

**Informe final\* del Proyecto DQ036**  
**Desarrollo de una metodología para determinar la cobertura arrecifal en Areas Naturales Protegidas**

**Responsable:** Dr. Jesús Ernesto Arias González  
**Institución:** Centro de Investigación y de Estudios Avanzados-Mérida  
Departamento de Recursos del Mar  
**Dirección:** Carretera Antigua a Progreso Km 6, CORDEMEX, Mérida, Yuc, 97310 , México  
**Correo electrónico:** [earias@mda.cinvestav.mx](mailto:earias@mda.cinvestav.mx)  
**Teléfono/Fax:** + 52 (999) 1 24 21 53, Fax: + 52 (999) 9 81 29 17, Conmutador: (999)12 42100 ext 2512  
**Fecha de inicio:** Junio 30, 2005  
**Fecha de término:** Marzo 21, 2012  
**Principales resultados:** Hojas de cálculo, fotografías, informe final  
**Forma de citar\*\* el informe final y otros resultados:** Arias-González J. E., Acosta-González G. 2012. Desarrollo de una metodología para determinar la cobertura arrecifal en Areas Naturales Protegidas. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados. Unidad Mérida. Departamento de Recursos del Mar. **Informe final SNIB-CONABIO, proyecto No. DQ036** México D. F.

**Resumen:**

Los arrecifes de coral son severamente afectados por fenómenos naturales y antropogénicos, por ende es importante su manejo y conservación. Herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y la Percepción Remota son utilizadas para realizar estudios en los arrecifes y contribuir a su conservación. En este trabajo se planteo desarrollar una metodología para obtener las coberturas arrecifales en dos áreas protegidas: Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos y Parque Marino Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano utilizando imágenes Hyperion. Este tipo de imágenes multiespectrales están siendo utilizadas para generar y analizar información de hábitats en arrecifes coralinos. La supervisión de las imágenes para realizar una clasificación supervisada de hábitat se hizo a partir de video-transectos. Este material fue útil para: a) obtener las coberturas relativas de los diferentes elementos que componen el bentos arrecifal (bióticos y abióticos); b) realizar una descripción de los arrecifes; c) discriminar y caracterizar los hábitat; y d) finalmente realizar imágenes clasificadas supervisadas de hábitats arrecifales en 5 arrecifes estudiados (Puerto Morelos, Isla Verde, Isla Sacrificios, La Blanca e Isla de En medio). Las comunidades bentónicas se clasificaron por grandes grupos morfofuncionales (GGMF), grupos morfofuncionales (GMF) y especies de corales escleractínios donde fue posible. El GGMF que presentó una mayor cobertura en todos los arrecifes fue el de las algas; los GMF dominantes fueron los corales ramificados (i.e. *Acropora palmata*) y corales submasivos (i.e. *Montastraea cavernosa*) de las familias Acroporidae y Favidae. La especie de coral escleractinio más importante en el arrecife Puerto Morelos fue *Acropora palmata*, y en los arrecifes de la zona norte del Sistema Arrecifal Veracruzano (Isla Verde e Isla Sacrificio) fue *Montastraea cavernosa*, mientras que los arrecifes de la zona sur (La Blanca e Isla de En medio) las especie mas importante fue *Colpophylia natans*. En el arrecife Puerto Morelos e Isla de En medio fueron discriminados 5 hábitats, mientras que en los arrecifes de Isla Verde, Isla Sacrificios y La Blanca fueron 4 hábitats. Las imágenes clasificadas supervisadas presentaron una buena precisión (0.84). Las imágenes multiespectrales Hyperion son una buena herramienta para realizar investigación en los sistemas arrecifales al tener la oportunidad de trabajar con un mayor número de bandas. No obstante, el tamaño de resolución espacial (30 x 30 m) y su aplicación en sistemas de arrecifes coralinos pequeños como los del Sistema Arrecifal Veracruzano dificulta la discriminación de los hábitats y por lo tanto el monitoreo temporal de la cobertura de los grupos bentónicos conspicuos como los corales y las algas.

- 
- \* El presente documento no necesariamente contiene los principales resultados del proyecto correspondiente o la descripción de los mismos. Los proyectos apoyados por la CONABIO así como información adicional sobre ellos, pueden consultarse en [www.conabio.gob.mx](http://www.conabio.gob.mx)
  - \*\* El usuario tiene la obligación, de conformidad con el artículo 57 de la LFDA, de citar a los autores de obras individuales, así como a los compiladores. De manera que deberán citarse todos los responsables de los proyectos, que proveyeron datos, así como a la CONABIO como depositaria, compiladora y proveedora de la información. En su caso, el usuario deberá obtener del proveedor la información complementaria sobre la autoría específica de los datos.



**Desarrollo de una Metodología  
para Determinar la Cobertura  
Arrecifal en Áreas Naturales  
Protegidas**

**Proyecto DQ036**

---



**INFORME FINAL**

Responsable: Dr. Jesús Ernesto Arias González

Colaboradores:

M. en C. Gilberto Acosta González (CINVESTAV)

Dr. Rodrigo Garza Pérez (UMDI-Sisal, UNAM)

Dr. Miguel Ángel Ruiz Zárate (ITCH)

Dr. Carlos González Salas (UADY)

Dr. Peter Mumby (University of Exeter)

Biol. David Gutiérrez (CONANP)

Biol. Jorge Carranza (CONANP)

## INDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	3
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	8
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	10
<b>OBJETIVOS</b> .....	13
<i>Objetivo general</i> .....	13
<i>Objetivos particulares</i> .....	13
<b>AREA DE ESTUDIO</b> .....	14
<i>Puerto Morelos</i> .....	14
<i>Sistema Arrecifal Veracruzano</i> .....	15
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	17
<i>PROCESO PARA LA SELECCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO</i> .....	17
<i>SITIOS DE MUESTREO</i> .....	19
ARRECIFE DE PUERTO MORELOS.....	19
ARRECIFES DEL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO.....	20
<i>TRABAJO DE LABORATORIO</i> .....	24
CARACTERIZACIÓN DE HÁBITAT ARRECIFALES.....	24
DESCRIPCIÓN GENERALES DE LOS ARRECIFES.....	26
ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	26
IMAGEN CLASIFICADA SUPERVISADA DE HABITAT.....	28
Comparación entre Imágenes Hyperion y Landsat ETM+.....	28
Georeferencia.....	31
Elección de bandas.....	32
Corrección de la columna de agua.....	32
Corrección de la superficie de océano.....	34
Obtención de imágenes de cada arrecife.....	34
Imagen clasificada.....	35
COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS ARRECIFALES.....	36
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	37
<i>GEOREFERENCIA DE LAS IMÁGENES</i> .....	37
<i>ARRECIFE PUERTO MORELOS</i> .....	37
Descripción general.....	37
Hábitats arrecifales.....	47
<i>ARRECIFES DEL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO</i> .....	53
<i>Arrecife Isla Verde</i> .....	53
Descripción general.....	53
Hábitats arrecifales.....	61
<i>Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales</i> .....	67
Arrecife Sacrificios.....	68
<i>Descripción general</i> .....	68
Hábitats arrecifales.....	76
Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales.....	81
Arrecife La Blanca.....	82
<i>Descripción general</i> .....	82
Hábitats arrecifales.....	90
Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales.....	95

Arrecife Isla de En medio .....	96
<i>Descripción general</i> .....	96
Hábitat arrecifales .....	104
Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales .....	109
<i>COMPARACIÓN ENTRE ARRECIFES</i> .....	110
<i>COMPARACIÓN ENTRE LAS IMAGENES CLASIFICADAS DE HÁBITATS</i> ..	112
<b>CONCLUSIONES</b> .....	118
<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	120
<b>REFERENCIAS</b> .....	121
<b>APENDICE I</b> .....	126
<b>APENDICE II</b> .....	127

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio: I) Arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano (A= Isla Verde, B= Isla Sacrificios, C= La Blanca y D= Isla de En medio) y II) Arrecife de Puerto Morelos. Unidades geográficas en UTM, WGS84, ZONA UTM: I) Q14 y II) Q16. ....	16
Figura 2. Procesamiento de las imágenes Landsat para la planeación de las estaciones de muestreo: A) Realización de área de entrenamiento (AOI), aplicación de la AOI para obtener un recorte de las imágenes de las bandas 1,2 y 3, C) Imagen compuesta en color verdadero, D) imagen clasificada supervisada.....	17
Figura 3. Clasificación no supervisada (10 clases) del área arrecifal de interés.....	18
Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo en la zona de Puerto Morelos.....	20
Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano: A) Arrecife Isla Verde, B) Arrecife Sacrificios, C) Arrecife Isla de En medio y D) Arrecife La Blanca.....	22
Figura 6. Método de videotransecto .....	24
Figura 7. Disposición de los puntos en la pantalla para el análisis de cada pausa o muestra a lo largo de los videotransectos (Tomada de Acosta-González 2005).....	25
Figura 8. Imágenes de satélite de una área arrecifal del estado de Quintana Roo con diferentes resolución espacial: A) Píxel de 30 x 30 m y B) píxel de 4 x 4 m.....	31
Figura 9. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), pastos marinos (PAS), octocorales (OCT), corales escleractínios (CE), esponjas (ESP), hidrocorales (HID) y otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa). Barras de error típico de la media.....	38
Figura 10. Sistema arrecifal de Puerto Morelos (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), pastos marinos (c) y octocorales (d) en el arrecife Puerto Morelos. Unidades geográficas en UTMs. ....	39
Figura 11. Distribución y cobertura (%) de corales escleractínios (a), esponjas (b), hidrocorales (c) y otros organismos (d) en el arrecife Puerto Morelos. Unidades geográficas en UTMs.....	40
Figura 12. Distribución y cobertura (%) de coral ramificado tabular (a), coral semiesférico (b), coral cerebro (c) y coral submasivo (d) registradas en el arrecife Puerto Morelos.....	42
Figura 13. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Acroporidae (a), Faviidae (b), Agariciidae (c) y Poritidae (d) registradas en el arrecife Puerto Morelos.....	43
Figura 14. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife Puerto Morelos. Simbología: AP= <i>Acropora palmata</i> , PA= <i>Porites asteroides</i> , DS= <i>Diploria strigosa</i> , AT= <i>Agaricia tenuifolia</i> , SR= <i>Siderastrea radians</i> , AA= <i>Agaricia agaricites</i> ,	

DC= <i>Diploria clivosa</i> , MA= <i>Montastraea annularis</i> , DYC= <i>Dichocoenia stokessi</i> , MC= <i>Montastraea cavernosa</i> , SS= <i>Siderastrea siderea</i> , PP= <i>Porites porites</i> , MM= <i>Meandrina meandrites</i> y OCOR= <i>Manicina areolata</i> , <i>D. laberintiformes</i> , <i>Madrasis mirabilis</i> , <i>Agaricia carinata</i> , <i>Stephanochoenia sp.</i> , <i>Mycetophyllia sp.</i> , <i>Montastrea franksi</i> y <i>Isophyllastrea rigida</i> . ....	44
Figura 15. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Puerto Morelos: <i>Acropora palmata</i> (a), <i>Porites asteroides</i> (b), <i>Diploria strigosa</i> (c) y <i>Agaricia tenuifolia</i> (d). ....	45
Figura 16. Distribución y cobertura (%) de los tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife Puerto Morelos: Arena (a), piso parejo (b), escombros de material calcáreo (c) y coral muerto (d). ....	46
Figura 17. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Puerto Morelos. ....	47
Figura 18. Promedios del porcentaje de cobertura de corales escleractínios en los 5 hábitats discriminados para el arrecife Puerto Morelos. Barras de Desviación estándar. ....	50
Figura 19. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), pastos marinos (PAS), octocorales (OCT), corales escleractínios (CE), esponjas (ESP), hidrocorales (HID) y otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa). Barras de error típico de la media. ....	53
Figura 20. Sistema arrecifal de Isla Verde (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), corales escleractínios (c) y pastos marinos (d). Unidades geográficas en UTM. ....	54
Figura 21. Distribución y cobertura (%) de esponjas (a), octocorales (b), otros organismos (c) e hidrocorales (d). Unidades geográficas en UTM. ....	55
Figura 22. Distribución y cobertura (%) de coral submasivo (a), coral cerebro (b), coral semiesférico (c) y coral ramificado (d) registradas en el Isla Verde. ....	56
Figura 23. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Favidae (a), Siderastreidae (b), Acroporidae (c) y Poritidae (d) registradas en el arrecife Isla Verde. ....	57
Figura 24. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife Isla Verde. Simbología: MC= <i>Montastraea cavernosa</i> , CN= <i>Colpophyllia natans</i> , SR= <i>Siderastrea radians</i> , MF= <i>Montastraea faveolata</i> , AC= <i>Acropora cervicornis</i> , DS= <i>Diploria strigosa</i> , MFR= <i>Montastrea franksi</i> , MA= <i>Montastraea annularis</i> , DL= <i>Diploria laberintiformes</i> , DC= <i>Diploria clivosa</i> y OCOR= <i>Siderastrea siderea</i> , <i>Porites asteroides</i> , <i>Manicina areolata</i> , <i>Acropora palmata</i> , <i>Meandrina meandrites</i> , <i>Agaricia fragilis</i> y <i>Mycetophyllia sp.</i> ....	58
Figura 25. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Isla Verde: <i>Montastraea cavernosa</i> (a), <i>Colpophyllia natans</i> (b), <i>Siderastrea radians</i> y <i>Montastraea faveolata</i> (d). Unidades geográficas en UTM. ....	59
Figura 26. Distribución y cobertura (%) de los tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife de Isla Verde: Pedacería de material	

calcáreo (a), Arena (b), Pavimento y rocas grandes (c) y Piso parejo (d). .....	60
Figura 27. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Isla Verde: HIV1,HIV2,HIV3 y HIV4.....	61
Figura 28. Imagen clasificada de hábitat del arrecife Isla verde.....	67
Figura 29. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), corales escleractínios (CE) esponjas (ESP), otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa), octocorales (OCT, pastos marinos (PAS) e hidrocorales (HID). Barras de error típico de la media.....	68
Figura 30. Sistema arrecifal de Isla Sacrificios (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), corales escleractínios (c) y esponjas (d). Unidades geográficas en UTM's.....	69
Figura 31. Distribución y cobertura (%) de otros organismos (a), octocorales (b), pastos (c) e hidrocorales (d). Unidades geográficas en UTM's. ....	70
Figura 32. Distribución y cobertura (%) de coral semiesférico (a), coral cerebro (b), coral digitiforme (c) y coral ramificado tabular (d) registrados en el arrecife Isla Sacrificios. ....	71
Figura 33. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Favidae (a), Siderastreidae (b), Astrocoeniinae (c) y Acroporidae (d) registradas en el arrecife Isla Sacrificios.....	72
Figura 34. Composición de especies y abundancia de corales escleractinios registrados en el arrecife Isla Sacrificios. Simbología: MC= <i>Montastraea cavernosa</i> , CN= <i>Colpophyllia natans</i> , SR= <i>Siderastrea radians</i> , DS= <i>Diploria laberintiformes</i> , MM= <i>Meandrina meandrites</i> , SS= <i>Siderastrea siderea</i> y AP= <i>Acropora palmata</i> .....	73
Figura 35. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Isla Sacrificios: <i>Montastraea cavernosa</i> (a), <i>Colpophyllia natans</i> (b), <i>Siderastrea radians</i> (c) y <i>Diploria laberintiformis</i> (d). Unidades geográficas en UTM's. ....	74
Figura 36. Distribución y cobertura (%) de los 2 tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife Isla Sacrificios: Pedacería de material calcáreo (a) y Arena (b). ....	75
Figura 37. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Isla Sacrificios: HIS1, HIS2, HIS3 y HIS4. ....	76
Figura 38. Imagen clasificada de hábitat de Isla Sacrificios.....	81
Figura 39. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), corales escleractínios (CE) esponjas (ESP), octocorales (OCT), otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa) e hidrocorales (HID). Barras de error típico de la media.....	82
Figura 40. Sistema arrecifal La Blanca (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), corales escleractínios (c) y esponjas (d). Unidades geográficas en UTM's. ....	83
Figura 41. Distribución y cobertura (%) de octocorales (a), otros organismos (b) e hidrocorales (d). Unidades geográficas en UTM's.....	84

Figura 42. Distribución y cobertura (%) de coral semiesférico (a), coral cerebro (b), coral digitiforme (c) y coral submasivo (d) registrados en el arrecife La Blanca.....	85
Figura 43. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Favidae (a), Siderastreidae (b), Astrocoeniinae (c) y Agariciidae (d) registradas en el arrecife La Blanca. ....	86
Figura 44. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife La Blanca. Simbología: CN= <i>Colpophyllia natans</i> , MC= <i>Montastraea cavernosa</i> , SR= <i>Siderastrea radians</i> , MM= <i>Meandrina meandrites</i> , MF= <i>Montastraea faveolata</i> , MFR= <i>Montastraea franksi</i> , MA= <i>Montastraea annularis</i> , AF= <i>Agaricia faveolata</i> , OCOR= Otros corales (AP= <i>Acropora palmata</i> , AC= <i>Acropora cervicornis</i> , PP= <i>Porites porites</i> y OD= <i>Oculina difusa</i> .....	87
Figura 45. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife La Blanca: <i>Colpophyllia natans</i> (a), <i>Montastraea cavernosa</i> (b), <i>Siderastrea radians</i> (c) y <i>Meandrina meandrites</i> (d). Unidades geográficas en UTMs. ....	88
Figura 46. Distribución y cobertura (%) de los dos tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife La Blanca: Pedacería de material calcáreo (a) y Arena (b). Unidades geográficas en UTMs. ....	89
Figura 47. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife La Blanca: HIB1, HIB2, HIB3 y HIB4.....	90
Figura 48. Imagen clasificada de hábitats del arrecife La Blanca. ....	95
Figura 49. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), esponjas (ESP), octocorales (OCT), pastos (PAST), corales escleractínios (CE) otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa) e hidrocorales (HID). Barras de error típico de la media. ....	96
Figura 50. Sistema arrecifal de Isla de En medio (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), esponjas (c) y pastos (d). Unidades geográficas en UTMs. ....	97
Figura 51. Distribución y cobertura (%) de octocorales (a), corales escleractínios (b), y otros organismos (c). Unidades geográficas en UTMs. ....	98
Figura 52. Distribución y cobertura (%) de coral cerebro (a), coral semiesférico (b), coral submasivo (c) y coral digitiforme (d) registrados en el arrecife Isla de En medio.....	99
Figura 53. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Favidae (a), Siderastreidae (b), Astrocoeniinae (c) y Acroporidae (d) registradas en el arrecife Isla de En medio. ....	100
Figura 55. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Isla de En medio: <i>Colpophyllia natans</i> (a), <i>Montastraea cavernosa</i> (b), <i>Siderastrea radians</i> (c) y <i>Meandrina meandrites</i> (d). Unidades geográficas en UTMs. ....	102
Figura 56. Distribución y cobertura (%) de los dos tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife Isla de En medio: Pedacería de material calcáreo (a) y Arena (b). Unidades geográficas en UTMs.....	103

Figura 57. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Isla de En medio: HID1, HID2, HID3, HID4 y HID5.....	104
Figura 58. Imagen clasificada de hábitat de Isla de En medio.....	109
Figura 59. Coberturas relativas (%) de Grandes Grupos Morfofuncionales de comunidades bentónicas en los sistemas arrecifales: PM= Puerto Morelos, IV= Isla verde, IS= Isla Sacrificio, IB= Isla Blanca y IE= Isla de En medio. Barras de error típico. ....	110
Figura 60. Número de especies de corales escleractinios en los arrecifes PM= Puerto Morelos, IV= Isla verde, IS= Isla Sacrificio, IB= Isla Blanca y IE= Isla de En medio .....	112
Figura 61. Proporción de los hábitats arrecifales que presentan en todo los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano. ....	117

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Sitios de muestreo y sus coordenadas geográficas en UTM's 19	
Tabla 2. Sitios de muestreo y sus coordenadas geográficas en UTM's. IS= Arrecife Sacrificios, IV= Arrecife Isla Verde, ID= Arrecife Isla de En medio y IBB= Arrecife La Blanca. ....	21
Tabla 3. Características de las plataformas satelitales que transportan los sensores Hyperion y LandSat ETM+. ....	28
Tabla 4. Características de las imágenes Hyperion y Landsat ETM+. .	29
Tabla 5. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Puerto Morelos. ....	48
Tabla 6. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife Puerto Morelos. ....	50
Tabla 7. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats: H1, H2, H3 y H5 .....	51
Tabla 8. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de Bray-Curtis . Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud. ....	52
Tabla 9. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Isla Verde. ....	62
Tabla 10. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife isla Verde. ....	64
Tabla 11. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats. ....	65
Tabla 12. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%). ....	66
Tabla 13. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Isla Sacrificios. ....	77
Tabla 14. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife Isla Sacrificios. ....	79
Tabla 15. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%). ....	80
Tabla 16. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife La Blanca. ....	91
Tabla 17. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife La Blanca. ....	93
Tabla 18. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats. ....	93

Tabla 19. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%).	94
Tabla 20. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Isla de En medio	105
Tabla 21. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife isla de En medio.	107
Tabla 22. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats.	107
Tabla 23. SIMPER de las especies de corales escleractínios dentro de cada hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%).	108
Tabla 24. Valores de riqueza de especies, equidad ( $J'$ ), diversidad de Shanon-Weaver ( $H'$ ) y valores de probabilidad de t de Hutchenson.	112

## INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral se encuentran generalmente localizados cerca de las costas y son de los ecosistemas marinos con mayor productividad y diversidad biológica. Las principales especies constructoras de arrecifes son los corales, organismos (Anthozoa pólipos) que colectivamente depositan carbonato de calcio para la construcción de las estructuras de la colonia (Dahdouh-Guebas, 2002).

Los arrecifes de coral se encuentran principalmente entre los trópicos de Cáncer y Capricornio. Su superficie mundial se estima en 60,000 km<sup>2</sup> y estos se encuentran en las costas de más de 100 países (Bryant *et al.*, 1998a). Son indudablemente uno de los mayores sitios de diversidad biológica en nuestro planeta con aproximadamente 4,000 especies de peces y 800 especies de corales constructores de arrecifes, de igual manera un gran número de especies de moluscos, crustáceos y equinodermos, etc. Soportan cerca de un millón de especies de diferentes taxas (Weier, 2001).

Los arrecifes de coral proporcionan una gran variedad de beneficios directos e indirectos a la población humana, tales como la protección contra la erosión costera (NOAA, 2002), alimento, entretenimiento y esparcimiento. Una gran parte de la población humana se ha establecido cerca de los océanos. El 8% del total de la población global viven a 100 km de un arrecife de coral, y este número incrementa a un 39% para la población que vive dentro de un margen de 100 km de la línea de costa (Rosen, 2000).

La zona costera en muchas ciudades esta sujeta a un incremento de presión antropogénica, causando daños considerables a los ecosistemas arrecifales. Ha sido reportado que éstos ecosistemas son dañados y destruidos en más de 93 países (IUCN, 1993), particularmente por el desarrollo costero y prácticas de sobreexplotación tales como el turismo, redes de fondo, pesca con cianuro, contaminación y la minería de corales (Bryant *et al.*, 1998b). Los arrecifes de nuestro país no son la excepción por lo que es necesario generar herramientas

para un manejo racional y la conservación de éstos ecosistemas, así como sus recursos a nivel local y regional.

La conservación requiere de la información de diversos atributos ambientales, como la distribución y cobertura de las especies, valores de biodiversidad, usos antropogénicos, amenazas y riesgos (Lehmann *et al.*, 2003). Existen un sin número de métodos para evaluar la cobertura de los diferentes elementos bentónicos del arrecife, principalmente las coberturas de corales escleractínios, utilizado normalmente como un indicador del estado de condición de estos sistemas. Una de las metodologías utilizadas para éste fin y que desde hace años se ha venido incrementando su uso es la metodología de Videotransectos (Aronson y Swanson 1988). Esta técnica permite de una manera rápida una evaluación de la cobertura de diferentes taxones bentónicos, disminuye los tiempos de inmersión con equipo scuba y además permite evaluaciones a escalas temporales al constituirse una videoteca, indispensable para realizar estudios de detección de cambio.

Frecuentemente la información obtenida de los videotransectos es incorporada a un ambiente espacial (mapas), utilizando como herramienta la percepción remota (PR) y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Garza-Pérez *et al.*, 2004). Estas herramientas se han aplicado para describir y monitorear una gran variedad de sistemas a escalas locales y globales (Dahdouh-Guebas, 2002). La PR ha sido utilizada para estudiar bosques de manglar (Ramachandran *et al.*, 1998), pastos marinos (Ferguson y Kormacher, 1997; Dahdouh-Guebas *et al.*, 1999; Pasqualini *et al.*, 2001) y arrecifes de coral (Mumby *et al.*, 1995; Fletcher, 2001; Ninsawat y Kumar, 2003; Garza-Pérez *et al.*, 2004).

La PR en arrecifes de coral se ha utilizado para la estimación de cobertura coralina, mapeo de tipos de sustrato, mapeo de hábitat, estado de condición arrecifal, eventos de blanqueamiento, diversidad y riqueza de especies arrecifales y recientemente la modelación y clasificación de hábitat (Andréfouët *et al.*, 2000,

Brock y Wright, 2000, Baxter, 2000, Bryant *et al.*, 1998b, Mumby *et al.*, 1995, Spalding y Grenfell, 1997, Garza-Pérez *et al.*, 2004). La PR hace uso de imágenes y fotografías obtenidas de sensores remotos colocados en aviones y satélites. Las imágenes de satélite son las que se aplican en mayor medida en los estudios arrecifales, y estas son obtenidas de diferentes sensores lo que hace que varíen en su resolución (resolución radiométrica, resolución espacial, resolución temporal y resolución espectral). Una de las imágenes utilizadas por su resolución espacial son las imágenes provenientes del satélite Ikonos, las cuales presentan un tamaño de píxel de 4x4 metros, sin embargo presenta únicamente 7 bandas lo cual dificulta la discriminación de diferentes elementos en las imágenes.

Actualmente se está incrementando el uso de sensores multispectrales en el estudio de los arrecifes de coral. Estos sensores colectan datos simultáneamente en docenas o cientos de angostas y adyacentes bandas espectrales, permitiendo así una mejor discriminación de elementos. Una de estas imágenes son las que son tomadas por el sensor Hyperion, uno de los tres sensores colocados en el satélite EO-1 satélite lanzado al espacio en noviembre del año 2000, tiene 242 bandas en un rango de longitud de onda entre 356 – 2577 nm, posee una resolución espacial de 30 metros y una resolución espectral de 10 nm (USGS, 2004), lo que permite mejores clasificaciones de objetos al mostrar mejor sus características espectrales y así usar esto para investigaciones cuantitativas y monitoreos dinámicos a través de la tecnología de percepción remota (Xiaoguang *et al.*, 2005). La aplicación de las imágenes del sensor Hyperion en arrecifes de coral están iniciando y se han realizado estudios para detectar el blanqueamiento coralino e identificar los hábitats con desarrollo arrecifal. (Kruse, 2003; Kutser *et al.*, 2003; Wettle *et al.*, 2004). En nuestro país no existen antecedentes del uso de las imágenes Hyperion.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente en este estudio se plantea determinar la cobertura arrecifal en áreas naturales protegidas, mediante la utilización de

videotransectos y la tecnología de percepción remota (PR), haciendo énfasis en corales escleractínios.

## **OBJETIVOS**

### *Objetivo general*

Desarrollar una Metodología para Determinar la Cobertura Arrecifal en Áreas Naturales Protegidas

### *Objetivos particulares*

- Seleccionar sitios de muestreo en 4 arrecifes de dos áreas naturales protegidas.
- Obtener información necesaria del bentos arrecifal mediante el método de videotransecto.
- Realizar una evaluación de la distribución y abundancia relativa (%) de los grupos bentónicos presentes en cada arrecife, haciendo énfasis en corales escleractínios.
- Discriminar y caracterizar los diferentes hábitats presentes en cada uno de los arrecifes estudiados.
- Evaluar la diversidad de corales escleractínios: riqueza de especies, el índice de diversidad (Shannon-Wiener) e índice de equidad (Pielou).
- Contrastar la cobertura relativa de corales escleractínios entre los hábitats de cada arrecife.
- Determinar las especies de corales escleractínios que tipifican y discriminan los hábitats.
- Realizar una imagen clasificada supervisada de hábitat de cada sistema arrecifal, utilizando imágenes hiperespectrales "Hyperion".
- Realizar una comparación entre los sistemas arrecifales en cuanto a la cobertura de Grandes Grupos Morfofuncionales y una comparación de los hábitat a partir de las imágenes supervidadas de los arrecifes de Veracruz.

## AREA DE ESTUDIO

### *Puerto Morelos*

Puerto Morelos se encuentra localizado a 35 km al sur de la ciudad de Cancún en el estado de Quintana Roo, entre los 2300074 y 2307468 N y los 515586 y 515586 W (zona Universal Transversa de Mercators (UTM) 16Q). Tanto la barrera arrecifal como la línea de costa abarcan 15 km de longitud. (Dreckmann *et al.* 1996). El arrecife es de tipo marginal y presenta una orientación norte-sur (Collado-Vides *et al.* 1998).

Jordán y colaboradores (1981) sugieren una división del sistema arrecifal en: laguna arrecifal, arrecife posterior, cresta arrecifal y arrecife anterior. El arrecife anterior forma una barrera hacia más abierto y protege el arrecife posterior y la laguna arrecifal de la acción directa del oleaje. La profundidad del arrecife posterior varia de acuerdo al tamaño del crecimiento del arrecife, con un máximo de 6m reportado en un canal (bocana) y una profundidad mínima de 1 m al sur (Ceiba). El sustrato es esencialmente duro y carbonatado, formado por corales como colonias de la especie *Acropora palmata*. Muchas de estas colonias están cubiertas por algas y existen algunos parches de *Thalassia testudinum* que poseen poco crecimiento por la intensa sedimentación. La laguna arrecifal se ubica entre la costa y el arrecife, presenta una anchura de entre 1500m y 200-300m en la parte cercana al poblado de Puerto Morelos, la máxima profundidad en la parte central de la laguna es de 4m. El sustrato se caracteriza por ser de arena con algunos corales y además se encuentran parches no muy densos de pastos marino y algas (Collado-Vides *et al.* 1998)

En febrero de 1998 se declaro al arrecife de Puerto Morelos como área natural protegida con el carácter de Parque Nacional, con una superficie total de 9,066 hectáreas (Fig. 1).

### *Sistema Arrecifal Veracruzano*

En las costas del Golfo de México existe un sistema arrecifal ubicado frente al estado de Veracruz, presenta tres grupos de arrecifes (Inman y Nordstrom, 1971). Dos de esos grupos constituyen el Parque Marino Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, decretado en agosto de 1992 con una superficie de 52,238 ha. Estos grupos de arrecifes se encuentran separados por la desembocadura del río Jamapa-Atoyac: el grupo norte esta ubicado frente al Puerto de Veracruz y el grupo sur se localiza frente al poblado de Antón Lizardo (Carricart-Ganivet y Horta-Puga, 1993). Para este estudio se eligieron 4 arrecifes de tipo plataforma: dos arrecifes del grupo norte (Isla Verde e Isla Sacrificios) y dos arrecifes del grupos sur (La Blanca e Isla de En medio) (Fig 1).

Isla Verde se localiza en la zona UTM 14 Q latitud 808302 y longitud 2126086, a 5.37 km de la costa, su eje más largo es en dirección NO-SE con 1.12 km y su parte más ancha mide 750 m; en su extremo sur se presenta un pequeño cayo de 225 m de longitud y 125 m de ancho, conocido como Isla Verde (Schuhmacher, 1970 ; Carricart-gavinet y Horta-Puga, 1993)

Isla Sacrificios se localiza en la zona UTM 14 Q latitud 805969 y longitud 2123081, a una distancia de 1.42 de la costa mas cercana, su eje más largo es en su dirección NW-SE con 1 km y su parte mas ancha mide 500 m, en su extremo sur presenta un pequeño cayo.

Isla de En medio se localiza en la zona UTM 15 Q latitud 191042 y longitud 2115440, a 6.5 km de la costa más cercana, su eje más largo es en dirección NW-SE con 2.25 km y su parte más ancha mide 1.8 km; presenta una porción emergida en la parte sur, conocida como Isla de En medio.

La Blanca se localiza en la zona UTM 15 Q latitud 184653 y longitud 2113339, a 2.62 km de la costa, su eje más largo es en dirección NW-SE con 875 m y su parte más ancha mide 500 m; no presenta porción emergida (Carricart-Ganivet y Horta-Puga, 1993).

El esquema climático del área de Veracruz se puede sintetizar en dos épocas del año, al primer período se le conoce como de nortes y al segundo período de lluvias (Villalobos 1971).

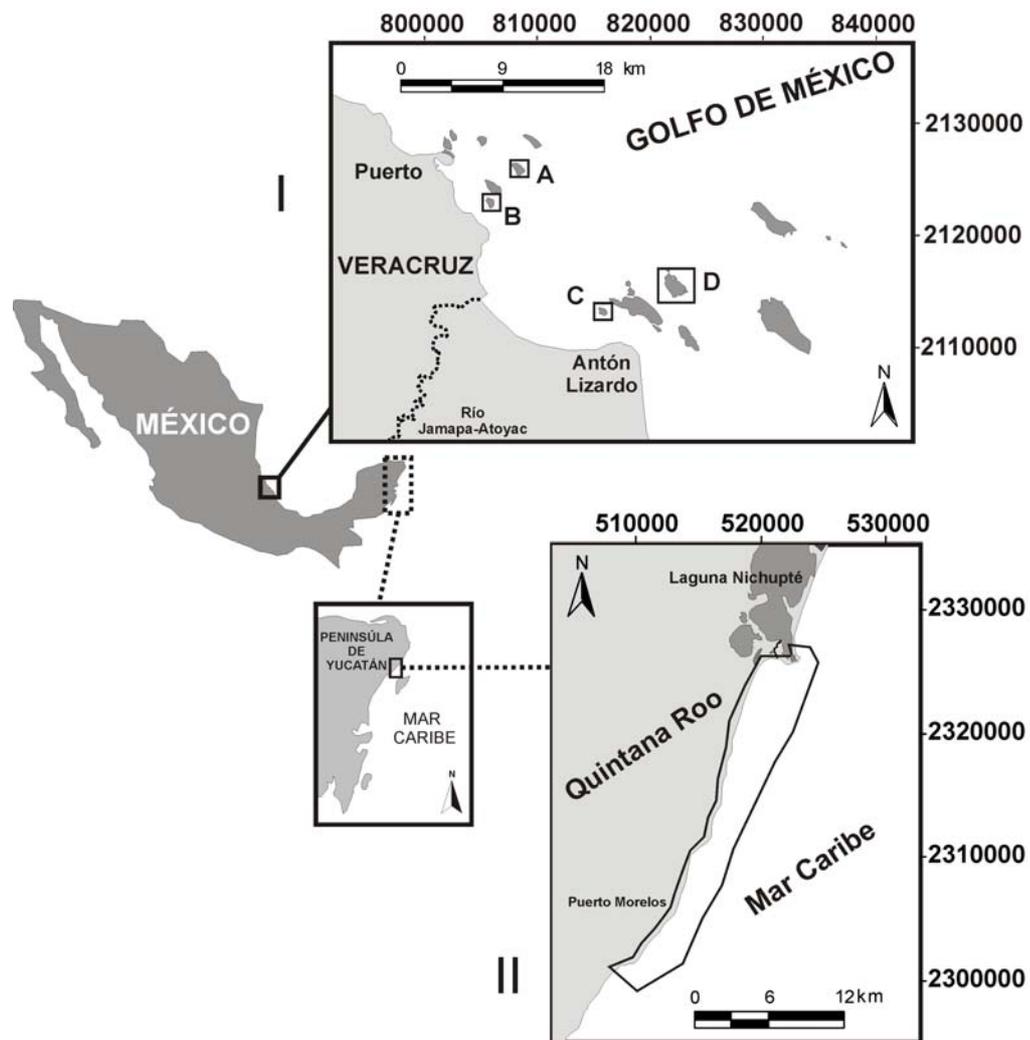


Figura 1. Área de estudio: I) Arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano (A= Isla Verde, B= Isla Sacrificios, C= La Blanca y D= Isla de En medio) y II) Arrecife de Puerto Morelos. Unidades geográficas en UTM, WGS84, ZONA UTM: I) Q14 y II) Q16.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### PROCESO PARA LA SELECCIÓN DE SITIOS DE MUESTREO

Utilizando imágenes Landsat ETM del año 2003 (NASA Landsat Program, 2003) se planteo el diseño de muestreo de las áreas de estudio. Para ejemplificar el proceso realizado se tomara el arrecife de Isla Verde como ejemplo.

Con base en la imagen Landsat ETM (2003), se procedió a obtener áreas de interés (AOI) de los arrecifes (Fig. 2A). Esta AOI se utilizó para obtener cortes de las imágenes correspondientes a las bandas: azul (b1, 450-520 nm), verde (b2, 520-600 nm) y roja (b3, 630-690 nm). Las tres bandas recortadas (b1, b2 y b3; Fig. 2B) se unieron para generar una imagen compuesta en color verdadero (Fig. 2C).

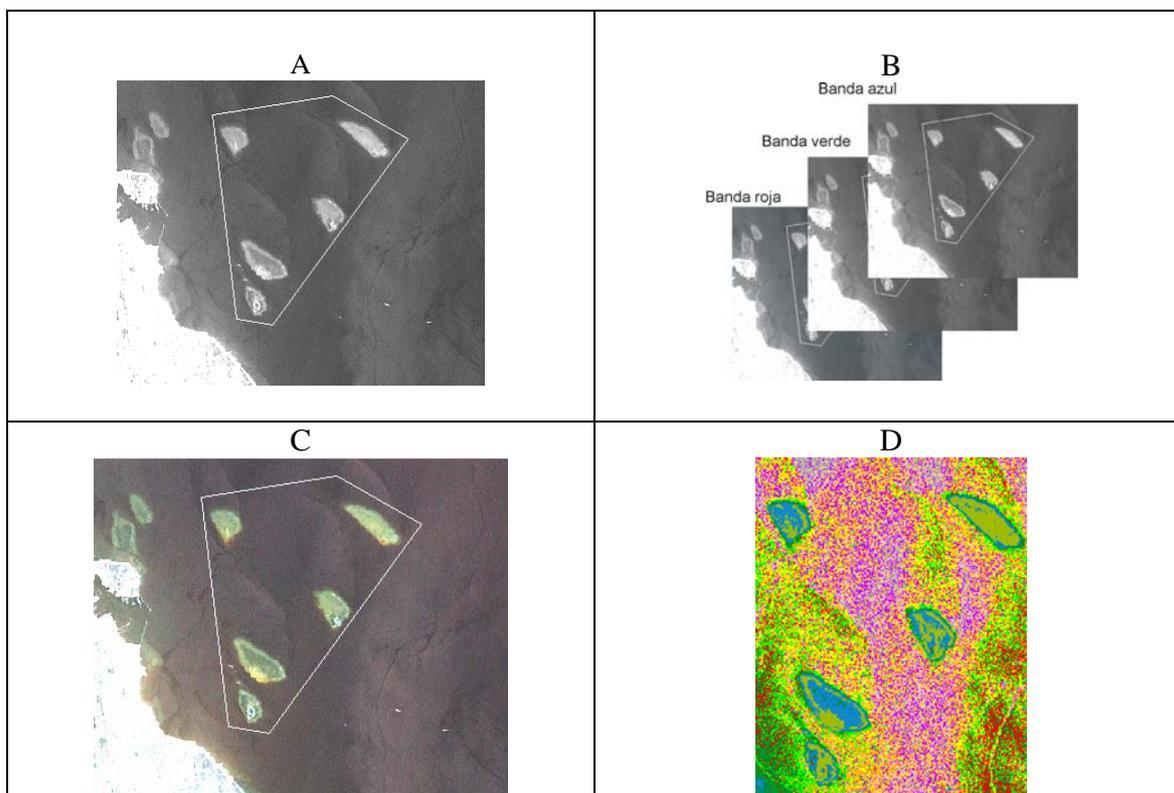


Figura 2. Procesamiento de las imágenes Landsat para la planeación de las estaciones de muestreo: A) Realización de área de entrenamiento (AOI), aplicación de la AOI para obtener un recorte de las imágenes de las bandas 1,2 y 3, C) Imagen compuesta en color verdadero, D) imagen clasificada supervisada.

Utilizando la imagen en color verdadero se procedió a realizar una imagen clasificada no supervisada, iniciando con 10 clases (Fig. 2D). Al observarse poca

diferenciación de clases en lo que respecta a la zonas con desarrollo coralino, se procedió a reducir los niveles digitales al trabajar exclusivamente con el área arrecifal de interés, de esta área se obtuvo una clasificación no supervisada de 10 clases (Fig 3).

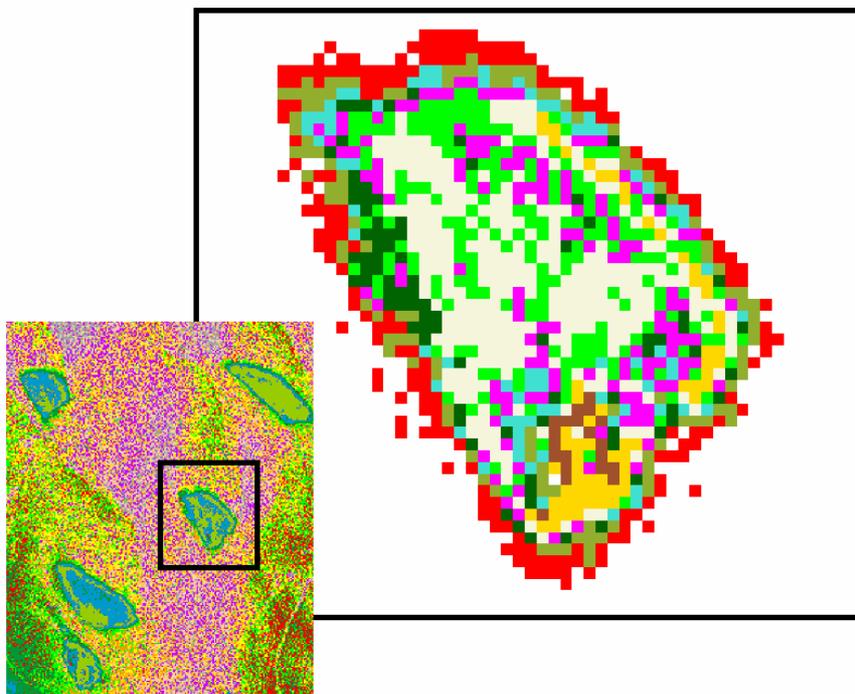


Figura 3. Clasificación no supervisada (10 clases) del área arrecifal de interés.

Al tener la imagen clasificada no supervisada se procedió a la selección de estaciones de muestreo georeferenciadas, ubicando sitios en distintas clases a lo largo de los arrecifes bajo estudio: Isla Verde, Isla Sacrificios, Isla de En medio, La Blanca y arrecife de Puerto Morelos.

## SITIOS DE MUESTREO

### ARRECIFE DE PUERTO MORELOS

Fueron seleccionados 25 sitios de muestreo a lo largo del arrecife de Puerto Morelos, para la obtención de la información se realizó una salida de campo del día 22 al 27 de noviembre de 2005, la ubicación geográfica de cada sitio de muestreo puede observarse en la tabla 1 y su ubicación en los arrecifes en la figura 4.

Tabla 1. Sitios de muestreo y sus coordenadas geográficas en UTM

SITOS	Zona UTM	LONGITUD	LATITUD	No. de estaciones	Fecha
PM1	16Q	512852	2301109	4	23-Nov-06
PM2	16Q	514150	2304241	0	23-Nov-06
PM3	16Q	521577	2320272	0	23-Nov-06
PM3N	16Q	521542	2320269	4	25-Nov-06
PM5	16Q	516949	2310982	4	24-Nov-06
PM5N	16Q	516882	2311219	4	24-Nov-06
PM6	16Q	516319	2308440	0	24-Nov-06
PM6N	16Q	516280	2308426	2	24-Nov-06
PM7	16Q	521840	2319779	0	24-Nov-06
PM8	16Q	517541	2309915	0	24-Nov-06
PM9	16Q	513889	2301216	0	24-Nov-06
PM12	16Q	511773	2301579	4	23-Nov-06
PM15	16Q	515552	2310618	4	24-Nov-06
PM16	16Q	515151	2307120	4	23-Nov-06
PM17N	16Q	517552	2313124	4	24-Nov-06
PM18N	16Q	520913	2320538	4	25-Nov-06
PM19	16Q	520210	2321429	0	25-Nov-06
PM20	16Q	516414	2311867	4	24-Nov-06
PM21	16Q	513180	2304308	4	23-Nov-06
PM22	16Q	520840	2321124	4	25-Nov-06
PM23	16Q	515318	2308991	4	26-Nov-06
PM24N	16Q	510970	2302612	4	24-Nov-06
PM25	16Q	517408	2316975	4	25-Nov-06
PM26	16Q	518981	2322329	4	25-Nov-06
PM27	16Q	515428	2308300	4	26-Nov-06

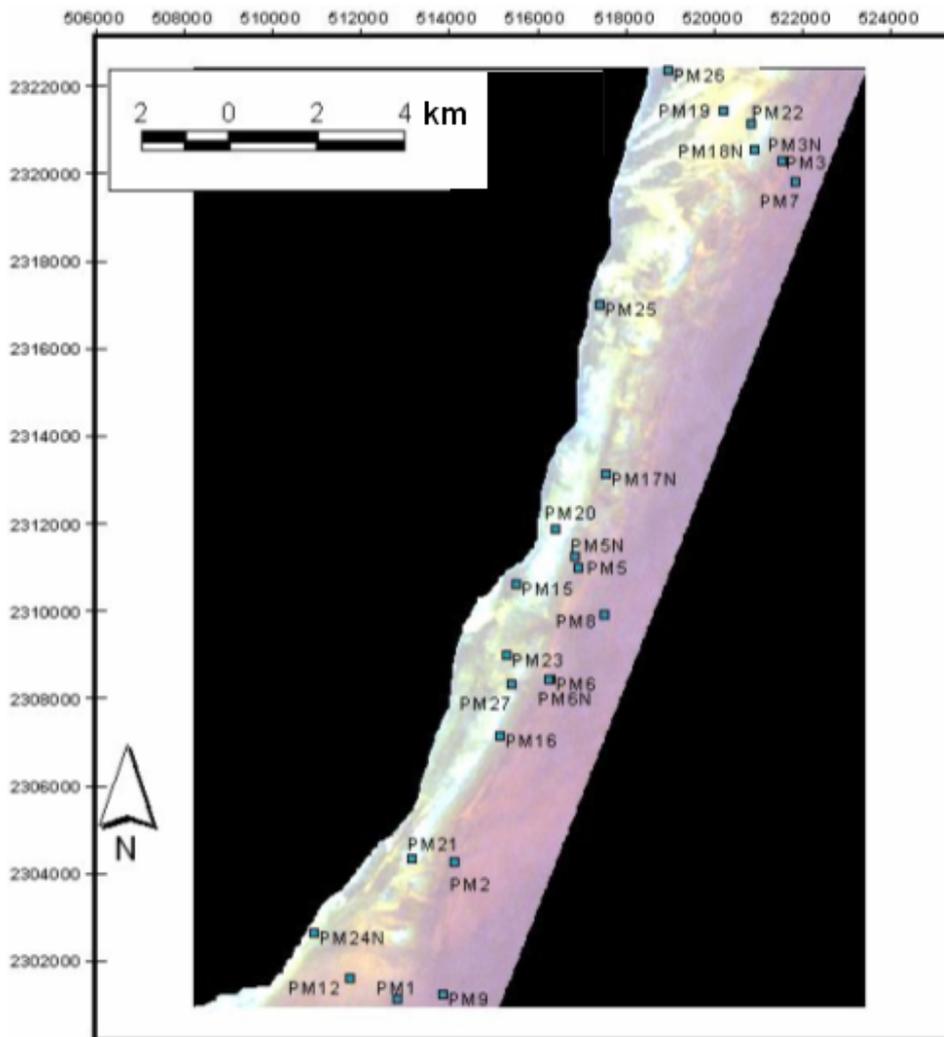


Figura 4. Ubicación de los sitios de muestreo en la zona de Puerto Morelos.

#### ARRECIFES DEL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO

Fueron seleccionados 10 sitios para el arrecife Isla Sacrificios (40 estaciones), 12 sitios en el arrecife Isla Verde (48 estaciones), 8 sitios en el arrecife Isla de En medio (32 estaciones) y 8 sitios en el arrecife La Blanca (32 estaciones). Para obtener esta información se realizó una salida de campo del día primero al 16 de mayo de 2006, la ubicación geográfica de cada sitio de muestreo puede observarse en la tabla 2 y su ubicación en los arrecifes en la figura 5.

Tabla 2. Sitios de muestreo y sus coordenadas geográficas en UTM. IS= Arrecife Sacrificios, IV= Arrecife Isla Verde, ID= Arrecife Isla de En medio y IBB= Arrecife La Blanca.

SITIO	Zona UTM	LATITUD	LONGITUD	No. de estaciones	Fecha
IS5	14 Q	805743	2123383	4	04-May-06
IS6	14 Q	805624	2123470	4	03-May-06
IS7	14 Q	806011	2123270	4	03-May-06
IS8	14 Q	805518	2123147	4	03-May-06
IS9	14 Q	806229	2122671	4	03-May-06
IS10	14 Q	806009	2122523	4	04-May-06
IS11	14 Q	806138	2123074	4	04-May-06
IS12	14 Q	805769	2122501	4	04-May-06
IS13	14 Q	805463	2123081	4	04-May-06
IS14	14 Q	805446	2123157	4	03-May-06
IV1	14 Q	808660	2125818	4	05-May-06
IV2	14 Q	808199	2125873	4	05-May-06
IV3	14 Q	807812	2126116	4	06-May-06
IV4	14 Q	808878	2125865	4	05-May-06
IV5	14 Q	808291	2125609	4	05-May-06
IV6	14 Q	807976	2125807	4	08-May-06
IV7	14 Q	807941	2125816	4	08-May-06
IV8	14 Q	808295	2126504	4	06-May-06
IV9	14 Q	808298	2126557	4	06-May-06
IV10	14 Q	807712	2126092	4	08-May-06
IV11	14 Q	807757	2126108	4	08-May-06
IV12	14 Q	808950	2125906	4	05-May-06
ID01	15 Q	190421	2114483	4	09-May-06
ID03	15 Q	189804	2115493	4	09-May-06
ID04	15 Q	190722	2116375	4	10-May-06
ID05	15 Q	191124	2115773	4	10-May-06
ID06	15 Q	191580	2115364	4	10-May-06
ID07	15 Q	191377	2115305	4	10-May-06
ID08	15 Q	190296	2116315	4	10-May-06
ID09	15 Q	190318	2115980	4	10-May-06
IBB1	15 Q	184346	2113010	4	13-May-06
IBB2	14 Q	815517	2113264	4	13-May-06
IBB3	15 Q	184384	2113621	4	14-May-06
IBB4	15 Q	184343	2113584	4	14-May-06
IBB5	15 Q	184681	2113365	4	14-May-06
IBB6	15 Q	184662	2113329	4	14-May-06
IBB7	15 Q	184863	2113046	4	14-May-06
IBB8	15 Q	184670	2112859	4	14-May-06

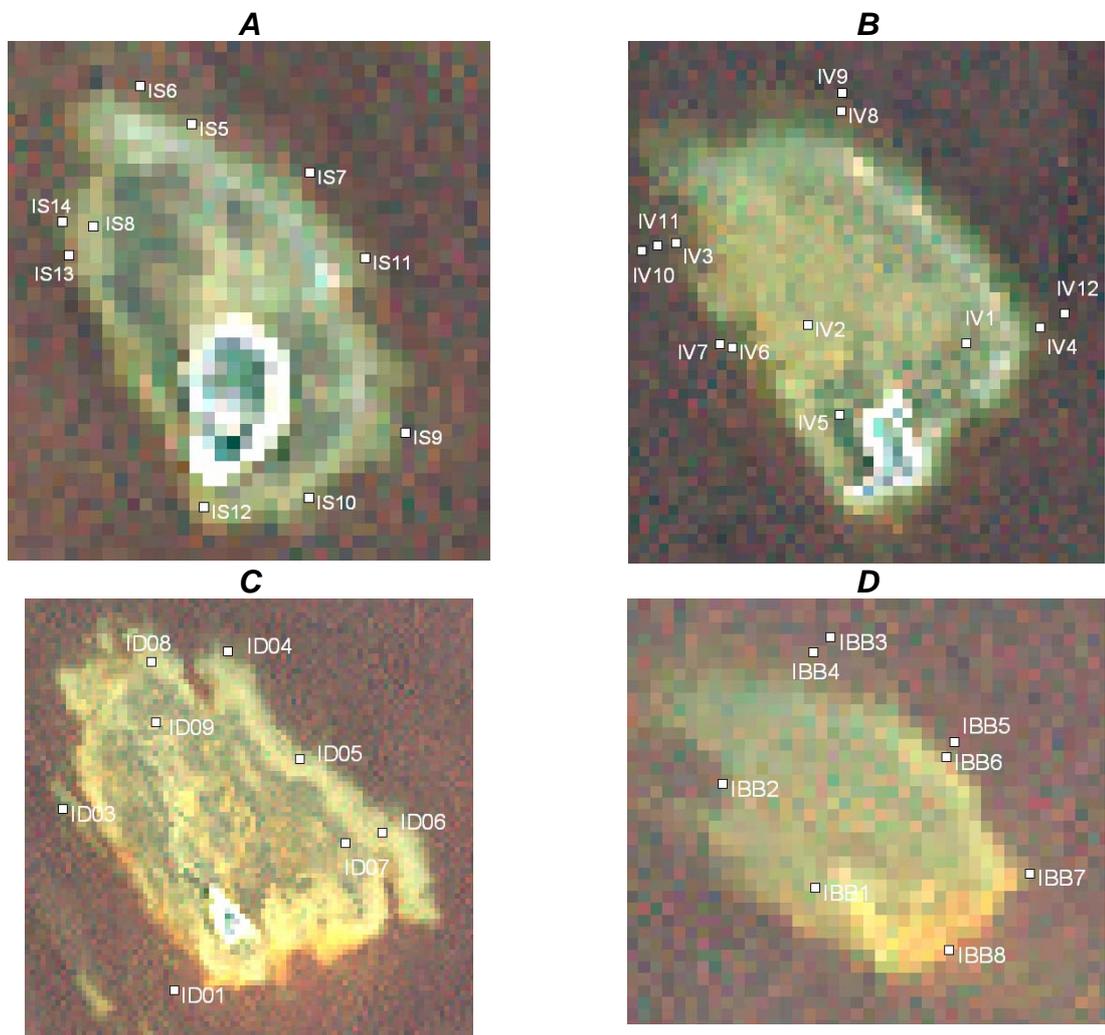


Figura 5. Ubicación de los sitios de muestreo en los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano: A) Arrecife Isla Verde, B) Arrecife Sacrificios, C) Arrecife Isla de En medio y D) Arrecife La Blanca.

## TÉCNICA DE VIDEOTRANSECTO

En cada sitio de muestreo, excepto en 3 sitios en Puerto Morelos que presentaron profundidades >60 pies (21.6m), se establecieron 4 estaciones de muestreo. En cada sitio se registró la posición geográfica (UTM) por medio de un sistema de posicionamiento global (GPS). En cada estación de muestreo con ayuda de

equipo SCUBA se colocó temporalmente un 1 transectos de 50m, se registro la profundidad y se realizó el registro del bentos arrecifal mediante el método de video-transecto.

Este método presenta la ventaja de que se pueden obtener registros permanentes de cada transecto y se reduce el tiempo de colecta. Además, es un método no destructivo que permite analizar comunidades bentónicas sin necesidad de colocar marcadores permanentes en el ambiente o realizar colectas de organismos y satisface varios de los requerimientos necesarios para establecer un sistema de monitoreo, ya que provee medidas cuantitativas de cambios temporales en las comunidades bentónicas (Aronson y Swanson, 1988; Carleton y Done, 1995; Osborne y Oxley, 1997). Las desventajas de ésta metodología son principalmente la calidad y resolución de las imágenes que pueden dificultar el trabajo en laboratorio al no reflejar la complejidad del sustrato y su rugosidad, y la identificación taxonómica realizada del video es menor respecto a la colecta de muestras y su identificación al microscopio (Osborne y Oxley, 1997; Membrillo-Venegas, 1999; Hernández-Landa, 2004).

La metodología de video-transecto consiste en filmar el fondo bentónico de manera perpendicular al sustrato a una distancia de 40 cm para conservar un área constante de aproximadamente  $1,350 \text{ cm}^2$  en cada cuadro de video (Fig. 6) Se empleo una cámara de video Hi-8 colocada en una caja hermética, acondicionada con un lente gran angular. Adicionalmente, se registraron visualmente las especies de corales escleractínios y su frecuencia a lo largo del transecto.



Figura 6. Método de videotransecto

## *TRABAJO DE LABORATORIO*

### CARACTERIZACIÓN DE HÁBITAT ARRECIFALES

Para realizar la caracterización de hábitat se analizaron los videos obtenidos en cada estación mediante su observación detallada en un monitor de alta resolución. Los videotransectos se revisaron deteniendo la imagen a intervalos de tiempo determinados. En cada una de estas pausas o muestras se identificaron los organismos bentónicos (corales, macroalgas, esponjas, pastos marinos) y tipos de sustrato bajo una serie de 13 puntos, los cuales se encontraban marcados y distribuidos de manera sistemática en la pantalla del monitor (Fig. 7).

Los corales escleractínios e hidrocorales se identificaron al nivel taxonómico de especie. Todos los organismos identificados y tipos de sustrato fueron incluidos en grupos morfofuncionales (GMF) y grandes grupos morfofuncionales (GGMF), los cuales consideran, para organismos, atributos morfológicos de las diferentes

especies (Apéndice I). El uso de atributos morfoestructurales ha probado ser útiles para describir y clasificar patrones en arrecifes o en zonas arrecifales (Bradbury *et al.*, 1986; Membrillo-Venegas, 1999).

Se observaron 40 pausas o muestras de video a lo largo de los 50 m de videotransecto, con un total de 520 puntos registrados por cada videotransecto, se analizó un área aproximada de 5.4 m<sup>2</sup>, la cual ha sido probada ser suficiente para caracterizar cualquier ambiente arrecifal (Membrillo-Venegas, 1999, Hernández-Landa, 2004, Acosta-González, 2005).

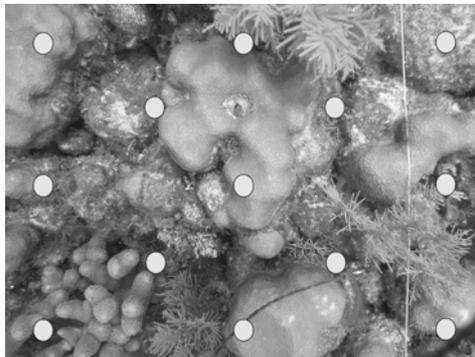


Figura 7. Disposición de los puntos en la pantalla para el análisis de cada pausa o muestra a lo largo de los videotransectos (Tomada de Acosta-González 2005).

El intervalo de tiempo entre cada muestra se calculó dividiendo el tiempo del videotransecto entre el número determinado de cuadros de imagen (40 pausas o muestras) para analizar el videotransecto. Para calcular la cobertura de los grupos bentónicos se empleo la siguiente fórmula (Osborne y Oxley, 1997):

$$\% \text{ de cobertura} = \frac{\text{Total de num. de puntos por forma de vida}}{\text{Total de num. de puntos por videotransecto}} \times 100$$

## DESCRIPCIÓN GENERALES DE LOS ARRECIFES

Con las bases de información generadas mediante el análisis de los videotransectos, se procedió a construir un Sistema de Información Geográfica (SIG; también conocida en inglés como “geodatabase”) para cada arrecife.

Cada uno de los SIG está formado por las bases de corales escleractíneos, octocorales, hidrocorales, GGMF, Familias y especies de Corales escleractíneos, cada una de estas constituyen una capa de información (layer).

Cada base de datos presenta la posición geográfica de cada uno de los sitios de muestreo que la conforman (unidades en UTM), lo que permite la representación espacial de la información contenida en la base de datos y relacionarlas entre si. Cada base contiene información de cobertura relativa (%). Estas capas fueron manejadas, analizadas y representadas gráficamente en un mapa.

La herramienta de trabajo utilizada para el procesamiento de la información en el que se fundamenta este trabajo es la aplicación informática ArcView 3.2 y 8.6. El tratamiento se lleva a cabo mediante la relación de las bases de datos. De todas las posibilidades ofrecidas por el sistema fue elegida la de Símbolos graduales, que es una representación grafica de los valores de cobertura utilizando símbolos, permite ubicar los sitios en los cuales existe información y representa de una manera progresiva valores de cobertura relativa (%).

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con la información obtenida del análisis de los videotransectos se elaboró una matriz de estaciones contra variables cualitativas (cobertura relativa). Con base en esta matriz se realizó un análisis multivariado de agrupamiento (análisis de conglomerados o clusters) utilizando el coeficiente general de Bray-Curtis (Zar, 1996), con la finalidad de detectar grupos de estaciones, basados en similitud.

Cada grupo discriminado se consideró como un hábitat, este análisis se realizó con el paquete estadístico PRIMER 5 (versión 5.2.2),

Se considero como hábitats diferentes a los grupos de estaciones a un nivel de similitud de: 52 en Puerto Morelos, 79 en Isla Verde, 80 en Isla Sacrificios, 73 en La Blanca y 63 en Isla de En medio. Trazando una línea perpendicular al eje de similitud del dendograma se discriminaron los hábitats.

Para caracterizar cada hábitat arrecifal detectado en los arrecifes, se utilizó los valores de cobertura relativa de los GGMF, los GMF y algunos géneros y especies presentes en los sitios de muestreo.

Para examinar las características globales de hábitat en cuanto a la diversidad de corales escleractínios, se calculó la riqueza de especies, el índice de diversidad por medio del índice de Shannon-Wiener y el índice de equidad de Pielou. Se realizó un ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis (ya que no se consiguió homocedasticidad en los datos; Zar, 1996) para contrastar las medianas de la cobertura coralina entre los hábitat de cada arrecife. Posteriormente si existen diferencias significativas entre ellos, se procedió a comparar por pares de hábitat con la prueba de Mann-Whitney, para determinar entre que hábitat existen diferencias estadísticamente significativas.

Para determinar las especies de corales escleractínios que tipifican y discriminan los hábitats, se aplicó un análisis de similitud en porcentaje (SIMPER; Clarke, 1993; Clarke y Warwick, 1994; Moyer *et al.*, 2003). Especies que estén en el 100% de similitud se consideran para determinar la estructura de la comunidad.

## IMAGEN CLASIFICADA SUPERVISADA DE HABITAT

Fueron adquiridas tres imágenes de los arrecifes de Veracruz tomadas por el sensor Hyperion. Las escenas corresponden al primer cuatrimestre del año 2006 (Apéndice II).

### Comparación entre Imágenes Hyperion y Landsat ETM+

La existencia de sensores situados en plataformas espaciales dio origen a la teledetección. Uno de los sensores más utilizados desde 1972 es el sensor Landsat, siendo el más reciente el Landsat ETM+ (en inglés Enhanced Thematic Mapper Plus) puesto en órbita en 1992. Este tipo de sensor es multispectral al coleccionar información del objeto con más de una banda en diferentes longitudes de onda. En 1980 fue utilizado por primera vez un nuevo tipo de sensores que poseían bandas continuas (AVIRIS : Airborne Visible/InfraRed Imaging Spectrometer) y no discretas como las colectadas por el Landsat ETM+. Este tipo de sensores fueron denominados hiperespectrales. Uno de este tipo de sensores es HYPERION puesto en órbita en el año 2000.

Cada una de las plataformas satelitales que transportan sensores presentan diferentes características. En cuanto a la plataforma satelital que contiene al sensor LandSat ETM+ (Satélite Landsat 7) y el que contiene al sensor Hyperion (satélite EO-1), actualmente no existen diferencias (Tabla 3).

Tabla 3. Características de las plataformas satelitales que transportan los sensores Hyperion y LandSat ETM+.

	<b>EO-1 (Hyperion)</b>	<b>Landsat 7 (Landsat ETM+)</b>
<b>Tipo de satélite</b>	Solar-Sincrónica	Solar-Sincrónica
<b>Altitud (km)</b>	705	705
<b>Inclinación (grados)</b>	98.2	98.2
<b>Periodo (min)</b>	99	98.9
<b>Ciclo (días)</b>	16	16

Las características de las imágenes obtenidas por los sensores Landsat ETM+ e HYPERION se pueden observar en la tabla 4.

Tabla 4. Características de las imágenes Hyperion y Landsat ETM+.

	<b>HYPERION</b>	<b>Landsat ETM+</b>
<b>Resolución espacial (m)</b>	30 m	30
<b>Escena (km)</b>	7.75 X 100	185 x185
<b>Bandas espectrales</b>	70 bandas en el espectro. Visible e infrarrojo cercano( 356 nm - 1058 nm) y 172 bandas en el Infrarrojo lejano(852 nm - 2577 nm)	Banda 1: 0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$ (azul); Banda 2: 0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$ (verde); Banda 3: 0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$ (rojo); Banda 4: 0.76 - 0.90 $\mu\text{m}$ (infrarrojo proximo); Banda 5: 1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$ (infrarrojo lejano); Banda 7: 2.08 - 2.35 $\mu\text{m}$ (Térmico lejano); Banda 6: 10.4 - 12.5 $\mu\text{m}$ (Térmico próximo); Banda 8 (pancromático): 0.52 - 0.90 $\mu\text{m}$ (espectro visible)
<b>Ancho de las bandas espectrales</b>	10 nm (nominal)	(1) 0.45 - 0.52 $\mu\text{m}$ (2) 0.52 - 0.60 $\mu\text{m}$ (3) 0.63 - 0.69 $\mu\text{m}$ (4): 0.76 - 0.90 $\mu\text{m}$ (5) 1.55 - 1.75 $\mu\text{m}$ (7) 2.08 - 2.35 $\mu\text{m}$ (6) 10.4 - 12.5 $\mu\text{m}$ (8) 0.52 - 0.90 $\mu\text{m}$
<b>Bits por píxel</b>	12 bits	8 bits

La principal ventaja que tienen las imágenes Hiperespectrales (Hyperion) es la facultad de medir la reflectancia en muchas bandas, a diferencia de las imágenes Landsat ETM+ que solo posee 8 bandas (Tabla 3). La teoría en lo que se apoya la detección hiperespectral es que la medida de la reflectancia en numerosas bandas estrechas del espectro permite detectar características y diferencias muy sutiles entre los rasgos de la superficie, permitiendo así la posibilidad de discriminar mayor número de clases (Thenkabail et al., 2004). Este tipo de imágenes se han venido aplicando mayormente en ambientes terrestres (vegetación, suelo y rocas) que en sistemas marinos.

Las imágenes HYPERION presentan 220 bandas desde el rango de longitud de onda desde 356 nm a 2577 nm. El volumen de datos colectados por Hyperion es aproximadamente 75 veces mayor comparado con las 8 bandas de sensor ETM+ (Thenkabail et al., 2004). En virtud de esta mayor cantidad de información espectral ofrecida por el sensor Hyperion da como resultado una mayor precisión que la obtenida por el sensor ETM+ (Arnold Tisot et al, 2005) en clasificaciones supervisadas.

La única desventaja de las imágenes obtenidas tanto por el sensor Hyperion es su resolución espacial de 30 x 30 m por píxel. Posiblemente en ambientes terrestres sea una buena resolución espacial, ya que por ejemplo en áreas de cultivos o tipos de vegetación no existen cambios drásticos, a excepción de la región de borde, en su composición vegetal por lo que es adecuada esta resolución. Sin embargo en sistema como los arrecifes de coral existen cambios considerables en una escala de metros por lo que en un píxel de 30 x 30 m podríamos tener cambios significativos de hábitat y no detectarlos (Fig. 8). Por tal razón aun que la resolución hiperespectral es una excelente herramienta para definir mejor nuestros elementos es necesario analizar si la escala espacial es adecuada para nuestro objetivo de estudio.

Por otro lado es recomendable la utilización de otro tipo de imágenes (como las del sensor ALI) aunado a la imagen Hyperion, ya que nos permitiría tener una mejor inferencia y precisión en nuestros resultados.

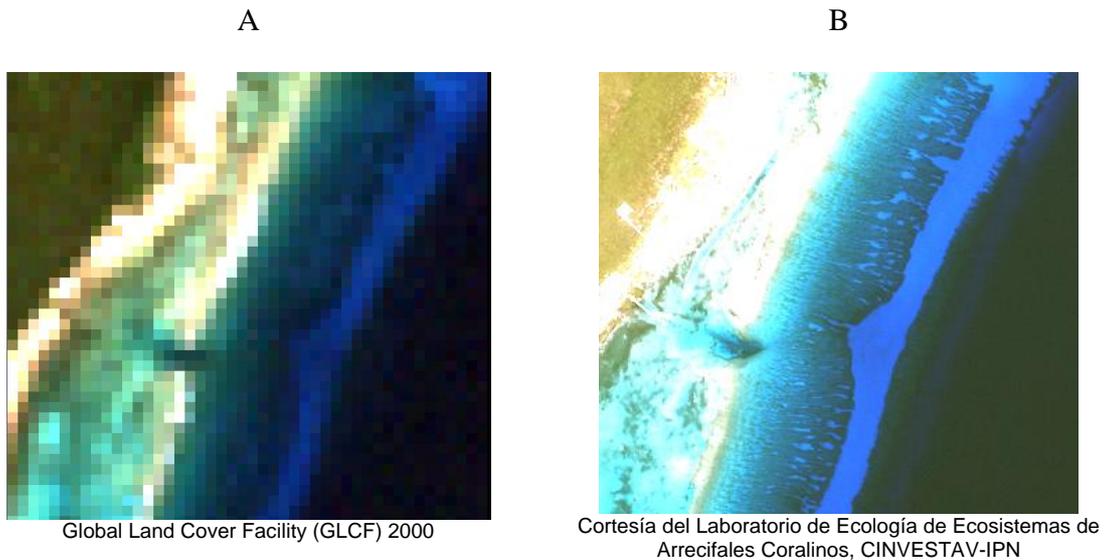


Figura 8. Imágenes de satélite de una área arrecifal del estado de Quintana Roo con diferentes resolución espacial: A) Píxel de 30 x 30 m y B) píxel de 4 x 4 m.

### *Georeferencia*

Para realizar todo el procesamiento de las imágenes HYPERION se utilizó el software ENVI 4.2. (RSI, 2006). Se seleccionaron 37 bandas que se encuentran en el rango de longitud de onda entre 426.82 a 803.3 nm.

La georeferencia se refiere al proceso de asignar coordenadas cartográficas a los datos de una imagen. Para tal efecto es necesario ubicar sitios comunes en una imagen georeferenciada y en las imágenes hyperion, a estos sitios se les denomina como puntos control (GCPs por sus siglas en inglés) y deben de ser principalmente estructuras que no cambien en el tiempo, como intersecciones de carreteras, muelles, edificaciones etc. En ambientes marinos se incrementa la dificultad de ubicar estos GCPs, por lo que es necesario ubicarlos tanto en los ambientes marinos como en el continente, y muchas veces no existen muchos sitios que puedan ser tomados como GCPs o bien estos son menores al tamaño de un píxel.

Tomando en cuenta los pocos sitios registrados en campo que pueden ser ubicados en la imagen, se aplicó el método imagen a imagen para georeferenciar, para esto se utilizó la banda 2 de una escena de satélite 7 ETM+ orthorectificada (USGS, 2003). Se ubicaron 12 GCPs tanto en el ambiente marino como en el terrestre en las imágenes, este número de GCPs es usado para una transformación de tercer orden (para esta transformación se requieren un mínimo de 10 GCPs).

Para estimar el error de la georeferencia se procedió a realizar una prueba de cuadrados medios de los residuales (RMS por sus siglas en inglés) para las imágenes.

#### *Elección de bandas*

Cada una de las bandas fueron analizadas con el fin de elegir las bandas que proporcionan mayor información para la discriminación de hábitat arrecifales. Las bandas que generaron mejor información fueron las bandas: B12 (467.52 nm), B19 (538.74 nm), B26 (609.97 nm). Finalmente se eligió la banda 45 (803.3 nm) para realizar la corrección de la superficie de océano, principalmente el oleaje, de las diferentes escenas.

#### *Corrección de la columna de agua*

Para remover la influencia de la columna de agua en la radiación del fondo, se aplicó una corrección llamada índice de profundidad no variante de tipo de fondo (Lyzenga, 1981). La corrección puede mejorar la precisión de los mapas de hábitats marinos y la interpretación visual de la imagen. Se tomó la decisión de aplicar la corrección de la columna de agua a las tres bandas, por lo que se generaron tres pares de bandas (b12-b19, b12-b26 y b19-b26), dada la gran materia en suspensión (sedimento) en la columna de agua presente en la región de Veracruz donde se ubican los sistemas arrecifales bajo estudio.

El procedimiento realizado a cada par de banda fue el siguiente:

1) En cada par de banda se seleccionó un grupo de píxeles que representó el agua profunda (aproximadamente 30 metros). Se calculó la media y la desviación estándar (dos desviaciones estándar) de los valores de radiación. Los valores más bajos de la desviación estándar son usados como Lsi en la subsecuente calculo; 3) De las dos bandas se seleccionó un grupo de píxeles del mismo tipo de fondo pero a diferentes profundidades (radiancia de hábitat de fondos arenosos), la información de estos píxeles fue convertida en logaritmo natural y se grafico en un bi-plot (ln (banda1 - Lsi ) contra ln (banda2 - Lsi )); 4) Se calculó la relación de coeficientes de atenuación por pares de bandas espectrales y por último; 5) se generó un índice de profundidad no variante de tipo de fondo utilizando la siguiente formula:

$$\text{Índice de profundidad no variante}_{ij} = \ln(L_i - L_{si}) - \left[ \left( \frac{k_i}{k_j} \right) \cdot \ln(L_j - L_{sj}) \right]$$

Donde:

Li es la radiación de píxeles de la banda i

Lsi valores bajos de desviación estándar

Lj es la radiación de píxeles de la banda j

Ki es el coeficiente de atenuación de la banda i

Kj es el coeficiente de atenuación de la banda j

ln logaritmo natural

Se generará un índice de profundidad no variante para cada una de los pares de bandas para las escenas de los arrecifes. Esta fórmula fue introducida al programa

ENVI y fue aplicada para generar nuevas bandas corregidas de cada par de bandas.

#### *Corrección de la superficie de océano*

Las tres imágenes corregidas resultantes fueron tomadas como la banda 1,2 y 3. Estas tres bandas en conjunto con la banda 45 (803.3 nm) se utilizaron para realizar la corrección de la superficie de océano (Hochberg *et al.* 2003), utilizada en este trabajo para remover algunos efectos del oleaje en las imágenes.

La corrección de la superficie del océano se realizó mediante el programa Deglint v1.1 desarrollado por Hochberg en el año 2003-2004. Este programa utiliza el siguiente algoritmo:

$$VIS_{\text{destello solar}} = VIS_{\text{inicial}} - NIR \cdot \text{Pendiente}$$

donde *VIS inicial* es la longitud de onda visible inicial (con el destello), NIR es la longitud de onda del infrarrojo cercano, y la pendiente es el valor obtenido de la regresión de la longitud de onda visible contra la longitud de onda del infrarrojo cercano.

Posteriormente de realizar esta corrección se generaron imágenes compuestas de cada escena. En una escena se encuentran ubicados los arrecifes de Isla Verde e Isla Sacrificios y en la otra los arrecifes de Isla de En medio y La Blanca.

#### *Obtención de imágenes de cada arrecife*

En cada escena se identificaron las áreas de interés (AOI por sus siglas en Inglés) de cada arrecife y se procedió a obtener una imagen recortada con solo los sistemas arrecifales. A cada una de estas imágenes se les aplicó una máscara en las regiones de los cayos arrecifales y zonas emergidas con el objetivo de reducir al máximo la información incesaria para el desarrollo de la imagen clasificada.

### *Imagen clasificada*

La imagen clasificada consiste en asignar a los píxeles de la imagen en clases temáticas, basándose en sus propiedades espectrales. Este proceso puede ser realizado por varios procedimientos. La clasificación supervisada fue el método utilizado en este estudio para realizar la clasificación de los hábitats con datos de campo. Se utilizó el procedimiento convencional de clasificación llamado similitud máxima (maximum likelihood en ingles).

### *Datos control*

Para cada imagen se utilizaron como sitios control o de campo los sitios de muestreo realizados en el arrecife y que previamente fueron analizados para obtener el número de hábitat presentes en cada arrecife.

Los pasos que se realizaron para obtener la imagen clasificada de hábitat son los siguientes:

- a) Introducir puntos control de los sitios que conforman un hábitat, obtenidos previamente en el análisis de caracterización de hábitat.
- b) Realizar la clasificación supervisada utilizando la imagen de satélite y los sitios control
- c) Evaluar la precisión de las imágenes supervisadas mediante una matriz de confusión y realizar el estadístico de Kappa.
- d) Editar el mapa de clasificación de hábitat para su presentación final.

## COMPARACIÓN ENTRE SISTEMAS ARRECIFALES

### *Características generales entre arrecifes*

Se realizó una comparación entre los sistemas arrecifales en cuanto a la cobertura relativa (%) de los GGMF más importantes. Los GGMF evaluados fueron corales escleractínios, octocorales, algas, esponjas, pastos marinos, hidrocorales, arena y pedacaría de material calcáreo. Se realizó un análisis no paramétrico de Kruskal-Wallis, al no cumplir los datos con los supuestos de la estadística paramétrica (homocedasticidad y distribución normal). Si existía diferencia estadísticamente significativa se realizó la prueba *a posteriori* de Tukey no paramétrico para contrastes múltiples.

Posteriormente se examinaron las características globales de los sistemas arrecifales en cuanto a la diversidad de corales escleractínios, se calculó la riqueza de especies, el índice de diversidad de Shannon-Wiener ( $H'$ ) y el índice de equidad de Pielou. Se comparó el índice  $H'$  de los sistemas arrecifales por medio de la prueba t de Hutchenson, donde la hipótesis nula es que dos sistemas arrecifales presentan una diversidad igual (Zar, 1998).

### *Comparación de la imagen clasificada de hábitat*

Se calculó el área ( $\text{km}^2$ ) y el porcentaje (%) que ocupa cada hábitat del sistema arrecifal, obtenida a partir de la imagen clasificada supervisada de cada arrecife, a excepción del sistema arrecifal de Puerto Morelos del cual no se obtuvo imagen.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### *GEOREFERENCIA DE LAS IMÁGENES*

La imagen denominada como Blanca presenta un error de 0.207 píxeles (6.21m), para la imagen denominada como En medio el valor fue de 0.301 píxeles (9.03 m) y finalmente para la imagen denominada como Isla Verde (que incluye el arrecife Sacrificios) el valor fue de 0.275 píxeles (8.25m). Estos valores son con respecto a una imagen Landsat 7 ETM+ del año 2003 de la zona de estudio. Tomando en consideración los pocos sitios encontrados en común (GCP) entre la imagen Hyperion del 2006 y la imagen Landsat 7 ETM+ del 2003 y tomando los valores publicados en línea en el proyecto LANDMAP ( <http://landmap.ac.uk/download/L7panrms.htm> ) los valores de RMS pueden estar dentro del rango de 0.209 a 2.014 píxeles. Por lo que la georeferencia de las imágenes es buena.

### *ARRECIFE PUERTO MORELOS*

#### Descripción general

El análisis de 25 sitios de muestreo (90 estaciones con video-transectos) reveló una cobertura de comunidades bentónicas de 32.3 %, 61.7 % de sustrato (i.e. arena, restos, etc.) y 0.05% de elementos no identificados.

### *COMUNIDAD BENTÓNICA*

La comunidad bentónica (100 %) estuvo constituido principalmente por algas (45.8 %) y se distribuyeron prácticamente en todo el arrecife (Fig. 10). El segundo Gran grupo morfofuncional (GGMF) más importante fue el de pastos marinos (35.5 %) el cual se encuentra distribuido principalmente en la zona de laguna arrecifal; estos dos grupos representaron el 81.3 % de la cobertura total (Fig. 9). Los GGMF que

registraron el porcentaje restante pueden observarse en la Figura 10 y 11, así como su cobertura y distribución en el arrecife.

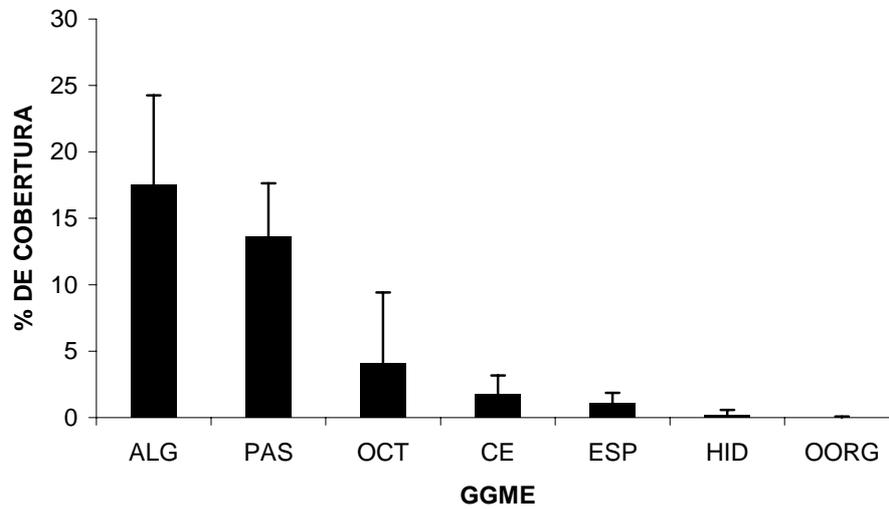


Figura 9. Variación de la Cobertura de los GGME: algas (ALG), pastos marinos (PAS), octocorales (OCT), corales escleractínios (CE), esponjas (ESP), hidrocorales (HID) y otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa). Barras de error típico de la media.

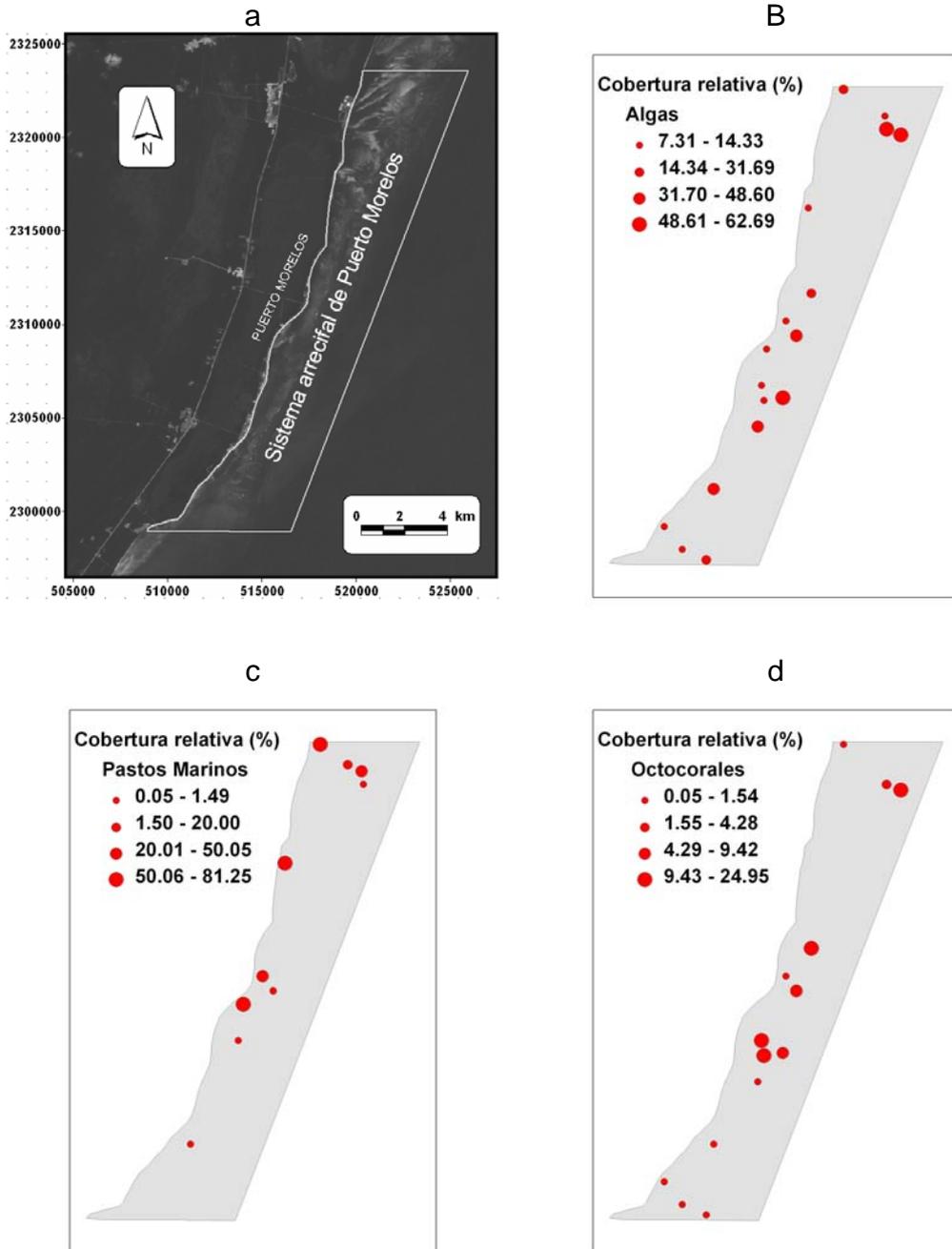


Figura 10. Sistema arrecifal de Puerto Morelos (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), pastos marinos (c) y octocorales (d) en el arrecife Puerto Morelos. Unidades geográficas en UTM.

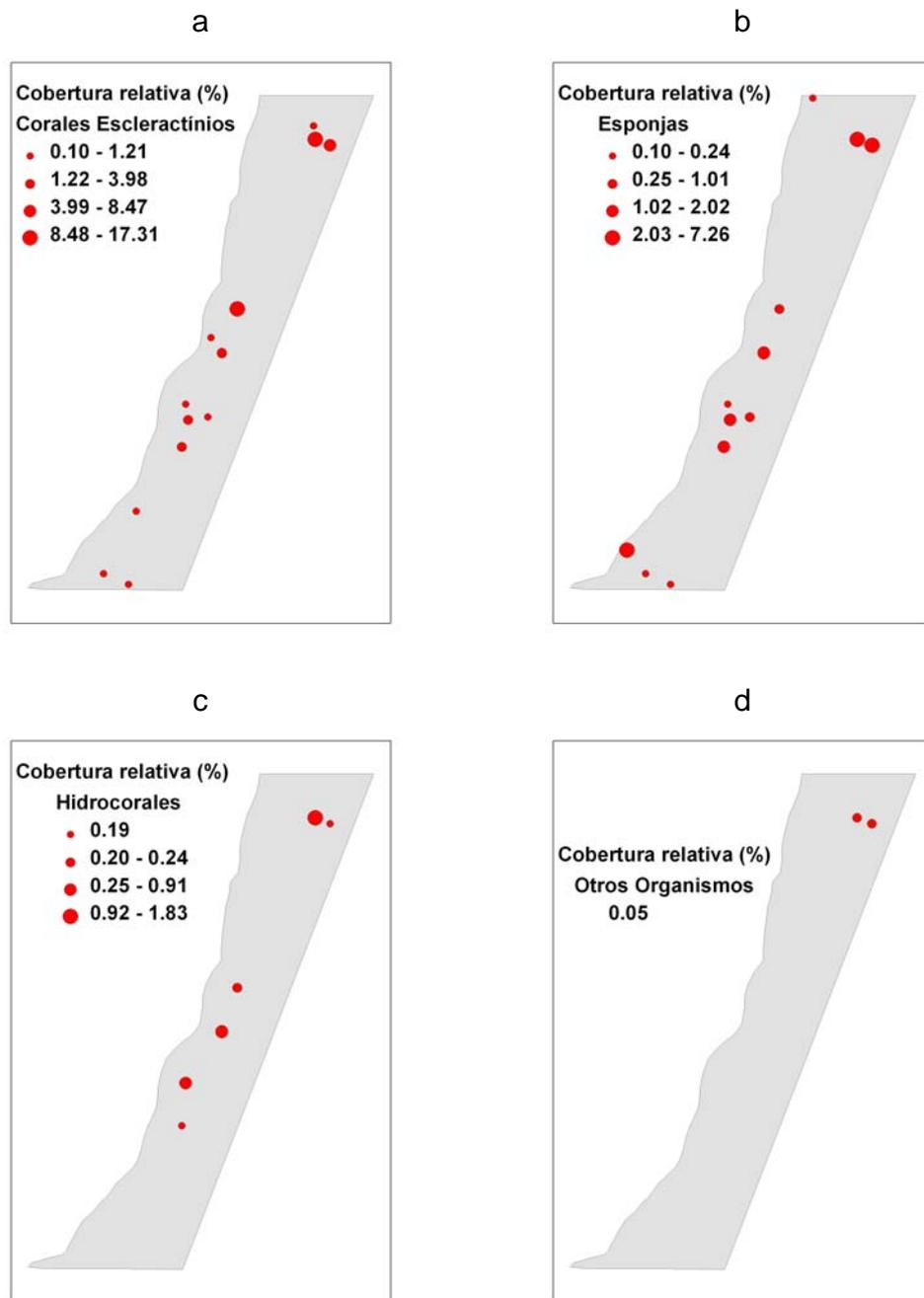


Figura 11. Distribución y cobertura (%) de corales escleractínios (a), esponjas (b), hidrocorales (c) y otros organismos (d) en el arrecife Puerto Morelos. Unidades geográficas en UTM's.

Dentro del grupo de corales escleractínios (tomado como 100 %) el grupo funcional que presentó mayor cobertura fue el de coral ramificado tabular (41.8 %), seguido del coral semiesférico (16 %), coral cerebro (15.8 %) y coral submasivo (10.3; Fig. 12). El grupo funcional que presentó menos cobertura fue el coral hongo con 0.2 %.

Se registraron 8 familias de corales escleractínios (tomado como el 100%), siendo la familia Acroporidae la que presentó una mayor cobertura (38.6 %), aunque prácticamente las especies de esta familia fueron registradas en dos sitios. La segunda familia en importancia fue la familia Favidae (22.9 %), seguida de la familia Agariciidae (12.9%) y Poritidae (9.9 %). La distribución de cobertura de estas familias puede observarse en la Figura 13. La familia que presentó menos cobertura en los sitios muestreados fue la familia Mussidae (0.3 %).

Tomando en cuenta las 8 Familias, se pudieron identificar 13 géneros de coral y 21 especies. Las especie con mayor cobertura fue *Acropora palmata*, representada por el 38.6 % del total de la cobertura de corales escleractínios. Esta especie fue registrada en pocos sitios en el sistema arrecifal de Puerto Morelos.

Las especies que le siguieron en importancia fueron *Porites astreoides*, *Diploria strigosa*, *Agaricia tenuifolia*, *Siderastrea radians* y *Agaricia agaricites* (8.7, 7.7, 6.6, 6 y 6 %, respectivamente). Las especies con menor cobertura fueron *Montastraea franksi* y *Isophyllastrea rigida* (Fig. 14). La distribución y cobertura de las tres especies de coral más importantes pueden observarse en la figura 15.

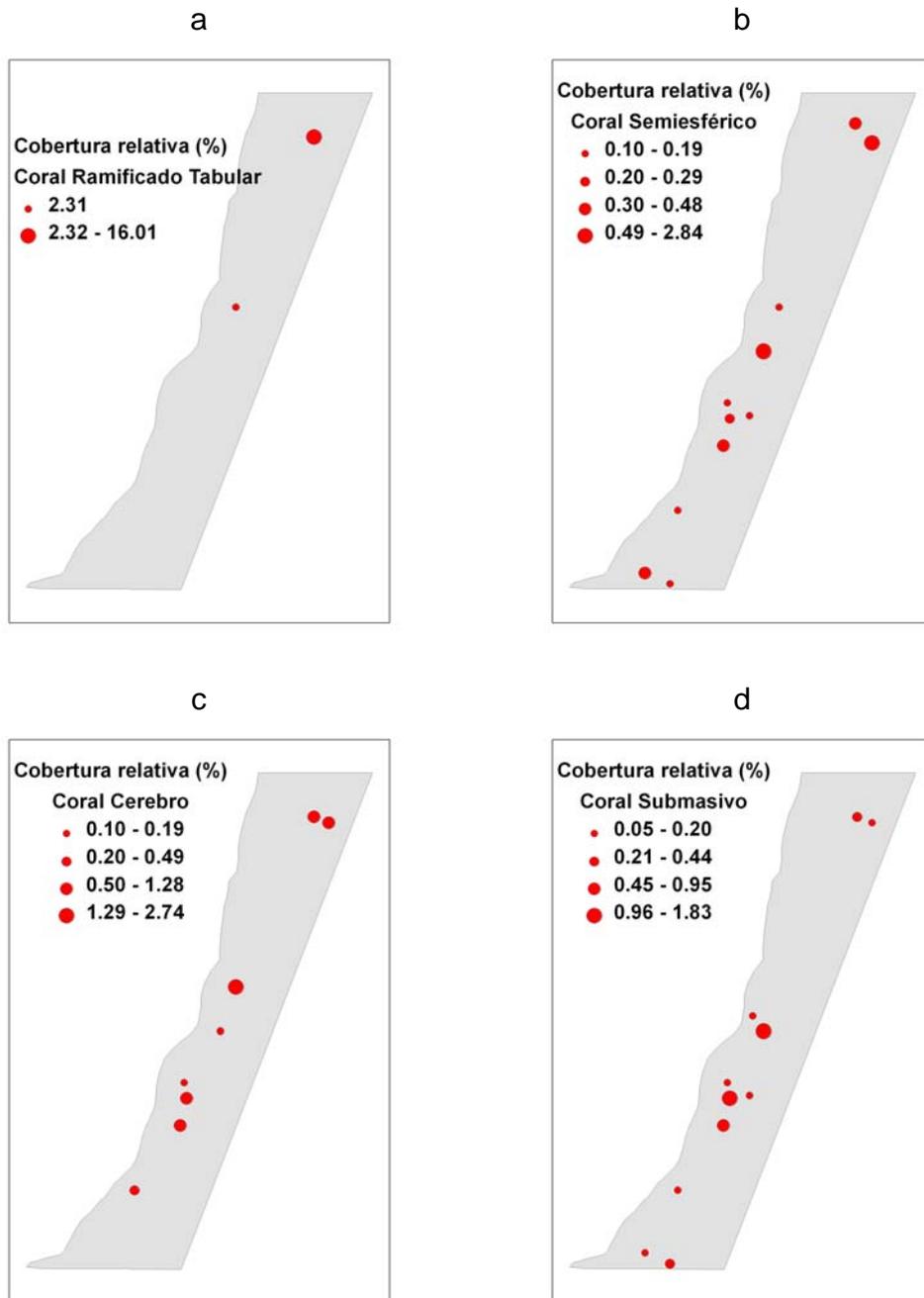


Figura 12. Distribución y cobertura (%) de coral ramificado tabular (a), coral semiesférico (b), coral cerebro (c) y coral submasivo (d) registradas en el arrecife Puerto Morelos.

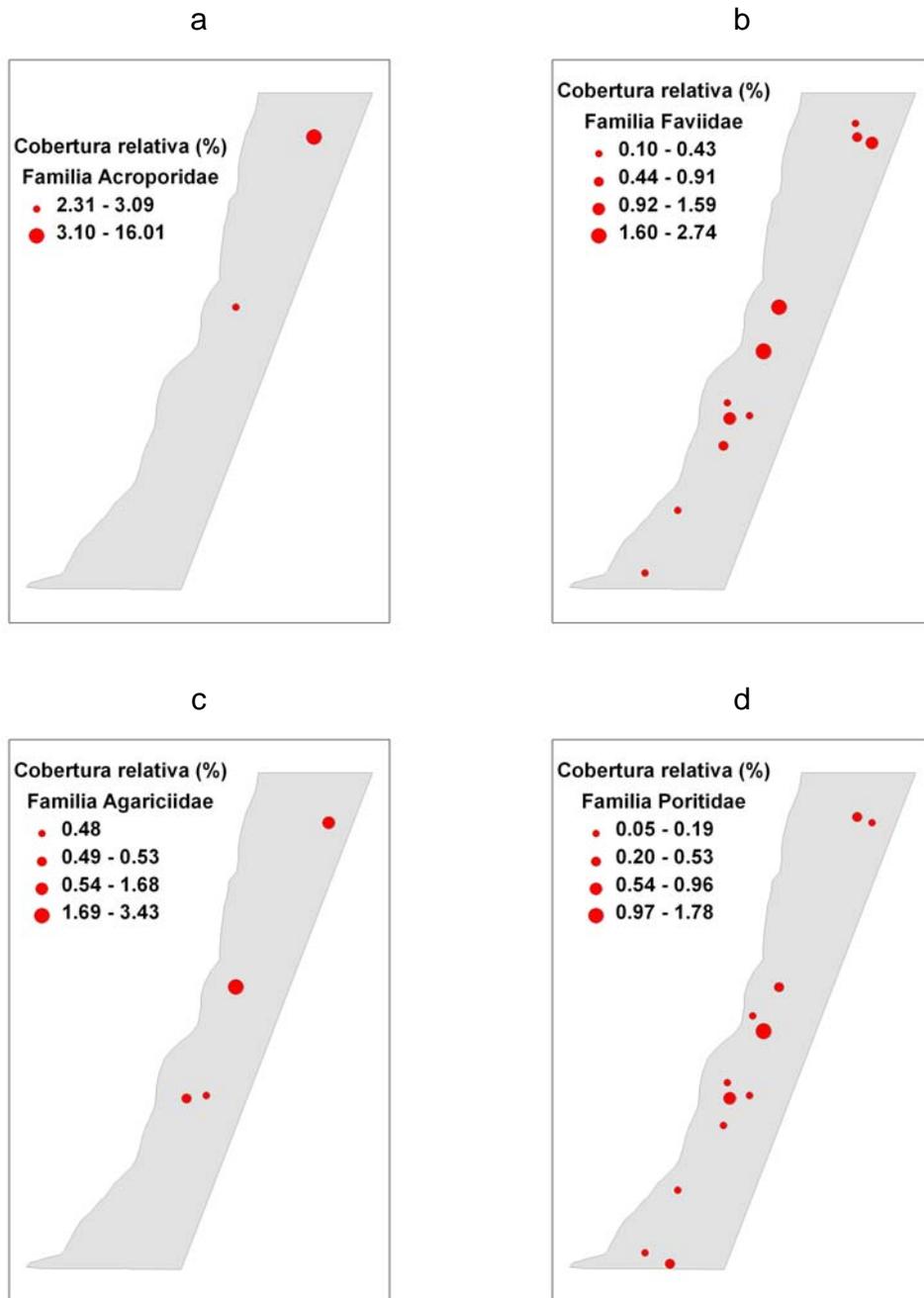


Figura 13. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Acroporidae (a), Faviidae (b), Agariciidae (c) y Poritidae (d) registradas en el arrecife Puerto Morelos.

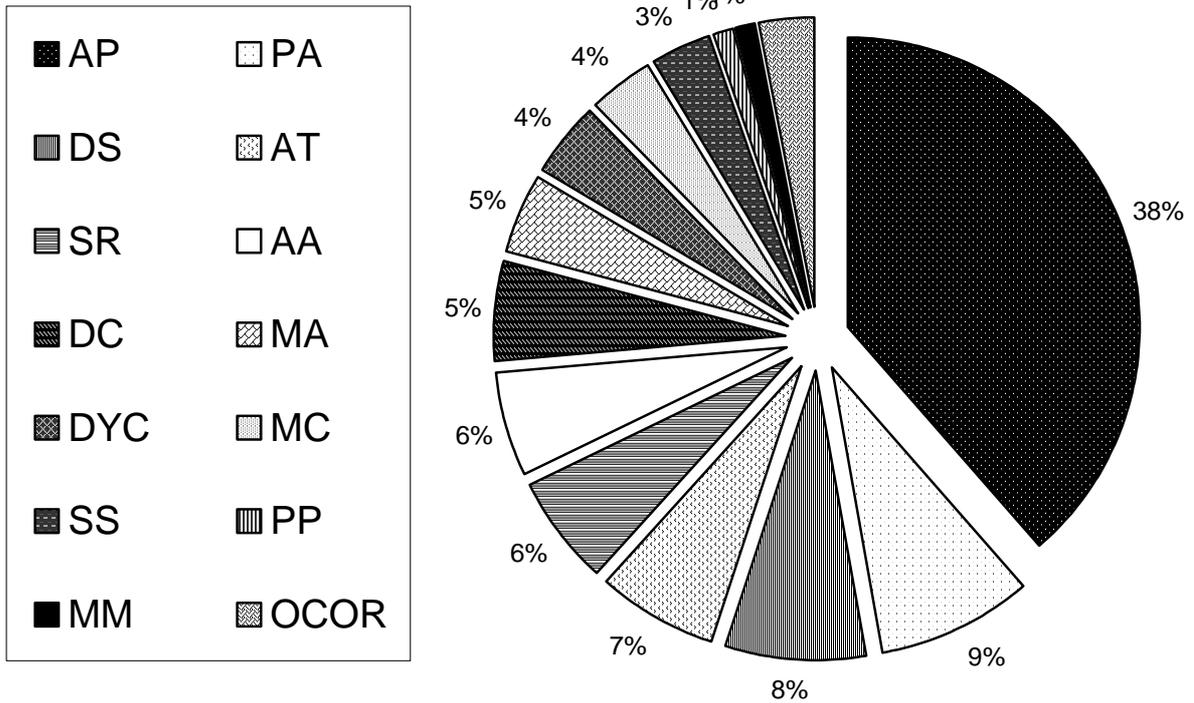


Figura 14. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife Puerto Morelos. Simbología: AP= *Acropora palmata*, PA= *Porites asteroides*, DS= *Diploria strigosa*, AT= *Agaricia tenuifolia*, SR= *Siderastrea radians*, AA= *Agaricia agaricites*, DC= *Diploria clivosa*, MA= *Montastraea annularis*, DYC= *Dichocoenia stokessi*, MC= *Montastraea cavernosa*, SS= *Siderastrea siderea*, PP= *Porites porites*, MM= *Meandrina meandrites* y OCOR= *Manicina areolata*, *D. laberintiformes*, *Madrasis mirabilis*, *Agaricia carinata*, *Stephanochoenia* sp., *Mycetophylia* sp., *Montastrea franksi* y *Isophyllastrea rigida*.

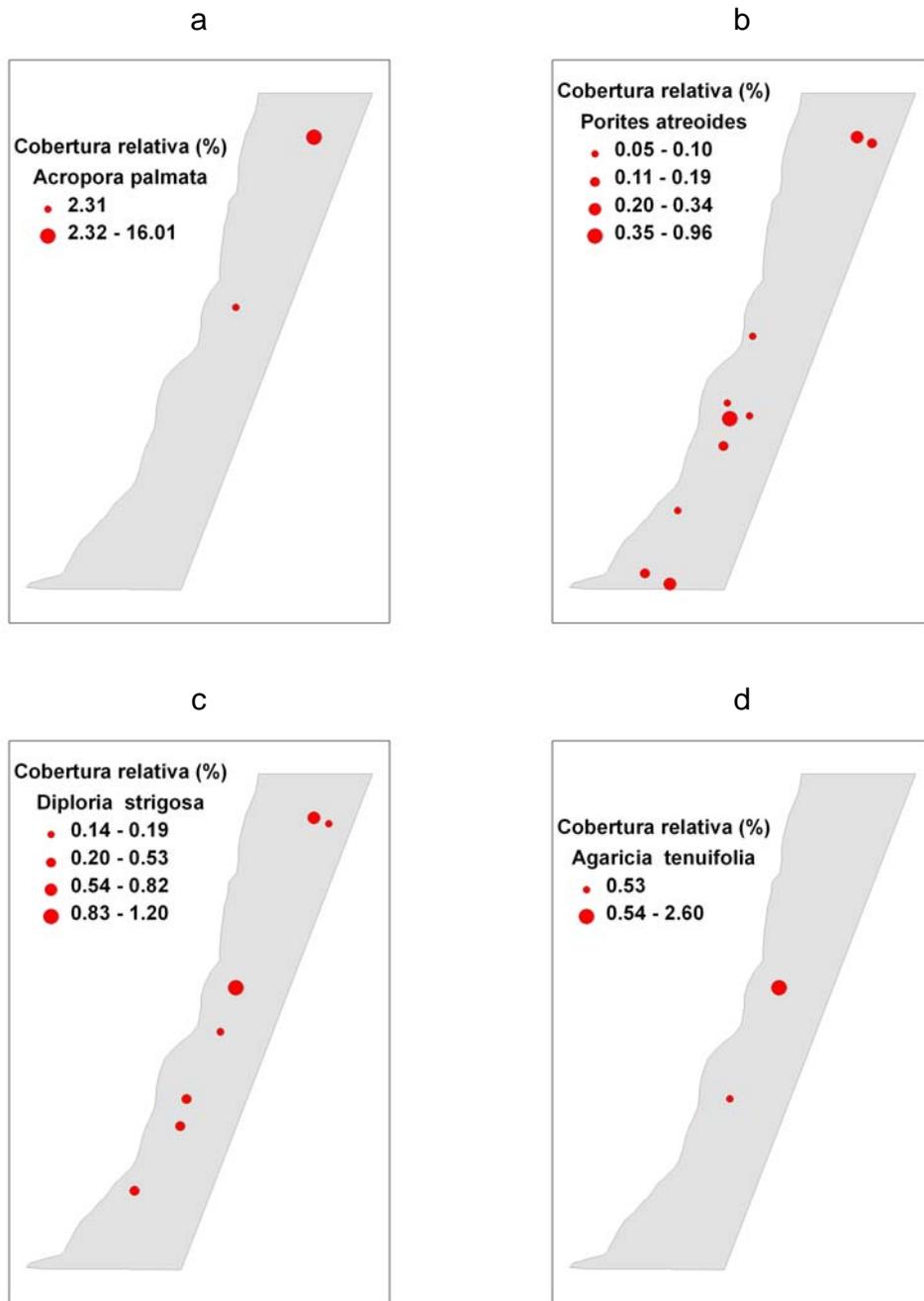


Figura 15. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Puerto Morelos: *Acropora palmata* (a), *Porites asteroides* (b), *Diploria strigosa* (c) y *Agaricia tenuifolia* (d).

## SUSTRATO

El sustrato estuvo compuesto esencialmente de arena (43.6 %), piso parejo (8.8 %), pedacería de material calcáreo (8.4 %), pavimento y rocas grandes (0.8 %) y coral muerto (0.13%). Su distribución y coberturas puede observarse en la figura 16.

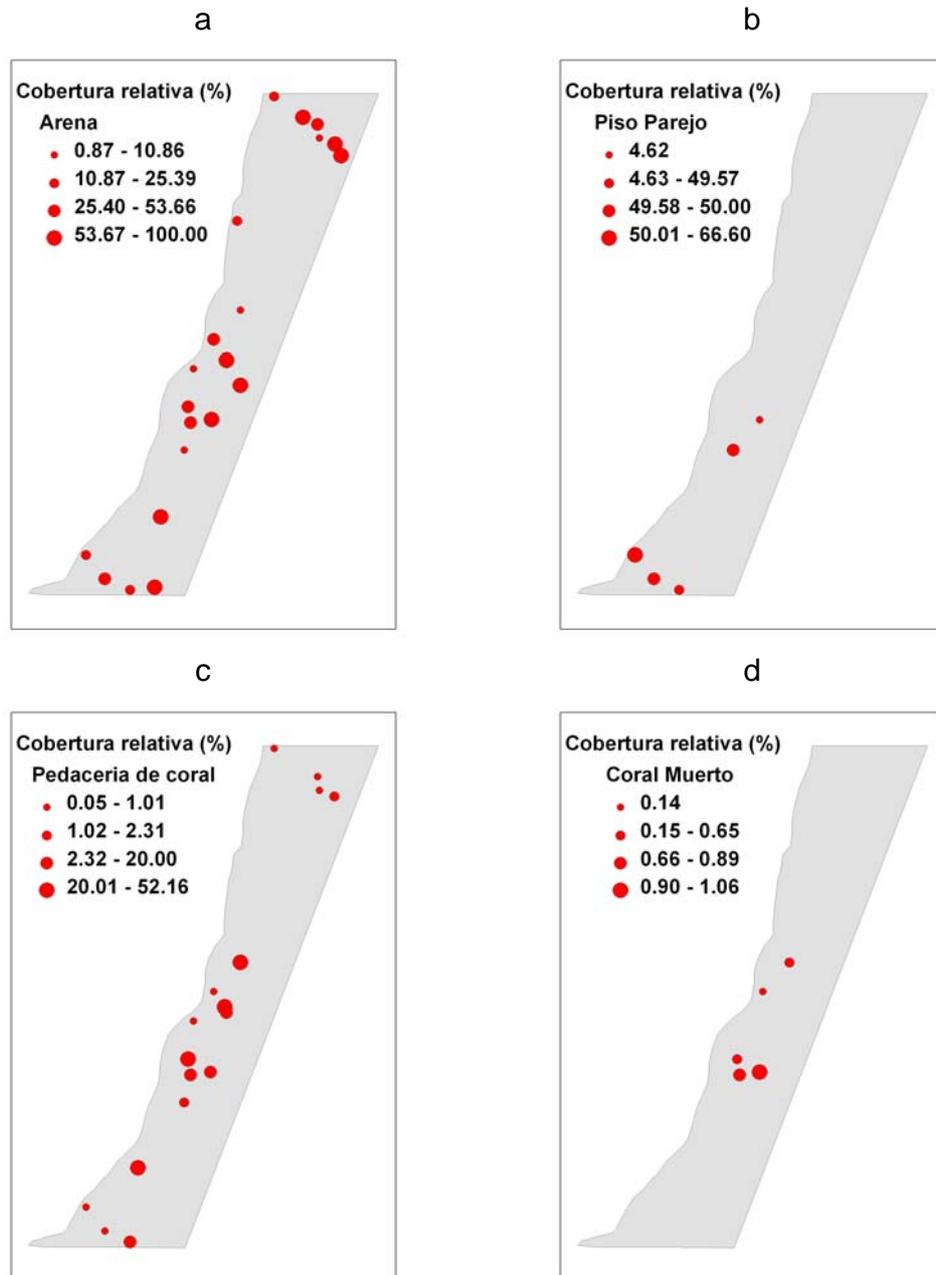


Figura 16. Distribución y cobertura (%) de los tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife Puerto Morelos: Arena (a), piso parejo (b), escombros de material calcáreo (c) y coral muerto (d).

## Hábitats arrecifales

El cluster resultado del análisis de agrupamiento mediante la utilización del coeficiente Bray-curtis discrimino 5 grupos, cada uno considerado como un hábitat (Fig. 17). Considerando la cobertura del bentos, el tipo de agregación de los corales, el sustrato dominante y su complejidad, estos hábitats fueron descritos (Tabla 5) y nombrados como: H1, H2, H3, H4 y H5

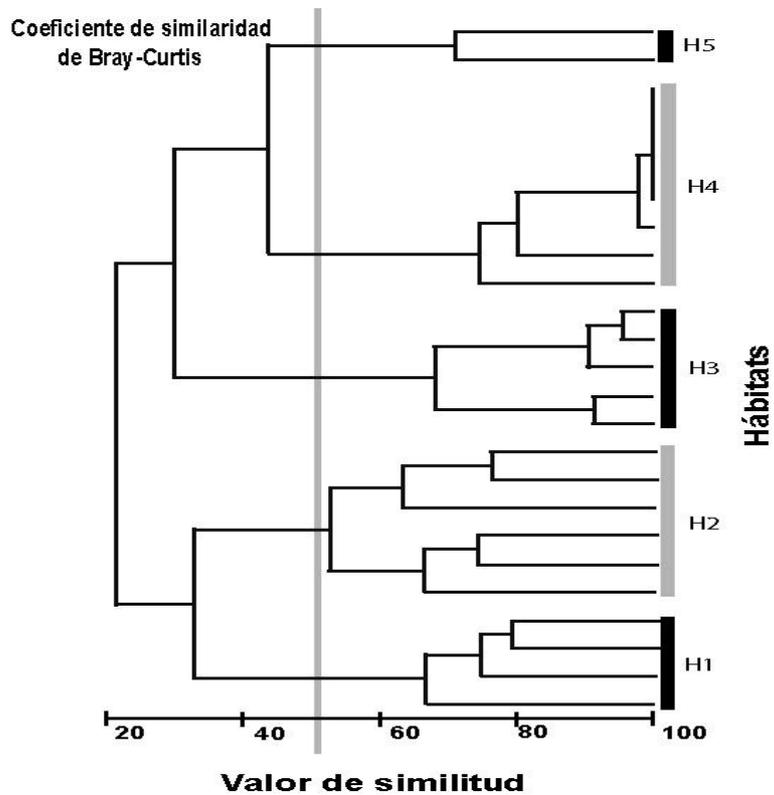


Figura 17. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Puerto Morelos.

Tabla 5. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Puerto Morelos.

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
1.H1	75.4 % SUSTRATO	53.99% Piso parejo 18.51% Arena	
	20.7 % ALGAS	20.68% Macroalgas Verdes/café	
	2.1% ESPONJAS	1.5% Tubular	
	1.1 OCTOCORAL	0.52% Ramificación dicotómica	
	0.63 % CORAL ESCLERACTINIO	0.26% Coral semiesférico	0.17% <i>Siderastrea radians</i>
		0.24% Coral submasivo	0.07% <i>Montastraea annularis</i>
	0.04 % HIDROCORAL	0.05% Folioso	0.05% <i>Millepora complanata</i>
2. H2	47.52 % ALGAS	22.56% Macroalgas Verdes/café	
	32.96 % SUSTRATO	21.79% Escombros de material calcáreo	
	9.72 % OCTOCORAL	4.06 % Ramificación arborescente	
	6.16% CORAL ESCLERACTINIO	3.05% Coral ramificado tabular	3.05 % <i>Acropora palmata</i>
		0.85 % Coral cerebro	0.46 % <i>Diploria strigosa</i>
		0.84 % Coral semiesférico	0.48% <i>Montastraea cavernosa</i>
	2.84% ESPONJAS	2.42% Costrosa/inscrustante	
	0.53% HIDROCORAL	0.29% Folioso	<i>Millepora complanata</i>
	0.16% PASTOS	0.16 % <i>Thalassia testudinum</i>	
	0.06% ELEMENTOS NO IDENTIFICABLES		
	0.02% OTROS ORGANISMOS	0.02% <i>Palytoa</i>	
3. H3	63.44% PASTOS	41.70% <i>Thalassia testudinum</i>	
	25.69% SUSTRATO	25.51% Arena	
	10.58% ALGAS	10.19% Macroalgas Verdes/café	
	0.14% ELEMENTOS NO IDENTIFICABLES		
	0.11% CORAL ESCLERACTINIO	0.09% Coral semiesférico	0.09% <i>Manicina aerolata</i>
		0.02% Coral submasivo	0.02% <i>Porites astroides</i>
	0.02% OCTOCORAL	0.01% <i>Gorgonia</i> sp. 0.01% Ramificación arborescente	
0.02% ESPONJAS	0.02% Semiesférica		

Continuación...

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
4.H4	97.5% SUSTRATO 2.5% PASTOS	95% Arena 2.5% Escombros de material calcáreo 2.5% <i>Thalassia testudinum</i>	
5. H5	67.50% SUSTRATO 19.78% OCTOCORAL 8.92% ALGAS 1.66% CORAL ESCLERACTINIO 1.01% ESPONJAS 0.75% PASTOS 0.29% HIDROCORAL 0.10% ELEMENTOS NO IDENTIFICABLES	41.68% Arena 23.13% Escombros de material calcáreo 10.36% Ramificación arborescente 8.80% Macroalgas Verdes/café 0.65% Coral cerebro 0.50% Coral submasivo 0.82% Costrosa/inscrustante 0.74% <i>Thalassia testudinum</i> 0.29% Ramificado	0.38% <i>Diploria clivosa</i> 0.50% <i>Porites astroides</i> 0.29% <i>Millepora alaicornis</i>

Para examinar las características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios, se calculó la riqueza de especies, el índice de diversidad de Shannon-Wiener y el índice de equidad de Pielou (ver Tabla 6). En cuanto a la Riqueza de especies, el hábitat que presentó la mayor riqueza fue el H2 con 20 especies, representando el 95 % de la totalidad de las especies registradas en este estudio, seguido de los hábitats H1 y H5 con 6 especies cada uno y en el hábitat H3 solo se presentaron 2 especies. El hábitat H4 no presento especies de corales escleractínios.

El valor más bajo del índice de diversidad Shannon-Wiener, fue el H3 (0.47 bits/individuo). El hábitat H1 y H6 presentaron un valor similar (1.66 bits/individuo). En contra parte, el hábitat que presento un mayor índice de diversidad fue el H2 (1.92 bits/individuo). El hábitat que presentó el mayor valor de equidad fue el H1 y el H5 (1) y el hábitat H2 fue el que presentó el menor valor (0.64).

Tabla 6. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife Puerto Morelos.

HÁBITAT	Riqueza de especies	Valor de Diversidad H'(loge)	Índice de Equidad J'
H1	6	1.66	0.93
H2	20	1.92	0.64
H3	2	0.47	0.68
H4	0	0	0
H5	6	1.66	0.93

El ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó diferencias significativas ( $H=32.95$ ,  $p<<0.01$ ) entre los hábitats. Al encontrarse diferencias significativas con esta prueba se procedió a comparar por pares de hábitats con la prueba de Mann-Whitney, ver Tabla 7.

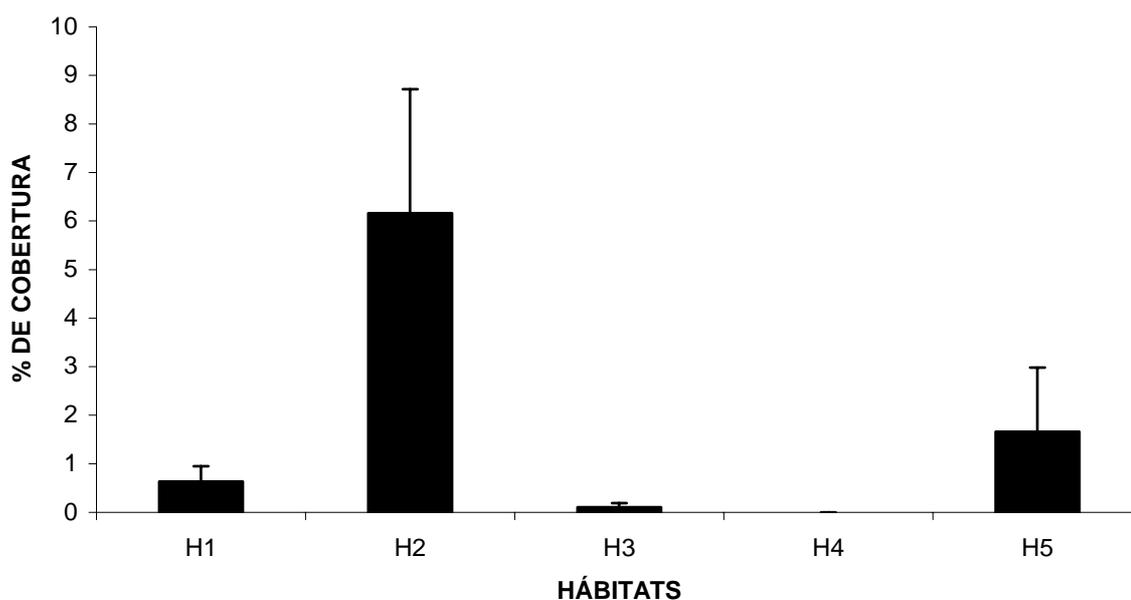


Figura 18. Promedios del porcentaje de cobertura de corales escleractínios en los 5 hábitats discriminados para el arrecife Puerto Morelos. Barras de Desviación estándar.

Se presentaron diferencias significativas (Mann Whitney;  $p<0.05$ ) con respecto a varios hábitats, principalmente con el hábitat H2 (Mann Whitney;  $p=1$ ) (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats: H1, H2, H3 y H5

HÁBITAT/HÁBITAT	H5	H3	H2	H1
H5				
H3	>0,05			
H2	<0,01	<0,001		
H1	>0,05	>0,05	<0,001	

El análisis de similitud en porcentaje (SIMPER) mostró que *Porites astreoides* fue el que mayor contribuyó a la similitud dentro del hábitat H1 y H2 (54 y 25.58 %, respectivamente). En el hábitat H3 se presentó una similitud de cero y en lo que respecta al hábitat H4 al no existir especies de corales escleractínios no hubo valor de similitud. Finalmente en el hábitat H5 la especie *Diploria clivosa* fue la que contribuyó en mayor medida a la similitud del hábitat (37.29 %). Para mayores detalles ver la Tabla 8.

Tabla 8. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de Bray-Curtis . Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud.

HÁBITAT	Contrib%	Cum. %
Group H1		
% de similitud: 24,71		
Especies		
<i>Porites astroides</i>	54,08	54,08
<i>Siderastrea siderea</i>	19,72	73,80
<i>Siderastrea radians</i>	15,70	89,50
<i>Montastraea cavernosa</i>	10,50	100,00
Group H2		
% de similitud: 28,04		
Especies		
<i>Porites astroides</i>	25,58	25,58
<i>Diploria Strigosa</i>	18,49	44,08
<i>Diploria Clivosa</i>	13,41	57,48
<i>Siderastrea radians</i>	12,08	69,56
<i>Agaricia agaricites</i>	10,19	79,75
<i>Acropora palmata</i>	4,93	84,68
<i>Siderastrea siderea</i>	2,45	87,13
<i>Dichocoenia stokesi</i>	2,25	89,38
<i>Montastraea cavernosa</i>	2,22	91,59
Group H3		
Menor a dos muestras		
Group H4		
Menor a dos muestras		
Group H5		
% de similitud: 46,25		
Especies		
<i>Diploria Clivosa</i>	37,29	37,29
<i>Porites astroides</i>	31,36	68,64
<i>Siderastrea radians</i>	31,36	100,00

## ARRECIFES DEL SISTEMA ARRECIFAL VERACRUZANO

### Arrecife Isla Verde

#### Descripción general

El análisis de 12 sitios de muestreo (48 estaciones) mostró una cobertura de comunidades bentónicas de 81.45%, 18.33% de sustrato (i.e. arena, restos, etc.) y 0.22% de elementos no identificados.

#### Comunidad bentónica

La comunidad bentónica (100 %) estuvo constituido principalmente por algas (56.20.%) y se distribuyeron prácticamente en todo el arrecife (Fig. 20). El segundo Gran grupo morfofuncinal (GMF) más importante fue el de corales escleractínios (15.26 %) el cual se encuentra distribuido principalmente en la zona de sotavento arrecifal; estos dos grupos representaron el 71.46 % de la cobertura total (Fig. 19). Los GGMF que registraron el porcentaje restante pueden observarse en la Figura 20 y 21, así como su cobertura y distribución en el arrecife.

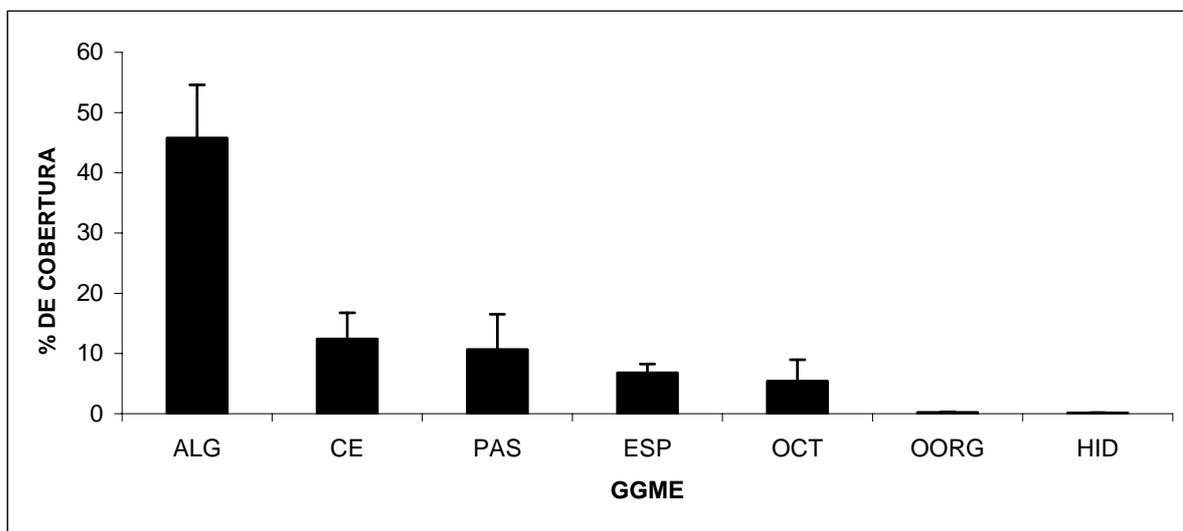


Figura 19. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), pastos marinos (PAS), octocorales (OCT), corales escleractínios (CE), esponjas (ESP), hidrocorales (HID) y otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa). Barras de error típico de la media.

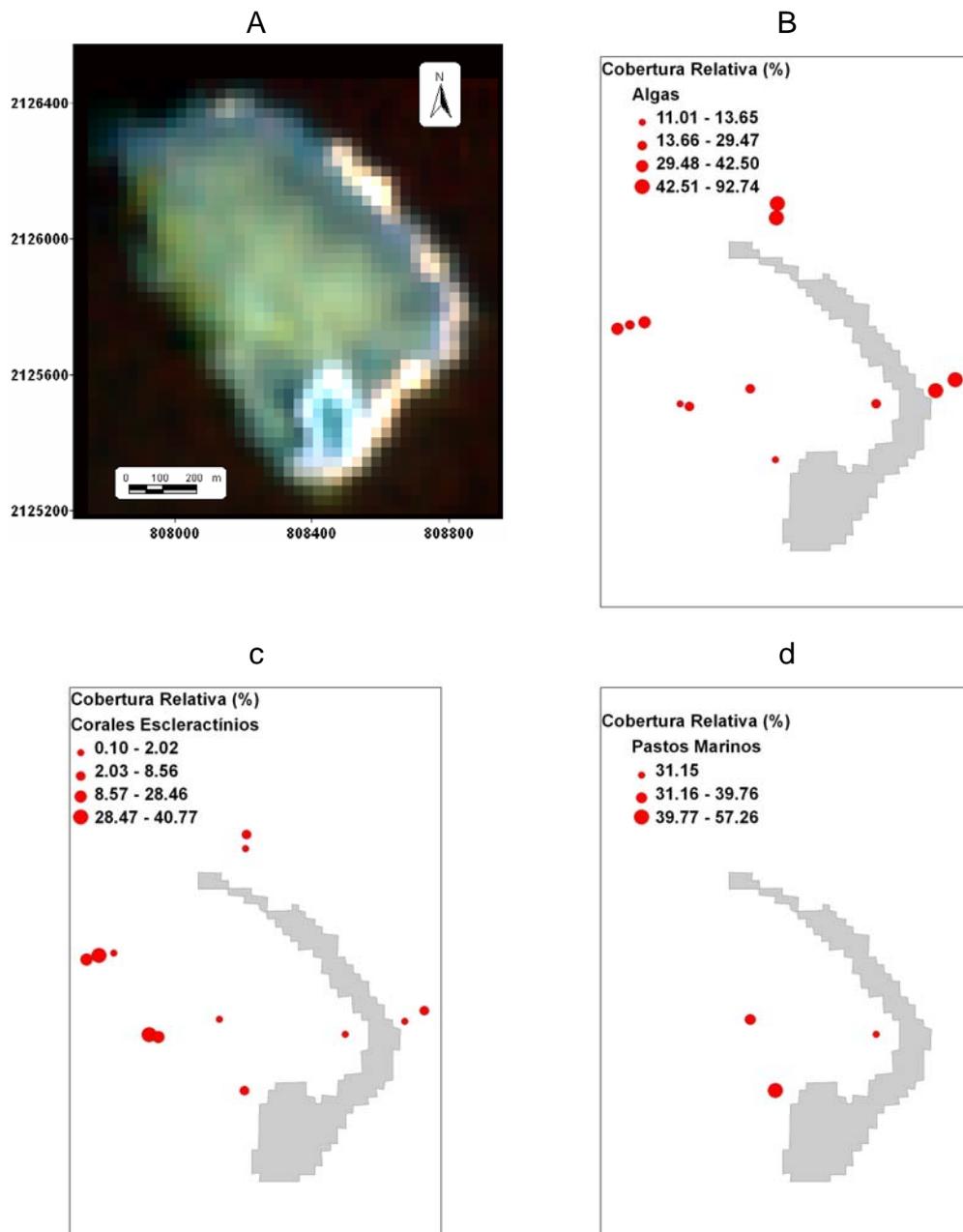


Figura 20. Sistema arrecifal de Isla Verde (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), corales escleractínios (c) y pastos marinos (d). Unidades geográficas en UTM.

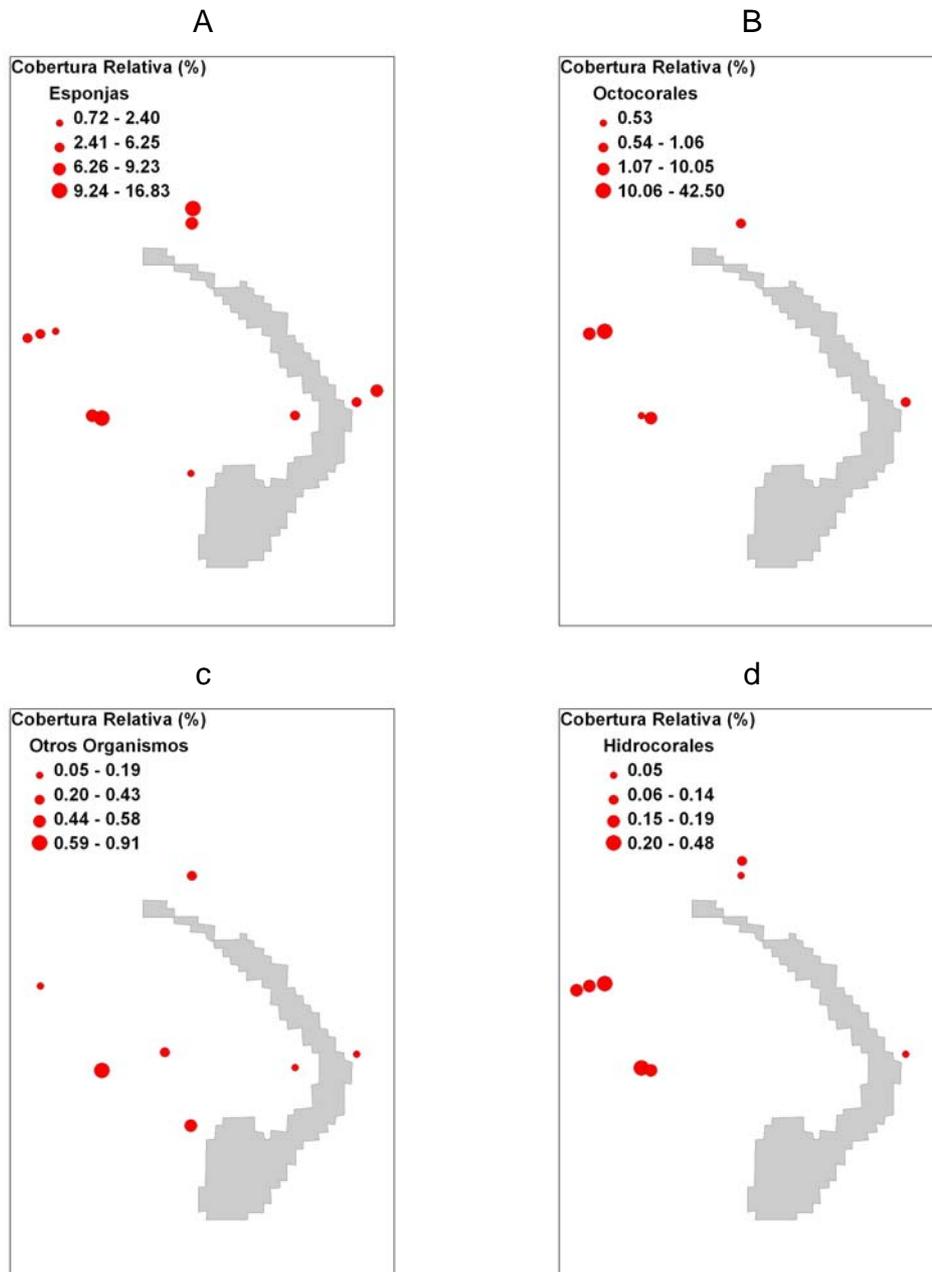


Figura 21. Distribución y cobertura (%) de esponjas (a), octocorales (b), otros organismos (c) e hidrocorales (d). Unidades geográficas en UTM's

Dentro del grupo de corales escleractínios (tomado como 100 %) el grupo funcional que presentó mayor cobertura fue el de coral submasivo (42.59 %), seguido del coral cerebro (37.56 %), coral semiesférico (15.38 %) y coral ramoso

(4.06; Figura 22). El grupo funcional que presentó menos cobertura fue el coral hongo con 0.03 %.

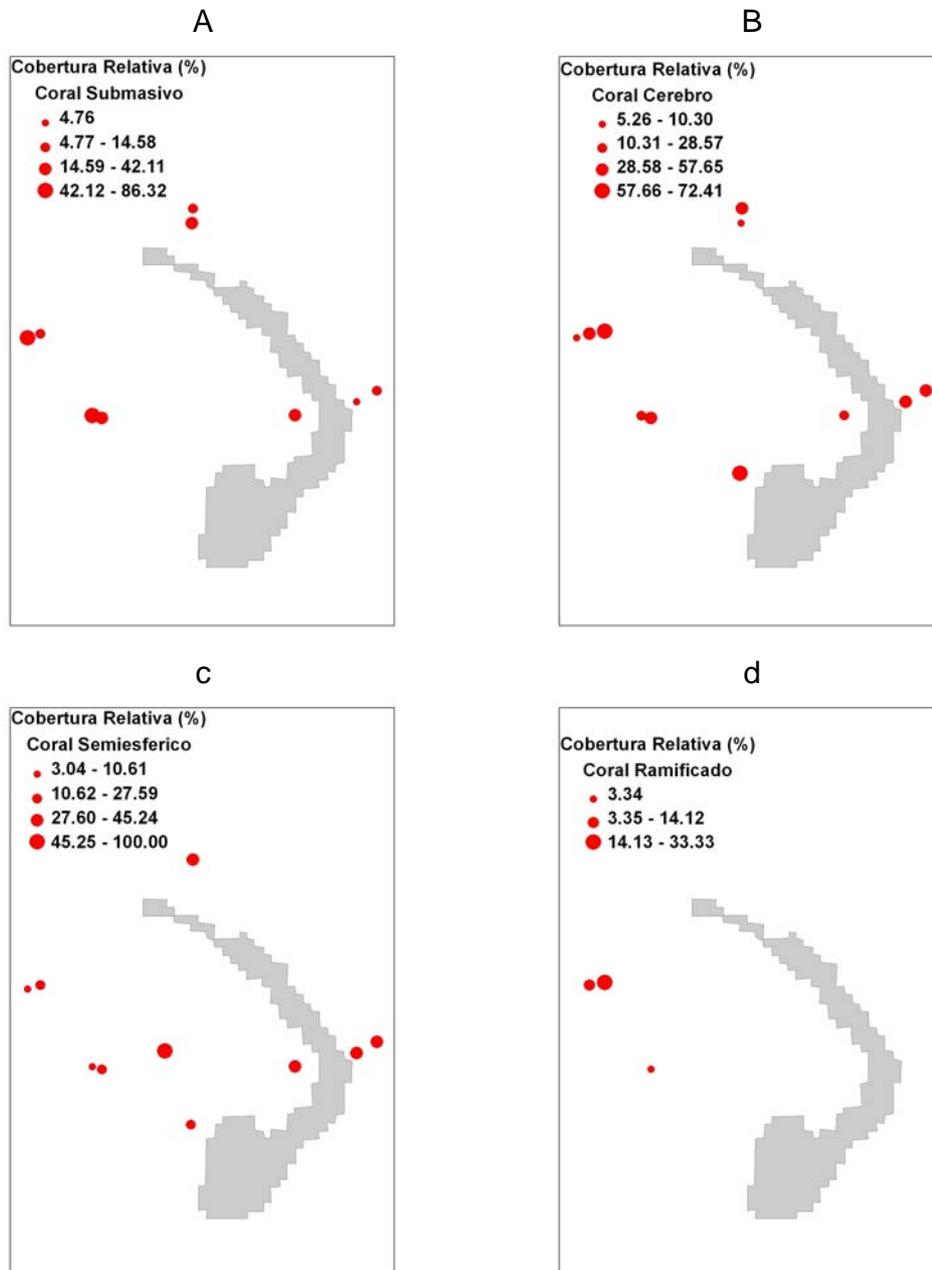


Figura 22. Distribución y cobertura (%) de coral submasivo (a), coral cerebro (b), coral semiesférico (c) y coral ramificado (d) registradas en el Isla Verde.

Se registraron 7 familias de corales escleractínios (tomado como el 100%), siendo la familia Favidae la que presentó una mayor cobertura (87 %). La segunda familia

en importancia fue Siderastreidae (7.57 %), seguida de la familia Acroporidae (4.38%) y Poritidae (0.8 %). La distribución y cobertura de estas familias puede observarse en la Figura 23. La familia que presentó menos cobertura en los sitios muestreados fue la familia Mussidae (0.03 %)

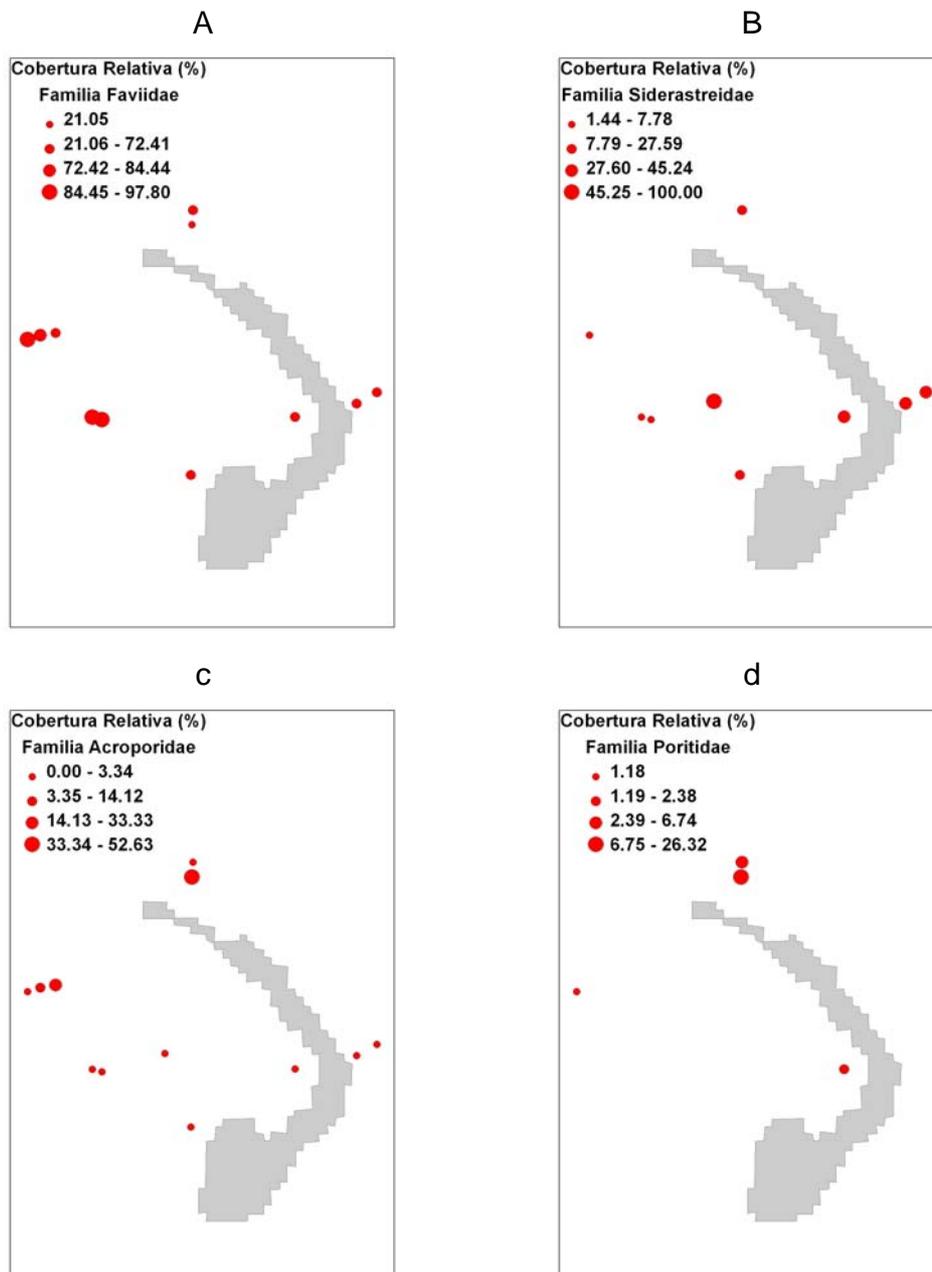


Figura 23. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Favidae (a), Siderastreidae (b), Acroporidae (c) y Poritidae (d) registradas en el arrecife Isla Verde.

Tomando en cuenta las 8 Familias, se pudieron identificar 10 géneros de coral y 17 especies. La especie con mayor cobertura fue *Montastraea cavernosa*, representada por el 36.68 % del total de la cobertura de corales escleractínios.

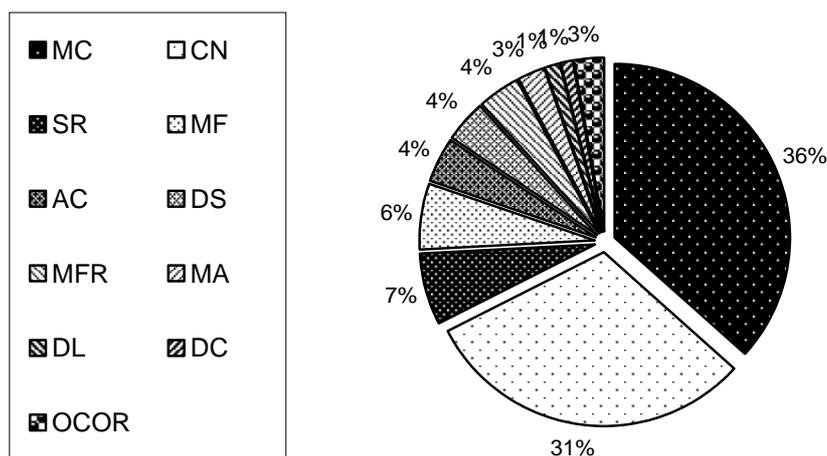


Figura 24. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife Isla Verde. Simbología: MC= *Montastraea cavernosa*, CN= *Colpophyllia natans*, SR= *Siderastrea radians*, MF= *Montastraea faveolata*, AC= *Acropora cervicornis*, DS= *Diploria strigosa*, MFR= *Montastrea franksi*, MA= *Montastraea annularis*, DL= *Diploria laberintiformes*, DC= *Diploria clivosa* y OCOR= *Siderastrea siderea*, *Porites asteroides*, *Manicina areolata*, *Acropora palmata*, *Meandrina meandrites*, *Agaricia fragilis* y *Mycetophyllia sp.*

Las especies que le siguieron en importancia fueron *Colpophyllia natans*, *Siderastrea radians*, *Montastraea faveolata* (30.91, 6.67 y 5.9 %, respectivamente). Las especies con menor cobertura fueron *Agaricia fragilis* y *Mycetophyllia sp.* (Fig. 24). La distribución y cobertura de las cuatro especies de coral más importantes pueden observarse en la figura 25.

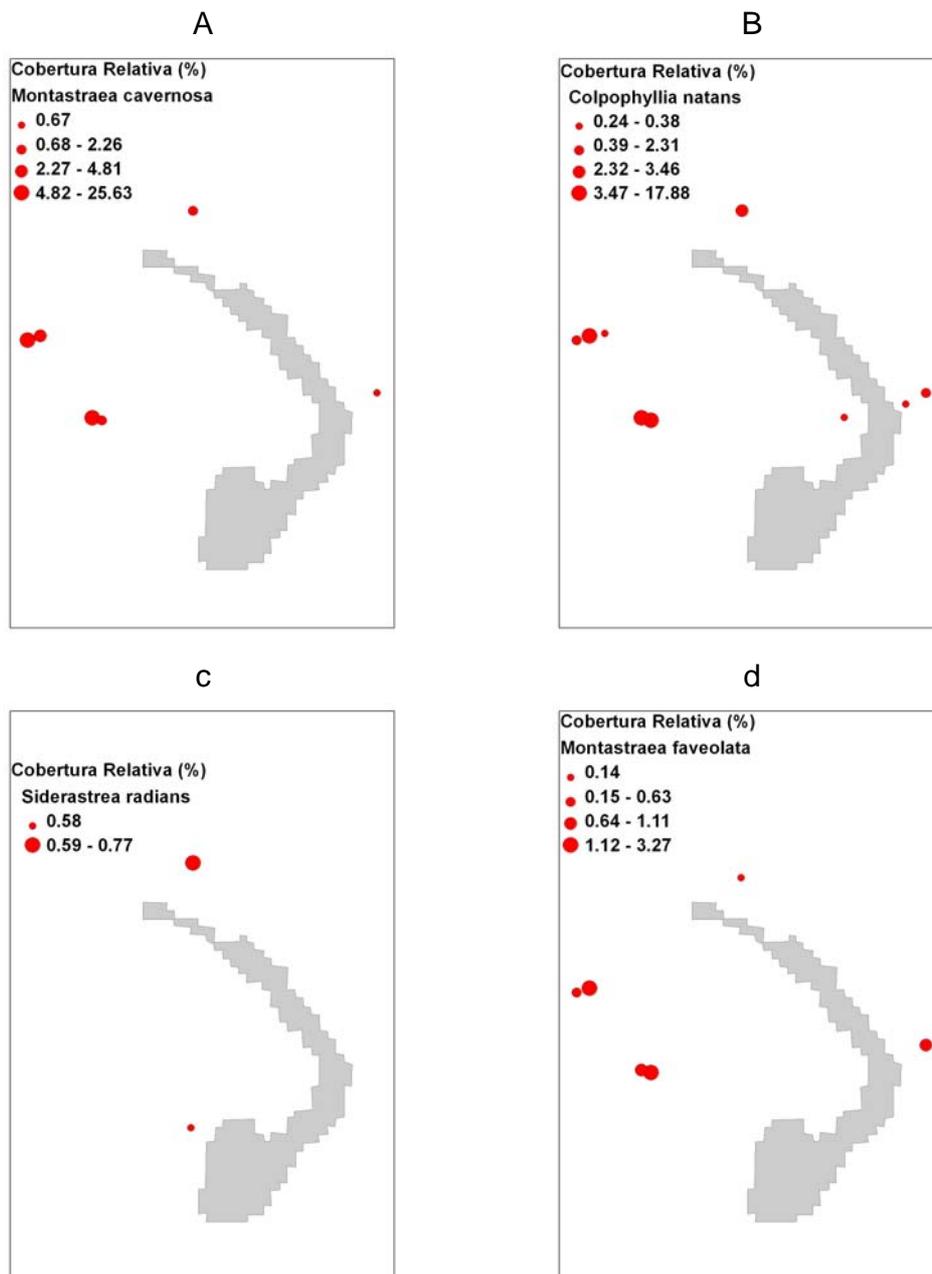


Figura 25. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Isla Verde: *Montastraea cavernosa* (a), *Colpophyllia natans* (b), *Siderastrea radians* y *Montastraea faveolata* (d). Unidades geográficas en UTM.

## Sustrato

El sustrato estuvo compuesto esencialmente de pedacera de material calcáreo (57.96 %), arena (28.82 %), pavimento y rocas grandes (9.48 %) y piso parejo (1.92%). Su distribución y coberturas puede observarse en la figura 26.

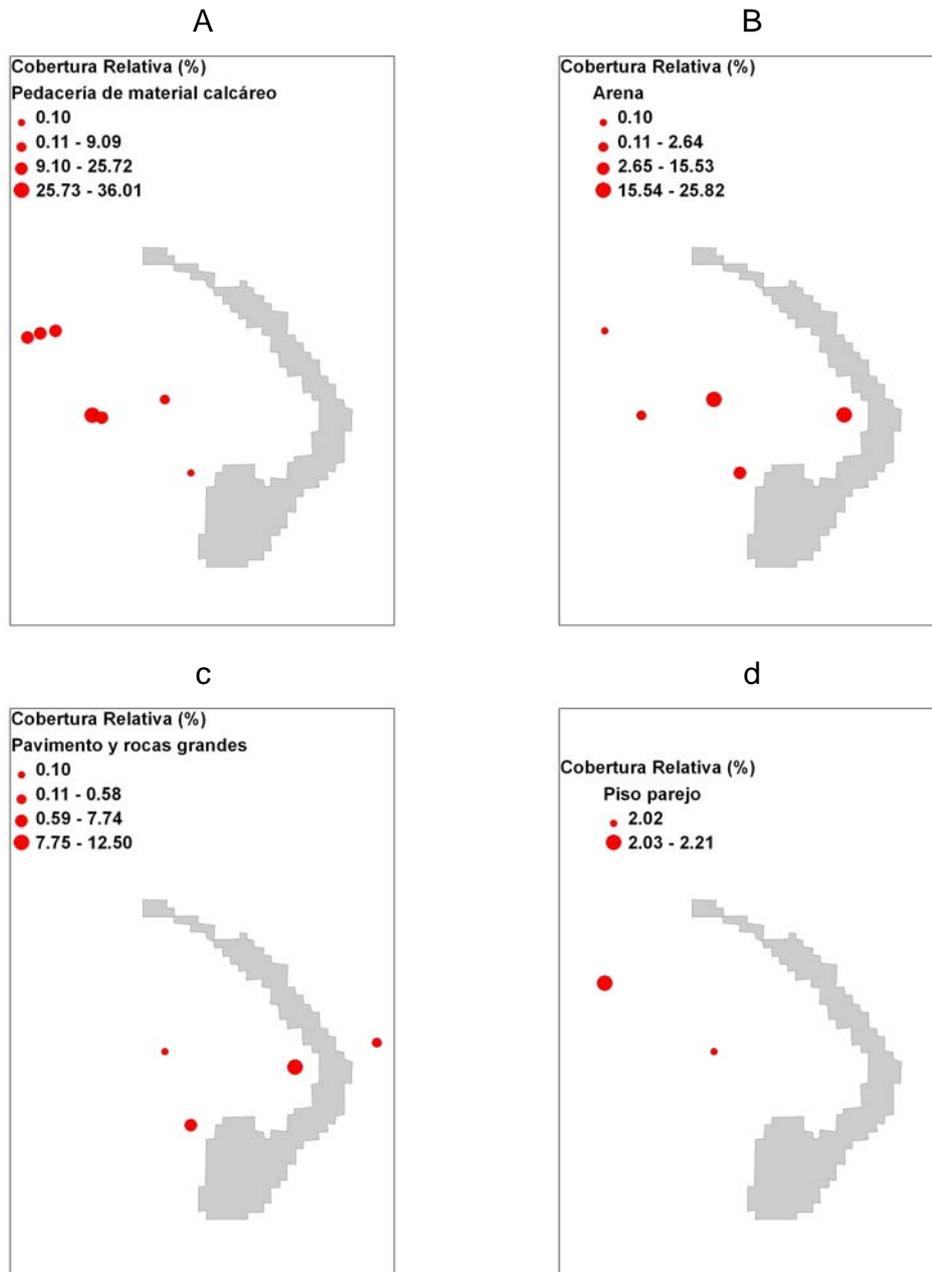


Figura 26. Distribución y cobertura (%) de los tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife de Isla Verde: Pedacera de material calcáreo (a), Arena (b), Pavimento y rocas grandes (c) y Piso parejo (d).

## Hábitats arrecifales

El cluster resultado del análisis de agrupamiento mediante la utilización del índice de similitud de Bray-Curtis discriminó 4 grupos, cada uno considerado como un hábitat (Fig. 27). Cada uno de los hábitats fue descrito en base a sus características geomorfológicas y bióticas, ver Tabla 9.

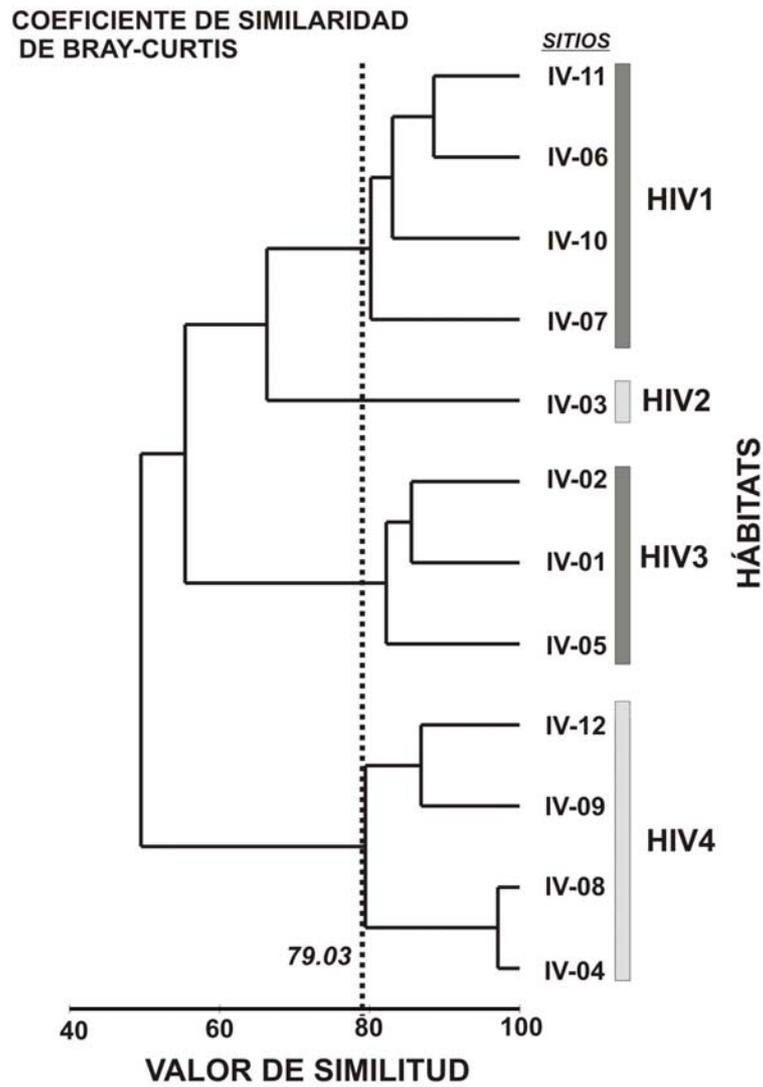


Figura 27. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Isla Verde: HIV1, HIV2, HIV3 y HIV4.

Tabla 9. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Isla Verde.

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características		
HIV1	31.18% Corales escleractínios	15.11% Submasivo	85.19% <i>Montastrea faveolata</i> 8.11% <i>Montastrea franksi</i> 6.11% <i>M. annularis</i>		
		11.14% Cerebro	88.47% <i>Colpophyllia natans</i> 7.55% <i>D. Strigosa</i> 3.56% <i>D. laberintiformes</i> 0.43% <i>Meandrina meandrites</i>		
		3.45% Coral semiesférico	63.75% <i>M. cavernosa</i> 31.70% <i>Siderastrea radians</i> 4.53% <i>Manicina aerolata</i> 100% <i>A. cervicornis</i> 100% <i>Agaricia fragilis</i>		
		1.45% C RAMOSO			
		0.02% Copa y flor			
		27.68% Algas	54.28% Algas filamentosas (TURF) 45.64% ALGAS Macroalgas Verdes/café		
		26.18% Sustrato	0.09% Algas Calcáreas Articuladas 97.47% pedacería de material calcáreo		
		9.34% Esponjas	2.53% Arena 95.61% Costrosa/incrustante 4.03% tubular		
		5.12% Octocoral	0.54% Semiesférica 90.63% Ramificación dicotómica 6.73% No ramificada 3.63% Ramificación arborescente		
		0.26% Corales de fuego Hidrocoral	50% Ramificado 50% Folioso	<i>M. alvicornis</i> <i>M. complanata</i>	
		0.24% Organismos	100% Erizos		
		HIV2	42.50% Octocoral	61.85% Ramificación arborescente 36.59% Ramificación dicotómica 2.52% No ramificada 0.11% Ramificación pinnada	
				34.38% Algas	74.39% ALGAS Macroalgas Verdes/café 25.45% Algas filamentosas (TURF) 0.14% ALGAS Costrosa coralina
				18.89% Sustrato	87.81% Pedacería de material calcáreo 11.71% piso parejo 0.51% Arena
2.40% Esponjas	14.02% Semiesférica 14.02% Vaso 72.12% Costrosa/incrustante				
0.72% Coral muerto					
0.72% Corales Escleractínios	66.77% Cerebro			80.13% <i>Colpophyllia natans</i> 20.03% <i>D. Strigosa</i> 100% <i>A. cervicornis</i>	
	33.39% C. Ramoso				
0.38% Corales de fuego Hidrocorales	88.56% Ramificado 12.65% Folioso			<i>M. alvicornis</i> <i>M. complanata</i>	

Continuación...

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
HIV3	42.72% Pastos		100% <i>Thalassia testudinum</i>
	21.17% Algas	39.69% Algas filamentosas (TURF)	
		30.36% ALGAS Costrosa coralina	
		29.67% ALGAS Macroalgas Verdes/café	
		0.08% Algas Calcáreas Articuladas	
	2.10% Corales escleractinios	57.23% Cerebro	48.08% <i>D. Clivosa</i>
			36.06% <i>D. Strigosa</i>
			9.35% <i>D. laberintiformes</i>
			6.68% <i>Colpophylia natans</i>
		34.34% Semiesférico	73.45% <i>Siderastrea radians</i>
			26.71% <i>Siderastrea siderea</i>
		8.39% Submasivo	89.03% <i>Montastrea franksi</i>
			8.90% <i>Porites astroides</i>
	1.89% Esponjas	89.03% Costrosa/incrustante	
	10.18% tubular		
	0.85% Semiesférica		
0.40% Organismos	56.09% Erizos		
	40.06% Sésiles		
	4.01% Palytoa		
0.11% Coral muerto			
0.08% No ID.			
HIV4	85.18% Algas	64.95% ALGAS Costrosa coralina	
		34.16% Algas filamentosas (TURF)	
		0.89% ALGAS Macroalgas Verdes/café	
	9.01% Esponjas	98.18% costrosa/incrustante	
		1.07% Vaso	
		0.40% Semiesférica	
		0.40% tubular	
	4.35% Corales escleractinios	42.27% Cerebro	82.31% <i>Colpophylia natans</i>
			16.98% <i>D. Strigosa</i>
			0.65% <i>D. Clivosa</i>
		1.74% Coral semiesférico	57.33% <i>Siderastrea radians</i>
			31.77% <i>M. cavernosa</i>
			11.05% <i>Siderastrea siderea</i>
		0.64% Submasivo	45.07% <i>Montastrea faveolata</i>
		31.93% <i>Porites astroides</i>	
		20.66% <i>Montastrea franksi</i>	
		1.88% <i>M. annularis</i>	
	0.12% C RAM TABUL.	100% <i>A. palmata</i>	
	0.01% Hongo	100% <i>Mycetophylia</i>	
0.60% No ID			
0.47% Octocoral	100% No ramificada		
0.14% Sustrato	100% pavimento/rocas grandes		
0.13% Organismos	83.21% Erizos		
	9.25% Vágiles (móviles)		
	9.25% Sésiles		
0.06% Corales de fuego Hidrocoral	100% Folioso	<i>M. complanata</i>	
0.04% Coral muerto			

Para examinar las características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios, se utilizó la riqueza de especies, el índice de diversidad de Shannon-Wiener y el índice de equidad de Pielou (ver Tabla 10). En cuanto a la Riqueza de especies, el hábitat que presentó la mayor riqueza fue el Hábitat HIV1 con 13 especies, seguido del Hábitat HIV4 (12 especies), HIV3 (8 especies) y HIV2 (3 especies).

El valor más bajo de índice de diversidad (Shannon-Wiener) se registró en el hábitat HIV2 con 0.97 bits/individuo. El hábitat HIV1 y HIV3 presentaron valores de diversidad de 1.62 y 1.76 bits/individuo, respectivamente. Finalmente el hábitat que presentó el mayor valor de diversidad fue el hábitat HIV4 con 1.87 (bits/individuo). El hábitat que presentó el mayor valor de equidad fue el HIV2 (0.88) y el hábitat HIV1 fue el que presentó el menor valor (0.63).

Tabla 10. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife isla Verde.

<b>HÁBITAT</b>	<b>Riqueza de especies</b>	<b>Valor de Diversidad (H')</b>	<b>Índice de Equidad</b>
HIV1	13	1.62	0.63
HIV 2	3	0.97	0.88
HIV 3	8	1.76	0.84
HIV 4	12	1.87	0.75

El ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó diferencias significativas ( $H=15.7397$ ,  $p<<0.05$ , con un 95% del nivel de confianza) entre los hábitats. Al encontrarse diferencias significativas con esta prueba se procedió a comparar por pares de hábitats con la prueba de Mann-Whitney, ver Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats.

HÁBITAT/HÁBITAT	HIV 1	HIV 2	HIV 3	HIV 4
HIV 1				
HIV 2	X			
HIV 3	X	O		
HIV 4	O	X	O	

X=  $p < 0.05$  Diferencia significativa (Hábitats diferentes)

O =  $p > 0.05$  No diferencia significativa (Hábitats similares)

El análisis de similitud en porcentaje (SIMPER) mostró que las especies de *Colpophylia natans* y *Montastrea faveolata* contribuyeron a la similitud dentro del Hábitat HIV1 (39.7 y 38.82 %, respectivamente). En el hábitat HIV3 la especie de *Siderastrea radians* fue la que contribuyó con un 100%, y en el hábitat HIV4 las especies que contribuyeron mayormente a la similitud fueron *Colpophylia natans* (36.62%) y *Siderastrea radians* (28.78%). Para mayores detalles ver la Tabla 12.

Tabla 12. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%).

GRUPO DE HÁBITAT		
<i>Hábitat HIV1</i>		
% de similitud: 46.31		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Colpophyllia natans</i>	39.7	39.7
<i>Montastrea faveolata</i>	38.82	78.52
<i>M. cavernosa</i>	7.59	86.11
<i>M. annularis</i>	5.37	91.48
<i>Montastrea franksi</i>	2.98	94.46
<i>D. Strigosa</i>	2.38	96.84
<i>Siderastrea radians</i>	1.99	98.83
<i>A. cervicornis</i>	0.81	99.64
<i>Manicina aerolata</i>	0.36	100
<i>Hábitat HIV2</i>		
Menor a dos muestras		
<i>Hábitat HIV3</i>		
% de similitud: 83.92		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Siderastrea radians</i>	100	100
<i>Hábitat HIV4</i>		
% de similitud: 19.63		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Colpophyllia natans</i>	36.62	36.62
<i>Siderastrea radians</i>	28.78	65.39
<i>D. Strigosa</i>	19.78	85.18
<i>M. cavernosa</i>	7.38	92.56
<i>Porites astroides</i>	4.31	96.87
<i>Montastrea faveolata</i>	3.13	100

*Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales*

La imagen clasificada de hábitat mostró una precisión (matriz de confusión – análisis de Kappa) de 0.84 (Fig. 28)

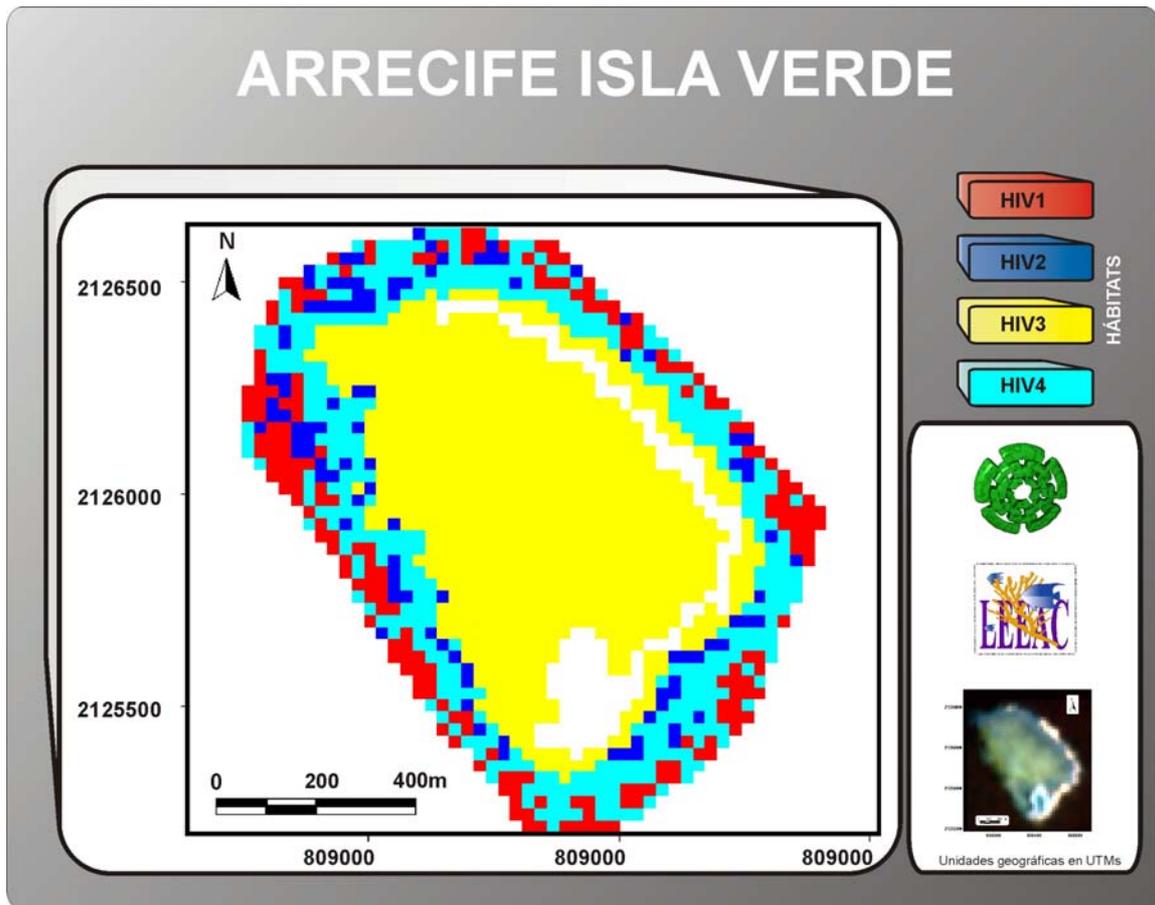


Figura 28. Imagen clasificada de hábitat del arrecife Isla verde.

## Arrecife Sacrificios

### *Descripción general*

El análisis de 8 sitios de muestreo (32 estaciones) mostró una cobertura de comunidades bentónicas de 65% y 35% de sustrato (i.e. arena, restos, etc.).

### Comunidad bentónica

La comunidad bentónica (100 %) estuvo constituido principalmente por algas (65.84%) y se distribuyeron prácticamente en todo el arrecife (Fig. 30). El segundo Gran grupo morfofuncional (GMF) más importante fue el de corales escleractínios (23.89%) el cual se encontró distribuido principalmente en la zona de sotavento arrecifal; estos dos grupos representaron el 89.75 % de la cobertura total (Fig. 29). Los GGMF que registraron el porcentaje restante pueden observarse en la Figura 30 y 31, así como su cobertura y distribución en el arrecife.

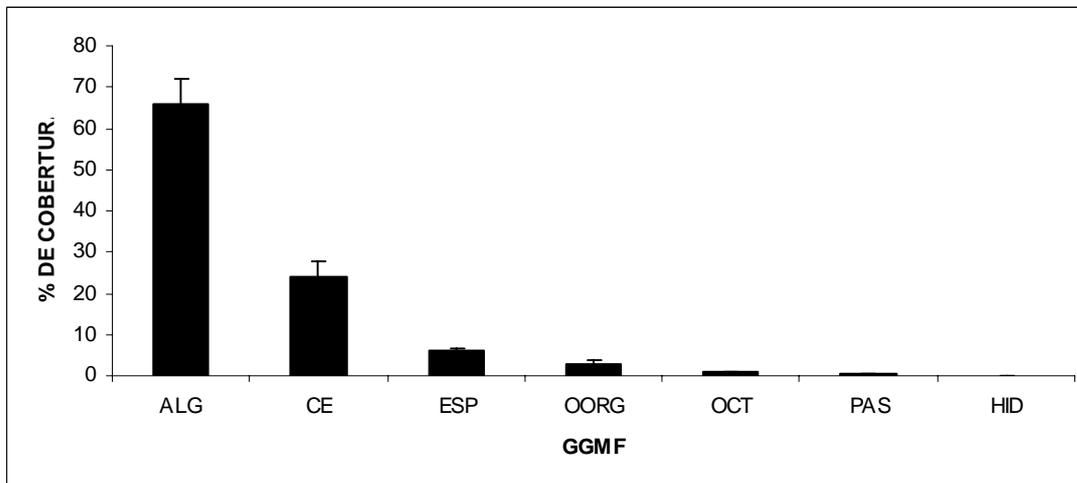


Figura 29. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), corales escleractínios (CE) esponjas (ESP), otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa), octocorales (OCT, pastos marinos (PAS) e hidrocorales (HID). Barras de error típico de la media.

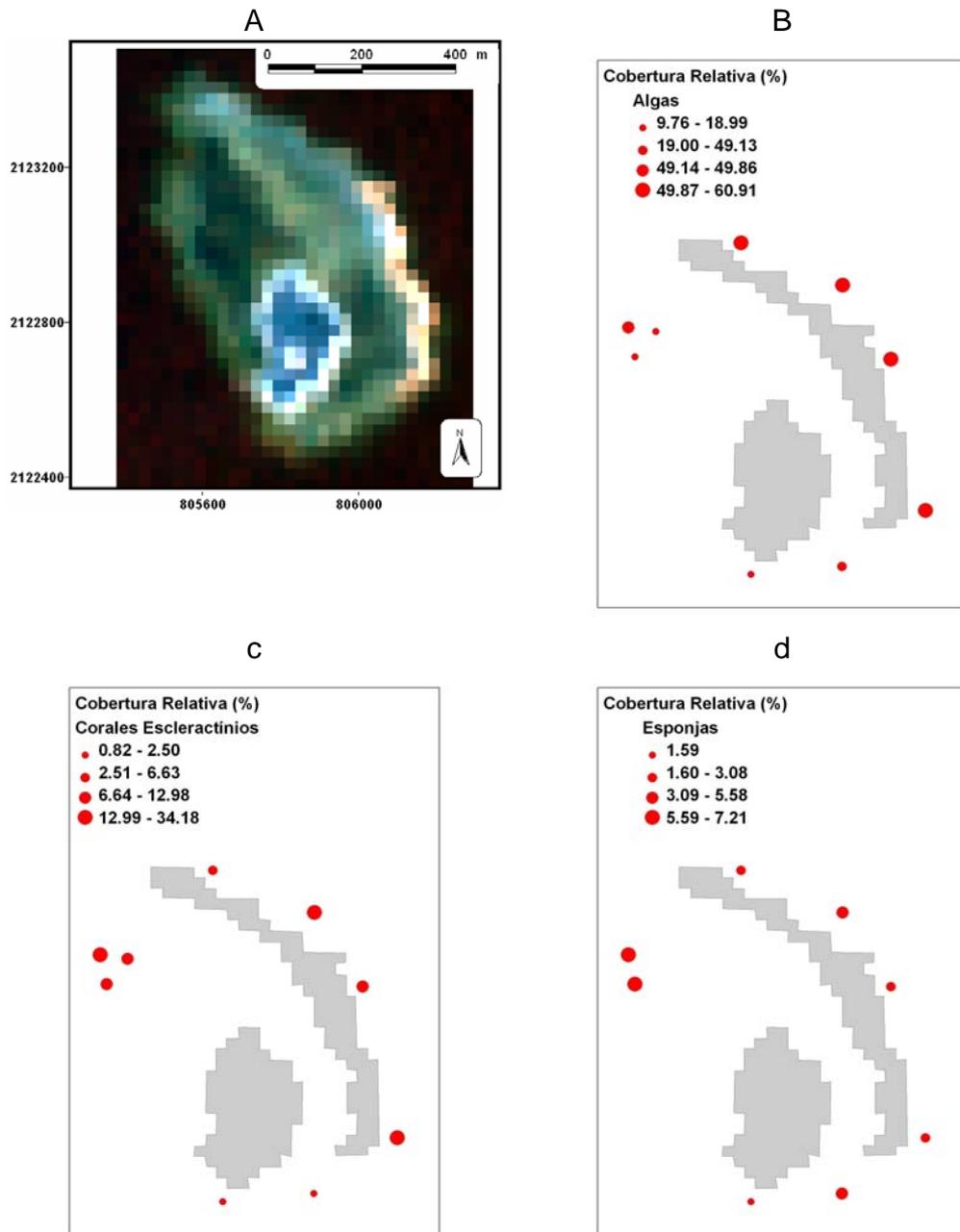


Figura 30. Sistema arrecifal de Isla Sacrificios (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), corales escleractínios (c) y esponjas (d). Unidades geográficas en UTM.

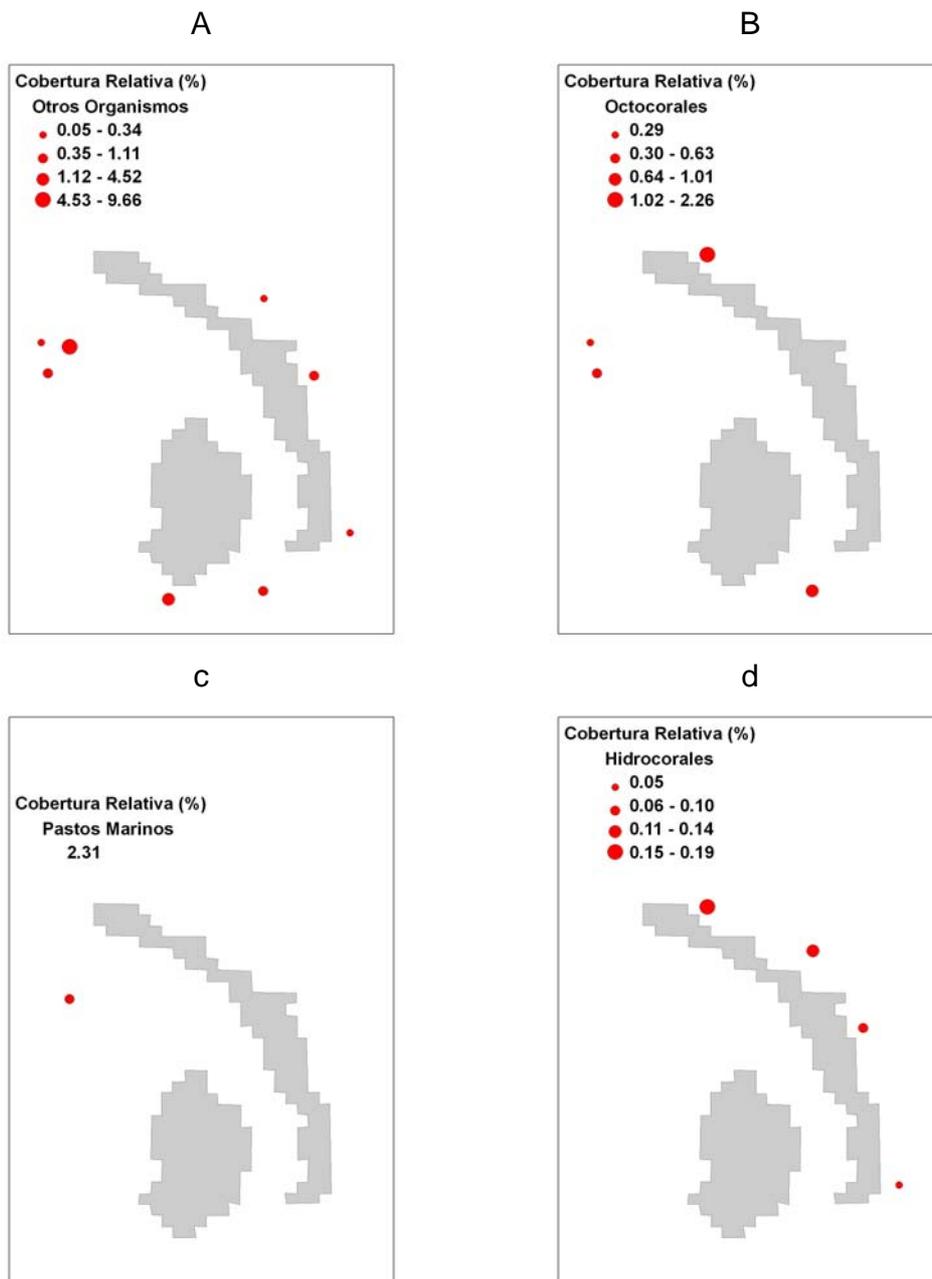


Figura 31. Distribución y cobertura (%) de otros organismos (a), octocorales (b), pastos (c) e hidrocorales (d). Unidades geográficas en UTM.

Dentro del grupo de corales escleractínios (tomado como 100 %) el grupo funcional que presentó mayor cobertura fue el semiesférico (49.45 %), seguido del coral cerebro (44.85 %), coral digitiforme (5.36 %) y coral ramificado tabular (0.35%, Figura 32).

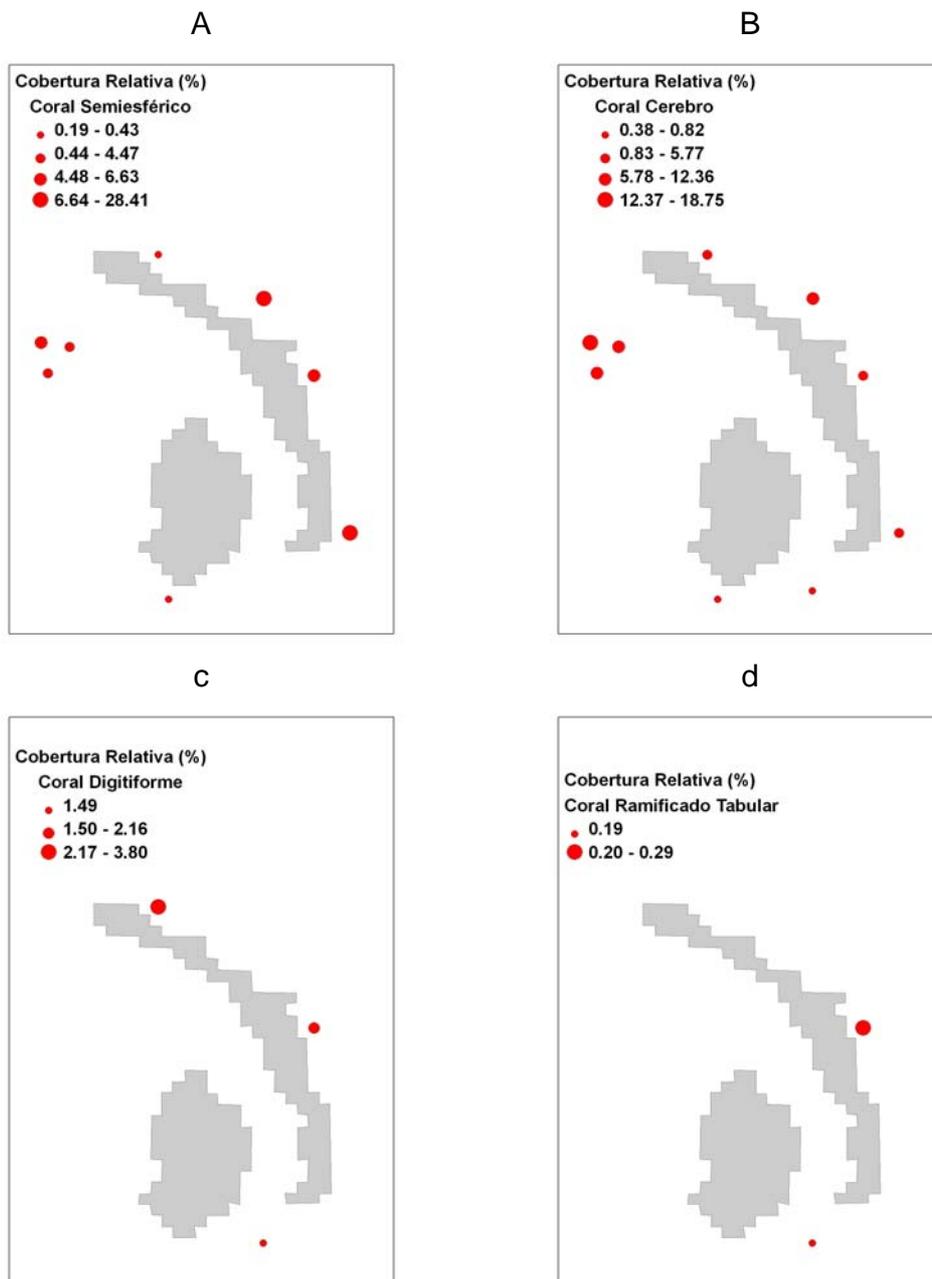


Figura 32. Distribución y cobertura (%) de coral semiesférico (a), coral cerebro (b), coral digitiforme (c) y coral ramificado tabular (d) registrados en el arrecife Isla Sacrificios.

Se registraron 4 familias de corales escleractínios (tomado como el 100%), siendo la familia Favidae la que presentó una mayor cobertura (85.24 %). La segunda familia en importancia fue Siderastreidae (9.06 %), seguida de la familia

Astrocoeniinae (5.36%) y Acroporidae (0.35). En la Figura 33 puede observarse la distribución y cobertura de estas familias.

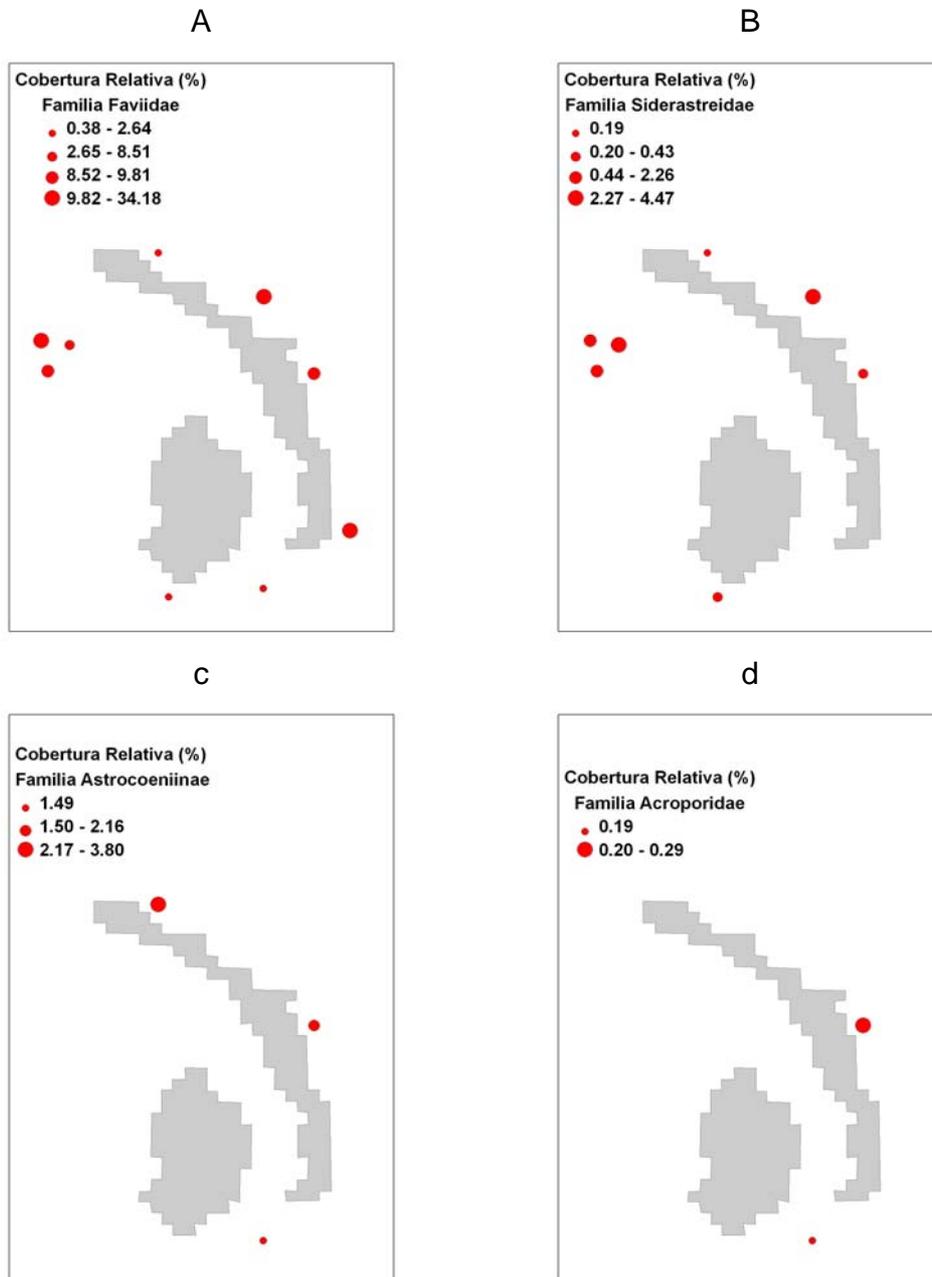


Figura 33. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Faviidae (a), Siderastreidae (b), Astrocoeniinae (c) y Acroporidae (d) registradas en el arrecife Isla Sacrificios.

Tomando en cuenta las 4 Familias, se pudieron identificar 6 géneros de coral y 7 especies. La especie con mayor cobertura fue *Montastraea cavernosa*, representada por el 41 % del total de la cobertura de corales escleractínios.

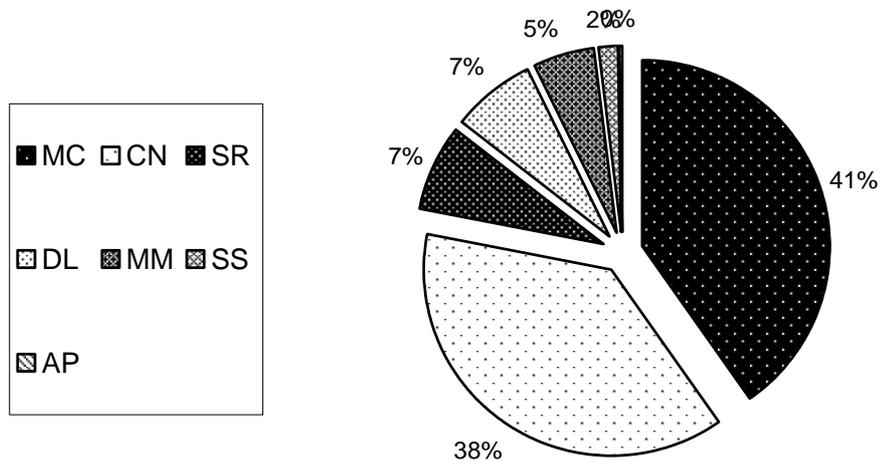


Figura 34. Composición de especies y abundancia de corales escleractinios registrados en el arrecife Isla Sacrificios. Simbología: MC= *Montastraea cavernosa*, CN= *Colpophyllia natans*, SR= *Siderastrea radians*, DS= *Diploria laberintiformes*, MM= *Meandrina meandrites*, SS= *Siderastrea siderea* y AP= *Acropora palmata*.

Las especies que le siguieron en importancia fueron *Colpophyllia natans*, *Siderastrea radians*, *Diploria laberintiformis* (38, 7 y 7 %, respectivamente). Las especies con menor cobertura fueron *Siderastrea siderea* y *Acropora palmata* (Fig. 34). La distribución y cobertura de las cuatro especies de coral más importantes pueden observarse en la figura 35.

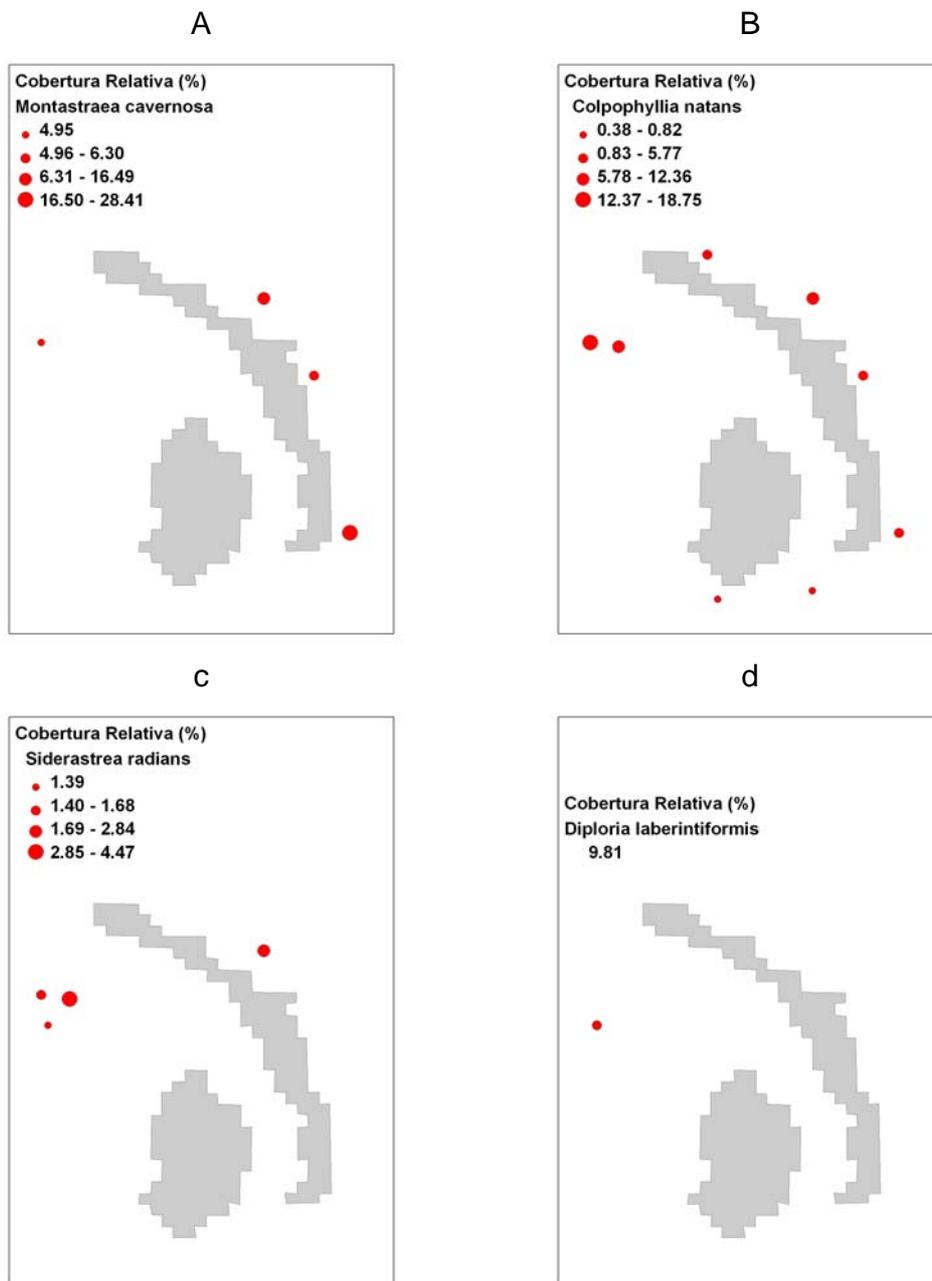


Figura 35. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Isla Sacrificios: *Montastraea cavernosa* (a), *Colpophyllia natans* (b), *Siderastrea radians* (c) y *Diploria laberintiformis* (d). Unidades geográficas en UTM.

## Sustrato

El sustrato estuvo compuesto esencialmente de pedacería de material calcáreo (73 %) y arena (27 %). Su distribución y coberturas puede observarse en la figura 36.

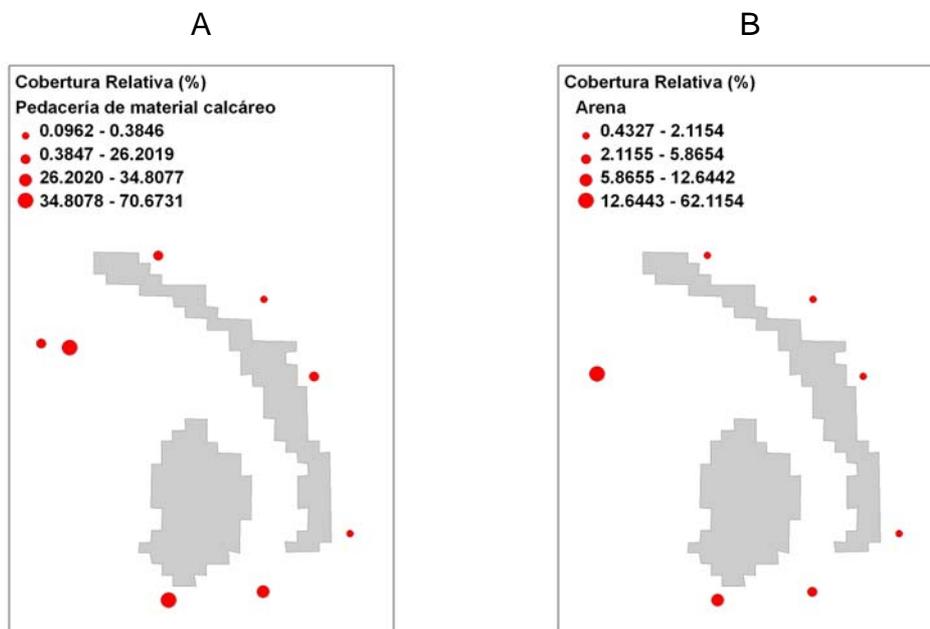


Figura 36. Distribución y cobertura (%) de los 2 tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife Isla Sacrificios: Pedacería de material calcáreo (a) y Arena (b).

## Hábitats arrecifales

El cluster resultado del análisis de agrupamiento mediante la utilización el coeficiente de similitud de Bray-Curtis discriminó 4 grupos, cada uno considerado como un hábitat (Fig. 37). Cada uno de los hábitats fue descrito en base a sus características geomorfológicas y bióticas, ver Tabla 13.

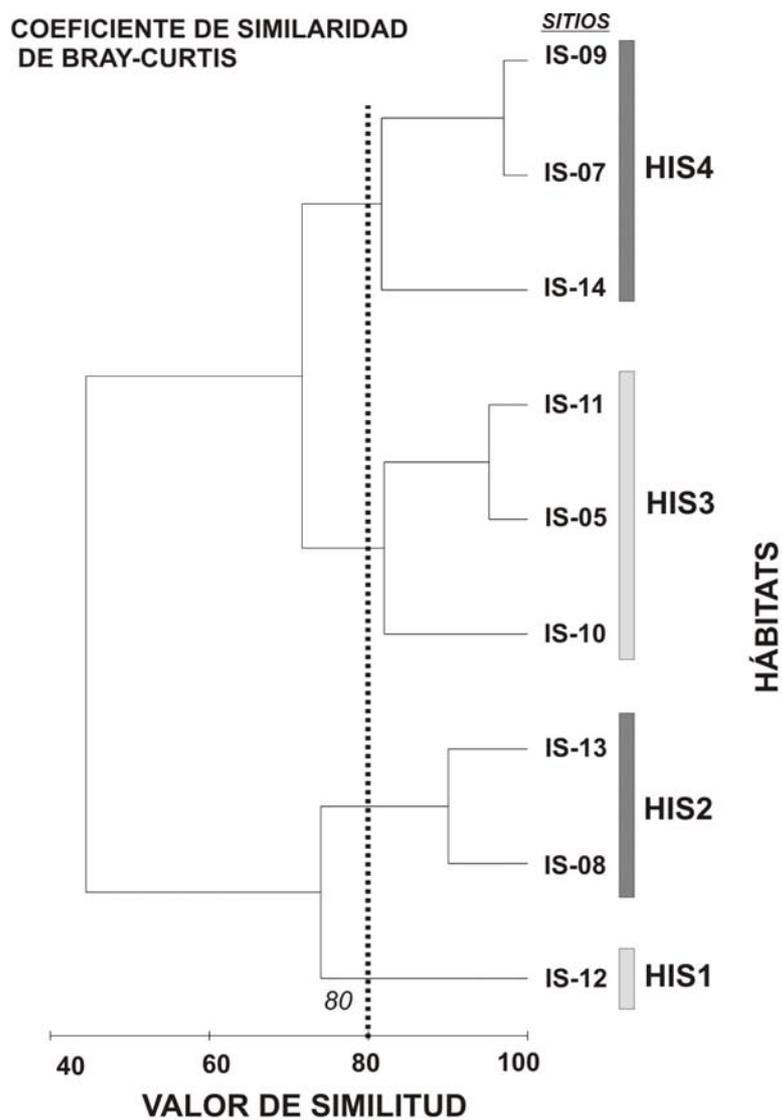


Figura 37. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Isla Sacrificios: HIS1, HIS2, HIS3 y HIS4.

Tabla 13. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Isla Sacrificios.

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
HIS1	83.3% Sustrato	84.82% pedacería de material calcáreo 15.18% Arena	
	9.76% Algas	83.25% Macroalgas Verdes/café 13.3 % Algas filamentosas (TURF) 3.45% Costrosa coralina	
	4.52% organismos	100% Erizos	
	1.59% Esponjas	63.64% costrosa/incrustante 36.36% tubular	
	0.82% Corales escleractínios	52.77% Coral semiesférico 46.9% Cerebro	100% <i>Siderastrea siderea</i> 100% <i>Colpophylia natans</i>
HIS2	59.09% Sustrato	52.56% Arena	
	18.10% Algas	47.43% Pedacería de material coralino 44.76 Macroalgas Verdes/café 15.80 Algas filamentosas (TURF) 39.44 Costrosa coralina	
	12.52 % Corales escleractínios	3.37% Coral semiesférico  9.16% Cerebro	87.02% <i>Siderastrea radians</i> 12.84% <i>Siderastrea siderea</i> 53.54% <i>D. laberintiformes</i> 46.45% <i>Colpophylia natans</i>
	5.22% Organismos	7.37% Palytoa 92.56% Erizos	
	3.61% Esponjas	3.33 % vaso 96.55% costrosa/incrustante	
	1.15% Pastos		100% <i>Thalassia testudinum</i>
	0.31% Octocorales		100% <i>Gorgonia sp.</i>
HIS3	55.46% Algas	75.12% Algas filamentosas (TURF) 24.87% Algas costrosa coralina	
	30.91% Sustrato	90.94% Pedacería de material calcáreo 9.07% arena	
	7.18% Corales escleractínios	2.28% Coral semiesférico  2.26% Cerebro 0.16% C RAM Tabul	7.73% <i>Siderastrea siderea</i> 92.08% <i>M. cavernosa</i> 100% <i>Colpophylia natans</i> 100% <i>A. palmata</i> 100% <i>Madrasis mirabilis / M. decactis</i>
	3.54% Esponjas	2.48% Coral digitiforme 97.33% costrosa/incrustante 2.72% Tubular	
	1.09% Octocorales	55.40% Ramificación dicotómica 45.58% Ramificación pinnada	
	0.66% organismos	1.71% Erizos	
	0.10% Corales de fuego hidrocoral	Ramificado	100% <i>M. alcornis</i>

Continuación...

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
HIS4	56.92% Algas	91% Algas filamentosas (TURF) 8.98% Algas Costrosa coralina 0.03% Macroalgas Verdes/cafes	
	30.54% Corales escleractinios	18.25% Coral Semiesferico	91.06% <i>M. cavernosa</i> 8.25% <i>Siderastrea radians</i> 0.70% <i>Siderastrea siderea</i>
	6.92% Sustrato	16.21% arena 83.83% pedaceria de material calcareo	
	5.27% Esponjas	52% tubular 47.13% costrosa/íncrustante 0.91% Semiesférica	
	0.18% Organismos	100 % Erizos	
	0.10 Octocorales	100% Ramificación dicotómica	
	0.06 corales de fuego hidrocorales	100 % incrustante	100% <i>M. complanata</i>

Para examinar las características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios, se estimó la riqueza de especies, el índice de diversidad de Shannon-Wiener y el índice de equidad de Pielou (ver Tabla 14). En cuanto a la Riqueza de especies, el hábitat que presentó la mayor riqueza fue el Hábitat HIS3 con 5 especies, seguido del Hábitat HIS2 y HIS4 con 4 especies. El hábitat que presentó la menor riqueza fue HIS1 con 2 especies.

El valor más bajo del índice de diversidad Shannon-Wiener, fue el HIS1 (0.69 bits/individuo), debido a la existencia de un número limitado de especies. El hábitat HIS4 presentó un índice de diversidad de 0.86 (bits/individuo). El hábitat HIS2 presentó una clara dominancia de la especie de coral *Siderastrea radians*, sin embargo se registró un valor de diversidad de 1.19 (bits/individuo). En contra parte, el hábitat que presentó un mayor índice de diversidad fue HIS3 con un valor de 1.26 (bits/individuo; Tabla 14).

Tabla 14. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife Isla Sacrificios.

HÁBITAT	Riqueza de especies	Valor de Diversidad (H')	Índice de Equidad
HIS1	2	0.69	0.99
HIS 2	4	1.19	0.85
HIS 3	5	1.26	0.78
HIS 4	4	0.86	0.62

El ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó que no hubo diferencias significativas la cobertura de corales escleractínios ( $H= 3.03153$ ,  $p >> 0.05$ , con un 95% del nivel de confianza) entre los hábitats.

El análisis de similitud en porcentaje (SIMPER) mostró que la especie *Siderastrea radians* contribuyó con un 100% a la similitud del hábitat HIS2. En el hábitat HIS3 las especies de *Madrasis mirabilis* y *Colpophylia natans* contribuyen a la similitud con 55.17 % y 41.4 %, respectivamente,. Finalmente *Montastraea cavernosa* (49.41%) y *Colpophylia natans* (47.13%) fueron las especies que contribuyeron a la mayor similitud dentro del hábitat HI24 (Tabla 15).

Tabla 15. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%).

GRUPO DE HÁBITAT		
<i>Hábitat HIS1</i>		
Menor de dos muestras		
<i>Hábitat HIS2</i>		
% de similitud: 11.13		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Siderastrea radians</i>	100	100
<i>Hábitat HIS3</i>		
% de similitud: 45.53		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Madrasis mirabilis</i>	55.17	55.17
<i>Colpophylia natans</i>	41.46	96.63
<i>A. palmata</i>	1.89	98.52
<i>Siderastrea siderea</i>	1.48	100
<i>Hábitat HIS4</i>		
% de similitud: 56.43		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>M. cavernosa</i>	49.41	49.41
<i>Colpophylia natans</i>	47.13	96.54
<i>Siderastrea radians</i>	3.46	100

Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales

La imagen clasificada de hábitat mostró una precisión (matriz de confusión – análisis de Kappa) de 0.85 (Fig. 38)

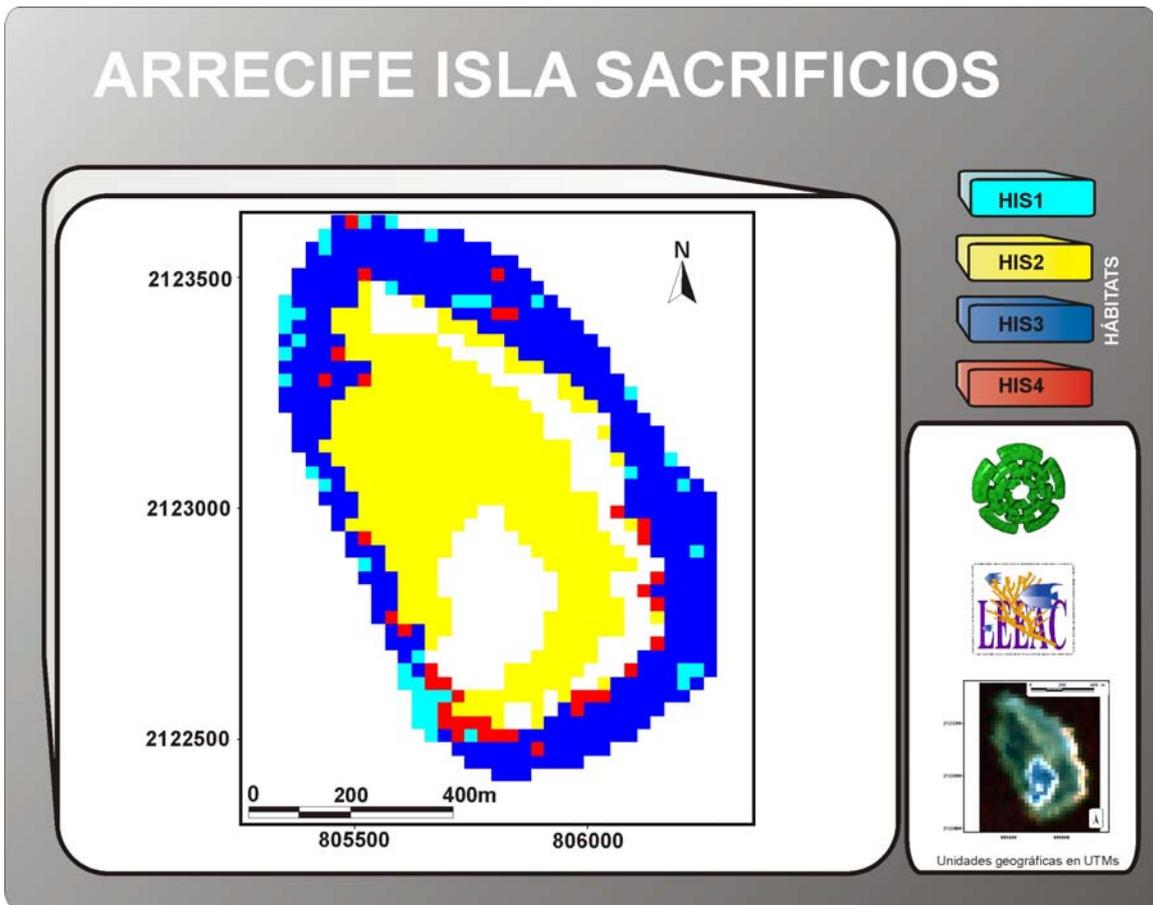


Figura 38. Imagen clasificada de hábitat de Isla Sacrificios.

## Arrecife La Blanca

### *Descripción general*

El análisis de 8 sitios de muestreo (32 estaciones) mostró una cobertura de comunidades bentónicas de 79.42 %, 20.58% de sustrato (i.e. arena, restos, etc.) y 0.01% de elementos no identificables.

### Comunidad bentónica

La comunidad bentónica (100 %) estuvo constituido principalmente por algas (57.79%) y se distribuyeron prácticamente en todo el arrecife (Fig. 40). El segundo Gran grupo morfofuncional (GMF) más importante fue el de corales escleractínios (26.91 %) el cual se encontró distribuido principalmente en la zona de sotavento arrecifal. Estos dos grupos representaron el 84.7 % de la cobertura total (Fig. 39). Los GGME que registraron el porcentaje restante pueden observarse en la Figura 40 y 41, así como su cobertura y distribución en el arrecife.

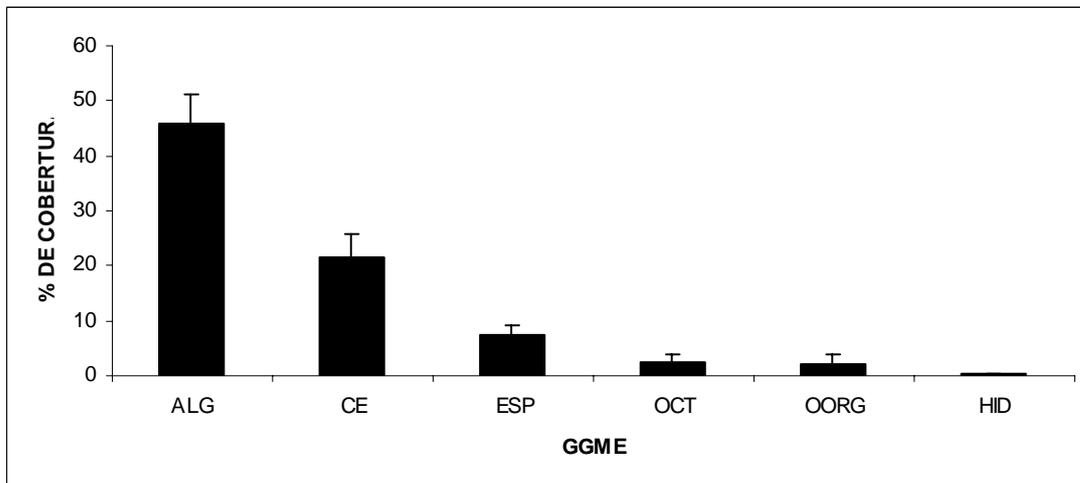


Figura 39. Variación de la Cobertura de los GGME: algas (ALG), corales escleractínios (CE) esponjas (ESP), octocorales (OCT), otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa) e hidrocorales (HID). Barras de error típico de la media.

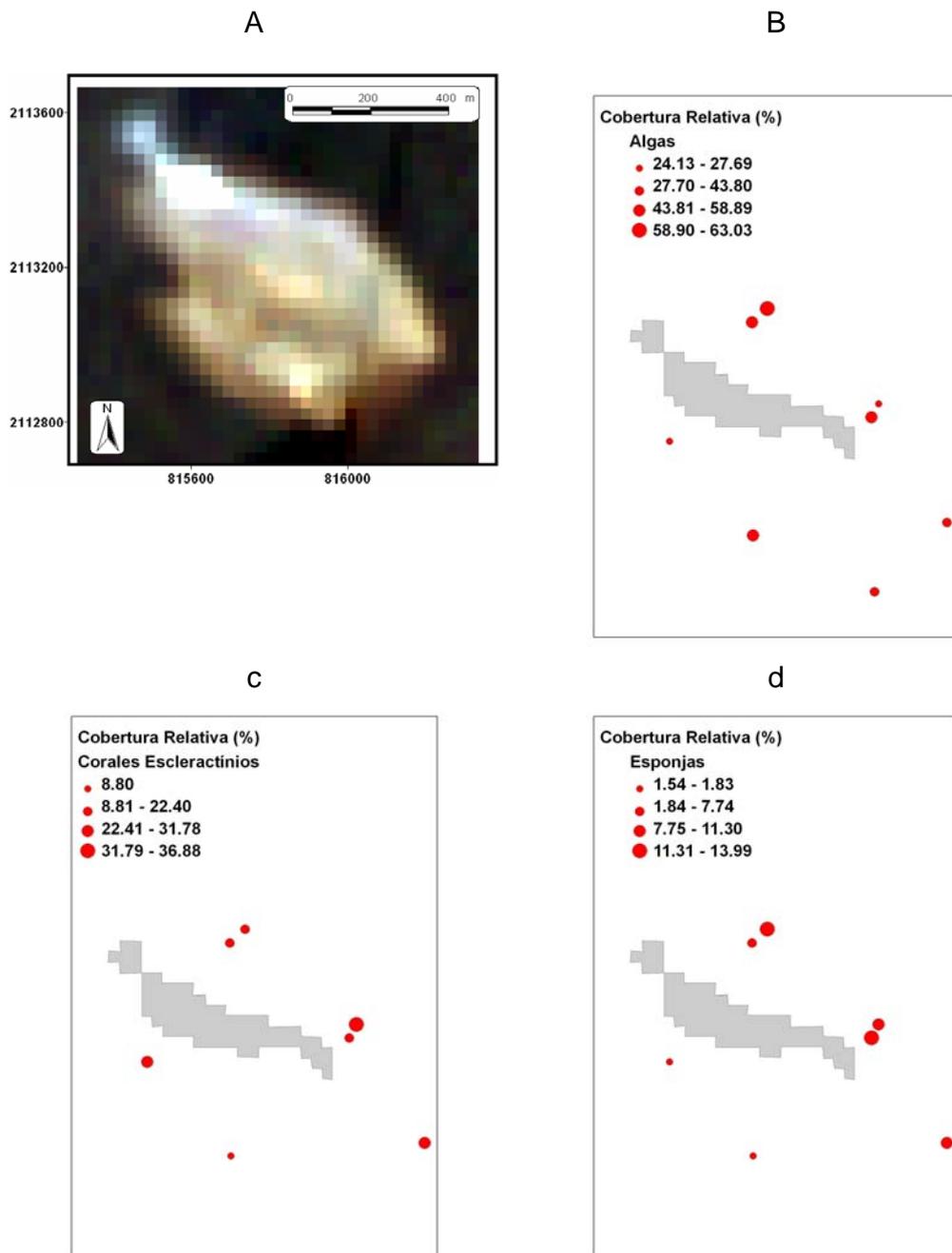


Figura 40. Sistema arrecifal La Blanca (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), corales escleractínios (c) y esponjas (d). Unidades geográficas en UTMs.

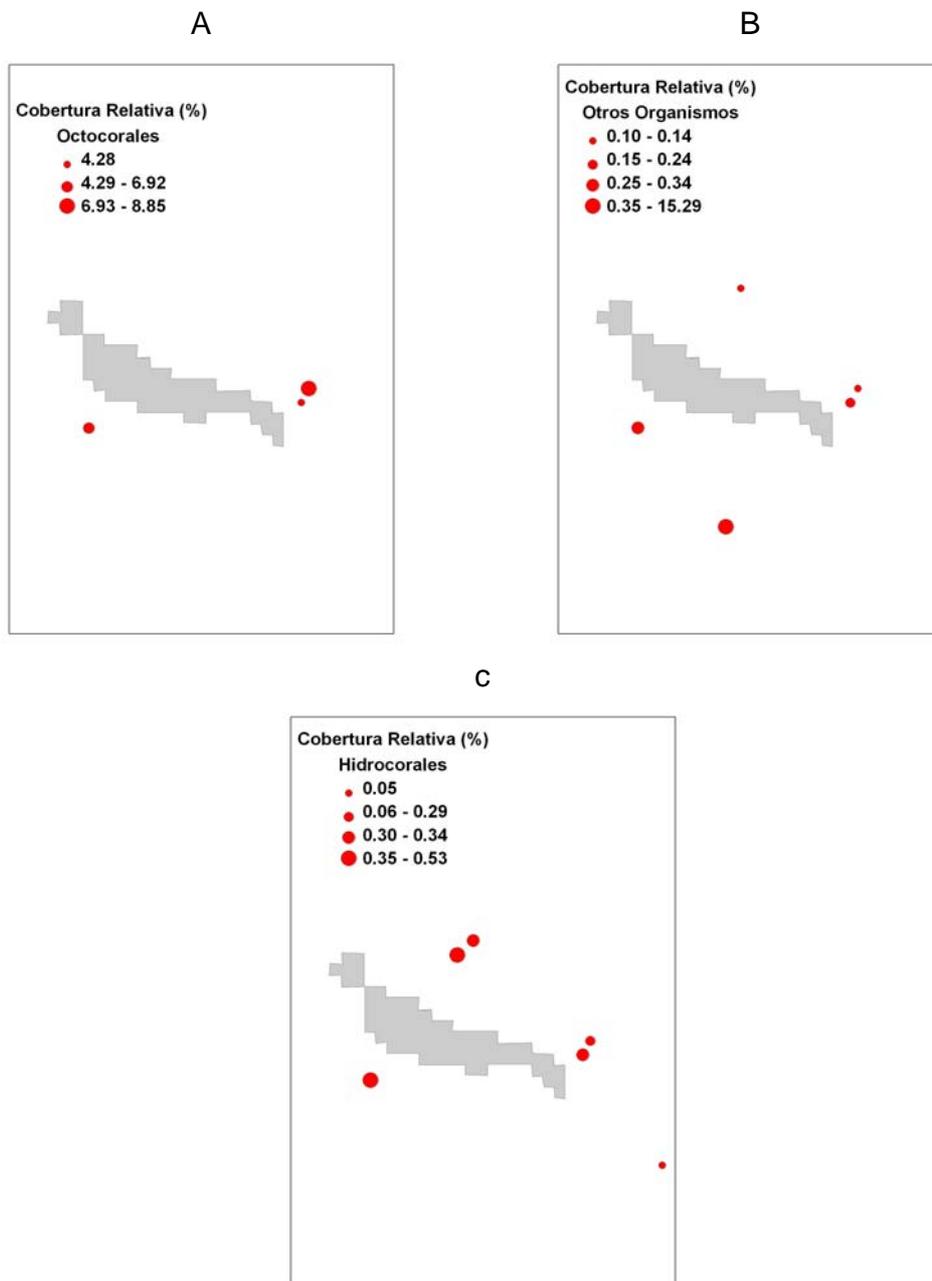


Figura 41. Distribución y cobertura (%) de octocorales (a), otros organismos (b) e hidrocorales (d). Unidades geográficas en UTM.

Dentro del grupo de corales escleractínios (tomado como 100 %) el grupo funcional que presentó la mayor cobertura fue el semiesférico (41.82 %), seguido del coral cerebro (41.54 %), coral digitiforme (7.9 %) y coral submasivo (6.83%, Figura 42).

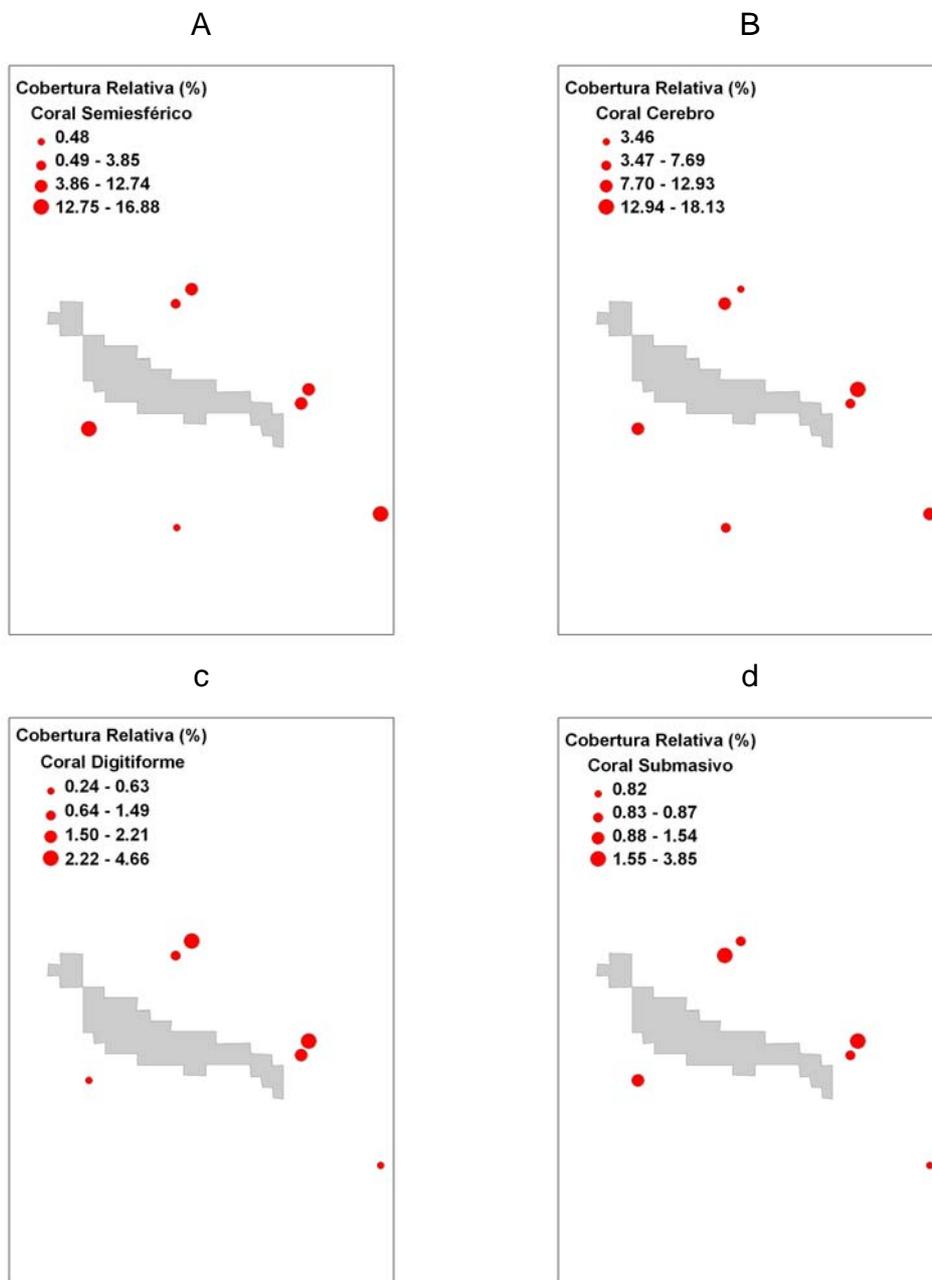


Figura 42. Distribución y cobertura (%) de coral semiesférico (a), coral cerebro (b), coral digitiforme (c) y coral submasivo (d) registrados en el arrecife La Blanca.

Se registraron 4 familias de corales escleractínios (tomado como el 100%), siendo la familia Favidae la que presentó una mayor cobertura (73.43 %). La segunda familia en importancia fue Siderastreidae (16.76 %), seguida de la familia

Astrocoeniinae (7.79 %) y Agariciidae (1.07%). La distribución y cobertura de éstas familias puede observarse su en la Figura 43.

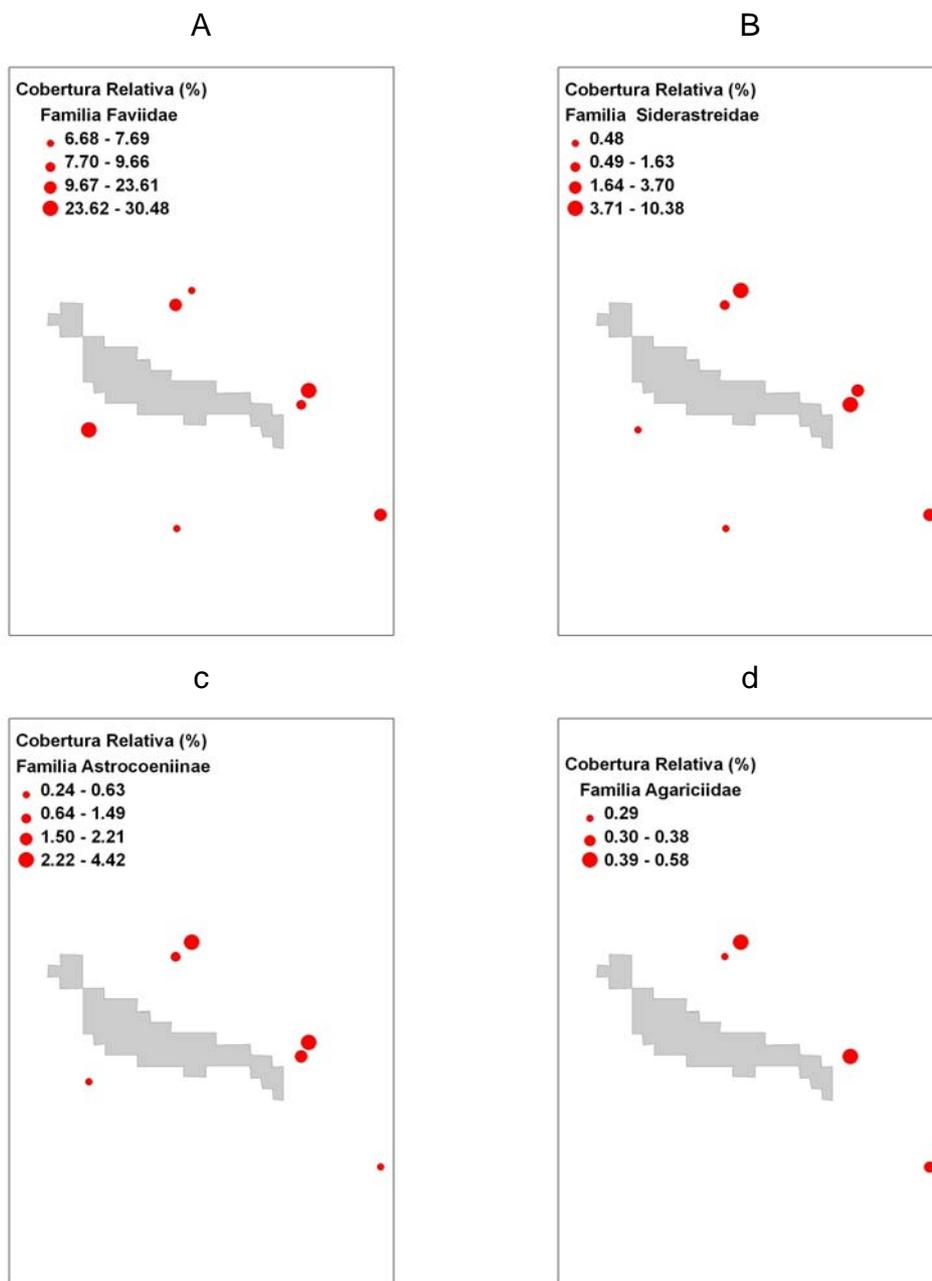


Figura 43. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Faviidae (a), Siderastreidae (b), Astrocoeniinae (c) y Agariciidae (d) registradas en el arrecife La Blanca.

Tomando en cuenta las 4 Familias encontradas, se identificaron 12 especies de coral. Las especie con mayor cobertura fue *Colpophyllia natans*, representada por el 41 % del total de la cobertura de corales escleractínios.

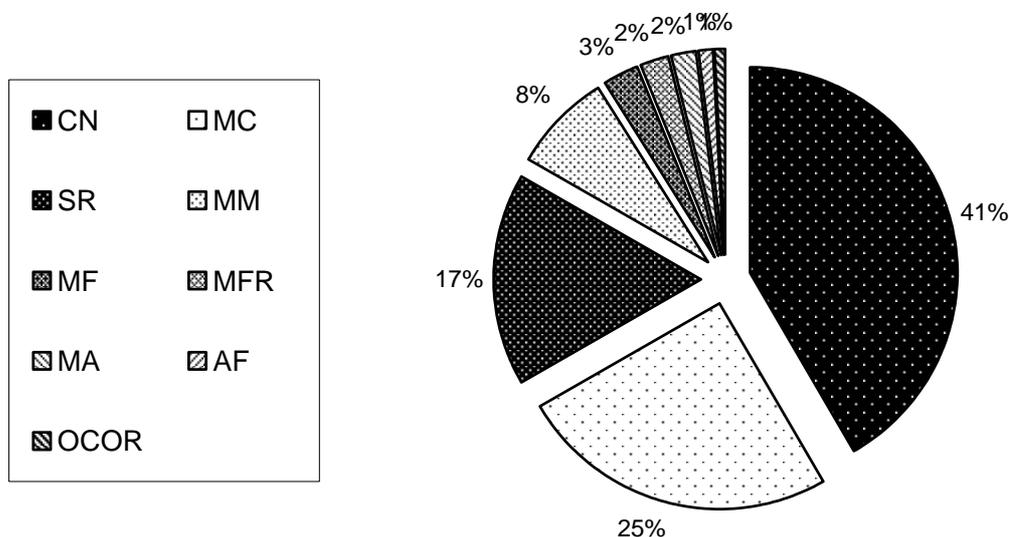


Figura 44. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife La Blanca. Simbología: CN= *Colpophyllia natans*, MC= *Montastraea cavernosa*, SR= *Siderastrea radians*, MM= *Meandrina meandrites*, MF= *Montastraea faveolata*, MFR= *Montastraea franksi*, MA= *Montastraea annularis*, AF= *Agaricia faveolata*, OCOR= Otros corales (AP= *Acropora palmata*, AC= *Acropora cervicornis*, PP= *Porites porites* y OD= *Oculina diffusa*).

Las especies que le siguieron en importancia fueron *Montastraea cavernosa*, *Siderastrea radians* y *Meandrina meandrites* (25.06, 16.76 y 7.79 %, respectivamente). Las especies con menor cobertura fueron *Porites porites* y *Oculina diffusa* (Fig. 44). La distribución y cobertura de las cuatro especies de coral más importantes pueden observarse en la figura 45.

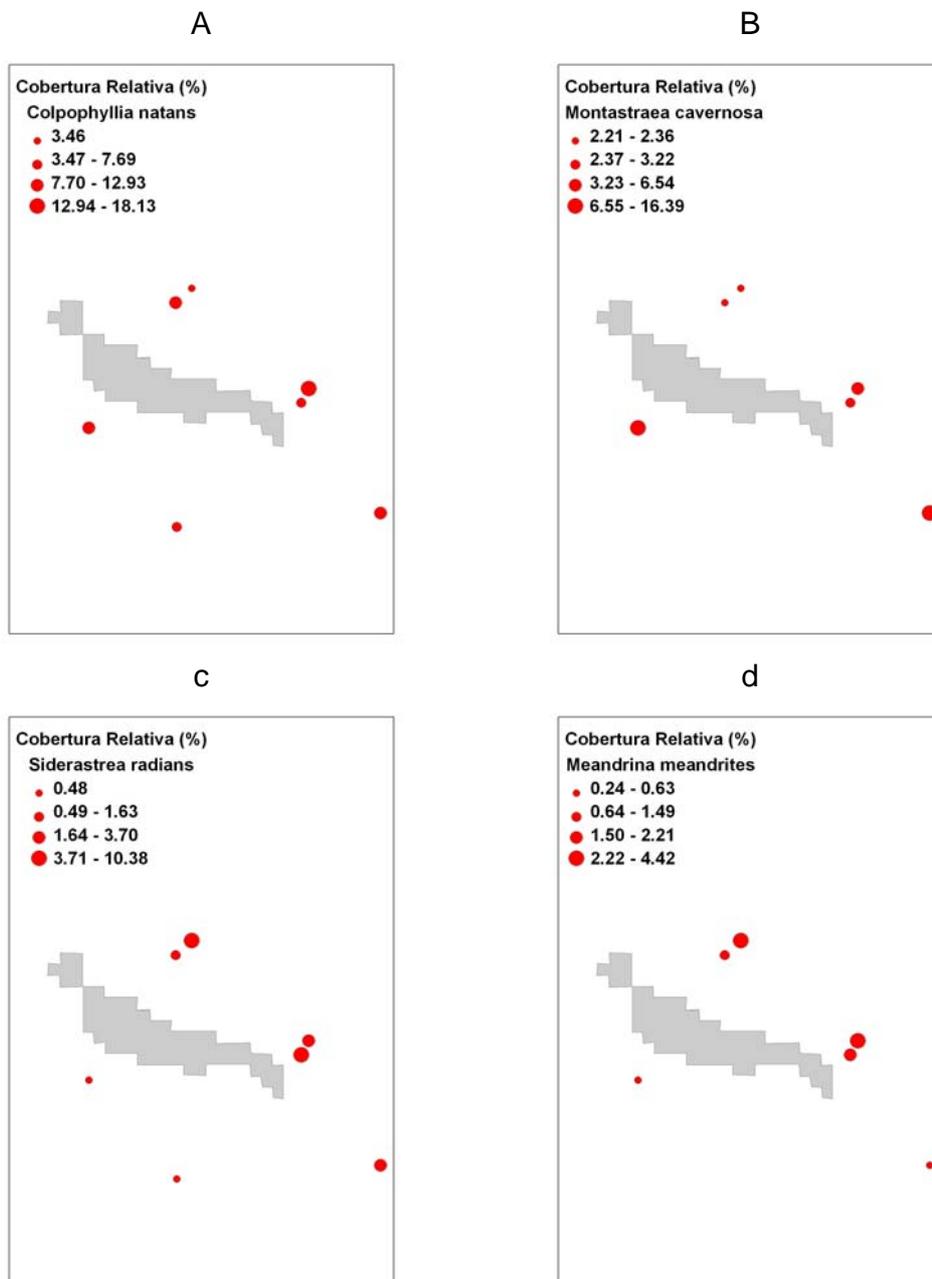


Figura 45. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife La Blanca: *Colpophyllia natans* (a), *Montastraea cavernosa* (b), *Siderastrea radians* (c) y *Meandrina meandrites* (d). Unidades geográficas en UTM.

### Sustrato

El sustrato estuvo compuesto esencialmente de pedacería de material calcáreo (56.93%) y arena (41.58 %). El piso parejo, pavimento con rocas grandes y elementos no identificables presentaron muy bajas coberturas (4.58, 0.06 y 0.03

%, respectivamente). La distribución y cobertura de los dos principales sustratos se observan en la figura 46.

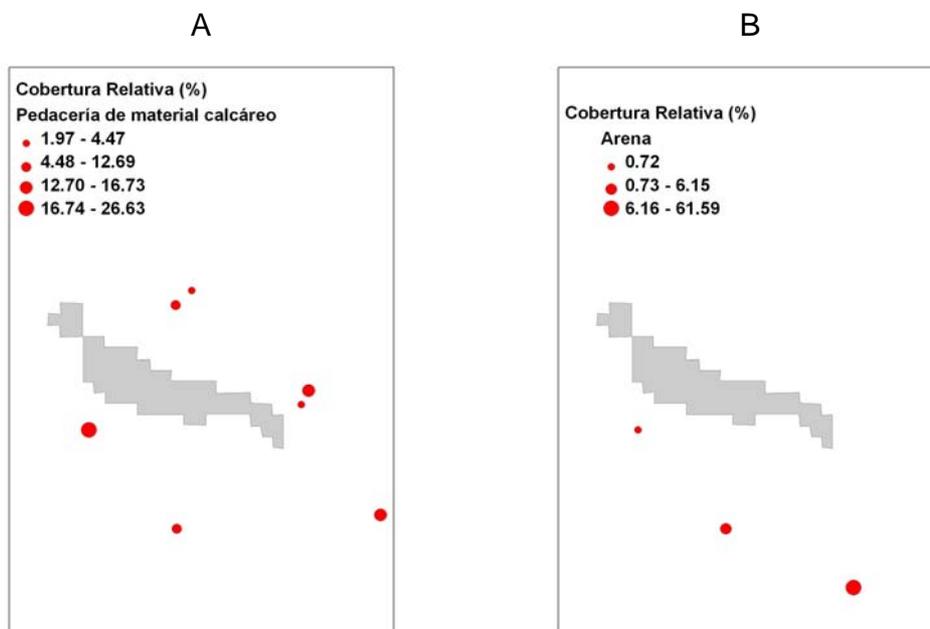


Figura 46. Distribución y cobertura (%) de los dos tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife La Blanca: Pedacería de material calcáreo (a) y Arena (b). Unidades geográficas en UTM.

## Hábitats arrecifales

El cluster resultado del análisis de agrupamiento mediante la utilización el coeficiente de similitud de Bray-Curtis discriminó 4 grupos, cada uno considerado como un hábitat (Fig. 47). Cada uno de los hábitats fue descrito en base a sus características geomorfológicas y bióticas, ver Tabla 16.

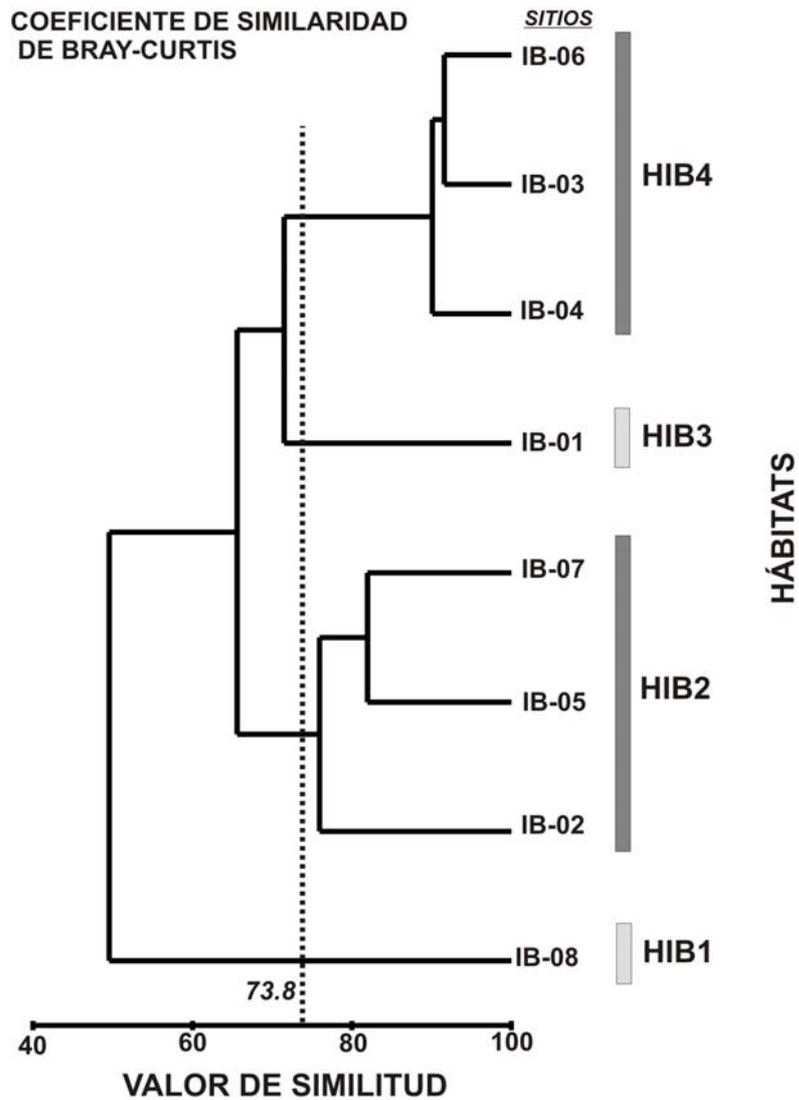


Figura 47. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife La Blanca: HIB1, HIB2, HIB3 y HIB4.

Tabla 16. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife La Blanca.

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características	
HIB1	38.41% Algas	10.26% Macroalgas Verdes/café		
	61.58% sustrato	89.74% Algas filamentosas (TURF) 100% Arena		
HIB2	32.26% Corales escleractínios	14.25% Coral semiesférico	17.99% <i>Siderastrea radians</i> 81.98% <i>M. cavernosa</i> 100% <i>Colpophylia natans</i> 36.14% <i>M. annularis</i> 40.06% <i>Montastrea franksi</i> 23.57% <i>Montastrea faveolata</i> 100% <i>A. cervicornis</i> 20.03% <i>Oculina diffusa</i> 80.13% <i>Agaricia fragilis</i>	
	31.88% Algas	87.57% Algas filamentosas (TURF) 7.89% Macroalgas Verdes/café 4.52% ALGAS Costrosa coralina		
	22% sustrato	88.21% pedacera de material calcáreo 10.73% piso parejo 1.07% arena		
	7.77% Esponjas	55.59% costrosa/incrustante 43.52% tubular		
	5.26% Octocoral	0.83% Semiesférica 88.20% Ramificación dicotómica 5.98% Ramificación arborescente 3.89% Ramificación pinnada		
	0.26 Corales de fuego hidrocoral	92.46% Ramificado 6.16% Incrustante	<i>M. alcicornis</i> <i>M. complanata</i>	
	HIB 3	55.43% Algas	41.92% Algas Costrosa coralina 13.46% Algas filamentosas (TURF) 0.05% Macroalgas Verdes/café	
		18.94% Sustrato	12.69% pedacera de material calcáreo 6.15% arena 0.10% pavimento/rocas grandes	
		15.29% Organismos	100% Erizos	
		8.80% Corales escleractínios	7.69% Coral semiesférico 0.63% Cerebro C Ram Tabul.	100% <i>Siderastrea radians</i> 100% <i>Colpophylia natans</i> 100% <i>A. palmata</i>
1.54% Esponjas		1.35% tubular 0.19% costrosa/incrustante		

Continuación...

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características	
HIB4	59.23% Algas	64.94% Algas filamentosas (TURF)		
		34.93% ALGAS Costrosa coralina		
		0.14% Macroalgas Verdes/café		
	29.79% Corales escleractínios	43.24% Coral semiesférico		72.47% <i>Siderastrea radians</i> 27.56% <i>M. cavernosa</i> 100% <i>Colpophylia natans</i>
		33.61% Cerebro		
		8.53% Submasivo		
		2.21% Copa y flor		100% <i>Agaricia fragilis</i>
	11.41% Esponjas	23.74% Semiesférica		
		23.74% Costrosa/incrustante		
		4.21% tubular		
	5.63% Sustrato	100% pedacería de material calcáreo		
	1.43% Octocoral	73.96% Ramificación dicotómica		
25.78% Ramificación arborescente				
0.40% CORALES DE FUEGO HIDROCORAL	28.04% Ramificado		<i>M. alcornis</i>	
	72.12% folioso		<i>M. complanata</i>	
0.11% Organismos	100% Erizos			

El hábitat que presentó la mayor riqueza fue el Hábitat HIB2 con 11 especies, seguido del Hábitat HIB4 con 8 especies. El hábitat HIB3 presento 3 especies y el HIB1 no se registró ninguna especie de coral escleractínio.

El valor más bajo de índice de diversidad encontrado (Shannon-Wiener) fue en el hábitat HIB3 (0.46 bits/individuo), seguido del hábitat HIB2 ( 1.4 bits/individuo). El hábitat HIB4 fue el que presentó el mayor valor índice de diversidad con 1.62 bits/individuo. El hábitat que presentó el mayor valor de equidad fue el HIB4 (0.78) y el hábitat HIB3 fue el que presentó el menor valor (0.52). Ver Tabla 17.

Tabla 17. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife La Blanca.

HÁBITAT	Riqueza de especies	Valor de Diversidad (H')	Índice de Equidad
HIB1	0	0	0
HIB2	11	1.411	0.58
HIB3	3	0.4641	0.42
HIB4	8	1.622	0.78

El ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó diferencias significativas ( $H=7.0$ ,  $p<0.05$ , con un 95% del nivel de confianza) entre los diferentes hábitat. Al encontrarse diferencias significativas con esta prueba se procedió a comparar por pares de hábitats con la prueba de Mann-Whitney, ver Tabla 18.

Tabla 18. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats.

HÁBITAT/HÁBITAT	HIB2	HIB3	HIB4
HIB2			
HIB3	X		
HIB4	O	O	

X=  $p < 0.05$  Diferencia significativa (Hábitats diferentes)

O =  $p > 0.05$  No diferencia significativa (Hábitats similares)

El análisis de similitud en porcentaje (SIMPER) mostró que las especies de *Colpophylia natans* y *Montastraea cavernosa* contribuyen con 50.39% y 38.2% , respectivamente, a la similitud del hábitat HIB2. En el hábitat HIB4 las especies de *Colpophylia natans* y *Siderastrea radians* contribuyen con una 32.14 y 30.38 %, respectivamente, a la similitud (Tabla 19).

Tabla 19. Especies de corales escleractínios dentro de hábitat basado en el coeficiente de similitud de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similitud (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%).

GRUPO DE HÁBITAT		
<i>Hábitat HIB1</i>		
Menor a dos muestras		
<i>Hábitat HIB2</i>		
% de similitud: 69.48		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Colpophylia natans</i>	50.39	50.39
<i>M. cavernosa</i>	38.2	88.59
<i>Siderastrea radians</i>	6.62	95.21
<i>M. annularis</i>	1.9	97.11
<i>Madrasis mirabilis</i>	1.64	98.75
<i>Montastrea franksi</i>	0.78	99.53
<i>Montastrea faveolata</i>	0.47	100
<i>Hábitat HIB3</i>		
Menor a dos muestras		
<i>Hábitat HIB4</i>		
% de similitud: 59.55		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Colpophylia natans</i>	32.14	32.14
<i>Siderastrea radians</i>	30.38	62.52
<i>M. cavernosa</i>	17.42	79.94
<i>Madrasis mirabilis</i>	13.36	93.3
<i>Agaricia fragilis</i>	2.97	96.27
<i>Montastrea franksi</i>	2.24	98.52
<i>Montastrea faveolata</i>	1.48	100

Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales

La imagen clasificada de hábitat mostró una precisión (matriz de confusión – análisis de Kappa) de 0.88 (Fig. 48)

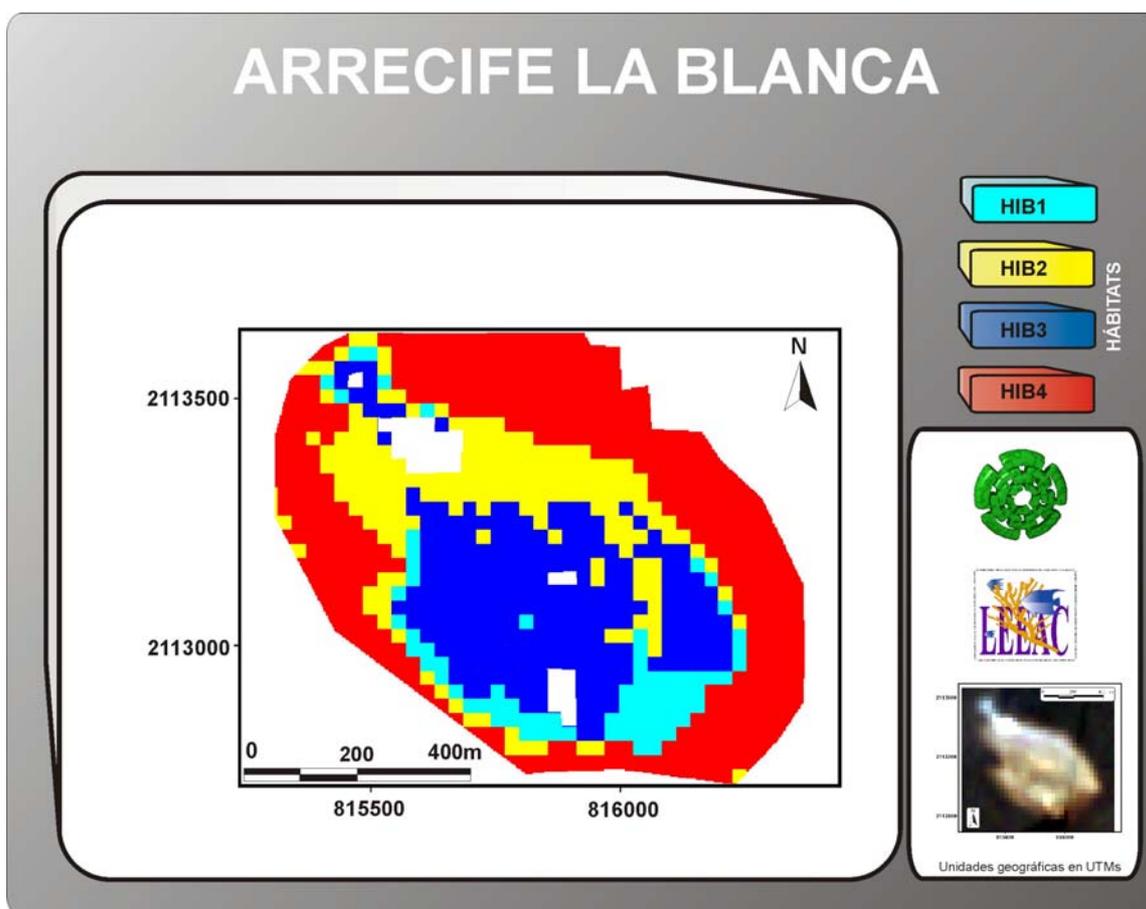


Figura 48. Imagen clasificada de hábitats del arrecife La Blanca.

## Arrecife Isla de En medio

### *Descripción general*

El análisis de 9 sitios de muestreo (36 estaciones) mostró una cobertura de comunidades bentónicas de 81.37 % y 18.63 % de sustrato (i.e. arena, restos, etc.).

### Comunidad bentónica

La comunidad bentónica (100 %) estuvo constituida principalmente por algas (61.01 %) que se distribuyeron prácticamente en todo el arrecife (Fig. 50). El segundo Gran grupo morfofuncional (GMF) más importante fue el de esponjas (10.54 %) el cual se distribuyeron principalmente en la zona de sotavento arrecifal. Estos dos grupos representaron el 71.55 % de la cobertura total (Fig. 49). La coberturas y distribución de los GGMF que registraron el porcentaje restante pueden observarse en la Figura 50 y 51,.

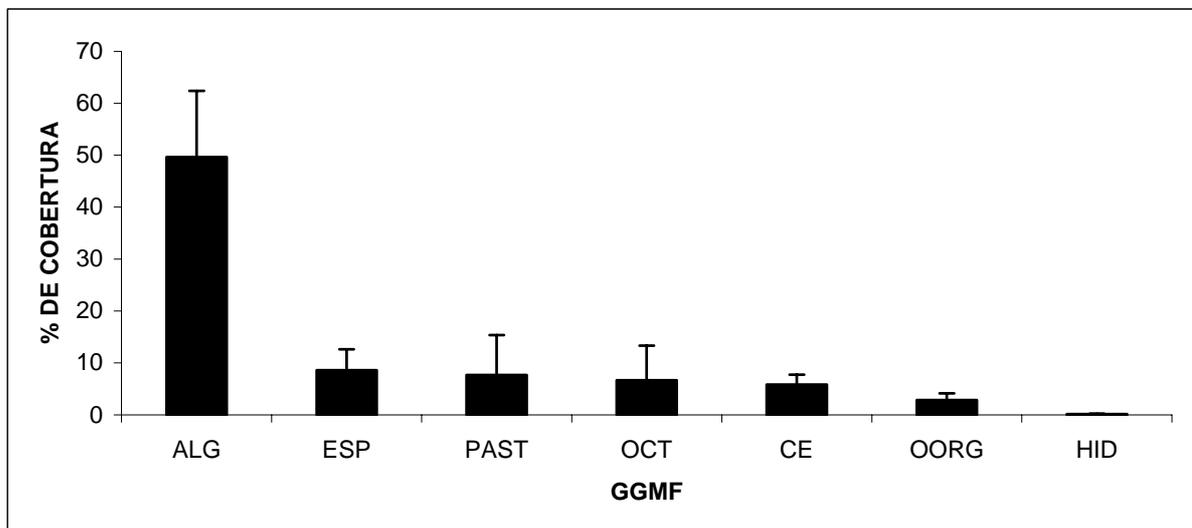


Figura 49. Variación de la Cobertura de los GGMF: algas (ALG), esponjas (ESP), octocorales (OCT), pastos (PAST), corales escleractínios (CE) otros organismos (OORG, organismos vagiles, sésiles y palytoa) e hidrocorales (HID). Barras de error típico de la media.

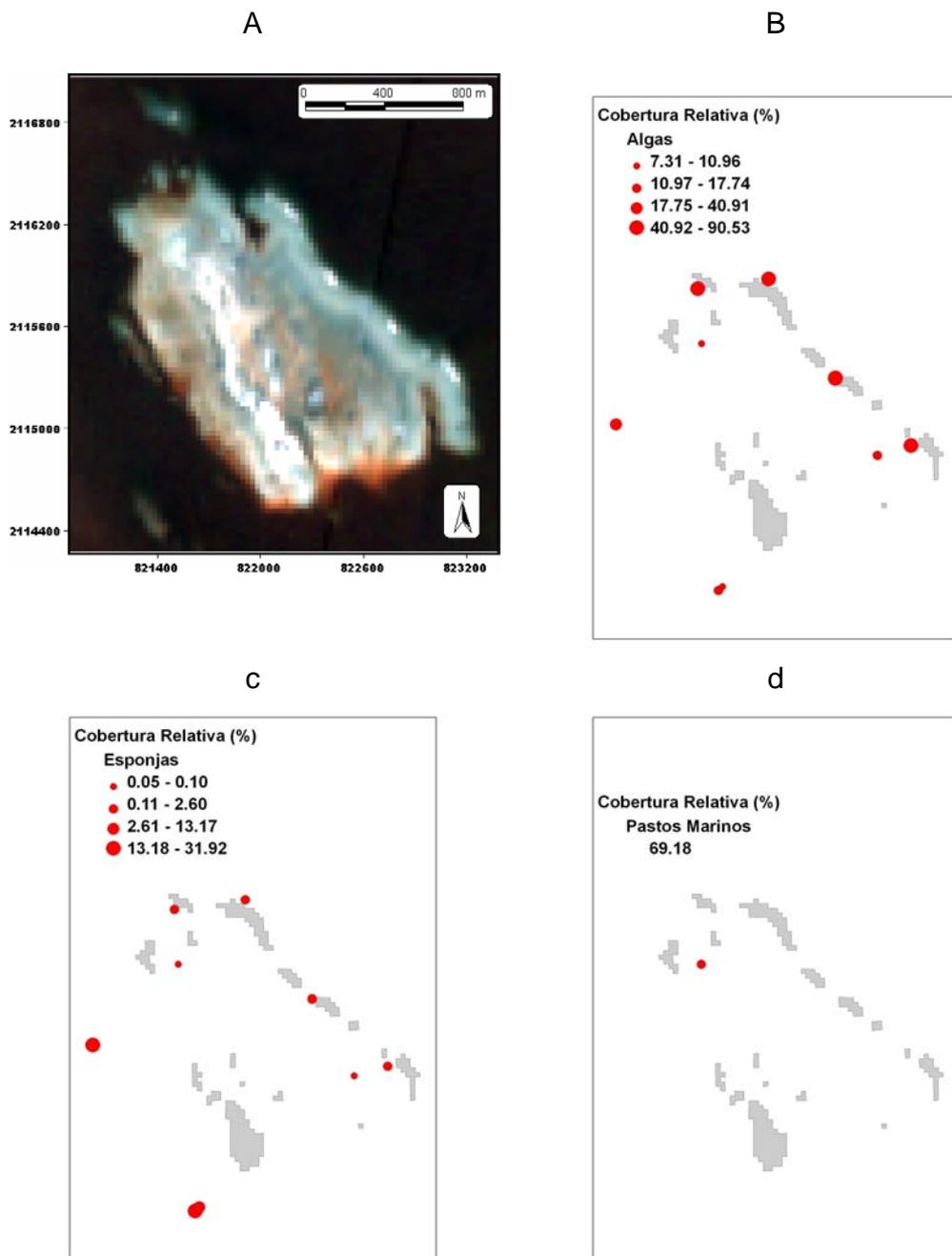


Figura 50. Sistema arrecifal de Isla de En medio (a) y distribución y cobertura (%) de algas (b), esponjas (c) y pastos (d). Unidades geográficas en UTM.

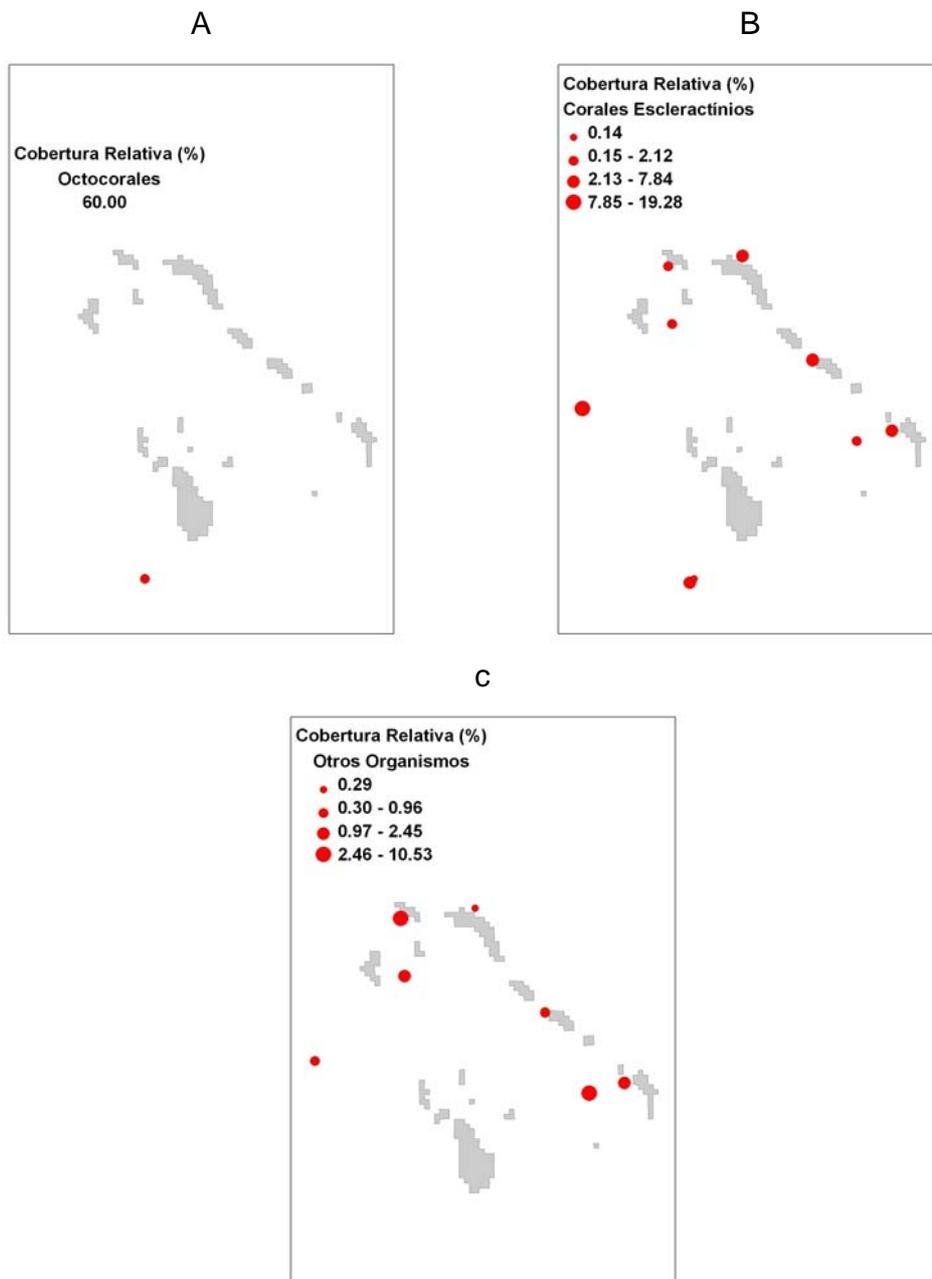


Figura 51. Distribución y cobertura (%) de octocorales (a), corales escleractínios (b), y otros organismos (c). Unidades geográficas en UTMs.

Dentro del grupo de corales escleractínios (tomado como 100 %) el grupo funcional que presentó la mayor cobertura fue el coral cerebro (62.35 %), seguido del coral semiesférico (20.84 %), coral submasivo (8.36 %) y coral digitiforme (5.14 %, Fig. 52).

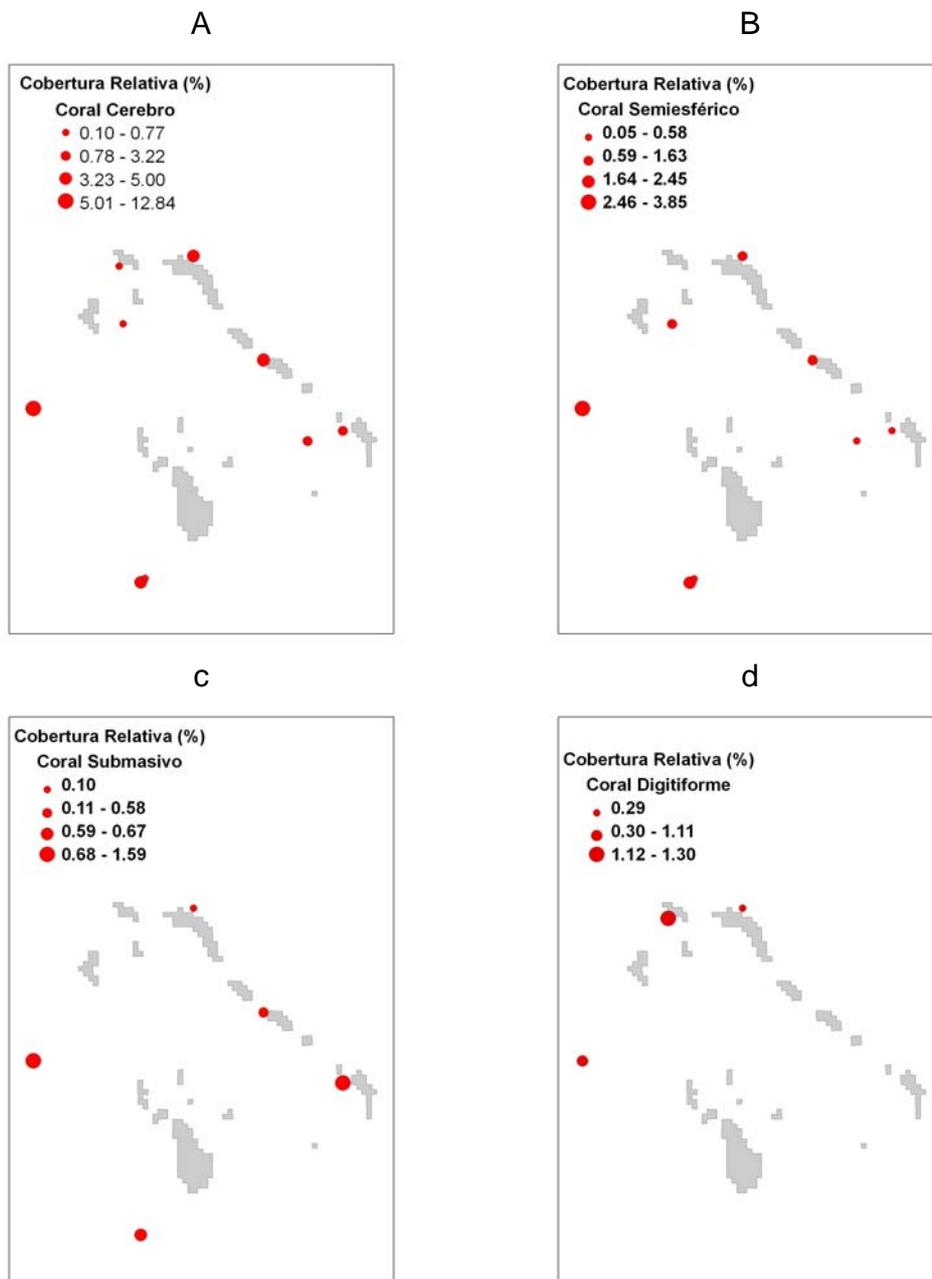


Figura 52. Distribución y cobertura (%) de coral cerebro (a), coral semiesférico (b), coral submasivo (c) y coral digitiforme (d) registrados en el arrecife Isla de En medio.

Se registraron 4 familias de corales escleractínios (tomado como el 100%), siendo la familia Favidae la que presentó una mayor cobertura (84.07 %). La segunda familia en importancia fue Siderastreidae (7.43 %), seguida de la familia

Astrocoeniinae (5.14%) y Acroporidae (3.3 %). La distribución y cobertura de éstas familias puede observarse en la Figura 53.

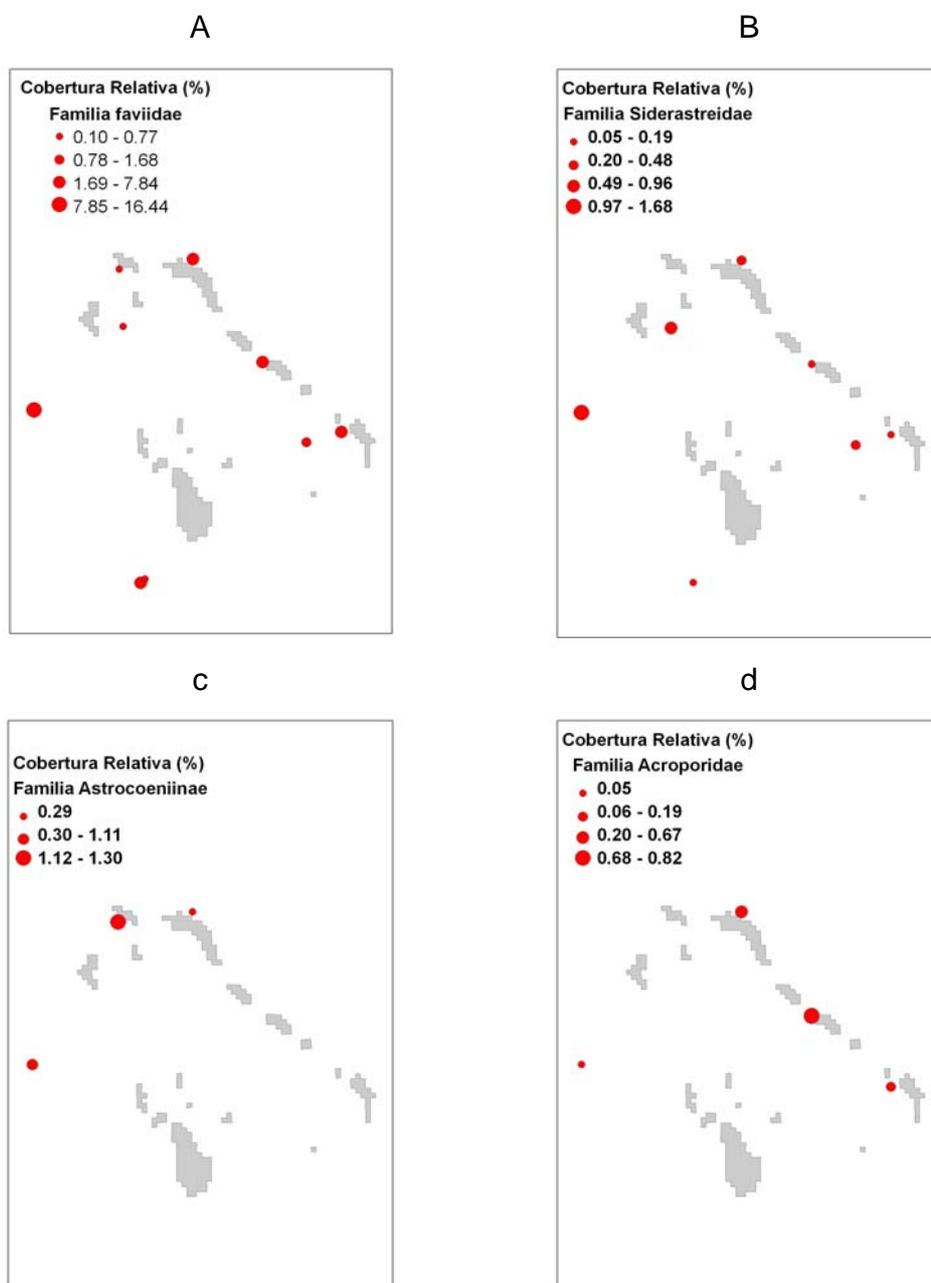


Figura 53. Distribución y cobertura (%) de las familias de corales escleractínios: Faviidae (a), Siderastreidae (b), Astrocoeniinae (c) y Acroporidae (d) registradas en el arrecife Isla de En medio.

Tomando en cuenta las 4 Familias, se pudieron identificar 5 géneros de coral y 9 especies. Las especie con mayor cobertura fue *Colpophyllia natans*, representada por el 62.35 % del total de la cobertura de corales escleractínios.

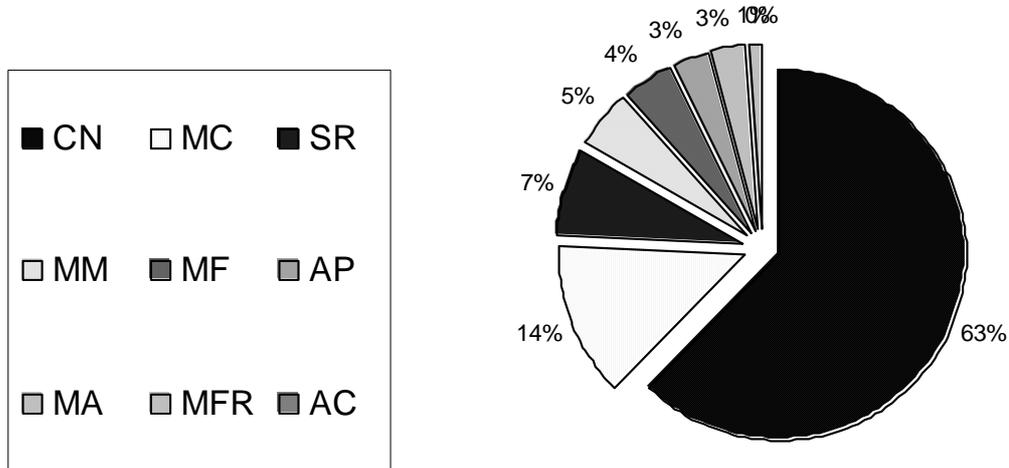


Figura 54. Composición de especies y abundancia de corales escleractínios registrados en el arrecife Isla de En medio. Simbología: CN= *Colpophyllia natans*, MC= *Montastraea cavernosa*, SR= *Siderastrea radians*, MM= *Meandrina meandrites*, MF= *Montastraea faveolata*, AP= *Acropora palmata*, MA= *Montastraea annularis*, MFR= *Montastraea franksi* y AC= *Acropora cervicornis*.

Las especies que le siguieron en importancia fueron *Montastraea cavernosa*, *Siderastrea radians* y *Meandrina meandrites* (13.41, 7.44 y 5.14 %, respectivamente). Las especies con menor cobertura fueron *Montastraea franksi* y *Acropora cervicornis* (Fig. 54). La distribución y cobertura de las cuatro especies de coral más importantes pueden observarse en la figura 55.

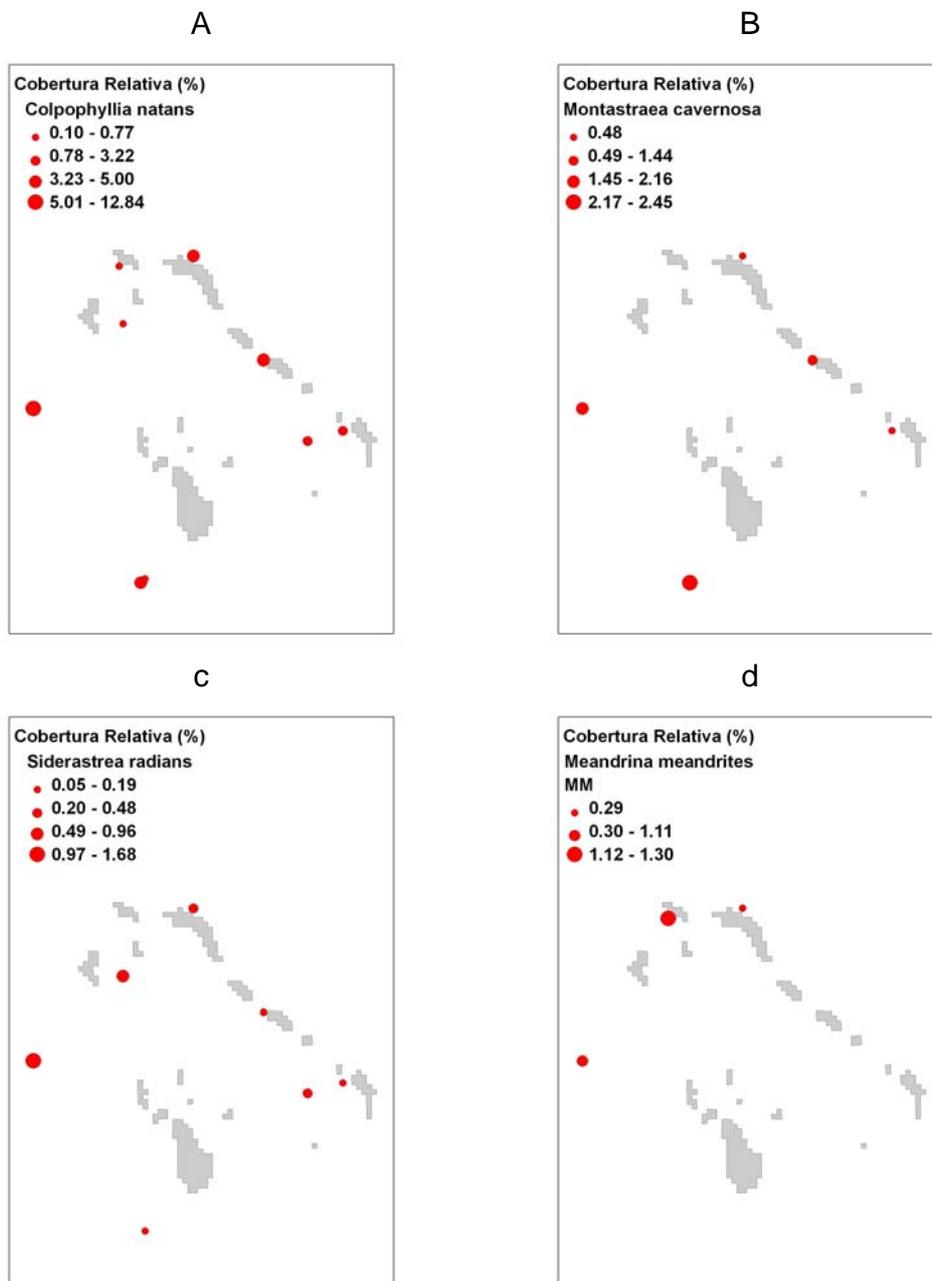


Figura 55. Distribución y cobertura (%) de las especies de corales escleractínios más importantes dentro del arrecife Isla de En medio: *Colpophyllia natans* (a), *Montastraea cavernosa* (b), *Siderastrea radians* (c) y *Meandrina meandrites* (d). Unidades geográficas en UTM.

## Sustrato

El sustrato estuvo compuesto esencialmente de pedacería de material calcáreo (99.62 %) y arena (0.38 %). La distribución y coberturas de los dos principales sustratos se observan en la figura 56.

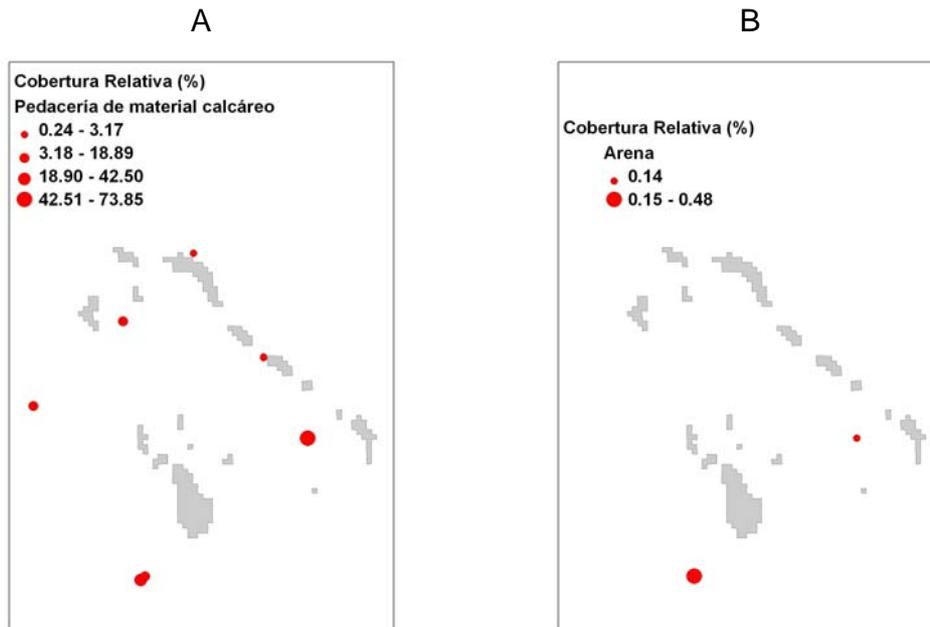


Figura 56. Distribución y cobertura (%) de los dos tipos de sustrato más importantes dentro del arrecife Isla de En medio: Pedacería de material calcáreo (a) y Arena (b). Unidades geográficas en UTM.

## Hábitat arrecifales

El cluster resultado del análisis de agrupamiento mediante la utilización del coeficiente de similitud de Bray-Curtis discriminó 5 grupos, cada uno considerado como un hábitat (Fig. 57). Cada uno de los hábitats fue descrito en base a sus características geomorfológicas y bióticas, ver Tabla 20.

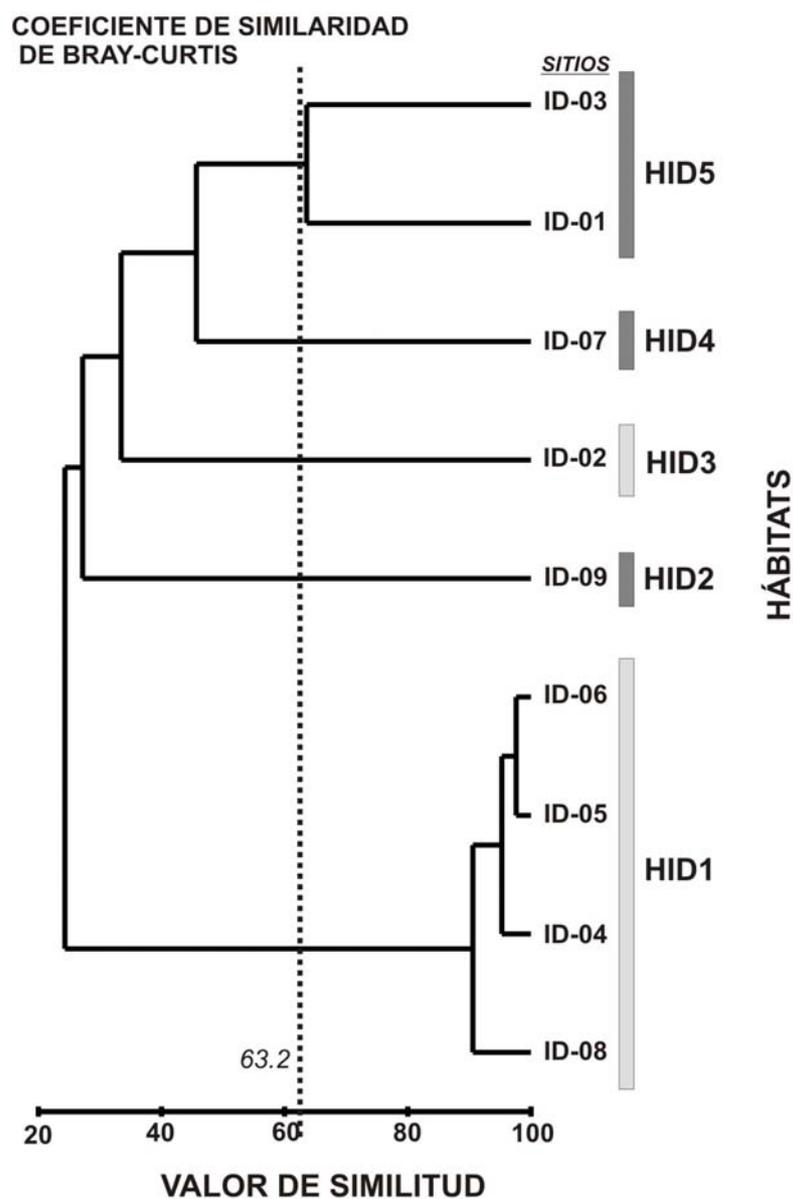


Figura 57. Cluster para discriminar los hábitats existentes en el arrecife Isla de En medio: HID1, HID2, HID3, HID4 y HID5.

Tabla 20. Descripción de hábitats discriminados en el arrecife Isla de En medio

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
HID1	88.64% Algas  5.31% Corales escleractínios  3.46% Organismos 1.68% Esponjas  0.85% Sustrato 0.05% Corales de fuego hidrocoral	56.96% Algas filamentosas (TURF)	
		31.60% ALGAS Costrosa coralina	
		0.08% Macroalgas Verdes/café	
		3.14% Cerebro	100% <i>Colpophylia natans</i>
		0.79% Coral semiesférico	76.07% <i>M. cavernosa</i> 24.34% <i>Siderastrea radians</i>
		0.56% Submasivo	92.29% <i>Montastrea faveolata</i> 8.59% <i>Montastrea franksi</i>
		0.42% C RAM TABUL.	100% <i>A. palmata</i>
		0.40% c	100% <i>Madrasis mirabilis / M. decactis</i>
		100% Erizos	
		98.01% costrosa/incrustante	
HID2	69.18% Pastos 15.63% Sustrato 10.96% Algas  2.45% Organismos 1.73% Corales escleractínios  0.05% Esponjas	2.15 % tubular	
		100% pedacería de material calcáreo	
		<i>Folioso</i>	100% <i>M. complanata</i> 100% <i>Thalassia testudinum</i>
		100% pedacería de material calcáreo	
		95.18% Algas filamentosas (TURF)	
		4.82% ALGAS Macroalgas Verdes/café	
		100% Erizos	
		55.58% CORAL SEMIESFERICO	100% <i>Siderastrea radians</i>
		0.77% CEREBRO	100% <i>Colpophylia natans</i>
		100% tubular	
HID3	60% Octocoral 19.38% Sustrato  13.17% Esponjas  7.31% Algas 0.14% Corales escleractínios	100% Ramificación dicotómica	
		97.49 % pedacería de material calcáreo	
		2.48% Arena	
		51.09% tubular	
		83.57% costrosa/incrustante	
		11.11% Semiesférica	
		30.77% vaso	
		98.68% Algas filamentosas (TURF)	
		1.33% Macroalgas Verdes/café	
		0.10% cerebro	100% <i>Colpophylia natans</i>
0.05% CORAL SEMIESFERICO	100% <i>Siderastrea radians</i>		
HID4	73.99% SUSTRATO  15.34% Algas  8.46% Organismos 2.12% Corales escleractínios  0.10% Esponjas	99.81% pedacería de material calcáreo	
		0.20% Arena	
		88.09% Algas filamentosas (TURF)	
		13.52% Macroalgas Verdes/café	
		100% Erizos	
		79.55% Cerebro	100% <i>Colpophylia natans</i>
25.71% CORAL SEMIESFERICO	100% <i>Siderastrea radians</i>		
100% costrosa/incrustante			

Continuación...

Hábitat	Principal componente	Características	Sub-características
HID5	29.33% Algas	55.22% Algas filamentosas (TURF)	
		35.16% ALGAS Costrosa coralina	
	28.58% Esponjas	8.36% ALGAS Macroalgas Verdes/café	
		0.25% Algas calcáreas Articuladas	
		57.03% costrosa/incrustante	
		41.38% tubular	
	27.62% SUSTRATO	1.60% semiesférica	
	13.56 % Corales escleractínios	100% pedacería de material calcáreo	
		8.77% CEREBRO	100% <i>Colpophylia natans</i>
		3.15% Coral semiesférico	73.28% <i>M. cavernosa</i>
			36.46% <i>Siderastrea radians</i>
		1.06% SUBMASIVO	72.57% <i>M. annularis</i>
		15.87% <i>Montastrea franksi</i>	
	11.34% <i>Montastrea faveolata</i>		
	0.55% c	100% <i>Madrasis mirabilis</i> / <i>M. decactis</i>	
0.48% Organismos	0.02% C RAMOSO	100% <i>A. cervicornis</i>	
0.43% CORALES DE FUEGO HIDROCORAL	100% Erizos		
	50.31% Folioso	<i>M. complanata</i>	
	44.28% Ramificado	<i>M. alcornis</i>	

El hábitat que presentó la mayor riqueza fue el Hábitat HID5 con 8 especies, seguido del Hábitat HID1 con 7 especies y los hábitat HID2, HID3 y HID4 presentaron solo dos especies (Tabla 21).

El valor más bajo de índice de diversidad lo presentó el hábitat HID4 (0.50 bits/individuo), seguido de los hábitat HID3 (0.63), HID2 (0.68). Los hábitat HID5 y HID1 presentaron los valores más altos (1.15 y 1.34, respectivamente; Tabla 21).

El hábitat que presentó el mayor valor de equidad fue el HID1 (0.99) y el hábitat HID1 fue el que presentó el menor valor (0.68).

Tabla 21. Características globales de los hábitats en cuanto a la diversidad de corales escleractínios en el arrecife isla de En medio.

HÁBITAT	Riqueza de especies	Valor de Diversidad (H')	Índice de Equidad
HID1	7	1.34	0.68
HID2	2	0.68	0.99
HID3	2	0.63	0.91
HID4	2	0.50	0.73
HID5	8	1.15	0.55

El ANOVA no paramétrico de Kruskal-Wallis indicó diferencias significativas ( $H=7.0$ ,  $p<0.05$ , con un 95% del nivel de confianza) entre los hábitats. Al encontrarse diferencias significativas con esta prueba se procedió a comparar por pares de hábitats con la prueba de Mann-Whitney, ver Tabla 22.

Tabla 22. Resultados de la prueba estadística Mann-Whitney para comparar entre pares de Hábitats.

HÁBITAT/HÁBITAT	HID1	HID2	HID3	HID4	HID5
HID1					
HID2	O				
HID3	X	O			
HID4	O	O	O		
HID5	O	X	X	X	

X=  $p < 0.05$  Diferencia significativa (Hábitats diferentes)

O =  $p > 0.05$  No diferencia significativa (Hábitats similares)

El análisis de similitud en porcentaje (SIMPER) mostró que la especie *Colpophyllia natans* es la que contribuye en mayor medida (74.1%) a la similitud dentro del hábitat HID1. Esta misma especie (62.82%) en conjunto con *Montastraea cavernosa* (28.85%) contribuyeron en mayor medida a la similitud en el hábitat HID5 (Tabla 23).

Tabla 23. SIMPER de las especies de corales escleractínios dentro de cada hábitat basado en el coeficiente de similaridad de Bray-Curtis. Las especies son listadas en orden ascendente de acuerdo a su porcentaje de contribución de similaridad (Contrib%). Los números de la derecha reflejan el porcentaje acumulativo de la contribución de cada especie (Cum%).

GRUPO DE HÁBITAT		
<i>Hábitat HID1</i>		
% de similaridad: 39.96		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Colpophylia natans</i>	74.1	74.1
<i>M. cavernosa</i>	9.18	83.28
<i>A. palmata</i>	6.51	89.79
<i>Montastrea faveolata</i>	5	94.78
<i>Madrasis mirabilis</i>	2.81	97.6
<i>Siderastrea radians</i>	2.4	100
<i>Hábitat HID2</i>		
Menor a dos muestras		
<i>Hábitat HID3</i>		
Menor a dos muestras		
<i>Hábitat HID4</i>		
Menor a dos muestras		
<i>Hábitat HID5</i>		
% de similaridad: 55.32		
Especies	Contrib%	Cum%
<i>Colpophylia natans</i>	62.82	62.82
<i>M. cavernosa</i>	28.85	91.67
<i>M. annularis</i>	7.05	98.72
<i>Montastrea faveolata</i>	1.28	100

Imagen clasificada supervisada de hábitats arrecifales

La imagen clasificada de hábitat mostró una precisión (matriz de confusión – análisis de Kappa) de 0.88 (Fig. 58)

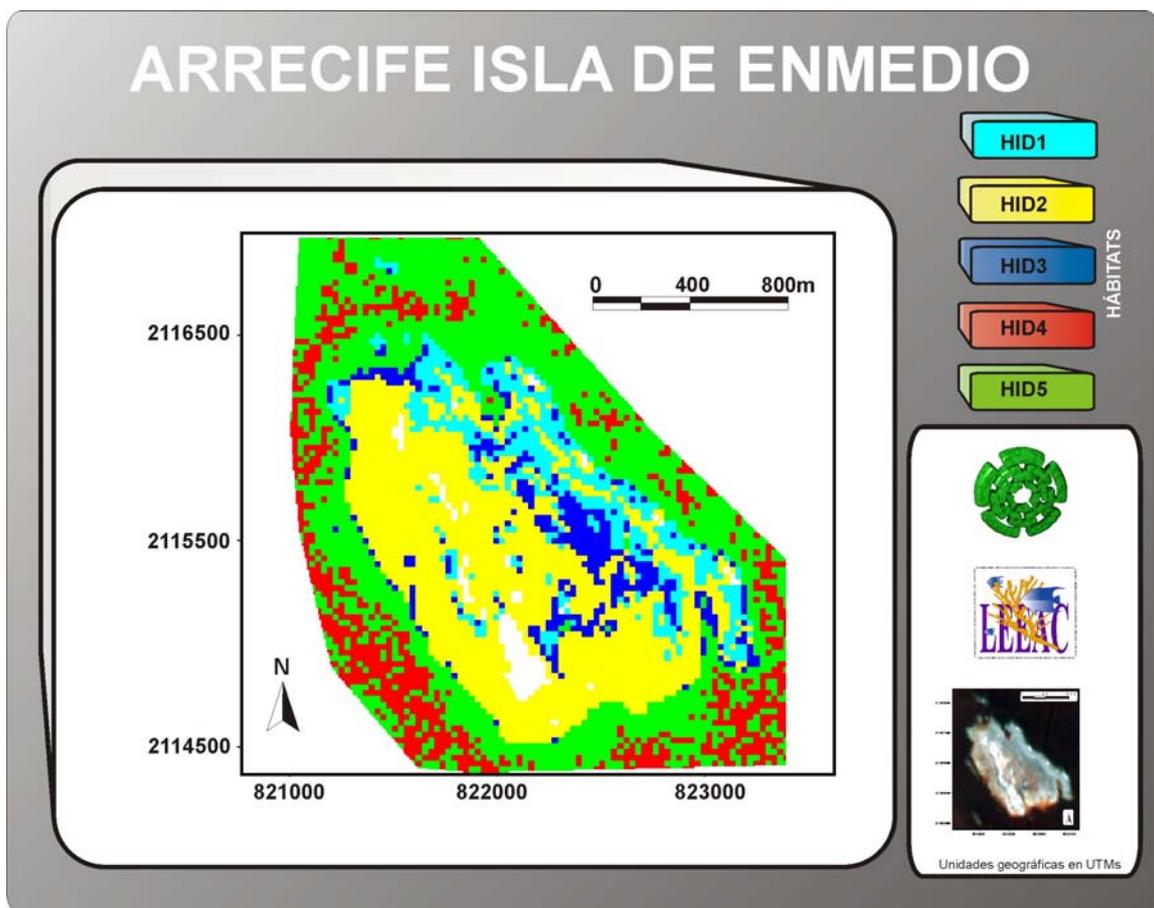


Figura 58. Imagen clasificada de hábitat de Isla de En medio.

## COMPARACIÓN ENTRE ARRECIFES

Los GGMF de pastos marinos, octocorales e hidrocorales no fueron significativamente diferentes entre las diferentes islas del SAV y entre las islas y Puerto Morelos ( $> 0.05$ ). Esto se debió a la gran heterogeneidad de información en los sitios de muestreo que presentaron coberturas relativamente similares a excepción de Isla Sacrificios (IS) donde se registró una menor cobertura de estos tres GGMF (Fig. 59).

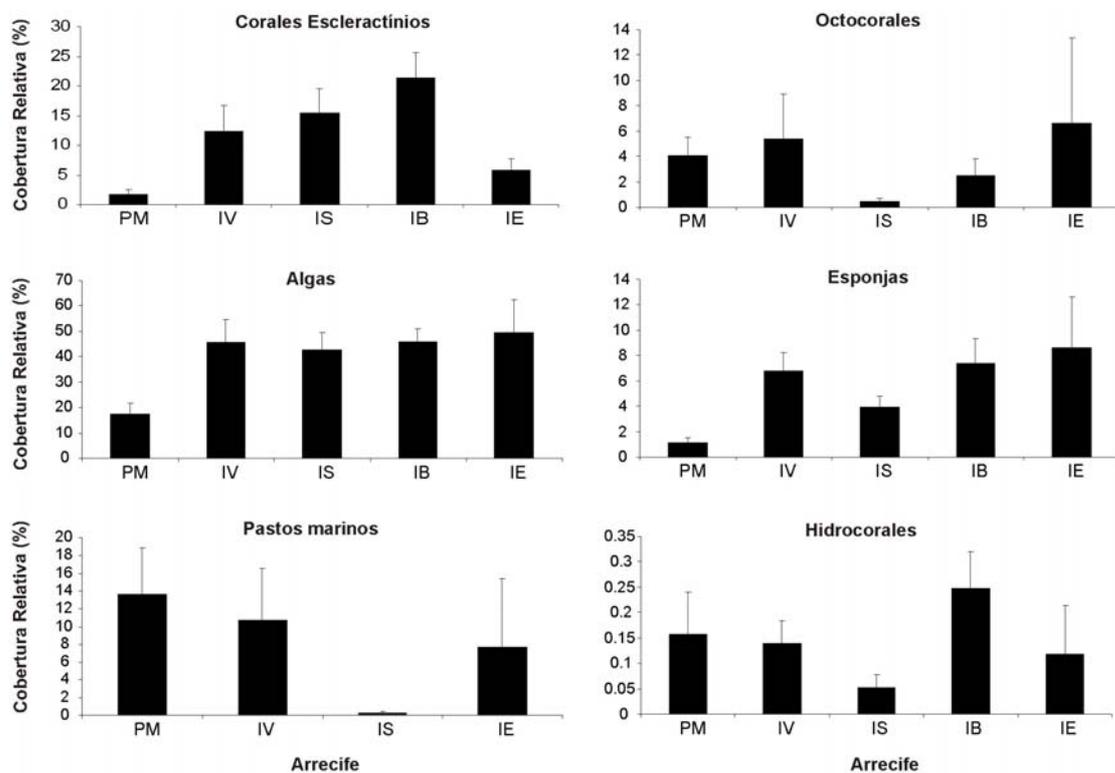


Figura 59. Coberturas relativas (%) de Grandes Grupos Morfofuncionales de comunidades bentónicas en los sistemas arrecifales: PM= Puerto Morelos, IV= Isla Verde, IS= Isla Sacrificio, IB= Isla Blanca y IE= Isla de En medio. Barras de error típico.

Los otros GGMF (corales escleractínios, algas, esponjas, arena y pedacería de material calcáreo) fueron significativamente diferentes ( $< 0.05$ ). La contrastación por pares de arrecifes mediante la prueba de Tukey no paramétrico no definió

diferencias estadísticamente significativas entre los cuatro arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano, pero si algunos de estos sistemas con el arrecife de Puerto Morelos (PM).

La cobertura de corales escleractínios del arrecife Puerto Morelos (PM) no presentó diferencias significativas con la cobertura del arrecife de Isla De En medio (IE). Ambos arrecifes presentaron las menores coberturas relativas de corales escleractínios, no obstante PM fue el arrecife con las menores coberturas de corales escleractínios. El arrecife de Isla Blanca (IB) presentó la mejor condición al presentar una máxima cobertura relativa ( $21.3 \% \pm 4.2$ ). Sin embargo, en los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano se encontró la mayor cobertura de algas ( $42.5 \% \pm 7$  en IS;  $49.6 \% \pm 12.7$  en IE), que fue no significativamente diferente entre estos sistemas, pero significativamente diferente con el arrecife de PM ( $< 0.05$ ). El arrecife de PM presentó la menor cobertura de algas ( $17.5\% \pm 4$ ).

Considerando la condición de los arrecifes en función de la relación corales escleractínios-algas, el arrecife que presentó la mejor condición fue IB con una relación de 1:2, seguido de IS 1:3, IV 1:4, IE (1:9) y PM (1:10).

La máxima riqueza de especies fue registrada en PM (21 especies) y el menor registro se hizo en el arrecife IS (7 especies, Fig. 60). Los valores de equidad son similares en los cinco sistemas arrecifales. El valor de diversidad fue más alto en el arrecife de PM con un valor de 2.2 (bits/individuo) y el valor mas bajo se registró en IE 1.31 (bits/individuo). Los valores de diversidad fueron contrastados con la prueba de t de Hutchenson que no mostró que diferencias significativas entre los cinco sistemas arrecifales (Tabla 24). Los arrecifes bajo estudio presentan buena diversidad en función de la cobertura de cada una de las especies registradas.

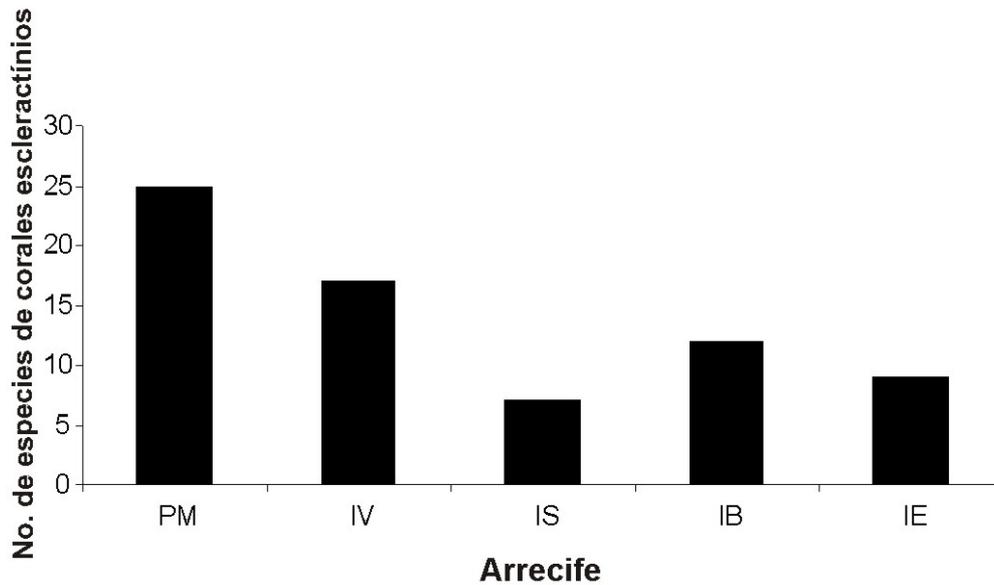


Figura 60. Número de especies de corales escleractinios en los arrecifes PM= Puerto Morelos, IV= Isla verde, IS= Isla Sacrificio, IB= Isla Blanca y IE= Isla de En medio

Tabla 24. Valores de riqueza de especies, equidad (J'), diversidad de Shanon-Weaver (H') y valores de probabilidad de t de Hutchenson.

Arrecife	No. de especies	J'	H'(loge)	t de Hutchenson
PM	21	0.7302	2.223	> 0.05
IV	17	0.6464	1.831	> 0.05
IS	7	0.6974	1.357	> 0.05
IB	12	0.6328	1.573	> 0.05
IE	9	0.5982	1.314	> 0.05

### COMPARACIÓN ENTRE LAS IMAGENES CLASIFICADAS DE HÁBITATS

Al analizarse el área que ocupa cada hábitat discriminado en cada sistema arrecifal pudo identificarse que proporción del arrecife presentó una mejor condición en relación a los valores de cobertura relativa de corales escleractinios. Los corales al ser el principal elemento de los arrecifes por la función tan importante de contribuir a la acreción del arrecife, son sin duda uno de los mejores

indicadores para conocer el estado que posee un arrecife, considerando que entre mayor cobertura de coral exista en un sistema mayor será su probabilidad de mantenerse en el tiempo.

En el arrecife IV el hábitat que presentó una mejor cobertura de corales escleractinios (31.18%) fue el hábitat HIV1 que ocupó el 14.2 % del sistema arrecifal con un área de 0.2 km<sup>2</sup> (Fig. 61). Los hábitats que presentaron una mayor área fueron aquellos que tuvieron coberturas altas de pastos marinos y algas (hábitat HIV3 y HIV4 respectivamente) (Fig. 61)

En el arrecife IS el hábitat HIS4 fue donde se registró la mejor cobertura de corales escleractinios (30.5 %), el cual representó el 4.7 % del arrecife, que corresponde a un área de 0.02 km<sup>2</sup> (Fig. 61). El hábitat HIS2 presentó la mayor proporción del arrecife (45.5 %) con coberturas altas de pastos marinos, correspondiente a un área de 0.29 km<sup>2</sup>. El hábitat que le siguió en área fue el HIS3 (0.29 km<sup>2</sup>) en el cual se registró una cobertura relativa de algas de 55.46%.

En el arrecife IB, el hábitat donde se registró la mejor cobertura de corales escleractinios (32.2 %) fue HIB2 (Fig. 61). Este hábitat ocupa el 20.3 % del arrecife con un área de 0.14 km<sup>2</sup> (Fig. 61). Finalmente en el arrecife IE el hábitat donde se registró la mejor cobertura de corales escleractinios (13.56 %) fue el hábitat HID5, ocupando un área de 1.2 km<sup>2</sup> equivalente al 37.2 % del arrecife.

Los arrecifes que tuvieron una mayor cobertura de corales escleractinios fueron IB, IV e IS, mientras que el arrecife IE tuvo la menor cobertura (13.56%). IE presentó una mayor área del hábitat relacionado a corales, debido a que es el arrecife más grande de los cuatro estudiados en el SAV. Los arrecifes frente al Puerto de Veracruz (IS y IV) presentaron las mayores coberturas, inclusive mayores a las registradas en el arrecife del Caribe (PM). Las especies que dominan los sistemas del SAV (*Montastraea cavernosa* y *Colpophyllia natans*), presentan grandes tallas; mientras que en el arrecife de PM, aunque domina *M.*

*annularis*, hay otras especies muy importantes que no adquieren grandes dimensiones, como es el caso de *Porites astroides*.

La metodología utilizada en este trabajo es sin duda una línea base de investigación y monitoreo. La posibilidad de tener sitios plenamente georeferenciados permite tener un seguimiento de los sitios muestreados de manera temporal. Aunado a esto, y muy importante, la utilización del videotransecto como técnica de muestreo y evaluación hace posible poder realizar una comparación a largo plazo ya que el material constituye parte de una videoteca de los arrecifes muestreados del Sistema Arrecifal Veracruzano, siendo los videos un testimonio de la condición de estos sistemas en el momento que son generados. La obtención de información a partir de los videotransectos es ampliamente replicable a diferentes niveles taxonómicos y/o de grupos morfofuncionales. Por lo que dependiendo de los objetivos de investigación, sea para conservación, manejo o investigación, y la experiencia del analizador se puede generar información en distintos niveles y así tener la posibilidad de compararse en escalas espaciales y temporales. Sin duda esta información es importante para otros estudios que se realicen en la zona, ya que son variables cuantitativas que podrían explicar muchos de los patrones y procesos que se llevan a cabo en los arrecifes.

Como segundo punto muy importante, la utilización de la percepción remota permite realizar un análisis de forma global de la condición de cada uno de los sistemas arrecifal utilizando para generar este análisis información con muestreos puntuales. La posibilidad de discriminar y visualizar áreas con características similares, basadas en los valores de radiación directamente relacionadas con las características bentónicas, permite delimitar zonas que poseen diferentes coberturas relativas de elementos bentónicos y así determinar la condición (utilizando elementos clave como los corales y las algas) de cada uno de estas áreas discriminadas (hábitat), con lo que permite establecer una posible zonificación de manejo y de usos para la conservación de estos sistemas tan

importantes en las costas veracruzanas. Resaltando, que con solo los muestreos puntuales no sería posible un buen manejo del sistema tomando en cuenta que no se tiene la variabilidad de tipos de hábitat y su distribución espacial en todo el sistema.

Es indudable que las imágenes hiperespectrales como es el caso de las imágenes HYPERION permiten una mejor discriminación de niveles digitales al tener una gran cantidad de bandas, sin embargo la resolución espacial que posee la cual es de 30 x 30 metros dificulta la discriminación de hábitat, dado que muchas áreas arrecifales presentan cambios considerables en menos de 30 metros por lo que se necesitaría una imagen con mayor resolución espacial (fotografía aérea o imagen IKONOS) aunque se sacrificara la resolución espectral. Las imágenes aéreas serían más idóneas en el caso particular de los arrecifes que comprenden el SAV, ya que la dimensión de los arrecifes presentes en esta área geográfica del país serían excelentemente cubiertas con fotografías, abaratando el costo de adquisición de imágenes dado que las dimensiones espaciales mínimas de compra (ejemplo 100m<sup>2</sup> para el caso de las imágenes IKONOS) de imágenes de satélite nos obliga a adquirir una gran cantidad de áreas sin ningún interés como lo es el mar abierto (para los objetivos de este estudio). El uso de imágenes de satélite, la percepción remota y los sistemas de información geográficos son una excelente herramienta para minimizar al máximo los gastos y obtener una gran cantidad de información de una manera holística.

Las imágenes HYPERION permitieron tener un panorama con una cierta precisión de la condición y las características de los hábitat que componen los arrecifes estudiados del Sistema Arrecifal Veracruzano. Tomando como indicadores la cobertura de corales escleractinios, la cobertura de algas y el área que ocupa el hábitat con mejor cobertura de corales escleractinios, además considerando que a nivel mundial es tomado como un indicio de perturbación la existencia de una gran cantidad de algas como el reflejo de una fase de cambio, debido que al existir un sobre crecimiento algal, causa mortalidad sobre los corales (Jompa y

McCook, 2002) al competir por espacio (Box y Mumby, 2007) y estresar de forma física directa a los corales al hacerles sombra, abrasión (Linderman, 2001) e inclusive con exudados químicos (Smith *et al.* 2006), lo que trae como consecuencia un cambio en la cobertura bentónica domina por corales a una dominada por algas. El sobrecrecimiento algal es atribuido a varios factores, entre los que destacan la sobre explotación de peces herbívoros que disminuye el ramoneo en el arrecife y por lo tanto no hay un control sobre el crecimiento algal (Jompa y McCook, 2002) , la excesiva entrada de nutrientes como consecuencia de actividades humanas y el sobre crecimiento algal como una consecuencia de la mortalidad coralina después de algún evento de blanqueamiento o por los daños de tormentas (Diaz-Pulido and Diaz, 1997). Tomando en cuenta la cobertura de corales y la cobertura algal posiblemente se puede establecer cuales de los arrecifes presentan mayor impacto por eventos antropogénicos y/o naturales. Considerando lo anterior podemos establecer que el arrecife que presentó una mejor condición (menos impacto) fue IB y el que presentó menor condición fue IE (mayor impacto). Sin embargo, se tiene que tomar con cautela esta diferencia en cuanto a la condición establecida por estos indicadores, y seria importante la generación de información alterna para poder establecer contundentemente las zonas afectadas por presiones antropogénicas o naturales, o por ambas.

Sin duda la posibilidad de tener la condición arrecifal nos permite poner más atención a aquellos hábitats que poseen una mayor cobertura de corales escleractinios para establecer estrategias de manejo y conservación.

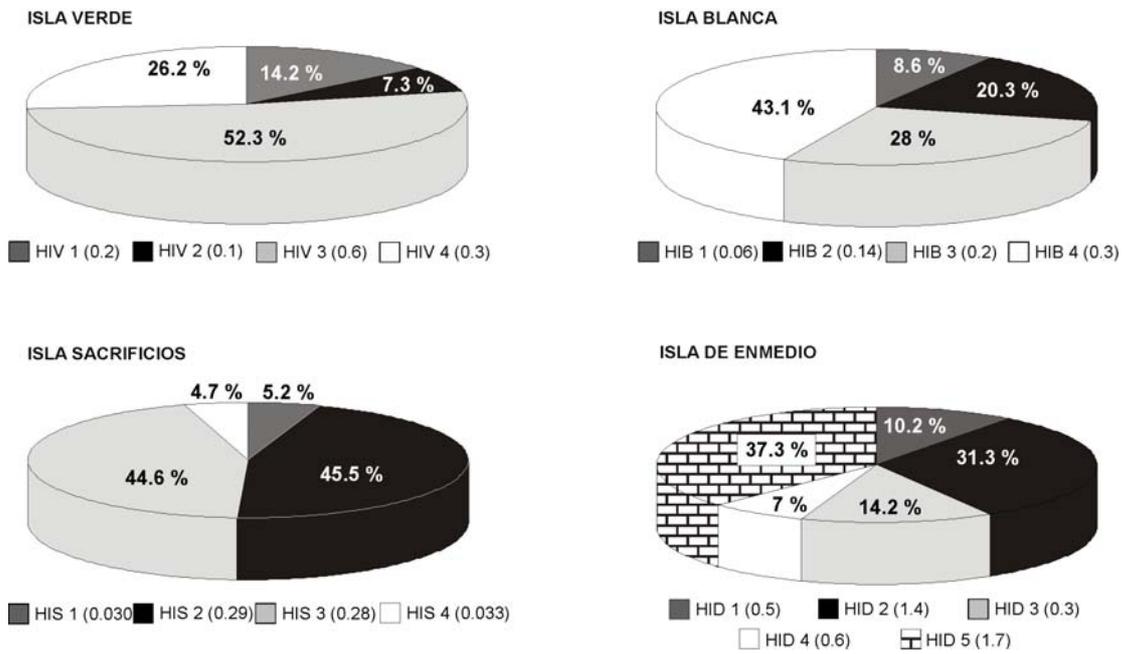


Figura 61. Proporción de los hábitats arrecifales que presentan en todo los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano.

## CONCLUSIONES

El método de video-transecto es una herramienta importante para la descripción y caracterización de hábitat arrecifales porque se tiene un registro que puede permitir hacer estudios de cambio temporal o detección de cambio. Los videos son registros permanentes que se pueden conservar en video-tecas.

La aplicación de la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el estudio de la caracterización de los arrecifes de Puerto Morelos, Isla Verde, Isla Sacrificios, La Blanca e Isla de En medio, nos permitió tener una visión general de los sistemas. Esto nos permitió manejar distintas bases de información (corales escleractínios, octocorales, hidrocorales, GGMF, Familias y especies de Corales escleractínios) en un mismo entorno espacial.

El uso de símbolos graduales en SIG, nos permitió hacer un mejor análisis de los componentes abióticos y bióticos (principalmente corales escleractínios) de una manera visual. Esto permite ubicar los sitios donde se registró información y al mismo tiempo tener una representación progresiva de la cobertura relativa (%) de los componentes de estudio.

Las algas fueron el Gran Grupo Morfofuncional que presentó la mayor cobertura relativa en todos los arrecifes.

La familia Acroporidae fue la que presentó la mayor cobertura relativa en el arrecife Puerto Morelos, mientras que la familia Favidae fue la que presentó la mayor cobertura en los arrecifes del SAV.

*Acropora palmata* fue la especie más importante en el arrecife Puerto Morelos; *Montastraea cavernosa* fue, la especie más importante en los arrecifes de Isla Verde e Isla Sacrificios; *Colpophylia natans* fue la especie más importante en los arrecifes de isla La Blanca y en Isla de En medio.

De manera general, el arrecife Puerto Morelos e Isla de En medio presentaron cinco hábitats, mientras que los arrecifes de Isla Verde, Isla Sacrificios y La Blanca presentaron cuatro hábitat.

Tomando en cuenta como indicadores de estado de condición a los corales escleractinios, las algas y el área del hábitat con mejor cobertura de corales escleractinios se pudo establecer que el arrecife de Isla Blanca fue el que presentó la mejor condición; el que presentó el menor estado de condición fue el arrecife de Isla de Enmedio

Las imágenes clasificadas supervisadas presentaron una buena precisión de la distribución de hábitat en los sistemas arrecifales estudiados.

Las imágenes multiespectrales Hyperion pueden ser una buena herramienta para realizar investigación en los sistemas arrecifales al tener la oportunidad de trabajar con un mayor número de bandas. Sin embargo, su resolución espacial (tamaño del píxel) dificulta la discriminación de hábitat en sistemas relativamente pequeños, ya que en muchos sistemas arrecifales el cambio de hábitat se puede dar en una escala espacial de metros.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos a la CONANP y su personal del Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos y Parque Marino Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano por su apoyo y facilidades otorgadas para la realización de este trabajo. A la CONABIO por apoyar esta investigación. A CINVESTAV Unidad Mérida por el apoyo logístico, y un agradecimiento a todos los integrantes del Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos (LEEAC) y por su apoyo en todo el trabajo de investigación: Dr. Carlos González Salas, Dr. Miguel A. Ruiz Zarate y al Biol. Juan Carlos Fuentes May.

## REFERENCIAS

Acosta-González G (2005) Aplicación de Sistemas de Información Geográfica en la Caracterización Bentónica de dos Arrecifes de la Península de Yucatán. Tesis de Maestría. CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Yucatán, México.

Arnold TD, Formaggio AR, Galvão LS, Daleles RC (2005) Dados Hyperion e ETM+ na classificação de alvos agrícolas com diferentes níveis de distinção spectral. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril, INPE, p. 439-446.

Andréfouët S, Robinson JA, Feldman GC, Muller-Karger FE, Hu CM, Salvat B. (2000) Comparison of space sensors for estimation of coral reef areas in South Pacific atolls. En: Proc. 9th International Coral Reef Symposium. University of South Florida. Saint Petersburg, Florida, 233.

Aronson RB, Swanson DW (1988) Video survey of coral reefs: uni and multivariate applications. En: Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium 2: 1141-1146

Baxter K. (2000) Assessing the extent of coral bleaching using aerial photography and image processing techniques, Great Barrier Reef, Australia. En: Proceedings of the 9th International Coral Reef Symposium. Bali Indonesia. 1: 81-87

Box SJ, Mumby PJ (2007) Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals. *Mar Ecol Prog Ser.* 342: 139–149

Bradbury RH, Loya Y, Reichelt RE, Williams WT (1986) Patterns in the structural typology of benthic communities on two coral reefs on the central Great Barrier Reefs. *Coral Reefs* 4:161-167

Brock JC, Wright CW (2000) Preliminary results from a NASA Experimental Advanced Airborne Research LIDAR (EAARL) survey of Pacific Reef in Biscayne National Park, Florida. USGS Center for Coastal Geology, Florida. En: Proc. 9th International Coral Reef Symp: 233

Bryant D, Burke L., McManus J, Spalding M (1998a) Reefs at Risk. World Resources Institute, Washington DC, USA. 57 pp.

Bryant D, Burke L, McManus J, Spalding M (1998b) Reef at Risk: A Map-Based Indicator of Threat to the World's Coral Reefs. Box: Tools and Techniques for Monitoring and Mapping Coral Reefs. World Resource Institute, International Center for Living Aquatic Resource Management, World Conservation Monitoring Centre and United Nations Environment Program. 40

Carleton HJ, Done TJ (1995) Quantitative video sampling of coral reef benthos: large-scale application. *Coral Reefs* 14:35-46.

Carricart-Ganivet JP, Horta-Puga G (1993) Arrecifes de Coral en México. In: Salazar-Vallejo, S.I. y González, N.E. (ed) Biodiversidad marina y Costera de México. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México

Collado-Vides L, Ortegón-Aznar I, Sentíes-Granados A, Comba-Barrera L, González-González J (1998) Macroalgae of Puerto Morelos reef system, mexican caribbean. *Hidrobiológica* 8:133-143

Clarke KR (1993) Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology* 18:117-143

Clarke KR, Warwick RM (1994) Change in Marine Communities: An Approach to Statistical Analysis and Interpretation. Natural Environment Research Council UK, 140:144

Dahdouh-Guebas F, Coppejans E, Van Speybroeck D (1999) Remote sensing and zonation of seagrasses and algae along the Kenyan coast, *Hydrobiologia* 400: 63–73.

Dahdouh-Guebas F (2002) The use of remote sensing and GIS in the sustainable management of tropical coastal ecosystem. *Environment, Development and Sustainability* 4:93-112

Diaz-Pulido G, Diaz JM (1997) Algal Assemblages in lagoonal reefs of Caribbean oceanic atolls. In: Proc 8<sup>th</sup> Int Coral Reef Symp Publ 1: 827-832

Dreckmann KM, Scout I, Granados AB (1996) Lista actualizada de las algas marinas bentónicas de puerto Morelos, Quintana Roo, caribe mexicano. *Polibotánica* 3:1-17

Ferguson RL, Korfmacher K (1997) Remote sensing and GIS analysis of seagrass meadows in North Carolina, USA. *Aquatic Botany* 58:241–258

Fletcher MFF (2001) The applications of Geographic Information System to the coral reef of Southern Okinawa. En: 22nd Asian conference on Remote Sensing, Singapore 1:110-115

Garza-Pérez JR, Lehmann A, Arias-González JE (2004) Spatial Prediction of Coral Reef Habitats: Integrating Ecology with Spatial Modeling and Remote Sensing. *Marine Ecology Progress Series* 269:141-152.

Hernández-Landa R (2004) Variabilidad espacial de la cobertura de corales escleractínios y descripción de condición arrecifal a lo largo del Caribe mexicano y

en arrecife del Banco de Campeche. Tesis de Maestría. CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, Yucatán, México.

Hochberg EJ, Andréfouët S, Tyler MR (2003) Sea Surface Correction of High Spatial Resolution Ikonos Images to Improve Bottom Mapping in Near-Shore Environments. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING* 41: 1724- 1729

Inman DL, Nordstrom CE (1971). On the tectonic and morphologic classification of coasts. *Journal of geology* 79:1-21

International Union for Conservation of Nature (IUCN) (1993) *Reefs at Risk: A program for action*. Rue Mauverney 28, CH- 1196, Gland, Switzerland.

Jompa J, McCook LJ (2002) Effects of competition and herbivory on interactions between a hard coral and a brown alga. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 271: 25– 39

Jordán E, Merino M, Moreno O, Martín M (1981) Community structure of coral reefs in the Mexican Caribbean. En: *Proceedings of the IV International Coral Reef Symposium, Manila, Vol. 2*

Kruse FA (2003) Preliminary results – Hyperspectral mapping of coral reef systems using eo-1 hyperion, Buck Island, U.S. Virgin Islands. The 12th JPL Airborne Geoscience Workshop, 24 – 28 February, Pasadena, California.

Kutser T, Dekker AG, Skirving (2003) Modeling spectral discrimination of Great Barrier Reef benthic communities by remote sensing instruments. *Limnol. Oceanogr.* 48:497–510

Lehmann A, Overton JM, Leathwick JR (2003) GRASP: generalized regression analysis and spatial prediction. *Ecological Modelling* 160:165-183

Lirman D (2001) Competition between macroalgae and corals: effects of herbivore exclusion and increased algal biomass on coral survivorship and growth. *Coral Reefs* 19:392–399

Lyzenga DR (1981) Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *International Journal of Remote Sensing* 2:71–82

Membrillo- Venegas N (1999) Descripción de los paisajes arrecifales en la laguna del Arrecife Alacranes, Yucatán, México. Tesis de Maestría. CINVESTAV, Unidad Mérida-IPN. 119 pp.

Moyer RP, Riegl B, Banks K, Dodge RE (2003) Spatial patterns and ecology of benthic communities on a high-latitude South Florida (Broward County, USA) reef system. *Coral Reefs* 22:447–464

Mumby PJ, Raines PS, Gray DA, Gibson JP (1995) Geographic Information Systems: A tool for integrated coastal zone management in Belize. *Coastal Management* 23:111-121.

Ninsawat S, Kumar TN (2003) Mapping Coral Reefs of Phi Phi Island Using Remote Sensing and GIS for Integrated Coastal Zone Management. Regional Conference on Digital GMS. Bangkok, Thailand. pp 38-43

NASA Landsat Program, 2003, Landsat ETM+ scene p024r047\_7x20000424, SLC-Off, USGS, Sioux Falls, 12/22/2003.

NASA Landsat Program, 2003, Landsat ETM+ scene p018r046\_7x20010417, SLC-Off, USGS, Sioux Falls, 12/22/2003.

NOAA (2002) U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, A National Coral Reef Action Strategy. (Silver Springs, MD: U.S. Coral Reef Conservation Program, U.S. Coral Reef Task Force).

Osborne K, Oxley WG (1997) Sampling benthic communities using video transects. En: S. English, C. Wilkinson y V. Baker. (Eds.). *Survey Manual For Tropical Marine Resources*. Australian Institute of Marine Science. Townsville. 363-376 pp

Pasqualini V, Pergent-Martini C, Clabaut P, Marteel H, Pergent G (2001) Integration of aerial remote sensing, photogrammetry, and GIS technologies in seagrass mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 67:99–105.

Ramachandran S, Sundaramoorthy S, Krishnamoorthy R, Devasenapathy J, Thanikachalam M (1998) Application of remote sensing and GIS to coastal wetland ecology of Tamil Nadu and Andaman and Nicobar group of islands with special reference to mangroves. *Current Science* 75:236-244.

Rosen C (2000) *World Resources 2000-2001. People and Ecosystems: The Fraying Web of life*, Elsevier Science, Amsterdam. The Netherlands, 390 pp.

Schuhmacher H (1978). *Arrecifes Coralinos. Su extensión , mundo animal y ecología*. Omega, Barcelona, 288 p.

Smith JE, Shaw M, Edwards RA, Obura D, Pantos O, Sala E, Sandin SA, Smriga S, Hatay M, Rohwer FL (2006) Indirect effects of algae on coral: algae-mediated, microbeinduced coral mortality. *Ecol Lett* 9:835–845

Spalding MD, Grenfell AM (1997) New estimates of global and regional coral reef areas. *Coral Reefs* 16:225-230.

Thenkabail PS, Enclona EA, Ashton MS, Legg C, De Dieu MJ (2004) Hyperion, IKONOS, ALI and ETM plus sensors in the study of African rainforests. *Remote Sensing of Environment* 9:23-43

Weier J (2001) Mapping the Decline of Coral Reefs. Earth Observatory: URL: [earthobservatory.nasa.gov/Study/Coral/](http://earthobservatory.nasa.gov/Study/Coral/).

Wettle M, Brando VE, Dekker AG (2004) A methodology for retrieval of environmental noise equivalent spectra applied to four Hyperion scenes of the same tropical reef. *Remote Sensing of Environment* 93:188-197.

USGS. 2004. [http://eo1.usgs.gov/userGuide/hyp\\_prod.html](http://eo1.usgs.gov/userGuide/hyp_prod.html)

Villalobos A ( 1971) Estudio ecológico en un arrecife coralino en Veracruz México. *Symp. Invest. Resour. Caribbean Sea. Organized Jointly by UNESCO and FAO*, pp. 531-545

Xiaoguang J, Lingli T, Caixing L, Xiaohuan X, Liang L (2005) Deducing and Analyzing the Spectral Characteristic of Objects Using EO-1 Hyperion Data. *IEEE*. 1686- 1689

Zar JH (1996) *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall (Press), p652

## APENDICE I

Agrupación de los elementos bióticos y abióticos en grupos morfofuncionales (GMF) y grandes grupos morfofuncionales (GGMF).

GGME	GME	ESPECIE
ESCLERACTINEOS	CORAL SEMIESFERICO	Siderastrea sp.
		Montastraea cavernosa
		Dichocoenia stokessi
		Stephanochoenia
		Favia sp.
		Manicina aerolata
		Isophyllastrea rigida
		Musa angulosa
		Diploria Clivosa
		D. Strigosa
	CORAL CEREBRO	D. labyrinthiformis
		Colpophyllia natans
		Meandrina meandrites
		Montastraea annularis
	CORAL SUBMASIVO	M. franksi
		M. faveolata
		Porites astreoides
	CORAL INCRUSTANTE	Agaricia agaricites
		A. tenuifolia
		A. carinata
A. danai		
A. purpurea		
CORAL HONGO	Leptoseris cucullata	
	Mycetophyllia sp.	
CORAL PILAR	Scolymia	
	Dendrogyra cylindrus	
CORAL RAMIFICADO TABULAR	Acropora palmata	
	A. Prolifera	
CORAL RAMOSO	A. cervicornis	
	P. porites	
CORAL DIGITIFORME	Madrasis mirabilis	
	M. decactis	
HIDROCORALES	CORAL COPA Y FLOR HIDROCORALES RAMIFICADO HIDROCORALES FOLIOSO	Eusmilia fastigiata
		Millepora alaicornis
		M. complanata
OCTOCORAL	ABANICO	Gorgonia sp.
ESPONJAS	Ramificacion dicotomica Ramificacion arborecente Ramificacion pinnada No ramificada	
		Semiesférica
		vaso
		costrosa
ALGAS	tubular Macroalgas Verdes/cafes Algas Calcareas Articuladas ALGAS Costrosa coralina	
TAPETE ALGAL PASTOS	Algas filamentosas (TURF)	Thalassia testudinum
		Syringodium sp.
OTROS ORGANISMOS	ORGANISMOS VAGILES SÉSILES	
SUSTRATO	Palytoa ARENA PEDACERIA DE MATERIAL CALCAREO PAVIMENTO /ROCAS GRANDES PISO PAREJO CORAL MUERTO	
OTROS / NO IDENTIFICABLES		

## **APENDICE II**

A continuación se describen las características de las imágenes correspondientes a los arrecifes de Veracruz:

### **EO1H0240472006012110PX**

Satellite= EO1  
Sensor= Hyperion  
Target WRS Path= 024  
Target WRS Row=047  
Year of acquisition=2006  
Julian day of acquisition= 012  
Pointing Mode= Pointed within path/row

### **EO1H0240472006041110PY**

Satellite= EO1  
Sensor= Hyperion  
Target WRS Path= 024  
Target WRS Row=047  
Year of acquisition=2006  
Julian day of acquisition= 041  
Pointing Mode= Pointed within path/row

### **EO1H0240472006090110PZ**

Satellite= EO1  
Sensor= Hyperion  
Target WRS Path= 024  
Target WRS Row=047  
Year of acquisition=2006  
Julian day of acquisition= 090  
Pointing Mode= Pointed within path/row