utilizando tipo de hábitat (ponderación 50%), beta-diversidad (ponderación 30%) y compactación del hábitat (ponderación 20%). Las regiones con mayor intensidad de color representan áreas con valores más altos.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

Siguiendo el mismo criterio de asignación de valores en beta-diversidad se asignaron para las otras capas:

Tipo de hábitat: valor 5 para las clase 3 y 4 (praderas marinas y pastos marinos), valor 4 para la clase 7 (rubble, roca y arenas), valor 3 clase 1 (macroalgas, roca y arena), valor 2 a la clase 2 (roca, arena y rubble) y valor 1 a las clases 5 y 6 (macroalgas y arenas).

Compactación de hábitat: de acuerdo al rango en los datos se determinaron 5 intervalos los cuales se les dieron valores crecientes conforme aumentaban dichos valores.

De manera general, las regiones que presentan una mayor densidad de valores más altos se pueden agrupar en 4 regiones principalmente: (Figura 20)

- 1.- Parte noroeste de la bahía.
- 2.- Parte central de la bahía (costa sur de puerto san Carlos).
3. Parte centro-este de la bahía.
4. Parte sur-este de bahía (frente de isla Margarita).

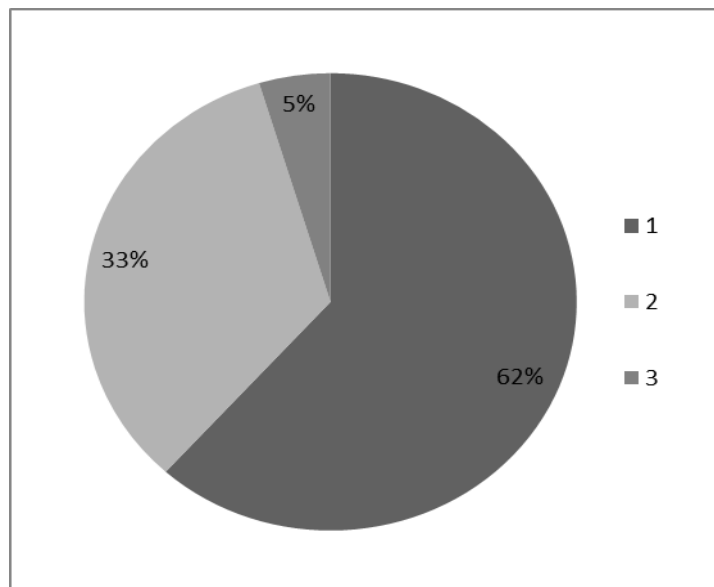


Figura 21. Porcentaje del territorio con denominación de protección, los números en orden ascendente representan el valor de prioritario para su conservación 1= bajo 2=medio 3=alto

Al calcular el área de cobertura con base a los valores obtenidos, el 5% del área se considera como alta prioridad para conservar, un 33% con media prioridad y 62% con prioridad determinada (este punto se abordara en la discusión). (Fig. 21).

8 Discusión.

8.1 Mapeo temático.

La metodología utilizada en este estudio resultó adecuada para el mapeo de los hábitat bentónicos someros (0 a -10m) en la bahía. El valor de kappa y la precisión general que se obtuvo de la clasificación temática es bueno (Congalton y Green, 2009) por lo que estos mapas constituyen una herramienta fundamental para el MIZC de la bahía. Sin embargo, se recomienda tener cautela al utilizar los datos pertenecientes a la clase 4 (pastos marinos y arena) y clase 5 (macroalgas y arena), ya que presentaron valores medios de precisión.

Uno de los problemas comunes en estudios de este tipo es la toma de decisiones respecto a los tipos de sustratos que son poco representativos. En este caso se decidió excluir de la descripción de los tipos de hábitat a los rodolitos que fueron observados en un solo sitio con cobertura $< 5\%$. Por otro lado, el grupo con muy alta cobertura ($> 75\%$) de rubble (ver Fig. 2, sitio de muestreo 88) está circunscrito a una sola estación donde la firma espectral estaba afectada por condiciones atmosféricas al momento de obtener la imagen (bruma). Estos, sustrato y grupo, son poco comunes y presentaron una alta confusión espectral en y con grupos espacialmente dominantes por lo que el excluirlos del análisis permitió generar un mapa temático más representativo del área de estudio. El haberlos excluido del análisis dió como resultado la generación de un mapa temático con un menor nivel de incertidumbre. La decisión anterior se puede considerar de manera general como un ajuste positivo, que permite al usuario de la herramienta generada obtener información confiable de los hábitat bentónicos de la Bahía.

El proceso de mapeo temático resultó en la caracterización de 7 distintos tipos de hábitat y permitió la ubicación de hábitat con alto valor ecológico (pastos marinos) así como hábitat caracterizados por un solo sustrato (arenas). La diferencia en área, cobertura y compactación de los hábitat era esperada ya que los componentes bióticos en éstos cambian de acuerdo al gradiente ambiental existente.

La clase 5 (baja-alta cobertura pasto marino) es una de las clases que presenta mayor fragmentación al mostrar el mayor número de polígonos pero no la mayor área. Esto

podría indicar pérdida de hábitat probablemente relacionada a la intensa actividad pesquera de moluscos y crustáceos (camarón principalmente), la cual causa una alta perturbación del paisaje bentónico.

El grado de compactación y el número de polígonos que presentaron hábitat fundadores como los pastos marinos y las clases 1 y 2 en comparación con las otras clases es bajo. Por lo tanto, considerando que hábitat menos compactados son más susceptibles a perturbaciones naturales y antropogénicas (Bogaert, et al., 2000), es evidente la necesidad de contar con herramientas que permitan diseñar estrategias adecuadas para el manejo y conservación de los recursos de la bahía; como lo es el diseño e implementación correcta de áreas naturales protegidas.

8.2 Selección de áreas prioritarias de conservación.

Uno de los criterios para la selección de regiones prioritarias de conservación es la alta complejidad del hábitat. Esto se traduce en valores elevados de beta-diversidad como resultado de las variaciones ambientales. De esta manera el estado de heterogeneidad junto con características propias de cada sistema son factores que coadyuvan en la elección o zonificación de las Regiones Prioritarias a Conservar (RPC) (Reyers, et al., 2002, Harborne, et al., 2006). Valores altos de beta-diversidad presentan alto valor ecológico y se esperaría que valores bajos indicaran lo inverso. Sin embargo, este supuesto no siempre se cumple y dependerá del tipo de hábitat que se evalúe. Los resultados obtenidos a partir del modelo utilizado en este estudio dependen del tamaño de ventana a evaluar o la distancia que cubre el análisis. Por lo tanto si se tienen regiones con un área mayor al tamaño de la ventana de análisis se obtendrán valores de beta-diversidad relativamente bajos y si el hábitat en cuestión tiene un alto valor ecológico se obtendrá una valoración incorrecta. Así mismo, los valores en los bordes de la imagen tenderán a ser bajos dado que no se cuenta con información más allá de los límites espaciales de ésta.

Para evitar estos errores, se ajustó el modelo al adoptar un análisis de superposición ponderada considerando otras características del paisaje como los tipos de hábitat de alta importancia ecológica, identificados *a priori*, mediante referencias en la literatura, y el grado de compactación de los polígonos. De esta manera se generaron dos archivos raster adicionales que permitieron ajustar y disminuir la incertidumbre.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

El primer raster consistió en reclasificar los tipos de hábitat de acuerdo al valor ecológico de cada clase. De acuerdo a Frost, et al., (1999); Bell, et al., (2001); Boström, et al., (2006) y Persson, et al., (2012), los pastos marinos (clases 3 y 4) tienen alta importancia ecológica por su alta productividad, como zonas de refugio de varias especies, y por la protección a la erosión entre otros. Por lo tanto, a las clases correspondientes a pastos marinos se les dio el valor más alto (5) en importancia que a los otros tipos de hábitat caracterizados.

Otro de los factores analizados como se comentó anteriormente es el grado de compactación (Wang, 2011) de los polígonos clasificados, el cual está directamente ligado con el efecto de borde en los distintos tipos de hábitat. A valores bajos de compactación mayor efecto de borde y por lo tanto menor resistencia a perturbaciones en el sistema (Bogaert, et al., 2000). De esta manera se generó un nuevo archivo raster reclasificado en donde los valores más altos de compactación fueron considerados como una característica de mayor importancia. El efecto de borde ha sido ampliamente estudiado en sistemas terrestres para la determinación del área mínima a proteger (Dajoz, 1999). La relación de área total de una zona a proteger respecto al efecto de borde que ésta pueda tener, estará en función de su configuración espacial.

El número y tipos de capas utilizadas para hacer ponderaciones de este tipo no está definida por una metodología particular ya que esta depende directamente de los objetivos del área que se desea conservar y de los elementos que se tienen. El método aquí propuesto tiene la facilidad de poder usar cualquier tipo de información o capas las cuales también se les puede asignar el valor de peso acorde a la importancia u objetivo de la elección o ubicación de regiones con alta importancia ecológica.

Por otro lado el término conservar implica directamente mantener o salvaguardar la biodiversidad de un sistema, a partir de la visión anterior pueden surgir las distintas denominaciones de áreas protegidas que estarán en función de las características bióticas y abióticas. Como ejemplo de lo anterior se tienen los parques nacionales, monumentos naturales y áreas prioritarias que son un ejemplo claro de la diferencia en las características de cada sistema.

Como se comentó en el apartado anterior el modelo de beta-diversidad está en función al tamaño de ventana que se le asigna al mismo. La proporción de valores responde

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

también a ello, es decir, valores de ventanas pequeñas se obtienen polígonos muy pequeños en áreas muy extensas y para observadores entrenados notarán que no es plausible proponer sitios exclusivamente a las zonas determinadas por este modelo ya que los factores bióticos no siguen un patrón o dinámica de acuerdo a esta delimitación (segmentos pequeños). Sin embargo una de las consideraciones que se proponen es delimitar con base al grado de intensidad o densidad de los polígonos como se detallan los cuatro sitios donde principalmente se encontraron los sitios de alto valor ecológico (Fig. 20).

9 Conclusiones.

El presente trabajo constituye el primer estudio sobre la caracterización y mapeo de los hábitat bentónicos someros en Bahía Magdalena, BCS y ha dado como resultado la construcción de una herramienta fundamental, con un nivel de incertidumbre conocido, para el manejo adecuado de los recursos costeros de la región.

La toma de decisiones relacionadas con el manejo de los recursos, debe estar fundamentada en datos sólidos, obtenidos sistemáticamente y que proporcionen información correcta sobre el estado de los recursos de interés. Sin embargo, muchas veces se carece de la información, por lo que estudios de este tipo proporcionan líneas base de los ecosistemas costeros que pueden ser utilizadas para evaluar la perturbación, natural y/o antropogénica a lo largo del tiempo.

Las metodologías tradicionales son a menudo buenas pero restrictivas en zonas de grandes áreas por lo que la integración y aplicación de las nuevas tecnologías de la información junto con los sistema de información geográfica, crean un nuevo enfoque de estudio en el que se parte de supuestos robustamente fundamentados como lo es el uso de las firmas espectrales de los objetos. Sin embargo, no se tiene metodologías universales que satisfagan todas las necesidades, cada una de ellas tiene sus particularidades. El mapeo de hábitat bentónicos no es la excepción, ya que un factor limitante en este tipo de estudios es la profundidad y el grado de transparencia de la columna de agua.

Para el mapeo de ecosistemas marinos someros se proponen puntos a considerar para de esta manera sentar bases de trabajo para trabajos posteriores.

- 1.- Considerar la escala de trabajo o resolución espacial de la información que se desea generar.
- 2.- Si no se tienen modelos batimétricos del área de estudio buscar alternativas que permitan cuantificar el grado de penetración de la luz, como lo sería el uso de un disco de sechhi, ya que la corrección de columna de agua está en función del grado de visibilidad en ésta.
- 3.- Tener una resolución espacial alta en las escenas del área de estudio para facilitar la creación del mosaico y mejorar la calidad del mapeo temático.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

4.- Si se conoce información a priori del área en cuestión, correr una clasificación no supervisada y cotejar con la información que se conoce del lugar, posteriormente definir o reorganizar el mapa temático anterior y generar un muestreo estratificado en función del tamaño de las áreas de cobertura, para una mejor caracterización del hábitat.

5.- Considerar la resolución temporal de las escenas para evitar problemas medioambientales y favorecer las ventanas atmosféricas plasmados en las imágenes, al tener alta resolución temporal se disminuye el grado de dificultad en la elaboración del mosaico final que indirectamente puede tener efectos en la elaboración de los mapas temáticos (calidad del mosaico).

6.- Cuidar que entre las escenas usadas para el mosaico no existan o hayan pasado perturbaciones naturales o antropogénicos que hayan cambiado de manera significativa el área como lo es un huracán o en su caso un derrame de hidrocarburos entre otros.

En este estudio se proponen cuatro áreas de alta importancia ecológica para considerarlas como sitios prioritarios para su conservación. Los sitios se eligieron en base a la beta-diversidad, características ecológicas del hábitat y grado de compactación de los polígonos representantes de cada clase. La ventaja de la metodología aquí propuesta, es que se pueden utilizar distintas fuentes de datos (o capas) a los cuales se les pueden asignar distintas ponderaciones en función de los objetivos de manejo de un área determinada. Por lo tanto las capas a elegir y la capa con mayor peso en la ponderación dependerá directamente del objetivo del área protegida.

Este estudio propone una herramienta robusta para la identificación, selección y/o zonificación de áreas naturales protegidas, ya que considera la ecología, estructura y susceptibilidad a la perturbación del paisaje, características que determinan los procesos ecológicos que ocurren en los ecosistemas y por lo tanto influyen en su biodiversidad. Sin embargo, es importante considerar que para un MIZC exitoso también es necesario contemplar información de otras disciplinas como la social y económica y no olvidar que todo esto debe estar fundamentado en un marco legal.

10 Referencias.

- Abbott, I. A., and Hollenberg, G. J., 1976, *Marine algae of California*, Stanford, Calif., Stanford University Press, xii, 827 p. p.:
- Albrecht, J., 2007, *Key concepts & techniques in GIS*, Los Angeles i.e. Thousand Oaks, Calif., SAGE Publications, x, 103 p. p.:
- Álvarez-Borrogo S. Galindo-Bect LA, C.-B. A., 1975, *Características hidroquímicas de Bahía Magdalena*, BCS.: *Ciencias Marinas*, no. 2, p. 94-110.
- Beatley, T. J. B., David; K. Schwab, Anna, 1994, *An Introduction To Coastal Zone Management*, Washington D.C., Island Press.
- Bello-Pineda, J., Liceaga-Correa, M. A., Hernández-Núñez, H., and Ponce-Hernández, R., 2005, *Using aerial video to train the supervised classification of Landsat TM imagery for coral reef habitats mapping: Environmental Monitoring and Assessment*, v. 105, no. 1-3, p. 145-164.
- Bogaert, J., Rousseau, R., Van Hecke, P., and Impens, I., 2000, *Alternative area-perimeter ratios for measurement of 2D shape compactness of habitats: Applied Mathematics and Computation*, v. 111, no. 1, p. 71-85.
- Campbell, J. B., 1987, *Introduction to remote sensing*, New York, Guilford Press, xxiv, 551 p. p.:
- Center, A. R., 2012, *Superposición ponderada (Spatial Analyst) Volume 2012*.
- Cordeira-Estrada, S., Lorenzo-Sánchez, S., Areces-Mallea, A., and Martínez-Bayón, C., 2008, *Mapping of the spatial distribution of benthic habitats in the Gulf of Batabanó using Landsat-7 images: Cartografía de la distribución espacial de los hábitats bentónicos en el Golfo de Batabanó utilizando imágenes Landsat-7*, v. 34, no. 2, p. 213-222.
- Chavez Jr, P. S., 1996, *Image-based atmospheric corrections - Revisited and improved: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 62, no. 9, p. 1025-1036.
- Chee, Y. C., 2004, *An ecological perspective on the valuation of ecosystem services: Biological Conservation*, v. 120, p. 549-565.
- Chuvieco, E., 1995, *Fundamentos de teledetección espacial.*, Madrid, Ediciones Rialp, S.A.
- Cogan, C. B., Todd, B. J., Lawton, P., and Noji, T. T., 2009, *The role of marine habitat mapping in ecosystem-based management.: ICES Journal of Marine Science*, no. 66, p. 2033 - 2042.
- CONABIO, 1998, *REGIONES MARINAS PRIORITARIAS DE MÉXICO*, Volume 2012.
- , 2008, *REGIONES TERRESTRES PRIORITARIAS DE MÉXICO*, Volume 2012.
- CONANP, 2011a, *Objetivos estratégicos* Volume 2012.
- , 2011b, *¿Qué Hacemos?*, Volume 2012.
- Congalton, R. G., 1991, *A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data: Remote Sensing of Environment*, v. 37, no. 1, p. 35-46.
- Dajoz, R., 1999, *ENTOMOLOGIA FORESTAL: Los insectos y el bosque. Papel y diversidad de los insectos en el medio foresta*, España, Mundi-Prensa.
- ERDAS, 2012, *Mosaicos al extremo con ERDAS IMAGINE Y ERDAS LPS*, Volume 2012.
- FAO, 1999, *La contribución de la ciencia al manejo costero integrado*.
- Ferguson, R. L., Wood, L. L., and Graham, D. B., 1993, *Monitoring spatial change in seagrass habitat with aerial photography: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 59, no. 6, p. 1033-1038.
- Frost, M. T., Rowden, A. A., and Attrill, M. J., 1999, *Effect of habitat fragmentation on the macroinvertebrate infaunal communities associated with the seagrass *Zostera marina* L: Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 9, no. 3, p. 255-263.
- Garza-Pérez, J. R., Lehmann, A., and Arias-González, J. E., 2004, *Spatial prediction of coral reef habitats: Integrating ecology with spatial modeling and remote sensing: Marine Ecology Progress Series*, v. 269, p. 141-152.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

- Gell, F. R., and Roberts, C. M., 2003, Benefits beyond boundaries: The fishery effects of marine reserves: *Trends in Ecology and Evolution*, v. 18, no. 9, p. 448-455.
- GESAMP, 1999, Report on the twentieth session.
- Gomasasca, M. A., 2009, Basics of geomatics, Dordrecht ; London, Springer, xli, 656 p. p.:
- Gorley, K. R. C. a. R. N., 2005, PRIMER: Getting started with v6. Plymouth.
- Green, E., Clark, C., and Edwards, A., 2000a, Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management: Image classification and habitat mapping.
- Green, E. P. M. P. J., Edwards, A. J., and Clark, C. D., 2000b, Remote sensing Handbook for tropical coastal management: Paris: United Nations Educational, p. 129-175.
- Gui, L. J., Philippa J. Mason, 2009, Essential image processing and GIS for remote sensing, London UK., Wiley-Blackwell.
- Habitats), M. M. E. S., 2008, MESH Guide to Habitat Mapping, Joint Nature Conservation Committee.
- Harborne, A. R., Mumby, P. J., Micheli, F., Perry, C. T., Dahlgren, C. P., Holmes, K. E., and Brumbaugh, D. R., 2006, The Functional Value of Caribbean Coral Reef, Seagrass and Mangrove Habitats to Ecosystem Processes, Volume 50, p. 57-189.
- Hester, D. B., Cakir, H. I., Nelson, S. A. C., and Khorram, S., 2008, Per-pixel classification of high spatial resolution satellite imagery for urban land-cover mapping: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 74, no. 4, p. 463-471.
- Jensen, J. R., 2005, Introductory digital image processing : a remote sensing perspective, Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, Prentice Hall series in geographic information science, xv, 526 p. p.:
- Lara-Lara, e. a., 2008, Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales, Capital natural de México, Volume 1: México, CONABIO, p. 109-134.
- Leisher C, v. B. P., Scherl L., 2007, Nature's investment bank: how marine protected areas contribute to poverty reduction: *The Nature Conservancy*, p. 57.
- López-Rocha, J. A., Bertha Patricia Ceballos Vázquez, Federico A. García-Domínguez, Marcial Arellano -Martínez, Marcial Villalejo-Fuerte y Abril K. Romo-Piñera. , 2010, La pesquería de la almeja chocolata *Megapitaria squalida (Bivalvia: Veneridae)* en Baja California Sur, México: *Hidrobiológica*, v. 20(3), p. 230-237.
- Lyzenga, D. R., 1981, Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data (Bahamas): *International Journal of Remote Sensing*, v. 2, no. 1, p. 71-82.
- M. Zainal, A. J., 1994, New technique for enhancing the detection and classification of shallow marine habitats: *Marine Technology Society Journal*, v. 28, no. 2, p. 68-77.
- Manishika, J., 2009, GIS and Remote Sensing techniques (a case study of A developing Urban Center), Rajasthan, Himanshu Publications.
- Marine, W., 2012.
- Martinez, M. J., Alejandro Días Ponce, 2005, Percepción Remota "Fundamentos de teledetección": CONAGUA.
- Mather, P. M., Magaly Koch, 2011, Computer Processing of Remotely-Sensed Images, New York, Wiley-Blackwell.
- Mondragon, J., and Mondragon, J., 2003, Seaweeds of the Pacific Coast : common marine algae from Alaska to Baja California, Monterey, Calif, *Sea Challengers*, 97 p. p.:
- Morales-Zarate, 2006, Patrones de reclutamiento y deriva larvaria de la almeja catarina *Argopecten ventricosus* en el complejo lagunar de Bahpia Magdalena-Almejas, B.C.S. [Doctorado.
- Mumby, P. J., and Edwards, A. J., 2002, Mapping marine environments with IKONOS imagery: Enhanced spatial resolution can deliver greater thematic accuracy: *Remote Sensing of Environment*, v. 82, no. 2-3, p. 248-257.

CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.

- Mumby, P. J., Green, E.P., Edwards, A.J. and Clark, 1997a, Coral reef habitat-mapping: How much detail can remote sensing provide?: Marine Ecology Progress Series, v. 159, p. 51-60.
- , 1997b, Measurement of seagrass standing crop using satellite and digital airborne remote sensing: Marine Ecology Progress Series, v. 159, p. 51-60.
- Mumby, P. J., and Harborne, A. R., 1999, Development of a systematic classification scheme of marine habitats to facilitate regional management and mapping of Caribbean coral reefs: Biological Conservation, v. 88, no. 2, p. 155-163.
- Network, C. C. A. M. P., 1989, The status of ICZM: A Global Assessment Summary Report of a workshop convened at Charleston.
- NOAA , C. S. C., 2001, Guidance for Benthic Habitat Mapping: an Aerial approach.
- R. Funes Rodríguez, J. G. G., Ricardo Palomares García., 2007, Estudios ecológicos en Bahía Magdalena México, DF., Instituto Politécnico Nacional
- Readdie, M. D., Ranelletti, M., and McCourt, R. M., 2005, Common seaweeds of the Gulf of California = Algas comunes del Golfo de California, Monterey, CA, Sea Challengers, v, 104 p. p.:
- Reyers, B., Fairbanks, D. H. K., Wessels, K. J., and Van Jaarsveld, A. S., 2002, A multicriteria approach to reserve selection: Addressing long-term biodiversity maintenance: Biodiversity and Conservation, v. 11, no. 5, p. 769-793.
- Rioja-Nieto, R., Chiappa-Carrara, X., and Sheppard, C., 2012, Effects of hurricanes on the stability of reef-associated landscapes: Efectos de los huracanes sobre la estabilidad de paisajes asociados con arrecifes coralinos, v. 38, no. 1, p. 47-55.
- Rioja-Nieto, R., and Sheppard, C., 2008, Effects of management strategies on the landscape ecology of a Marine Protected Area: Ocean and Coastal Management, v. 51, no. 5, p. 397-404.
- Sandham, W., and Leggett, M., 2003, Geophysical applications of artificial neural networks and fuzzy logic, Dordrecht ; Boston, Kluwer Academic Publishers, Modern approaches in geophysics, v. 21, xxi, 324 p. p.:
- Schowengerdt, R. A., 2007, Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, Academic Press.
- SEMARNAT, 2007, Estrategia Nacional par el Ordenamiento Ecológico del Territorio en Mares y Costas .
- , 2010, Áreas naturales protegidas Volume 2012.
- Sheppard, C. R. C., Mathenson, K., Bythel, J. C., Murphy, P., Blair, C., and Blake, B., 1995, Habitat mapping in the Caribbean for management and conservation: use and assessment of aerial photography: Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, v. 5, p. 277-298.
- Siamak Khorram, S. A. C. N., Frank H. Koch, Cynthia F. van der Wiele 2012, Remote Sensing, Springer US.
- Slater, P. N., 1980, Remote sensing, optics and optical systems, Reading, Mass., Addison-Wesley Pub. Co., Remote sensing, v. [no 1], xvi, 575 p., 571 leaf of plates p.:
- Spitzer, D., and Dirks, R. W. J., 1987, Bottom influence on the reflectance of the sea: International Journal of Remote Sensing, v. 8, no. 3, p. 279-290.
- Story, M. a. C., R. , 1986, Accuracy assessment: A user's perspective: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 52, no. 3, p. 397-399.
- UAH, 2010, Autoapendizaje SIG, Volume 2012, p. 05.
- Wang, Y., 2011, A review on spatial attributes of nature reserves and optimal site-selection methods: Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica, v. 31, no. 14, p. 4094-4106.
- Ward, D. H., Tibbitts, T. L., Morton, A., Carrera-González, E., and Kempka, R., 2004, Use of digital multispectral videography to assess seagrass distribution in San Quintín Bay,

**CARACTERIZACIÓN Y MAPEO DE HÁBITAT BENTÓNICOS EN BAHÍA
MAGDALENA, B.C.S. MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN
GEOGRÁFICA (SIG) Y SENSORES REMOTOS.**

Baja California, Mexico: Uso de videografía multiespectral digital para evaluar la distribución del pasto marino en Bahía San Quintín, Baja California, México, v. 30, no. 1 A, p. 47-60.

Yang, X., 2009, Remote Sensing and Geospatial Technologies for Coastal Ecosystem Assessment and Management, *in* Springer, ed., Remote Sensing, Geospatial Technologies and Coastal Ecosystems: Tallahassee FL, p. 561.

Zar, J. H., 2010, Biostatistical analysis, Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall/Pearson, xiii, 944 p. p.: