



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**DESARROLLO DE UN ÍNDICE DE ESTRUCTURA
ARRECIFAL COMO PROPUESTA DE HERRAMIENTA
DE MANEJO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADA EN MANEJO
SUSTENTABLE DE ZONAS COSTERAS**

P R E S E N T A:

SILVIA GARCÍA GUZMÁN

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ

YUCATÁN, MÉXICO, 2013





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Hoja de Datos del Jurado

1. Datos del alumno

García
Guzmán
Silvia
58199105
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Manejo Sustentable de Zonas Costeras
408096988

2. Datos del tutor

Dr.
Joaquín Rodrigo
Garza
Pérez

3. Datos sinodal 1

Dr.
Rodolfo
Rioja
Nieto

4. Datos sinodal 2

Dr.
Jesús Ernesto
Arias
González

5. Datos sinodal 3

M. en C.
Iván
Penié
Rodríguez

6. Datos sinodal 4

Dr.
Daniel
Arceo
Carranza

7. Datos del trabajo escrito

Desarrollo de un índice de estructura arrecifal como propuesta de herramienta de manejo
100p
2013



Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación
(UMDI)

Desarrollo de un Índice de Estructura Arrecifal como Propuesta de Herramienta de Manejo

Tesis para obtener el título de Lic. en Manejo Sustentable de Zonas Costeras

presenta

Silvia García Guzmán

Director de Tesis: Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez

Sisal, Yucatán.

Dedicatoria

Al mar, que ha sido mi más grande inspiración y liberación espiritual

A mi familia y a mis amigos



Agradecimientos

- A mi honorable y alma Mater, UNAM. Muchas gracias por los profesores, las clases, las prácticas y por todo el conocimiento otorgado incondicionalmente.
- A la DGAPA-PAPIME por la beca de tesis de licenciatura otorgada a través del proyecto “Real reefs: Plataforma digital de entretenimiento para la evaluación de arrecifes coralinos”, Clave PE100910.
- Al Centro Ecológico Akumal (CEA) y Akumal Dive Center por todo el apoyo logístico brindado al equipo de PIESACOM.

-
- A mi respetable tutor, amigo y padre putativo Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez. Gracias por todo el apoyo y orientación académica para el desarrollo de esta tesis, el apoyo mental y sobre todo emocional. Ha sido una de mis más grandes inspiraciones y un modelo a seguir, muchas gracias por escucharme y abrirme puertas.
 - A mi familia Elisa, Manuel y a mi madre Elvia.
 - A mis estimados compañeros de trabajo en campo, Mariana Mata, Macho (Alex Schirp), Ulsía y Rod.
 - A mis amigos, que han sido mi soporte durante mi etapa universitaria, han sido mis ojos, mis oídos, mis sonrisas, mis lágrimas. A mis queridos amigos Mariana Gómez, Aleja (mi wera chula), Miguel (Mikepotrosky), Juanito, Daniel (Chiapas), Made, María Violencia, Meztli, Jean, Marie Mata, Jezy, Marco, Debi, Nicole, Toledo. Todos ustedes fueron y son parte de mi felicidad.
 - Y finalmente al Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que me brindó un espacio para escribir esta tesis y a los compañeros de oficina que soportaron mis momentos de estrés. MUCHAS GRACIAS.

*Cuando el sol
acaricia el horizonte de tu cuerpo
y la brisa se esconde
a dormir en la penumbra de las dunas,
poco antes de que lo oscuro
te acune y te proteja,
en el mágico intervalo de minutos
en que el día se viste
con el negro hondo de la noche,
entonces, mi mar, entonces,
me sobran las palabras
y me hago de espuma y de salitre...*

*Entonces,
tus murmullos monocordes y constantes
son todo lo que quiero y lo que mamo:
y sé que soy,
y sé que siento,
y sé que vivo
en un maridaje secreto y relajado
con historias de marinos y de peces
que juntan magia en tus orillas.*

*Entonces,
desde esta orilla que me dieron
con fortuna y sin angustias,
dejo llorar los sentimientos
que me hermanan con el mundo
impotente y revanchista,
plácido y rencoroso,
ofendido,
soñador,
esperanzado...*

-Diez poemas del mar-

Luis E. Prieto. Agosto, 2000

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 02 |
| 2. Marco Teórico..... | 05 |
| 2.1.1 <i>Complejidad Topográfica (Rugosidad)</i> | 06 |
| 2.1.2 <i>Cobertura Coralina</i> | 07 |
| 2.1.3 <i>Acreción Coralina</i> | 08 |
| 2.1.4 <i>Indicadores como Herramienta de Manejo Integral Costero (MIC)</i> | 09 |
| 2.2 <i>Antecedentes</i> | 13 |
| 2.3 <i>Problemática</i> | 14 |
| 2.4 <i>Justificación</i> | 15 |
| 2.5 <i>Hipótesis</i> | 16 |
| 2.5.1 <i>Objetivo Principal</i> | 16 |
| 2.5.2 <i>Objetivos específicos</i> | 16 |
| 2.6 <i>Zona de Estudio</i> | 17 |
| 2.7 <i>Descripción de los sitios de muestro</i> | 18 |
| 3. Metodología..... | 20 |
| 3.1 <i>Diseño de Muestreo</i> | 20 |
| 3.2 <i>Muestreo por el método de videotransectos</i> | 20 |
| 3.3 <i>Trabajo en campo</i> | 21 |
| 3.3.1 <i>Trabajo en laboratorio</i> | 22 |
| 3.3.2 <i>Desarrollo del Índice de Estructura Arrecifal (IEA)</i> | 23 |
| 3.3.3 <i>Cálculo del IEA</i> | 24 |
| 3.3.4 <i>Comparación estadística del Índice de Estructura Arrecifal entre los sitios estudiados</i> | 26 |
| 3.3.4.1 <i>Análisis de Componentes Principales</i> | 26 |
| 3.3.4.2 <i>Análisis de Redundancia</i> | 27 |
| 3.3.4.3 <i>Análisis de Escalamiento Multidimensional no-métrico</i> | 28 |
| 3.3.4.4 <i>Rango del IEA, estimación de valores extremos</i> | 29 |
| 4. Resultados..... | 30 |
| 4.1 <i>Análisis de la abundancia relativa de especies por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual</i> | 30 |
| 4.2 <i>Análisis de las especies que conforman el Índice de Preservación Potencial de Estructura Coralina (IPPEC) por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual</i> | 33 |
| 4.3 <i>Análisis de la Cobertura Coralina (CC) por especie por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual</i> | 35 |
| 4.4 <i>Análisis de la Complejidad Topográfica (CT) por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual</i> | 38 |
| 4.5 <i>Análisis del Índice de Estructura Arrecifal por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual</i> | 39 |
| 4.6 <i>Resultados del análisis multivariado</i> | 40 |
| 4.6.1 <i>Análisis de Componentes Principales</i> | 40 |

| | |
|---|----|
| 4.6.2 <i>Análisis de Redundancia (RDA)</i> | 42 |
| 4.6.3 <i>Análisis de escalamiento Multidimensional no-métrico MDS</i> | 45 |
| 4.7 <i>Ejemplificación de Valores Extremos (mínimo y máximo) del Rango de Valores del IEA</i> | 52 |
| 4.8 <i>Aplicación del Índice de Estructura Arrecifal en los arrecifes de Akumal, Mahahual, Q. Roo, México y Montecristi, República Dominicana</i> | 59 |
| 4.9 <i>Representación visual del Índice de Estructura Arrecifal en diferentes zonas y arrecifes</i> | 60 |
| 5. <i>Discusión</i> | 62 |
| 6. <i>Conclusión</i> | 72 |
| 7. <i>Bibliografía</i> | 74 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----------|--|-----|
| Fig. 2.1 | Componentes y subcomponentes, para la Evaluación de la salud del arrecife mesoamericano..... | 05. |
| Fig. 2.2 | Localización del área de estudio en el Caribe Mexicano, Estado de Quintana Roo, México..... | 18 |
| Fig. 3.1 | Método de filmación de videotransectos..... | 22 |
| Fig. 4.1 | Abundancia relativa de especies del Frente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo..... | 31 |
| Fig. 4.2 | Abundancia relativa de especies del Frente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo..... | 31 |
| Fig. 4.3 | Abundancia relativa de especies de la Pendiente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo..... | 32 |
| Fig. 4.4 | Abundancia de relativa especies de la Pendiente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo..... | 32 |
| Fig. 4.5 | Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en el Frente Arrecifal de Akumal Quintana Roo..... | 33 |
| Fig. 4.6 | Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en el Frente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo..... | 34 |
| Fig. 4.7 | Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en la Pendiente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo..... | 34 |
| Fig. 4.8 | Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en la Pendiente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo..... | 35 |
| Fig. 4.9 | Cobertura Coralina en la zona del frente arrecifal de Akumal..... | 36 |
| Fig. 4.10 | Cobertura Coralina en la zona del frente arrecifal de Mahahual..... | 36 |
| Fig. 4.11 | Cobertura Coralina en la zona de la pendiente arrecifal de Akumal..... | 37 |
| Fig. 4.12 | Cobertura Coralina en la zona de la pendiente arrecifal de Mahahual..... | 37 |
| Fig. 4.13 | Complejidad topográfica del promedio de Akumal y Mahahual..... | 38 |
| Fig. 4.14 | Índice de Estructura Arrecifal del promedio de Akumal y Mahahual..... | 40 |
| Fig. 4.15 | Triplot RDA de los Indicadores, estaciones y especies..... | 43 |
| Fig. 4.16 | Diagrama MDS, de la ordenación de 50 estaciones del arrecife de Akumal y Mahahual..... | 46 |
| Fig. 4.17 | Diagrama MDS del comportamiento de | |

| | | |
|-----------|---|----|
| | las estaciones agrupadas (Cluster) de acuerdo al porcentaje de similaridad (58 y 60%)..... | 47 |
| Fig. 4.18 | Diagrama MDS de comportamiento del indicador Número de Colonias..... | 48 |
| Fig. 4.19 | Diagrama MDS de comportamiento del indicador Número de Especies..... | 49 |
| Fig. 4.20 | Diagrama MDS de comportamiento del indicador Índice de Preservación Potencial de Estructura Coralina (IPPEC)..... | 49 |
| Fig. 4.21 | Diagrama MDS de comportamiento del indicador Cobertura Coralina..... | 50 |
| Fig. 4.22 | Diagrama MDS de comportamiento del indicador Complejidad Topográfica..... | 50 |
| Fig. 4.23 | Diagrama MDS de comportamiento del Índice de Estructura Arrecifal..... | 51 |
| Fig. 4.24 | Imagen representativa del fondo de la Laguna Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo..... | 53 |
| Fig. 4.25 | Abundancia de especies de la Laguna Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo, México..... | 54 |
| Fig. 4.26 | Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en la Laguna de Mahahual, Quintana Roo, México..... | 54 |
| Fig. 4.27 | Cobertura coralina de la Laguna de Mahahual, Quintana Roo, México..... | 55 |
| Fig. 4.28 | Imagen real del Arrecife Montecristi, República Dominicana..... | 56 |
| Fig. 4.29 | Abundancia de especies coralinas del arrecife Montecristi, República Dominicana..... | 57 |
| Fig. 4.30 | Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en el arrecife Montecristi, Rep.Dom..... | 57 |
| Fig. 4.31 | Cobertura coralina del arrecife Montecristi, República Dominicana..... | 58 |
| Fig. 4.32 | Índice de Estructura Arrecifal aplicado en cuatro arrecifes: Mahahual (laguna y arrecife) y Akumal, Quintana Roo, México, y MonteCristi, República Dominicana..... | 59 |
| Fig. 4.33 | Representación visual del Índice de Estructura Arrecifal de siete sitios y zonas de 3 diferentes arrecifes; Mahahual y Akumal, Q. Roo, México, y Montecristi, Rep. Dom..... | 61 |

Lista de Tablas

| | | |
|---------|--|----|
| Tabla 1 | Ponderación por especie coralina..... | 24 |
| Tabla 2 | Densidad de colonias coralinas..... | 30 |
| Tabla 3 | Valor de los indicadores evaluados para el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal (IEA)..... | 39 |
| Tabla 4 | Resultados del PCA de Cobertura coralina Valores del peso y porcentaje de cada componente principal por especie..... | 41 |
| Tabla 5 | Resultados del PCA del Número de Colonias..... | 41 |
| Tabla 6 | Análisis de Redundancia (RDA), Eigenvalores..... | 42 |

Lista de Ecuaciones

| | | |
|------------|---------------------------------------|----|
| Ecuación 1 | Tasa de acumulación de calcio..... | 09 |
| Ecuación 2 | Porcentaje de cobertura coralina..... | 23 |
| Ecuación 3 | Cálculo del IEA (1ra parte)..... | 24 |
| Ecuación 4 | Cálculo del IEA (2da parte)..... | 25 |
| Ecuación 5 | Fórmula del IEA | 25 |

Anexos

| | | |
|------|---|----|
| A1. | Indicadores de salud de los arrecifes..... | 84 |
| A2. | Complejidad topográfica (CT) de 10 estaciones del Frente Arrecifal de Akumal..... | 85 |
| A3. | Complejidad topográfica (CT) de 17 estaciones del Frente Arrecifal de Mahahual..... | 85 |
| A4. | Complejidad topográfica (CT) de 11 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Akumal..... | 86 |
| A5. | Complejidad topográfica (CT) de 12 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Akumal..... | 86 |
| A6. | Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 10 estaciones del Frente Arrecifal de Akumal..... | 87 |
| A7. | Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 17 estaciones del Frente Arrecifal de Mahahual..... | 87 |
| A8. | Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 11 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Akumal..... | 88 |
| A9. | Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 12 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Mahahual..... | 88 |
| A10. | Dendrograma obtenido del Análisis de Cluster..... | 89 |

1. Introducción

Los arrecifes coralinos son ecosistemas de gran importancia ecológica, debido a su alta diversidad, productividad y complejidad estructural. Son estructuras marinas construidas esencialmente por organismos simbioses hermatípicos (corales) cuyo esqueleto está constituido por carbonato de calcio (CaCO_3) en forma de aragonita, haciéndolos los principales constructores de estructuras arrecifales (Veron, 2000). Diversos organismos contribuyen mediante secreciones de carbonato de calcio, a la formación de arrecifes coralinos (por ejemplo esponjas, poliquetos, moluscos, crustáceos, equinodermos y peces). La formación y distribución de los arrecifes coralinos depende en buena medida de la temperatura del mar, alcalinidad, transparencia, sedimentos suspendidos, calcificación, profundidad, oleaje y corrientes (Kleypas *et al.*, 1999; Langdon *et al.*, 2000; McNeil *et al.*, 2004).

Estos ecosistemas cumplen con funciones de gran importancia como protección a la costa de marejadas, oleajes fuertes y huracanes; modificación de dirección y velocidad de las corrientes marinas, permitiendo el establecimiento de comunidades asociadas a este sistema como praderas de pastos marinos y manglar. Así mismo, intervienen en la dinámica y exportación de nutrientes a los sistemas demersales y terrestres, sirven como hábitat para especies marinas de consumo humano; y además representan un gran valor estético por su variedad de colores y formas, por lo que son fuente de recreación (buceo deportivo) y fuente de productos naturales con potencial biomédico (DRNA-NOAA,2002).

Los esquemas de distribución y abundancia de los organismos sésiles (corales escleractínios y milleporidos, algas de diversos tipos y otros invertebrados) en ambientes arrecifales, generalmente son el reflejo de procesos históricos, condiciones ambientales predominantes y complejas relaciones ecológicas (Veron, 1986; Wilkinson & Buddemeier, 1994).

Sin embargo, la estructura y el funcionamiento de los arrecifes coralinos se ve amenazada, por factores meteorológicos e hidrológicos. Estos afectan su desarrollo,

debido a la distribución latitudinal de cinturones de presión, los cuales controlan la lluvia y perturbaciones ciclónicas como; los huracanes y tormentas, mareas, corrientes y centros de surgencias oceánicas (Glynn, 1973).

También, es importante considerar los cambios climáticos globales, fluctuaciones de temperatura, el aumento en el nivel del mar y la acidificación de los océanos, propiciados por la emisión de bióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero hacia la atmósfera (Hoegh-Guldberg, 2011). Dichos cambios climáticos afectan directamente a los arrecifes reduciendo su resiliencia y resistencia ante eventos de blanqueamiento masivo y enfermedades (Done, 1999). Además las tormentas los pueden afectar más, cuando las colonias coralinas se encuentran en un cambio de fase a bentos no calcificados como algas, esponjas y corales blandos (Done, 1999).

Las colonias coralinas pueden responder a un ambiente gradualmente más perturbado por los diferentes escenarios del cambio climático a través de: 1. la tolerancia fisiológica (Done, 1992); 2. la rápida sustitución en las poblaciones de la misma especie (disminución en la longevidad) (Mumby & Steneck, 2011); 3. cambios estratégicos en la composición de las especies que contribuyen al crecimiento (arrecifes –efímeros vs. perennes-) (Jokiel *et al.*, 2004; Langmead & Sheppard, 2004; Jaramillo & Acosta, 2009) y, 4. cambios de fase que son transiciones de la dominancia de coral duro a un grupo funcional diferente, pero bien adaptado como los octocorales (Done, 1999) y actualmente las algas (Dustan & Halas, 1987; Liddell & Ohlhorst, 1992; Porter & Meier, 1992; Shulman & Robertson, 1996).

Diversos estudios han corroborado que las actividades antropogénicas y el desarrollo costero son los principales factores que afectan el estado de condición de los arrecifes coralinos (Hernández, 2005; Martínez & Acosta, 2005; Cruz-Toledo, 2011). Entre estos factores, se mencionan el cambio de uso de suelo, la construcción de centros urbanos, deterioro de la calidad del agua por escurrimientos y filtraciones, alta incidencia de actividades de buceo, pesca deportiva y navegación de tipo turístico, así como la modificación a sistemas de dunas costeras y manglares (National Research Council, 1990; Hollock *et al.*, 1993; Brown, 1997; Hoegh-Guldberg, 1999; Hughes & Conell,

1999; Knowlton, 2001; Garza-Pérez *et al.*, 2004; Buddemeier *et al.*, 2004; Medellín *et al.*, 2009; Hoegh-Guldberg, 2011).

Es importante considerar que la frecuencia e intensidad de los eventos extremos y el incremento potencial de las actividades antropogénicas afecta en el porcentaje de cobertura coralina, tamaño de las colonias, complejidad topográfica, densidad y distribución, abundancia de organismos calcificados vs. organismos no calcificados (competencia) (Langmed & Sheppard, 2004; Martínez & Acosta, 2005; Jaramillo & Acosta, 2009. Dichos efectos pueden producir cambios en las poblaciones y comunidades coralinas por las bajas tasas de calcificación y por ende repercutirá en toda la zona arrecifal (Done, 1999).

Últimamente se ha reconocido la importancia de tomar acciones para la conservación, manejo sustentable e integral de los recursos marinos y costeros, como la única vía para detener su degradación y ayudar a mantener la resiliencia de los sistemas de arrecifes coralinos (Garza-Pérez *et al.*, 2004; Mumby & Steneck, 2011).

Por lo tanto para evaluar el efecto de las estrategias de protección y contar con un registro continuo de los arrecifes coralinos, es necesario realizar monitoreos frecuentes, utilizando los indicadores como: diversidad de especies, cobertura de coral vivo, complejidad topográfica, proporción coral-algas, mortalidad coralina, enfermedades, blanqueamiento, abundancia de peces, calidad del agua, tasas de sedimentación, entre otros.

El presente trabajo propone una aproximación novedosa a la implementación de un índice integral de estructura en arrecifes coralinos, a partir de indicadores utilizados comúnmente de manera individual, considerando específicamente la complejidad topográfica, la cobertura coralina y la densidad de colonias por especie para desarrollar un índice potencial de preservación de estructura coralina, que sirve para la descripción y la comparación paisajística de los arrecifes coralinos, ya sea local o regionalmente.

2. Marco Teórico

Existen diferentes clasificaciones de indicadores, los cuales al ser evaluados en conjunto, proporcionan información para determinar y evaluar el estado de condición ó salud de los arrecifes coralinos. McField & Kramer (2007) propusieron clasificar en cuatro componentes los indicadores que existen, para evaluar la salud del arrecife Mesoamericano; 1. Estructura del ecosistema, 2. Función del ecosistema, 3. Conductores de cambio, y 4. Bienestar social y gobernanza (Figura 2.1). Cada componente se define como una condición o estado que tiene efectos, en la integridad y salud de los arrecifes, y que puede ser medido directa o indirectamente por indicadores específicos. En cada uno de los componentes, existen subcomponentes, y en cada subcomponente se incluyen indicadores cuyo perfil evaluativo sea similar (Anexo 1, pág. 84).



Fig. 2.1. Componentes y subcomponentes, para la evaluación de la salud del arrecife mesoamericano.

Para el desarrollo de esta tesis, se consideraron algunos indicadores correspondientes a los subgrupos *Biodiversidad* y *Estructura Comunitaria*, del grupo *Estructura del ecosistema*. Dichos indicadores son los siguientes; diversidad coralina (considerado para el desarrollo de Índice de Potencial de Preservación Coralina –IPPEC-), cobertura de coral y rugosidad coralina (complejidad topográfica). Así mismo se consideró el indicador; acreción coralina, el cual pertenece al subgrupo *Acreción y Bioerosión del arrecife*, del grupo *Función del ecosistema*.

Éstos indicadores fueron seleccionados por su potencial de poder describir estructural y funcionalmente los arrecifes coralinos, considerando que Arias et. al 2011, definió que los atributos de paisaje; cobertura de coral, complejidad del hábitat (complejidad topográfica), y riqueza de corales, son excelentes indicadores de valores críticos de biodiversidad coralina. Esto significa que los simples atributos de paisaje pueden ser usados para predecir valores de biodiversidad. Así mismo se reconoce que el uso de éstos atributos de paisaje en conjunto, son variables explicativas mucho más importantes para los patrones biogeográficos que la explicación individual de cada una de las variables y/o indicadores.

2.1.1 Complejidad Topográfica (Rugosidad Coralina)

La rugosidad, es una medición de la complejidad superficial que ha sido usada rutinariamente por investigadores, biólogos y ecólogos de los arrecifes coralinos. La rugosidad puede ser definida como la complejidad de la estructura física del fondo marino, y es un elemento clave e indicador para conocer el hábitat bentónico (Dunn, 2009; Wilson *et al.*, 2007). Para Magno & Villanoy (2006), la rugosidad es el estado de complejidad o irregularidad de una superficie.

La rugosidad se ha llamado de diferentes maneras: complejidad del hábitat, complejidad topográfica, y heterogeneidad del sustrato (Zainul, 2010; Beck, 1998). La heterogeneidad del sustrato aporta complejidad de hábitat y proporciona una variedad de nichos y por lo tanto variedad de condiciones ambientales que permiten una mayor diversidad. Es decir, las áreas con alta rugosidad proporcionan mayor diversidad de peces arrecifales, mayor superficie para la fijación de algas, corales y diversos

invertebrados sésiles (Rooney, 1993; Mumby, 2006; Zainul, 2010).

La rugosidad es un indicador que relaciona la cobertura de coral, el régimen de perturbación y la absorción de nutrientes, con las características de las comunidades de peces. Diversas investigaciones han documentado la importancia de la rugosidad en la estructura y composición del ensamble de peces (Luckhurst & Luckhurst, 1978; Roberts & Ormond, 1987; McCormick, 1994; Friedlander & Parrish, 1998; Nuñez-Lara & Arias-González, 1998; Nuñez-Lara *et al.*, 2005; Gratwicke & Speight, 2005; Wilson *et al.*, 2007; Arias-González *et al.*, 2008; Dunn & Halpin, 2009; Zainul, 2010). Aronson (1994), utilizó la rugosidad coralina como medida integradora de la perturbación en los sistemas arrecifales, concluyendo que la rugosidad está altamente correlacionada con la cobertura de coral, la diversidad, y el régimen de perturbación. Por otra parte, otros estudios han descrito el potencial de la rugosidad como bioindicador de la absorción de nutrientes y materia orgánica particulada (Zainul, 2010).

La rugosidad también ha sido utilizada como un indicador para identificar y clasificar los hábitat bentónicos mediante teledetección con Light Detection and Ranging (LIDAR, por sus siglas en inglés) (Brock *et al.* 2004, 2006, Kuffner *et al.* 2007)) y mediante imágenes de satélite (Pittman *et al.*, 2007; Purkis *et al.* 2008; Dunn & Halpin, 2009; Zainul, 2010)

Para la medición de la rugosidad coralina existen diversos métodos, el más común es la técnica de la cadena, la cual relaciona la longitud de una cadena con la distancia que cubre al ser posicionada sobre el substrato arrecifal (Aronson *et al.*, 1994; CARICOMP, 1994).

2.1.2 Cobertura Coralina

La cobertura coralina es un indicador que, generalmente, mide o estima la proporción (porcentaje) de la superficie del arrecife cubierto por coral escleractinio vivo. Este indicador sirve para describir la estructura ecosistémica de los arrecifes. McField & Kramer (2007), mencionan que la condición de un arrecife coralino sano se caracteriza por tener un porcentaje de cobertura coralina relativamente alto, un porcentaje de

algas calcáreas e incrustantes moderado, y un muy bajo o nulo porcentaje de macroalgas, sin embargo, para definir la salud de un arrecife coralino es necesario considerar diversos indicadores en conjunto como: diversidad y abundancia de peces, tasa de sedimentación, enfermedades y mortalidad coralina, calidad de agua, etc.

Es importante considerar que los corales escleractínios son los principales organismos constructores de la estructura tridimensional de los arrecifes coralinos y por ello es necesario conocer el estado de condición de estos para determinar las acciones a tomar para un manejo exitoso. Sin este grupo de corales, un arrecife no puede recuperarse después de alguna perturbación natural y/o antropogénica (Lang, 2003). El porcentaje de cobertura de corales duros es el parámetro que más frecuentemente se utiliza por los manejadores de áreas protegidas para estimar la salud de un arrecife (Hill, 2004).

2.1.3 Acreción Coralina

La acreción coralina puede ser descrita en términos demográficos de los organismos calcificadores como: su densidad y asentamiento, sus tasas de crecimiento, su longevidad promedio y tamaños máximos (Van Woesik & Done, 1997).

El aumento de la masa en relación al volumen que acompaña al envejecimiento de los corales formadores de arrecifes (hermatípicos) son a la vez los que favorecen la conservación de grandes bloques constructores de arrecifes en el sitio (Van Woesik & Done, 1997).

Los corales hermatípicos son aquellos organismos que tienen la capacidad de producir esqueletos de carbonato de calcio. Los escleractínios hermatípicos e hidrocorales se distinguen por la presencia de zooxantelas simbióticas, ausentes en los ahermatípicos y en muchas especies no constructoras (Birkeland, 1997).

Existen categorías de los organismos constructores, que están basadas en la manera en que sus estructuras calcáreas se mantienen después de la muerte. El tamaño de la unidad del esqueleto mineral es el factor determinante, es decir las especies formadoras de grandes colonias son consideradas como hermatípicos primarios u

organismos constructores. Aquellas especies de colonias más pequeñas y más frágiles tienden a formar grava-detritus y son considerados como hermatípicos secundarios. Los constructores de arena son aquellas especies que tienen unidades esqueléticas mucho más pequeñas que sus residuos calcáreos y sólo pueden formar detritus de grano fino que se puede acumular en capas de arena o limo no consolidados (Goreau, 1963).

Una forma de calcular la tasa de crecimiento arrecifal es a través de la tasa de acumulación de calcio o de carbono orgánico (Ecuación 1).

$$1. \quad I = \frac{\text{Peso del calcio o carbono orgánico depositado per hora}}{\text{Total del calcio o carbon orgánico contenido en la muestra}} \times 100$$

En resumen, la acreción es un proceso de construcción arrecifal basado en; 1) la acumulación biológica por corales y algas calcáreas, 2) la acumulación de sedimentos (por el depósito de organismos arrecifales asociados) y 3) por procesos destructivos moderados (por ejemplo a través de la depredación del coral vivo por peces, equinodermos, esponjas y gusanos poliquetos) y otros impactos naturales. El crecimiento neto de los arrecifes es la suma de la acumulación de la estructura arrecifal, la acumulación de sedimentos y la destrucción.

En el presente trabajo la acreción coralina, es decir, la porción de la acreción arrecifal dada únicamente por corales duros, será inferida a través del desarrollo de una aproximación, en forma del Índice Potencial de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC).

2.1.4 Indicadores como Herramienta de Manejo Integral Costero (MIC)

El MIC es un proceso continuo y dinámico que guía el uso, el desarrollo sustentable y la protección de áreas costeras. *“El manejo y la planificación comprensiva de las áreas marinas son esenciales para mantener en el largo plazo la integridad ecológica, la productividad y el beneficio económico de las regiones costeras”* (GESAMP, 1999).

El MIC requiere del involucramiento activo y sostenible de muchos actores claves (instituciones, científicos, políticas, gobiernos, empresariales etc.) y del público con intereses en cómo son distribuidos los recursos costeros y cómo son solucionados los conflictos. El proceso de MIC proporciona el medio en el cual se discuten los problemas a escala local, regional y nacional y se negocia su dirección hacia el futuro. El concepto de un enfoque integrado de manejo de áreas costeras es intencionalmente amplio y tiene cuatro elementos:

- Geográfico: Toma en cuenta las interrelaciones e interdependencias (físicas, químicas, biológicas y ecológicas) entre los componentes terrestres, estuarinos, litorales y de mar adentro de las regiones costeras.
- Temporal: Apoya la planificación e implementación de acciones de manejo dentro del contexto de una estrategia a largo plazo.
- Sectorial: Toma en cuenta las interrelaciones entre los usos humanos de los recursos y áreas costeras así como los valores e intereses socioeconómicos asociados.
- Político/institucional: Provee la más amplia posibilidad de consulta entre gobierno, sectores económicos y sociales y comunidad durante y para el desarrollo de políticas, planificación, resolución de conflictos, y elaboración de regulaciones relacionadas a cualquier asunto que afecte el uso y la protección de áreas, recursos y atractivos costeros.

El MIC requiere una base multidisciplinaria en donde exista una relación y colaboración entre los expertos en ciencias ambientales y sociales. Por ello dicha participación es fundamental para la realización de planes de MIC en cada fase del proceso (GESAMP, 1999). Las fases son las siguientes:

- Identificación y evaluación de asuntos claves
- Preparación del programa
- Adopción formal y financiamiento

- Implementación
- Evaluación

Para el desarrollo de este trabajo sólo se implementó la primera fase, que consiste en compilar, integrar y priorizar la información que define el contexto ambiental, social e institucional. Sin embargo para objetivos de esta tesis únicamente se consideró definir el contexto ambiental (evaluación de la condición del ecosistema costero) bajo los siguientes temas sugeridos por el Grupo Mixto de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP):

- Caracterización de los más significativos hábitats, especies y comunidades biológicas, los recursos vivos y no vivos, y de las interrelaciones entre los mencionados elementos.
- Identificación de las tendencias en la condición y uso de los recursos y en los valores y funciones de los ecosistemas (GESAMP, 1999).

La obtención de este tipo de información resulta esencial en el proceso del MIC. Es indispensable identificar y documentar las presiones y amenazas sobre el ambiente, así como su situación y las tendencias de deterioro.

En el contexto de esta tesis, es importante resaltar el concepto operativo de los indicadores. Estos tienen como principal objetivo brindar información, que describa las tendencias de cambio, la situación actual del medio ambiente y recursos naturales (monitoreo), así como las presiones que los amenazan (evaluación). Ellos constituyen una de las mejores y más utilizadas herramientas, para que la sociedad y los tomadores de decisiones obtengan una visión integral del estado del ambiente, los factores que lo amenazan y, la efectividad de las políticas públicas encaminadas a la solución de la problemática ambiental. (SEMARNAT- SNIARN, 2010. SEMARNAT, 2010).

Las tareas de monitoreo y evaluación, asociadas a la primera fase del MCI, mencionada anteriormente (identificación y evaluación de asuntos claves), requieren en

general de un sistema de indicadores que permita convertir datos brutos en información agregada y sintetizada, comprensible, y esto es especialmente importante para los tomadores de decisiones. En este sentido, la información producida con base en indicadores debe adecuarse a los requerimientos y a las prioridades para los que va ser utilizado (ambiental, social, económica o institucionalmente). También debe ser lo suficientemente sensible como para reflejar cambios significativos en los impactos medioambientales. En todo caso, los indicadores deben ser equilibrados respecto a los aspectos positivos y negativos que miden; deben ser sencillos, comprensibles e inequívocos, deben de permitir comparaciones en el curso del tiempo, deben permitir comparaciones entre escalas territoriales y órdenes de gobierno, y por último deben ser compactos por su forma de agregación (SEMARNAT, 2010).

En México actualmente existe un Sistema Nacional de Indicadores Ambientales (SNIA), en el cual establecen 3 categorías de indicadores para monitorear, evaluar y notificar el desempeño ambiental dentro de un Sistema de Manejo Ambiental (SMA):

- Indicadores de la Condición Ambiental (ICA): Proporcionan información para comprender los impactos ambientales, reales o potenciales, con la aplicación o en ausencia de SMA
- Indicadores del Desempeño de Gestión (IDG): Incluyen información sobre el esfuerzo de la Dirección de la institución y el grado de influencia obtenido, en el desempeño ambiental de los SMA.
- Indicadores del Desempeño Operacional (IDO): Registran información sobre el grado de adecuación de los SMA, para mejorar el desempeño ambiental de la institución.

El tipo de indicador a desarrollar en esta tesis de acuerdo al SNIA, corresponde a la categoría ICA, ya que se deriva de la aplicación en conjunto de indicadores tales como cobertura coralina, complejidad topográfica, y número de colonias, que proporcionan información sobre el estado de condición del arrecife. Este indicador a desarrollar

también contará con las características mencionadas como indispensables para la primera fase del MIC, mencionadas anteriormente.

2.2 Antecedentes

Durante los años 2004-2008 se realizaron monitoreos en diversos arrecifes del Caribe Mexicano entre ellos Akumal. Siguiendo el protocolo AGRRA en los años 2005-2006 se determinó en arrecifes de Quintana Roo (Sian Ka'an, Cozumel, Isla Contoy, Banco Chinchorro, Akumal entre otros) que el promedio de cobertura coralina era 7.5%. En general los arrecifes del norte de Quintana Roo en el 2000, presentaban en promedio 13% de cobertura coralina y 82% de macroalgas (Bozec *et al.*, 2008). En el año 2007 la cobertura en el arrecife de Akumal correspondía al 10% de corales vivos y 75% de macroalgas, mientras que para el año 2008 la cobertura coralina viva representaba sólo el 8% y 77% de macroalgas, en el 2010 9.93% correspondía a la cobertura coralina y 37.55% a macroalgas (García *et al.*, 2008; Garza-Pérez *et al.*, 2010)

Garza-Pérez *et al.* (2004), caracterizó el arrecife de Akumal, efectuando una comparación de grandes grupos funcionales, determinando que la cobertura coralina en promedio incluyendo todas las zonas del arrecife era de 14.56%. En ese estudio la cobertura de corales duros se utilizó como el principal indicador del estado de condición arrecifal, aunque menciona que no debe ser utilizado como el único indicador para definir dicho estado. También menciona que una pieza de información importante que se utilizó como indicador de desarrollo arrecifal y estado de condición es la presencia de un porcentaje de cobertura importante (4.3%) de la especie *Acropora palmata*.

En 1997 (Garza-Pérez, 1999) realizó una evaluación de la comunidad coralina arrecifal de Akumal teniendo como resultado un mayor porcentaje de cobertura de algas (28.14%) con respecto a la cobertura de Corales escleractínios (23.3%). Borges (2003) determinó que la comunidad bentónica en el arrecife de Akumal estaba dominada por

especies como *Montrastrea annularis*, *Agaricia agaricites* y *Siderastrea siderea*. En 1999, Steneck & Lang determinaron que la cobertura coralina viva era de 17.3%.

En el arrecife de Mahahual se ha reportado que los corales dominantes son *Porites astreoides*, *Acropora palmata*, *Agaricia tenuifolia*, *Montastrea annularis*, *Porites porites*, *Dendrogyra cylindrus*, *Siderastrea siderea* además *Millepora alcicornis* es la especie más importante de este arrecife (Borges, 2003, Aguilar, 1995). Garza-Pérez (2004) reporta que la comunidad coralina arrecifal de Mahahual en el 2001, presenta una condición saludable pero afectada por estrés, sin embargo presenta altas coberturas coralinas, alto valor de riqueza de especies coralinas y baja proporción de algas filamentosas/pardas, lo cual denota una buena estabilidad (resistencia, resiliencia y persistencia) por parte de la comunidad coralina a los disturbios naturales (blanqueamiento masivo y huracanes).

Ruiz-Zarate et. al., 2003, definieron que en Mahahual 1999, la cobertura coralina promedio era 17%. El estudio realizado por la ONG Amigos de Sian Ka'an entre los años 2002-2003 determinó que la cobertura de corales escleractínios en la parte sur del arrecife Mahahual variaba entre el 22 y 47% dependiendo de la zona del arrecife. Los autores concluyeron que el arrecife de Mahahual tenía zonas en muy buena condición por su desarrollo estructural y cobertura de coral vivo, sin embargo hay sitios con varias colonias de coral muerto, intemperizado, con sedimentos o bien, con sobre crecimiento de algas.

2.3 Problemática.

A nivel global, alrededor de mil millones de personas viven dentro de 100 km aledaños a los arrecifes de coral, en donde se benefician tanto de las pesquerías y el turismo, como de la protección a la línea de costa (Curran et. al 2002; Creel, 2003). Se espera que la población costera mundial se duplique para el 2050 y que los arrecifes de coral sufran más por las presiones derivadas de desarrollo no manejado a lo largo de las costas. En México en el año 2000 aproximadamente 22 millones de personas habitaban en la zona costera (Morales, 2006).

Los arrecifes coralinos de Quintana Roo conforman la porción septentrional del llamado Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), que se distribuye desde las inmediaciones de la Isla Contoy, cerca de Cancún hasta la costa de Honduras (Almada-Villela, 2003; Chávez, 2006). Esta zona está constituida por un área geográfica amplia y diversa. Con alta biodiversidad y gran diversidad espacial, geográfica y social haciendo de ésta una región destacada en el mundo.

El desarrollo costero ha evolucionado rápidamente a lo largo de la costa del Caribe Mexicano (Kramer & Kramer, 2002; Wilkinson, 2002, 2004; Bozec *et al.* 2008) y las regulaciones existentes no tienen mucha aplicación, y por estas razones la integridad de los recursos marino-costeros de ésta zona está seriamente amenazada (Garza-Pérez, 1999; Gardner *et al.* 2003; Wilkinson, 2004; Bozec *et al.* 2008). En esta zona se han observado cambios en la composición coralina, mortandades masivas de organismos arrecifales, reducción en el número de especies de coral y cobertura coralina (Aranson & Precht, 2006; Mora, 2008), entre otros, afectando la rugosidad del arrecife. Desde fines del siglo pasado uno de los principales problemas que se enfrentan los arrecifes de Quintana Roo, es un deficiente manejo y observancia de las regulaciones a las que deberían estar sometidos (Garza-Pérez, 1999, Hughes *et al.*, 2003; Bellwood *et al.*, 2004). El desarrollo costero no planificado no es solamente una amenaza seria para los arrecifes de coral, sino que también conduce a pérdidas socioeconómicas a largo plazo.

2.4 Justificación

El adecuado manejo de sistemas marinos requiere que sea reconocido el cambio estructural y funcional al que se ven sometidos como resultado de las diferentes formas de explotación humana (Arias-González, 1998). Por ello es importante la realización y el análisis de estudios enfocados a la caracterización de los arrecifes, para así determinar la importancia de los recursos de la zona como conocimiento base para su correcto manejo.

El papel de los indicadores arrecifales es aportar información básica sobre el estado de condición del sistema arrecifal desde diferentes atributos: 1. estructura del ecosistema,

2. función del ecosistema, 3. conductores de cambio, y 4. bienestar social y gobernanza. (McField & Kramer, 2007). Sin embargo en la actualidad existen pocos índices que, por una parte, incorporen integralmente información proporcionada por diversos indicadores, y por otra parte, que sea fácil su interpretación.

Por tanto, el desarrollar un índice arrecifal que incluya diversos indicadores de la estructura del ecosistema como: rugosidad arrecifal (complejidad topográfica), número de colonias vivas por especie (contempladas dentro de un Índice Potencial de Preservación de Estructura Coralina) y cobertura coralina, permitirá la evaluación sinóptica de la estructura arrecifal. Estos indicadores seleccionados para el desarrollo del índice, son considerados como excelentes atributos de paisaje, y que pueden ser usados para predecir valores de biodiversidad en diferentes áreas de arrecifes coralinos (Arias *et al.*, 2011).

La importancia de este *índice de estructura arrecifal*, es que incorpora y pondera los indicadores que influyen en la composición de los arrecifes coralinos, (p. ej. la estructura arrecifal puede tener una alta rugosidad pero baja cobertura coralina), presentando un solo resultado fácilmente interpretable, y puede ser adoptado como una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en manejo.

2.5 Hipótesis

El índice de estructura arrecifal desarrollado a través de la incorporación de tres indicadores ambientales relacionados (complejidad topográfica, cobertura coralina, índice de preservación de estructura coralina) otorgará información sinóptica de la composición estructural arrecifal en un solo valor, y podrá servir como herramienta para el apoyo a la toma de decisiones en manejo.

2.5.1 Objetivo principal

Desarrollar un índice de estructura arrecifal y evaluar su utilidad para aplicaciones en el manejo de Arrecifes.

2.5.2 Objetivos específicos

- Obtener datos de los indicadores; complejidad topográfica, cobertura coralina e

índice potencial de preservación de estructura coralina de los arrecifes de Akumal y Mahahual.

- Desarrollar el procedimiento para calcular el índice de estructura arrecifal.
- Comparar las estimaciones obtenidas del índice en dos sitios de estudio.
- Evaluar la utilidad del índice contrastándolo con el método tradicional de evaluación.
- Aplicación del Índice de Estructura Arrecifal como herramienta de manejo

2.6 Zona de Estudio

El área de estudio se encuentra ubicado en la costa este de Quintana Roo. El clima es cálido subhúmedo y la temperatura promedio oscila entre los 25°C y 27°C. La precipitación pluvial se da principalmente en el verano, y oscila entre 1000 y 2000 mm al año. Los vientos predominantes son del sureste y en la temporada de otoño-invierno abundan los vientos de noreste (Garza-Pérez, 1999; INEGI, 2012).

Las costas de Quintana Roo están influenciadas por aguas oceánicas que forman parte del extremo Noroccidental del Mar Caribe y parte del canal de Yucatán (Lara, 2008; Wilkinson et. al., 2009). Estas aguas se caracterizan por tener gran transparencia y una corriente predominante de sur a norte con velocidades promedio mayores a 2 nudos, durante la mayor parte del año. El régimen de marea es semi-diurno de poca amplitud, la temperatura promedio del agua es de 27.5°C. La salinidad promedio es de 35.6 a 36.7⁰/₀₀ (Ferre-D'amare, 1985).

La parte continental de este litoral está formado por calizas coralíferas con una plataforma estrecha y homogénea (Wilkinson et. al. 2009), en cuyas proximidades se localizan cuencas oceánicas profundas separadas por un sistema de crestas paralelas. A lo largo de la costa existe una serie de franjas arrecifales que la recorren intermitentemente y se encuentran en algunas zonas cerca de la playa (Borges, 2003).

En la costa oriental de la Península de Yucatán se localizan los arrecifes de Akumal y Mahahual (Fig. 2.2). Pertenecen al sistema de arrecifes bordeantes de Quintana Roo y comparten en general la misma estructura geomorfológica y comunitaria.



Fig. 2.2 Localización del área de estudio en el Caribe Mexicano, Estado de Quintana Roo, México.

2.7 Descripción de los sitios de muestro

El arrecife Akumal ($20^{\circ}24'N$, $87^{\circ}19'W$) presenta una morfología típica de los arrecifes bordeantes, con una estructura altamente desarrollada. En la zona de arrecife anterior se encuentran parches coralinos lagunares con una alta riqueza de especies coralinas camas de pastos marinos, extensos arenales y praderas con baja cobertura de algas, la profundidad de la laguna incrementa con la distancia a la costa. El sistema de lagunas arrecifales posee una alta complejidad morfológica ya que está constituido por varias caletas y bahías, entre las cuales existen dos que aportan agua dulce (proveniente del manto freático) al sistema, la laguna Yalkú y la caleta Catamarán. Posee una cresta arrecifal conspicua bien delineada. En la zona del arrecife posterior se encuentran zonas de transición dominadas por roca calcárea, canales de arena hasta una profundidad aproximada de 50 m (Garza-Pérez, 2004). Este sitio se diferencia de los demás arrecifes de la porción central de Quintana Roo, por contar con una formación arrecifal considerable (Jordán, 1993).

Mahahual (18°43'N, 87°41'N) es un arrecife bien desarrollado desde la cresta hasta las estructuras profundas, el sustrato es accidentado con alta cobertura de coral, pedacería de coral muerto, rocas, macroalgas y otros grupos bentónicos. Las cordilleras son altas, amplias y complejas (Nuñez-Lara, 2003), presenta playas arenosas y rocosas y una laguna somera muy extensa, así como estructuras coralinas bien desarrolladas en la zona de cordilleras y canales, lo que constituye su principal atracción turística. En las últimas décadas de siglo pasado este arrecife había sido explotado por pesquerías artesanales y se encontraba en una fase de cambio/incremento del tipo de presiones antropogénicas que actúan sobre él (Garza-Pérez, 2004). Posteriormente Mahahual se identificó como el sitio idóneo para que, dentro de los esquemas de funcionamiento regional, fuera el punto focal para la introducción de infraestructura, equipamiento y de la prestación de servicios a los desarrollos turísticos, visitantes y residentes locales, transformándose en el principal centro urbano de Costa Maya a partir del cual se organizará el resto del territorio de la zona sur. Estas perspectivas de desarrollo económico, social y urbano se rigen por el esquema de Desarrollo Urbano de Mahahual, instrumento adecuado y legalmente válido que orienta y regula el crecimiento urbano y turístico (Amigos de Sian Ka'an, 2003).

3. Metodología

3.1 Diseño del Muestreo

A partir de un diseño muestral estratificado al azar, establecido previamente (Garza-Pérez, 2004), se establecieron estaciones en cada zona arrecifal –laguna, frente y pendiente- definidas visualmente sobre una imagen de satélite de alta resolución y localizadas en campo por medio de un GPS. En cada estación se filmaron videotransectos y se midió la complejidad topográfica en diferentes zonas arrecifales: frente y pendiente en rangos de profundidad de 5-12 m y 18-23m respectivamente. Se muestrearon 21 estaciones en el arrecife de Akumal, y 29 en el de Mahahual.

3.2 Muestreo por el método de videotransectos (Garza-Pérez 2004)

Para la caracterización de la comunidad bentónica se utilizó una modificación al método de videotransectos de Garza-Pérez (2004), el cual es considerado un método de precisión media de acuerdo al área que abarca y el tipo y cantidad de datos que genera (Aronson *et al.* 1994, Garza-Pérez, 1999). Este método es no destructivo y permite analizar comunidades bentónicas además provee medidas cuantitativas de cambios temporales en las comunidades. (Membrillo-Venegas, 1999; Garza-Pérez, 1999). El método de videotransectos tiene diferentes ventajas: se ha demostrado que la tecnología de video de alta resolución hace la aproximación mucho más atractiva; permite al investigador cubrir un área mucho mayor por unidad de esfuerzo de muestreo; produce un registro permanente; y la exposición del video es automática, continua y no requiere revelado (Aronson *et al* 1994, Aronson & Swanson 1997, Garza-Pérez, 1999).

El método de Aronson y Swanson (1997) utiliza un conteo por puntos al azar, sin embargo en el presente trabajo se utilizó una modificación de dicho método por Garza-Pérez (2004), el cual consiste en el conteo de 13 puntos fijos a lo largo de la filmación del transecto, permitiendo describir la biota sésil del arrecife. Esta modificación tiene el suficiente poder estadístico para realizar análisis univariados de cobertura, diversidad y dominancia de la comunidad bentónica y permite detectar cambios biológicos entre sitios o tiempos, por medio de análisis multivariados (Garza-Pérez, 2004). La

modernización consistió en la utilización de videocámaras con formato digital de alta resolución, lo cual mejora la resolución tradicional del video analógico y provee la capacidad de una mayor discriminación de tipos de substrato y posibilidad de observar con mayor detalle.

3.3 Trabajo en campo

Se realizó un muestreo en el frente y pendiente del arrecife de Akumal a finales del mes de Mayo y principios de Junio del 2010, y en el mes de Octubre de 2011 en el arrecife de Mahahual. Se obtuvieron 50 videotransectos, 21 corresponden al arrecife de Akumal (10 del frente y 11 de la pendiente) y 29 para Mahahual (17 del frente y 12 de la pendiente). Para la recolección de datos, se requirió un equipo de tres buzos capacitados. En cada estación se tomaron datos de profundidad y dirección de cada transecto, se llevaron a cabo la filmación de un videotransecto y la estimación de la complejidad topográfica. Para la obtención de los videotransectos, un buzo se desplazó a lo largo del arrecife por encima de una cinta de medición (previamente desenrollada por otro buzo) de 50 x 0.6m filmando la comunidad arrecifal con una videocámara digital Handycam Sony HDR-HC9 de alta definición en un *housing* submarino StingRay HD con luces SunRay 600 de Light & Motion Inc. En cada transecto se realizó una estimación de complejidad topográfica, la cual se midió por medio de la técnica de la cadena (Aronson & Swanson, 1997 en Garza, 2004). Esta consiste en colocar una cadena sobre el fondo, teniendo cuidado de seguir con precisión el contorno del substrato. Posteriormente se mide la longitud alcanzada por la cadena sobre el substrato (Figura 3.1)



Fig. 3.1 Método de filmación de videotransectos (imagen tomada de Garza-Pérez 1999).

3.3.1 Trabajo en laboratorio

Cada uno de los transectos filmados se observaron en un monitor de alta resolución y se extrajeron 40 cuadros fijos repartidos a lo largo de los 50 m del substrato. En cada uno de esos cuadros se contaron 13 puntos fijos sobre la pantalla, identificando el tipo de cobertura biótica o substrato debajo de cada punto (al nivel taxonómico más bajo posible de las especies de corales escleractínios, tipos de algas –rojas, pardas, verdes, filamentosas, etc- y grupos morfológicos de esponjas y octocorales) obteniendo matrices de 520 puntos (13 puntos x 40 cuadros) por sitio. Para la categorización de los tipos de cobertura bentónica se utilizó una modificación de los grupos morfológicos propuesto por Garza (2004). Para la identificación de las especies de corales, tipos de algas y grupos morfológicos de octocorales y esponjas, se utilizaron como guías el *Reef set* de Humann (1993).

Para determinar el porcentaje de cobertura de cada grupo taxonómico y de substrato

(GTS), se utilizaron los datos originales de las matrices de conteo por puntos de cada sitio, con la siguiente formula (Ecuación 2) (Garza-Pérez 2004):

$$2. \quad \% \text{ de Cobertura} = \# \text{ de GTS} \times 100 / 520$$

Por último en cada uno de los videotransecto se realizó un conteo del número de colonias coralinas por especie para establecer su densidad por transecto (30m²), y el porcentaje de abundancia relativa en cada zona arrecifal (Frente y Pendiente).

3.3.2 Desarrollo del Índice de Estructura Arrecifal (IEA)

Para comparar la estructura en el frente y pendiente de Akumal y Mahahual, se desarrolló la ecuación del índice de estructura arrecifal, considerando los siguientes indicadores como variables a incluir en el índice:

1. Cobertura Coralina (CC). Son los porcentajes de cobertura coralina obtenidos del análisis de los videotransectos.
2. Complejidad Topográfica (CT). Son los datos obtenidos directamente del trabajo en campo, por medio del método de la cadena considerando el rango 0-1, donde 0=Nula y 1= Máxima CT arrecifal.
3. Índice Potencial de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC): Obtenido por el conteo de colonias coralinas y por la ponderación por especie, donde los corales constructores se les asignó el valor de 1, i.e., *Acropora palmata*, *Montastrea faveolata*, *Montastrea annularis*, aquellos corales con menor acreción i.e., *Agaricia agaricites*, *Porites porites* se les asignó el valor de valor de 0.5 y las especies con mínima acreción coralina como *Sidereastrea radians*, *Scolymia wellsi* tienen un valor de 0.1. Dichos valores ponderativos fueron establecidos de manera arbitraria, sin embargo se consideró el crecimiento y las formas en que se llegan a desarrollar cada especie de coral, pues se sabe que las especies de corales ramificados y masivos (e.j., género *Acroporidae*, *Faviidae*), en particular proporcionan una mayor rugosidad y complejidad arrecifal, que aquellas especies más pequeñas, como los corales incrustantes, foliosos

y carnosos (e.j. género *Poritidae*, *Agariciidae*, *Mussidae*) (McField & Kramer, 2007).
Tabla 1).

Tabla 1 Ponderación por especie coralina. Los valores de 1, 0.5 y 0.1, están asignados para cada una de las especies dependiendo de su contribución a la estructura arrecifal.

| Ponderación por especie | | | |
|-------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Valores | 1 | 0.5 | 0.1 |
| Especies | <i>Acropora cervicornis</i> | <i>Agaricia grahamae/undata</i> | <i>Agaricia fragilis</i> |
| | <i>Acropora palmata</i> | <i>Agaricia lamarcki</i> | <i>Dichocoenia stokesii</i> |
| | <i>Colpophylia nathans</i> | <i>Diploria clivosa</i> | <i>Eusmillia fastigiata</i> |
| | <i>Dendrogyra cylindricus</i> | <i>Madracis aurentera</i> | <i>Favia fragum</i> |
| | <i>Diploria labrythiformis</i> | <i>Madracis decactis</i> | <i>Helioseris cucullata</i> |
| | <i>Diploria strigosa</i> | <i>Madracis fromosa</i> | <i>Isophilastrea rigida</i> |
| | <i>Montastraea annularis</i> | <i>Madracis mariabilis</i> | <i>Isophillia sinuosa</i> |
| | <i>Montastraea cavernosa</i> | <i>Maniciana areolata</i> | <i>Millepora alcicornis</i> |
| | <i>Montastraea faveolata</i> | <i>Meandrina meandrites</i> | <i>Millepora complanata</i> |
| | <i>Montastraea franksi</i> | <i>Porites astreoides</i> | <i>Mussa angulosa</i> |
| | <i>Siderastrea sidérea</i> | <i>Porites porites</i> | <i>Mycetophilia aliciae</i> |
| | | <i>Porites porites divar</i> | <i>Mycetophilia ferox</i> |
| | | <i>Porites porites furc</i> | <i>Mycetophilia lamarckiana</i> |
| | | <i>Solenastrea spp</i> | <i>Scolymia cubensis</i> |
| | | <i>Stephanocoenia interespta</i> | <i>Scolymia lacera</i> |
| | | <i>Undaria agaricites</i> | <i>Scolymia wellsii</i> |
| | | <i>Undaria tenuifolia</i> | <i>Siderastrea radians</i> |
| | | | <i>Undaria humilis</i> |

3.3.3 Cálculo del IEA

Para la integración de los indicadores en un valor que proporcione información sinóptica se realizan varios cálculos, descritos a continuación:

A. Densidad de colonias por especie, que corresponde al conteo del número de colonias coralinas por especie por transecto, divididas entre el área de estudio muestreada (30m²) (Ecuación 3).

$$\frac{\text{Núm. de Colonias por especie}}{30m^2} \quad 3.$$

Los 30m² es el área total que cubre un transecto (50 x 0.6m).

B. Implementación de la medición indirecta de la de acreción coralina, a través del desarrollo del Índice Potencial de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC). Éste se obtiene a través de la multiplicación de la densidad de colonias de cada especie por estación por el factor de ponderación respectivo de la especie (0.1, 0.5 ó 1) (Ecuación 4).

$$4. \left(\frac{\text{Núm. de Colonias por especie}}{30 m^2} \right) * (\text{Ponderación})$$

C. Por último se realizó la sumatoria de la ponderación (por estación) y se multiplicó por el valor de la cobertura coralina y la complejidad topográfica (Ecuación 5).

$$5. IEA = IPPEC \left[\sum (a^1 \dots a^n * 1) + (b^1 \dots b^n * 0.5) + (c^1 \dots c^n * 0.1) \right] * (CC) * (CT)$$

dónde:

IEA= Índice de Estructura Arrecifal

IPPEC= Índice Potencial de Preservación de Estructura Coralina

$a^1 \dots a^n$ = especies coralinas constructoras con potencial de acreción

$b^1 \dots b^n$ = especies de menor acreción coralina

$c^1 \dots c^n$ = especies de mínima acreción coralina

CC= Cobertura Coralina

CT = Complejidad topográfica

3.3.4 Comparación estadística del índice de estructura arrecifal entre los sitios estudiados

Cada uno de los indicadores (complejidad topográfica, cobertura coralina e IPPEC), fue calculado en las 50 estaciones obtenidas (21 del arrecife de Akumal y 29 de Mahahual), dichas estaciones se promediaron por zona arrecifal y se calculó la desviación estándar. Posteriormente se realizó una comparación de medias (ANOVA) para encontrar diferencias significativas entre los arrecifes evaluados.

Para evaluar la utilidad de los indicadores utilizados en el índice de estructura arrecifal, se utilizaron herramientas estadísticas multivariantes como; Análisis de Componentes Principales, Análisis de Redundancia y Análisis Multidimensional no-métrico.

3.3.4.1 Análisis de Componentes Principales

Para la reducción de la dimensión de los datos de 86 variables obtenidas, 43 variables correspondientes a los datos de cobertura coralina y 43 al número de colonias coralinas por especie por cada transecto, se realizó un análisis de componentes principales. El ACP (PCA, por sus siglas en Inglés), es una técnica estadística de síntesis de la información, o reducción de la dimensión (número de variables). Es decir, ante una matriz de datos con muchas variables, el objetivo es reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible. Los nuevos componentes principales o factores fueron una combinación lineal de las variables originales e independientes entre sí.

La selección de los componentes principales se realizó de tal forma que el primero recogiera la mayor proporción posible de la variabilidad original; el segundo factor recogió la máxima variabilidad posible no recogida por el primero, y así sucesivamente. Del total de factores se eligieron aquellos que recogieran el suficiente porcentaje de variabilidad (Wold, 1987; Dunteman, 1989; Jolliffe & Morgan; Croux & Haesbroeck, 2000).

3.3.4.2 Análisis de Redundancia

Después de la selección de los componentes principales, se procedió a un Análisis de Redundancia (RDA), utilizando el software CANOCO Versión 4.5. Esta técnica se deriva del análisis canónico, el cual permite realizar dos tipos de comparaciones: directa e indirecta. La directa compara dos matrices de datos, la primera esta relacionada con la descripción de las especies y la segunda con características ambientales. En la comparación indirecta, la matriz que explica las variables “x” no interviene en el procedimiento del cálculo de la ordenación “y”.

De acuerdo a los objetivos de esta tesis se realizó una comparación directa, para determinar la significancia de los ejes canónicos (utilizando aleatorizaciones de Montecarlo), correlacionados entre los datos de las especies (número de colonias) y los indicadores (CT, CC, IPPEC) que influyen en el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal, utilizando todas las estaciones del frente y pendiente del Arrecife de Akumal y Mahahual.

El análisis de redundancia (RDA) es la extensión de la regresión múltiple para el modelo de datos de respuesta multivariada. El RDA fue propuesto por Rao (1964), sin embargo este análisis fue redescubierto por Wollenberg (1977). Redundancia es sinónimo de la varianza explicada. Este análisis es asimétrico por que: “Y” es la tabla de respuesta de las variables y, “X” es la tabla de las variables explicativas. Es decir que la ordenación de “Y” está limitando de alguna manera el resultado de la ordenación de los vectores, los cuales son combinaciones lineales de las variables en “X”. En este análisis cada vector de ordenación es una proyección unidimensional de la distribución de los objetos en un espacio que preserva las distancias euclidianas (Legendre & Legendre, 1998; Leps & Petr, 2003)

3.3.4.3 Análisis de Escalamiento Multidimensional no-métrico (MDS)

El análisis de escalamiento multidimensional no-métrico se utiliza para proveer una representación visual que da información sinóptica de un conjunto complejo de relaciones. Este análisis estadístico, realiza la búsqueda de vectores en espacio p -dimensional, para que la matriz de distancias euclidianas entre los vectores corresponda lo más posible a la función de la matriz original de acuerdo a un criterio de función llamado *stress*. Una vista simplificada del algoritmo se presenta a continuación (Clarke & Green, 1988; Clarke, 1993; Clarke & Warwick, 1994; Legendre & Legendre 1998; StatSoft, 2003).

1. Asignar puntos a coordenadas arbitrarias en espacio p -dimensional.
2. Calcular la distancia euclidiana entre todos los pares de puntos para formar una matriz de distancias (\hat{D}).
3. Comparar la matriz de distancias con la matriz original evaluando la función de *stress*. Mientras más pequeño sea el valor, mayor será la correspondencia entre las dos.
4. Ajustar las coordenadas de cada punto en la dirección del menor *stress*.
5. Repetir pasos 2 a 4 hasta que el *stress* obtenido no se reduzca más.

Se realizó el Análisis de Escalamiento multidimensional no-métrico, utilizando los datos de número de colonias, cobertura coralina, complejidad topográfica e IPPEC de cada una las estaciones.

El propósito de utilizar el MDS en esta tesis: es proveer una representación visual de patrones de proximidad (similitudes o distancias) en la estructura arrecifal del frente y pendiente entre Akumal y Mahahual, y de cada uno de sus indicadores. En esta técnica se utilizó el índice de similitud de Bray-Curtis y se realizó una transformación a través de la raíz cuadrada de los datos.

El MDS se utilizó en conjunto con un análisis aglomerativo jerárquico (cluster), utilizando el software Primer v.6.0 (Primer-E Ltd), se consideró el método de la ligadura

pareado ponderado por grupos de medias (WPGMA, por sus siglas en inglés). La combinación del cluster y análisis de ordenación (MDS) es una forma muy eficaz de comprobar la adecuación y la coherencia recíproca de ambas representaciones. Dos o más valores de similitud son elegidos de acuerdo a niveles jerárquicos, cada uno es determinado a un grupo particular de las muestras.

3.3.4.4 Rango del IEA, estimación de Valores Extremos (mínimo y máximo).

Para el establecimiento de un rango en esta tesis, se estimó un valor máximo y mínimo, considerando dos sitios arrecifales distintos (por sus características estructurales) a los evaluados en Akumal y Mahahual,

Para el valor máximo se consideró una estación del frente arrecifal de Monstecristi, República Dominicana, y para el mínimo se consideró una estación de la laguna arrecifal de Mahahual. En ambos sitios se calculó cada uno de los indicadores (CC, CT, IPPEC, número de especies) que fueron evaluados en el arrecife de Akumal y Mahahual.

Los valores del índice de estructura arrecifal (IEA) de Akumal y Mahahual, fueron comparados con los obtenidos en el arrecife de la República Dominicana, y en la laguna de Mahahual,

Estos valores del IEA, fueron incluidos en un diagrama con apoyo de imágenes, correspondientes a cada sitio y zona arrecifal, cuyo objetivo es representar visualmente la estructura arrecifal y el rango en el que se encuentran ubicados.

4. Resultados

De las 50 estaciones muestreadas en campo, 21 videotransectos corresponden al Arrecife de Akumal, en donde 10 videotransectos corresponden al frente y 11 a la pendiente. En Mahahual se obtuvieron 29 videotransectos de los cuales 17 fueron del frente y 12 de la pendiente. Los videotransectos fueron analizados y se obtuvieron datos promedio de la abundancia relativa de especies coralinas y de cada uno de los indicadores utilizados para desarrollar el Índice de Estructura Arrecifal.

4.1 Análisis de la abundancia relativa de especies por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual.

En cada arrecife se realizó el conteo del número de colonias coralinas por especies. En total se obtuvieron 2,508 colonias (106 des. est. ± 38.61 Col/transecto) en Akumal y 3,279 en Mahahual (113 des. est. ± 57.09 Col/transecto) (Tabla 2), sin embargo no se encontraron diferencias significativas del número de colonias en el frente ($F=0.1549$, $p=0.6972$) y pendiente ($F=0.7827$, $p=0.3863$) de ambos arrecifes. Se determinó que en el frente arrecifal de Akumal, la especie más abundante fue *Siderastrea siderea* (20%) (Figura 4.1) y en el frente de Mahahual fue *Undaria agaricites* (31%) (Figura 4.2). En Akumal la segunda especie con mayor abundancia fue *U. agaricites*, y en Mahahual *S. siderea*,

Con respecto a la pendiente de Akumal, la especie con mayor abundancia fue *M. faveolata* (17%) y en Mahahual fue *U. agaricites* (36%), en ambos arrecifes la segunda especie con mayor número de colonias fue *P. astreoides* (Figura 4.3 y 4.4).

Tabla 2. Promedio y desviación estándar de Col/transecto y densidad (m^2) de colonias coralinas registradas de los 50 videotransecto analizados, 21 corresponden al Arrecife de Akumal (10 del frente y 11 de la pendiente arrecifal) y 29 a Mahahual (17 del frente y 12 de la pendiente arrecifal), Quintana Roo.

| Arrecife | Frente Arrecifal (Col/Transecto) | Pendiente Arrecifal (Col/Transecto) | Promedio Total (Col/Transecto) | Densidad de Colonias (Col/ m^2) |
|----------|-------------------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------------|
| Akumal | 86.8 \pm 45.51 | 123.5 \pm 20.36 | 106 \pm 38.61 | 3.53 \pm 1.28 |
| Mahahual | 94.71 \pm 52.96 | 139 \pm 54.5 | 113 \pm 57.09 | 3.76 \pm 1.90 |

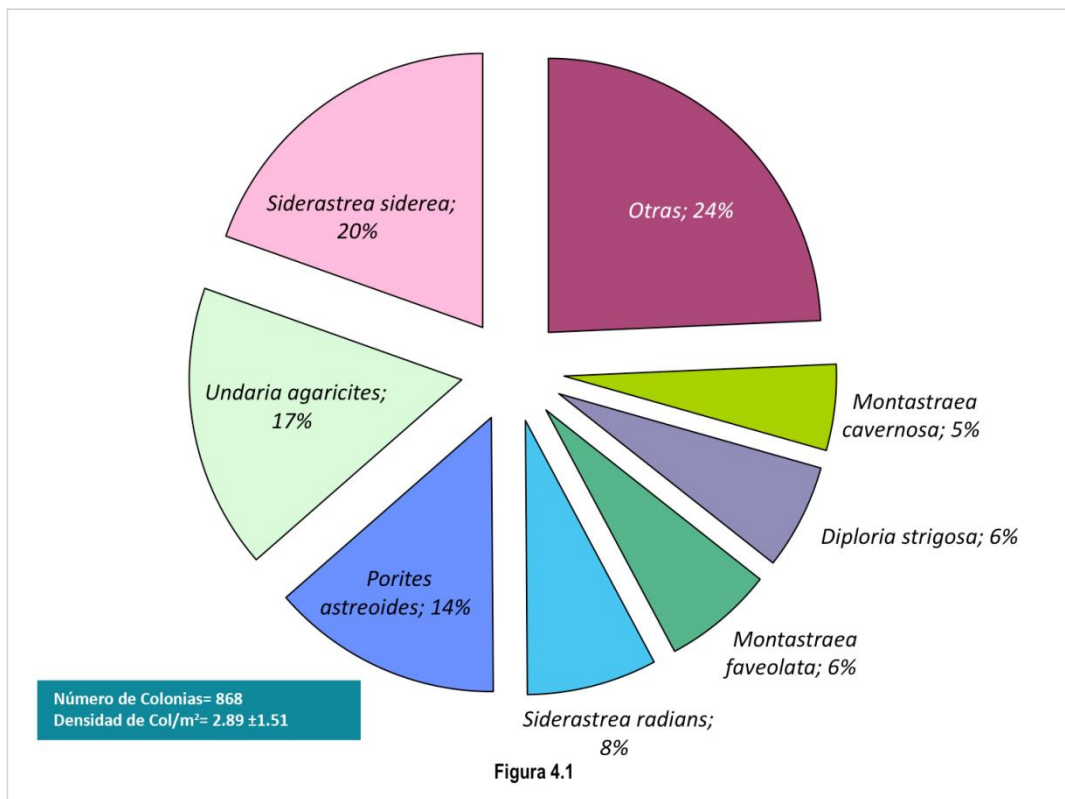


Fig. 4.1 Abundancia relativa de especies del Frente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo.

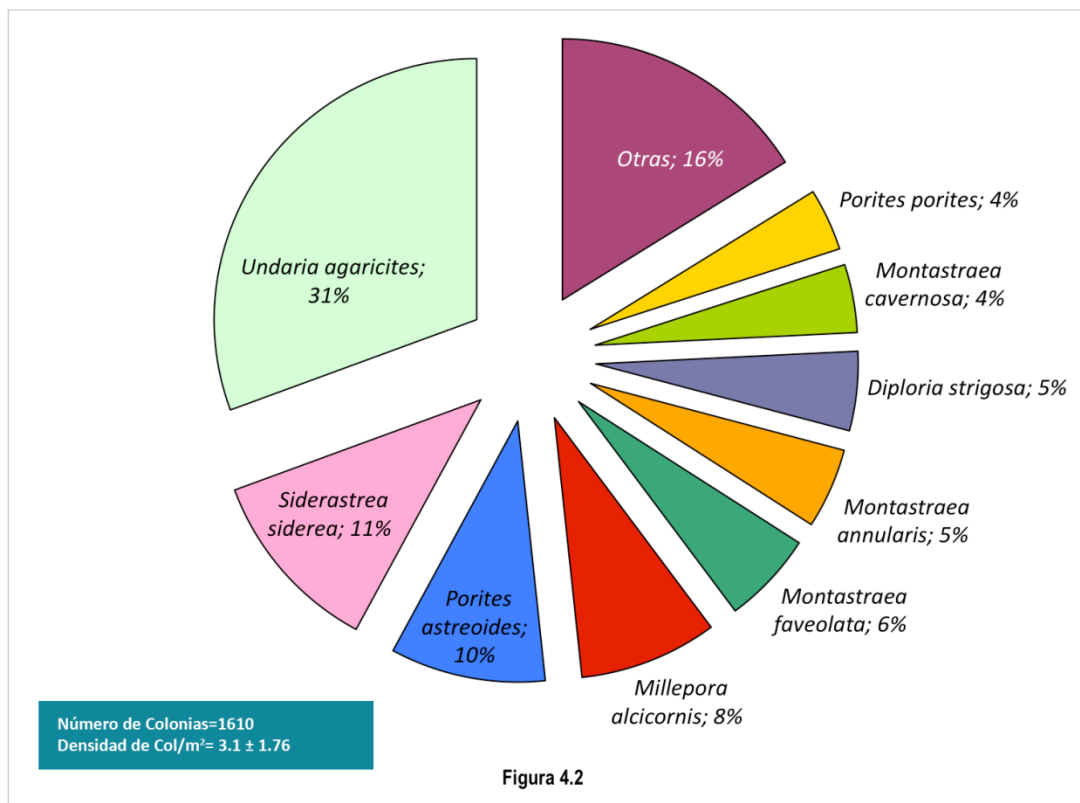


Fig. 4.2 Abundancia relativa de especies del Frente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo.

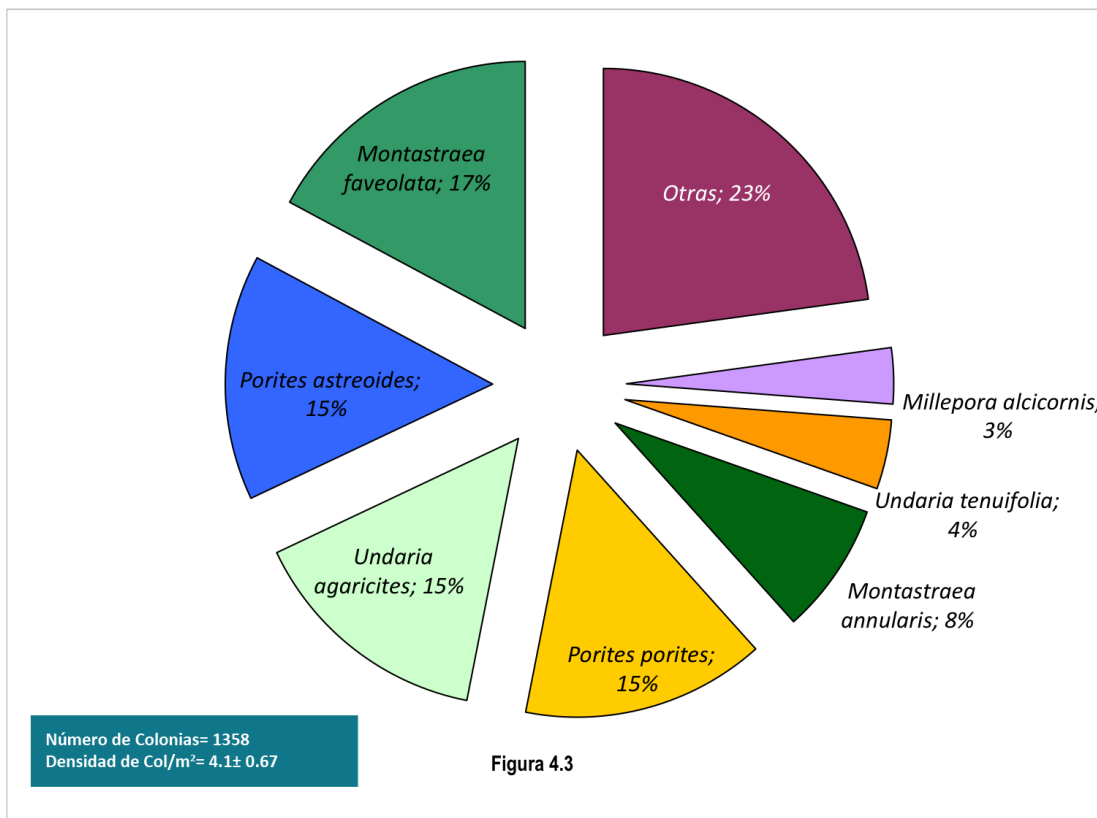


Fig. 4.3 Abundancia relativa de especies de la Pendiente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo.

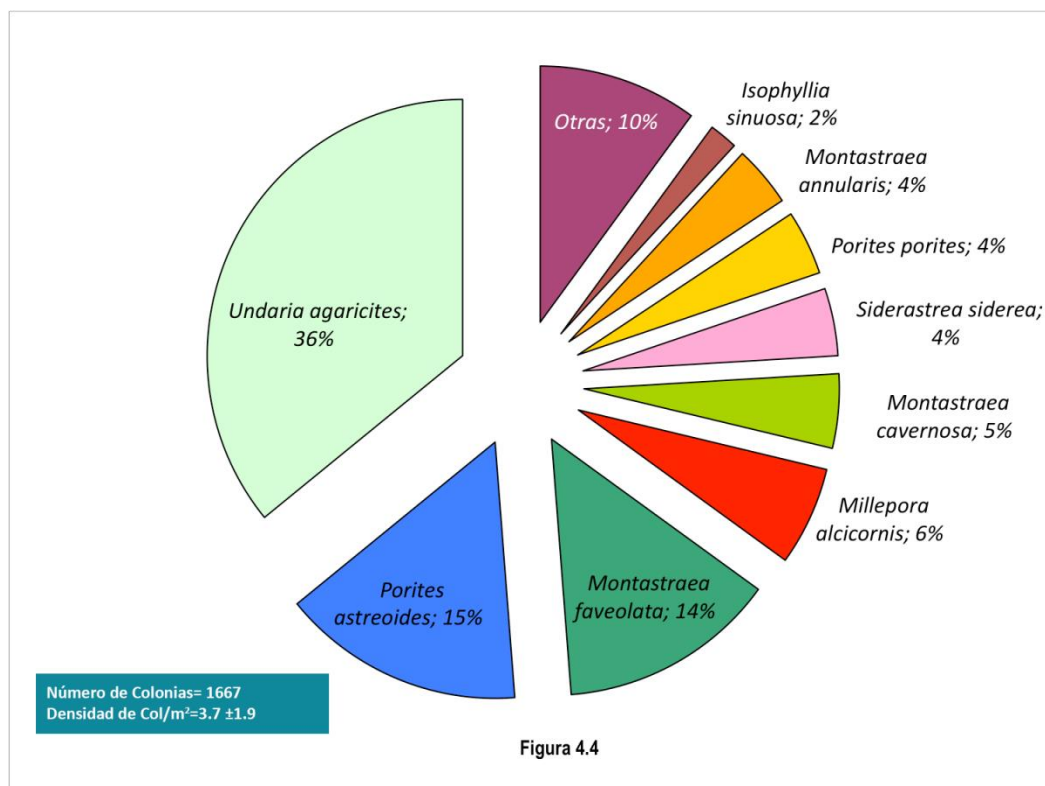


Fig. 4.4 Abundancia relativa de especies de la Pendiente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo.

4.2 Análisis de las especies que conforman el Índice de Preservación Potencial de Estructura Coralina (IPPEC) por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual.

De acuerdo a los ensamblajes coralinos del frente arrecifal de Akumal y Mahahual, no se encontraron diferencias significativas ($F=0.0001$, $p=0.9900$) en los valores estimados del IPPEC entre ambos arrecifes. En el Frente de Akumal se obtuvo un valor de 1.92 des. est. ± 1.0 siendo *S. siderea* (29%) y *U. agaricites* (13%) las especies con mayor contribución (Figura 4.5). En el frente de Mahahual se obtuvo un valor de 1.93 des. est. ± 1.14 siendo *U. agaricites* (25%) la especie la más relevante (Figura 4.6). Los valores más altos fueron obtenidos en la pendiente arrecifal, encontrando diferencias en el ensamblaje coralino entre ambos arrecifes ($F= 0.5759$, $p=0.4563$). En Akumal se obtuvo un IPPEC de 2.55 des. est. ± 0.34 y en la de Mahahual de 2.80 des. est. ± 1.07 . El valor de la pendiente de Akumal esta determinado principalmente por la especie *M. faveolata* (28%) (Figura 4.7) y en Mahahual por *U. agaricites* (29%) (Figura 4.8).

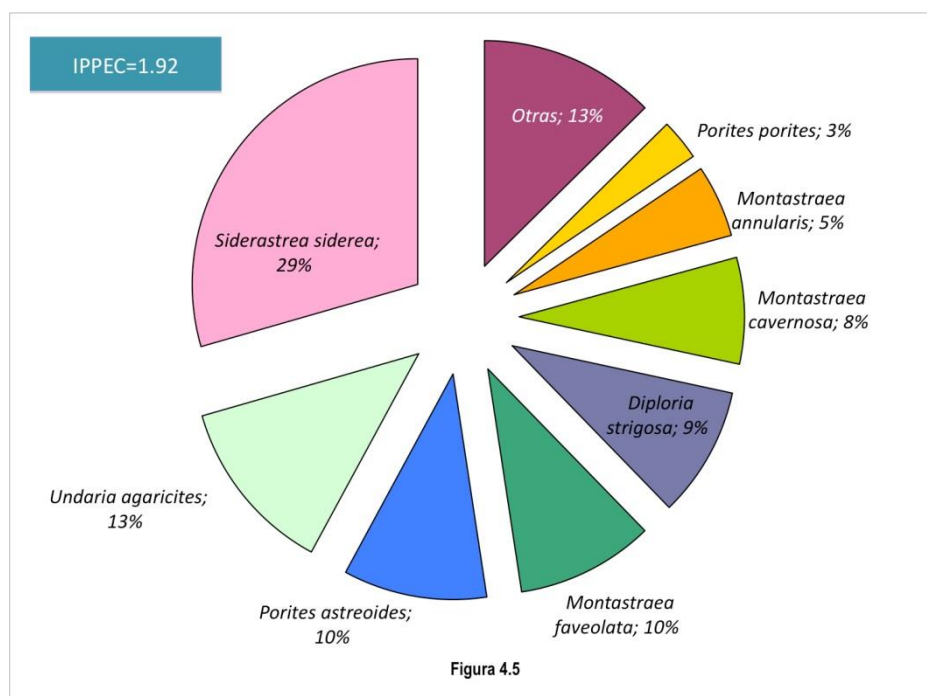


Fig. 4.5 Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en el Frente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo. El IPPEC fue de 1.92, siendo *S. siderea* y *U. agaricites* las especies más importantes.

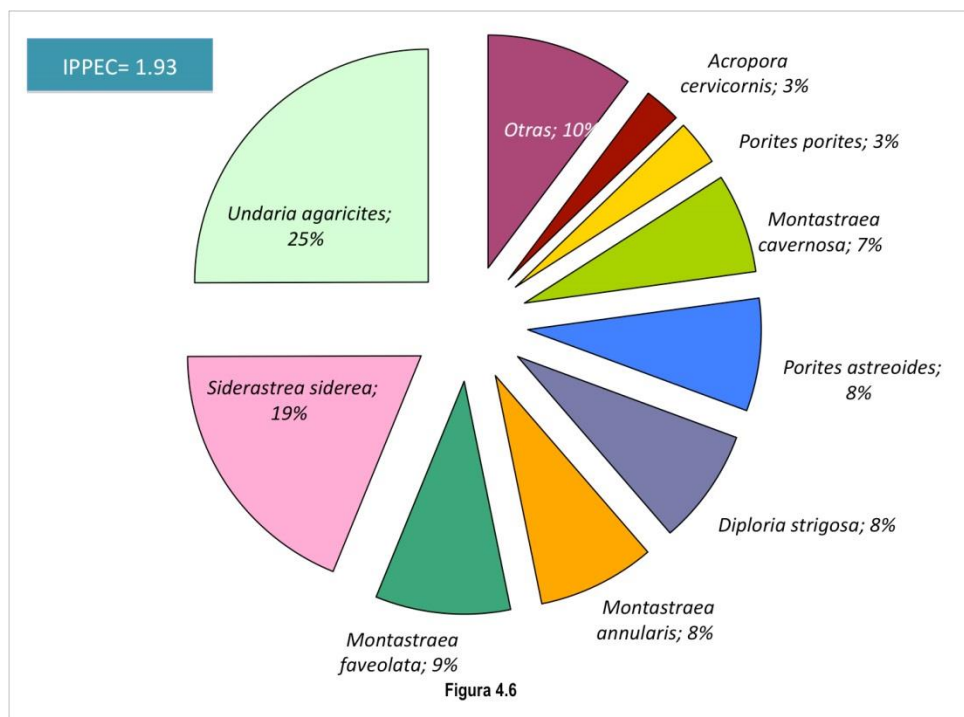


Fig. 4.6 Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en el Frente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo. El IPPEC fue de 1.93, siendo *U. agaricites* y *S. siderea* las especies más importantes.

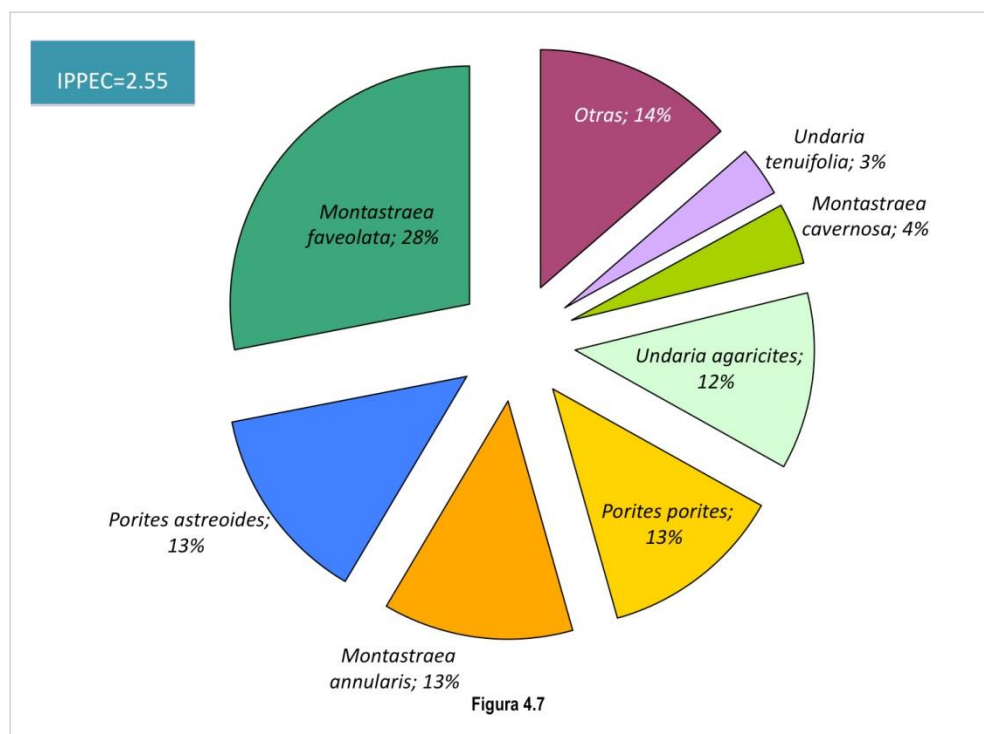


Fig. 4.7 Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en la Pendiente Arrecifal de Akumal, Quintana Roo. El IPPEC fue de 2.55, siendo *M. faveolata* la especie más importante.

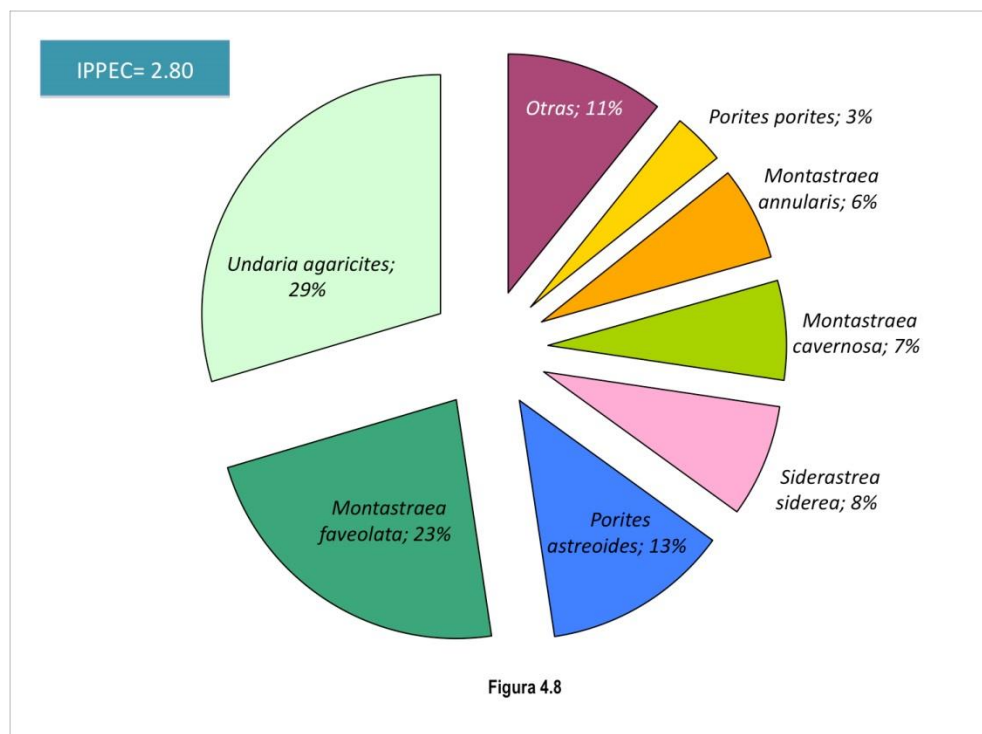


Fig. 4.8 Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en la Pendiente Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo. El IPPEC fue de 2.80, siendo *U. agaricites* la especie más importante.

4.3 Análisis de la Cobertura Coralina (CC) por especie por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual.

Se determinó que la cobertura coralina de la pendiente arrecifal de Akumal y Mahahual es similar a la del frente, pues no se encontraron diferencias significativas (frente $F=0.9031$, $p=0.0151$, pendiente $F=0.8859$, $p=0.211$). La cobertura coralina promedio del frente arrecifal de Akumal fue de 8.15% des. est. ± 5.25 y de Mahahual 7.80% des. est. ± 5.39 , las especies *M. faveolata* (27%) y *M. annularis* (24%) fueron respectivamente las que más contribuyeron a la cobertura coralina de esta zona en ambos arrecifes. (Figuras 4.9 y 4.10)

La cobertura coralina promedio en la pendiente arrecifal de Akumal fue de 12.29% des. est. $\pm 3.48\%$ y en la pendiente de Mahahual de 12.56% des. est. ± 5.29 , (Figuras 4.11 y 4.12). En ambas pendientes arrecifales la especie con mayor cobertura es *M. faveolata* y en segundo lugar están *M. annularis* (en Akumal) y *U. agaricites* (en Mahahual).

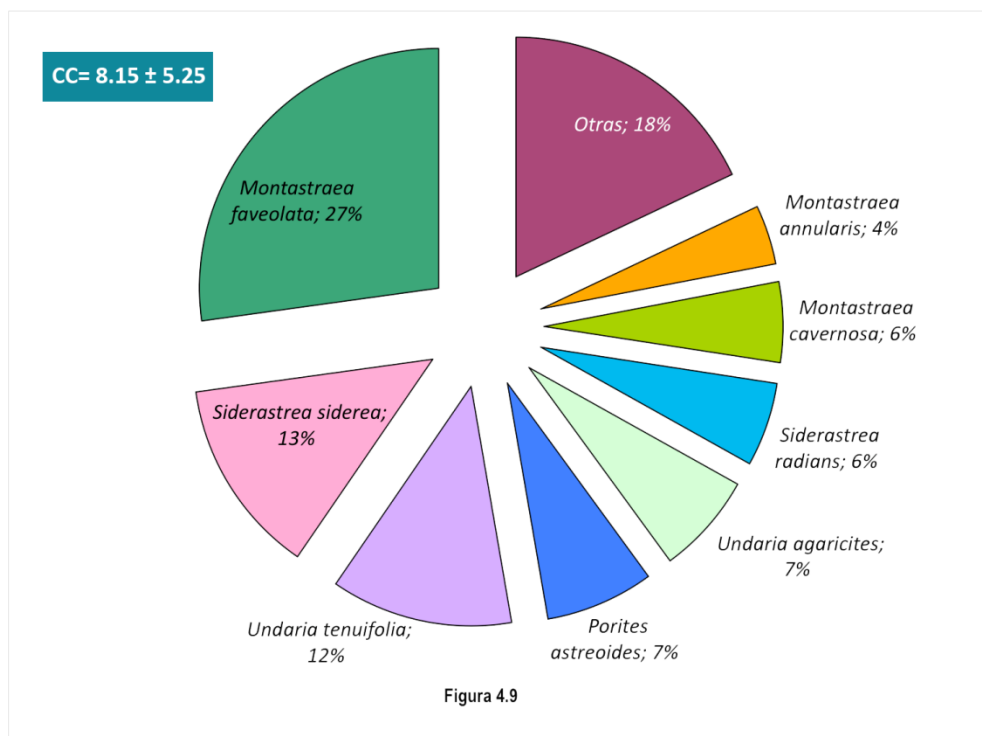


Fig. 4.9 Cobertura Coralina en la zona del frente arrecifal de Akumal. La cobertura promedio fue de 8.15%, constituida principalmente por *Montastraea faveolata*, y *Siderastrea siderea*.

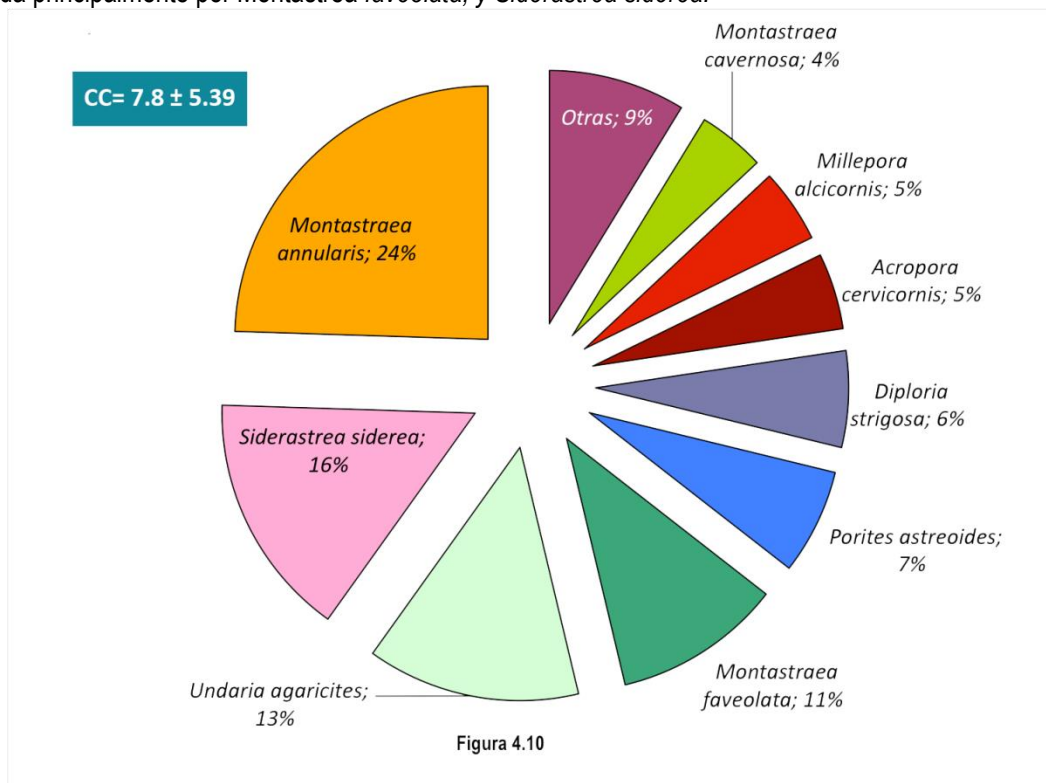


Fig. 4.10 Cobertura Coralina en la zona del frente arrecifal de Mahahual. La cobertura promedio fue de 7.80%, constituida principalmente por *Montastraea annularis* y *Siderastrea siderea*.

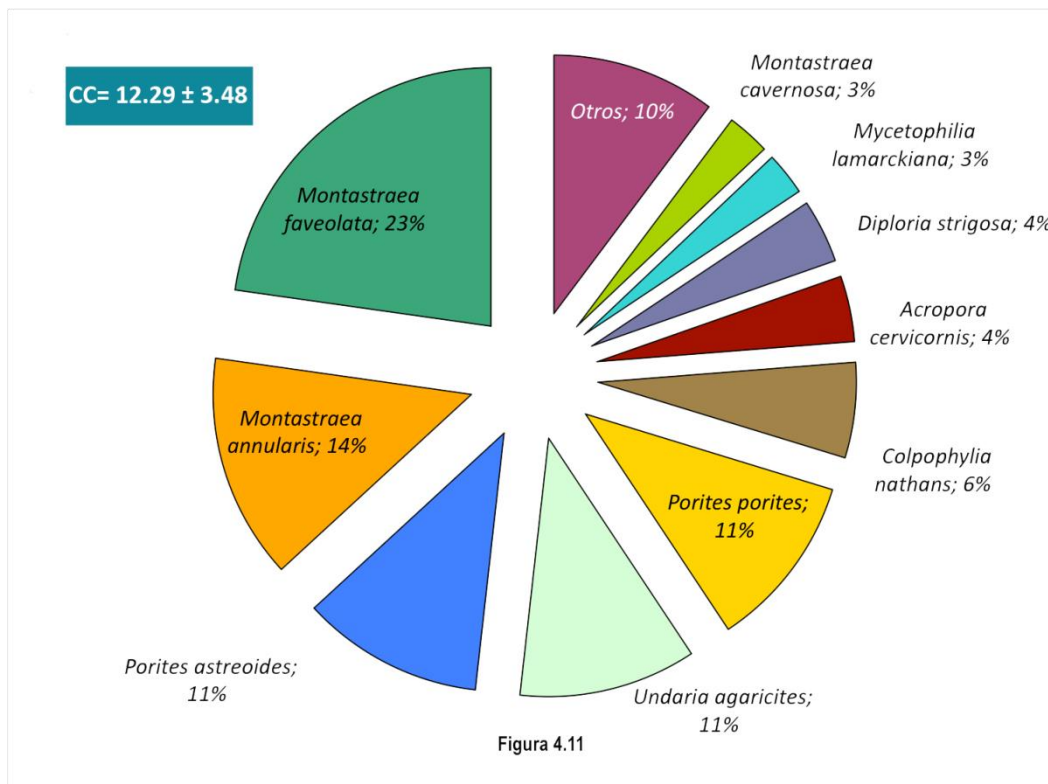


Fig. 4.11 Cobertura Coralina en la zona de la pendiente arrecifal de Akumal. La cobertura promedio fue de 12.29%, constituida principalmente por *Montastrea faveolata* y *Montastrea annularis*.

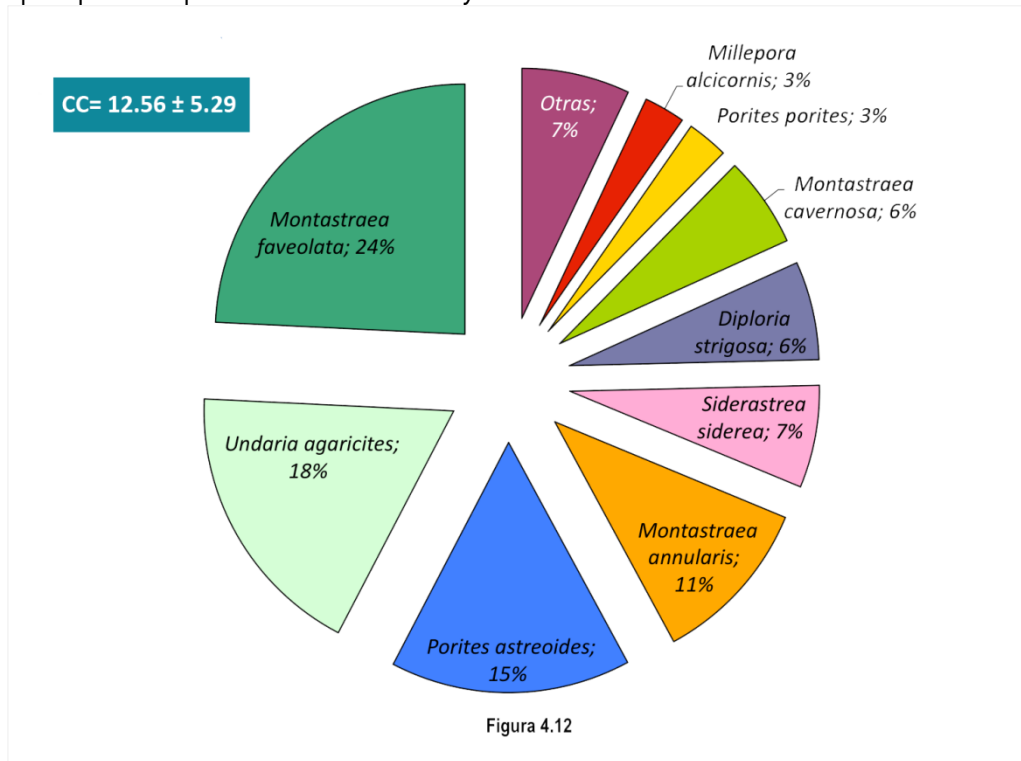


Fig. 4.12 Cobertura Coralina en la zona de la pendiente arrecifal de Mahahual. La cobertura promedio fue de 12.56%, constituida principalmente por *Montastrea faveolata* y *Montastrea annularis*.

4.4 Análisis de la Complejidad Topográfica (CT) por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual.

Se estimó la complejidad topográfica para cada una de las estaciones de los arrecifes (Anexos A2-A5 págs. 85-86), posteriormente se promediaron las estimaciones de cada zona arrecifal arrojando los siguientes resultados: La complejidad topográfica del frente de Akumal fue la más baja de las zonas y arrecifes evaluados con un valor de 0.17 des. est. ± 0.11 , encontrando diferencias significativas ($F=0.9211$, $p=0.3463$) con respecto al frente de Mahahual (0.22 des. est. ± 0.12). El valor más alto de la CT obtenida fue en la pendiente de ambos arrecifes (Akumal y Mahahual) obteniendo el mismo valor de 0.25 (des. est. ± 0.09 y ± 0.07 correspondientemente) sin encontrar diferencias estadísticas ($F=0.0101$, $p=0.9210$) (Figura 4.13).

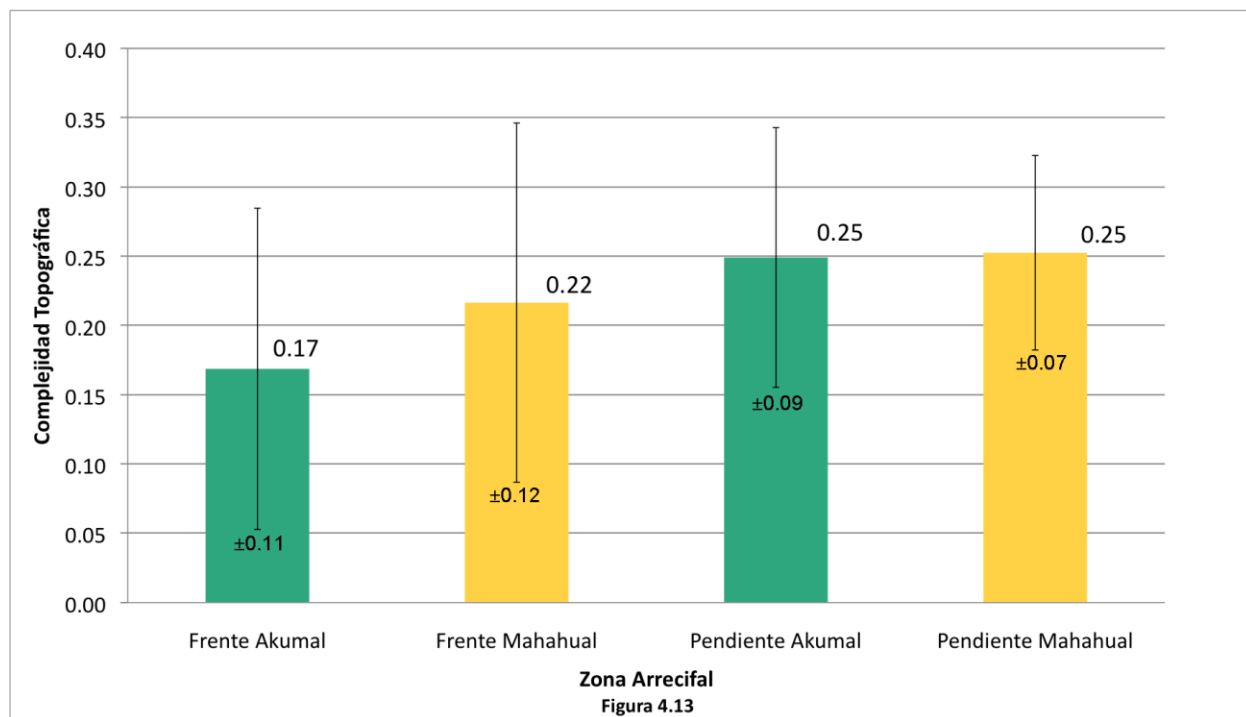


Fig. 4.13 Complejidad topográfica del promedio de 10 estaciones del Frente Arrecifal de Akumal y 17 de Mahahual, 11 de la pendiente de Akumal y 12 de Mahahual.

4.5 Análisis del Índice de Estructura Arrecifal por Zona Arrecifal de Akumal y Mahahual.

Se calculó el IEA para cada una de las estaciones correspondientes a las zonas de los arrecifes evaluados (Anexos A6-A9, págs. 87-88), utilizando la información correspondiente de sus indicadores -IPPEC, CC y CT- (Tabla 3). El promedio de los valores del IEA por zona arrecifal denota diferencias significativas entre los arrecifes de Akumal y Mahahual. En el frente de ambos arrecifes la diferencia fue $F=0.6520$, $p=4269$, en Akumal se obtuvo el menor IEA con un valor de 3.63 des. est. ± 3.77 , seguido por el frente de Mahahual cuyo valor fue 5.24 des. est. ± 5.57 . Los valores más altos del IEA se presentaron en la pendiente de ambos arrecifes siendo Mahahual el más alto con 10.71 des. est. ± 6.47 , por tanto demuestra una diferencia ($F=1.8647$, $p=0.1865$) y mayor estructura arrecifal que en Akumal con 7.71 des. est. ± 3.48 (Figura 4.14).

Tabla 3. Valor de los indicadores evaluados y desviación estándar, para el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal (IEA). IPPEC = Índice de Preservación Potencial de Estructura Coralina, CC= Cobertura Coralina, CT= Complejidad topográfica.

| Zona Arrecifal /Arrecife | IPPEC | CC | CT | IEA |
|--------------------------|-----------|------------|-----------|------------|
| Frente Akumal | 1.92±1.0 | 8.15±5.25 | 0.17±0.11 | 3.63±3.77 |
| Frente Mahahual | 1.93±1.14 | 7.80±5.39 | 0.22±0.12 | 5.24±5.57 |
| Pendiente Akumal | 2.55±0.34 | 12.29±3.48 | 0.25±0.09 | 7.71±3.48 |
| Pendiente Mahahual | 2.80±1.07 | 12.56±5.29 | 0.25±0.07 | 10.71±6.47 |

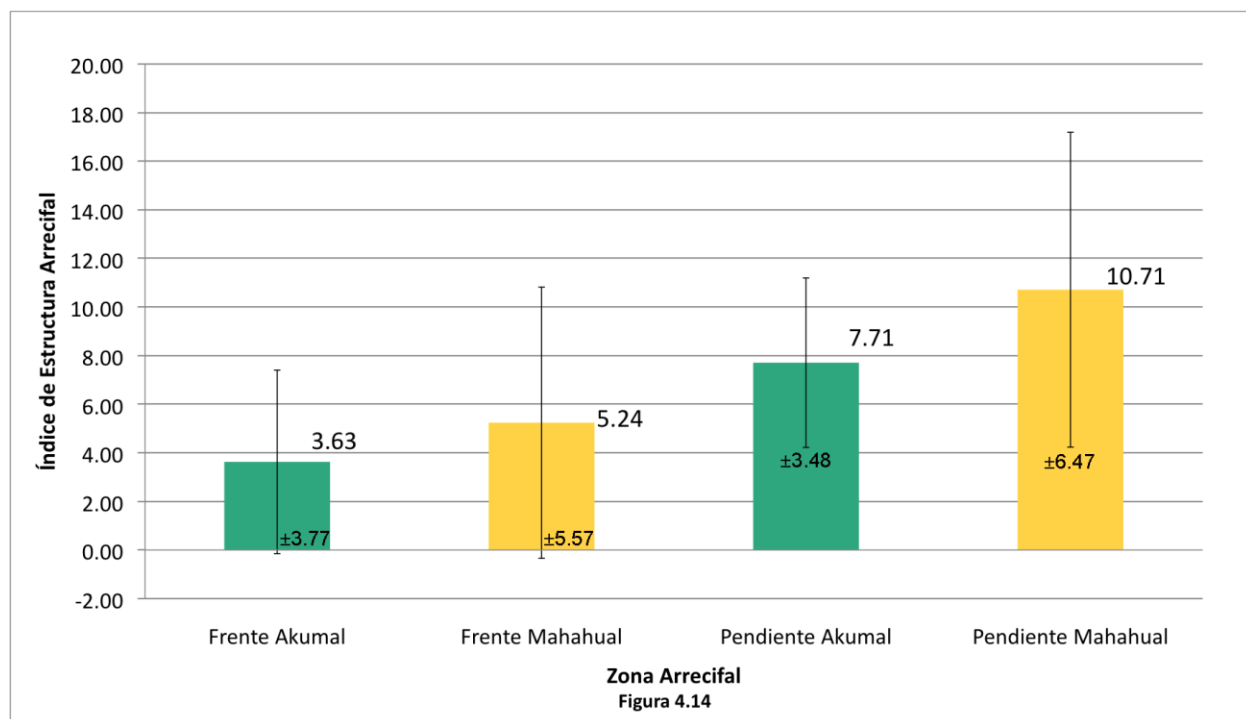


Fig. 4.14 Índice de Estructura Arrecifal del promedio de 10 estaciones del Frente Arrecifal de Akumal y 17 de Mahahual, 11 de la pendiente de Akumal y 12 de Mahahual.

4.6 Resultados del análisis multivariado

4.6.1 Análisis de Componentes Principales

Las 83 variables obtenidas se dividieron en dos tablas (con 43 variables cada una); la primera tabla representa datos del número de colonias por especie por transecto, y la segunda con los datos de cobertura coralina por especie por transecto.

En total se determinaron 15 variables (cuyo peso/valor de correlación fue menor a 1), las cuales describen más del 90% de la variabilidad de datos, 10 variables corresponden a la cobertura coralina, y 5 al número de colonias.

Para la cobertura coralina del Arrecife de Akumal y Mahahual (frente y pendiente) se reportó el 95.24% de variabilidad en datos cuyos componentes fueron los siguientes (Tabla 4):

Tabla 4. Resultados del PCA de Cobertura coralina. Valor de correlación y porcentaje de cada componente principal por especie.

| # Variable | Especie | Valor de correlación | Porcentaje (%) |
|------------|-----------------------------|----------------------|----------------|
| 1 | <i>Montastrea faveolata</i> | 0.552 | 40.977 |
| 2 | <i>Siderastrea sidérea</i> | 0.773 | 24.552 |
| 3 | <i>Montastrea annularis</i> | 0.777 | 8.856 |
| 4 | <i>Millepora alcicornis</i> | 0.869 | 5.213 |
| 5 | <i>Undaria agaricites</i> | 0.623 | 5.000 |
| 6 | <i>Undaria tenuifolia</i> | -0.844 | 3.511 |
| 7 | <i>Porites asteroides</i> | -0.644 | 2.906 |
| 8 | <i>Colpophilya nathans</i> | 0.505 | 1.082 |
| 9 | <i>Montastrea cavernosa</i> | 0.757 | 1.610 |
| 10 | <i>Siderastrea radians</i> | -0.711 | 1.542 |
| Total | | | 95.249 |

Para el número de colonias se reportó el 95.85% de la variabilidad de los datos. Cuyos componentes fueron los siguientes (Tabla 5):

Tabla 5. Resultados del PCA del Número de Colonias. Valor de correlación y porcentaje de cada componente principal por especie.

| # Variable | Número de colonias por especie | Valor de correlación | Porcentaje (%) |
|------------|--------------------------------|----------------------|----------------|
| 11 | <i>Undaria agaricites</i> | 0.837 | 79.270 |
| 12 | <i>Montastrea faveolata</i> | 0.498 | 9.005 |
| 13 | <i>Siderastrea sidérea</i> | 0.865 | 4.662 |
| 14 | <i>Millepora alcicornis</i> | -0.782 | 1.562 |
| 15 | <i>Porites asteroides</i> | 0.754 | 1.358 |
| Total | | | 95.857 |

4.6.2 Análisis de Redundancia-RDA

Se consideraron todas las estaciones del frente y pendiente de los arrecifes de Akumal y Mahahual. A dichas estaciones se les asignaron números para su identificación; los números 1-10 pertenecen al frente y del 11-21 a la pendiente arrecifal de Akumal. Para el frente de Mahahual corresponden del 22-38 y para la pendiente del 39-50.

Los eigenvalores obtenidos se presentan en la Tabla 6 y el diagrama resultante del RDA se presenta en la figura 4.15.

Tabla 6. Análisis de Redundancia (RDA). Eigenvalores de los cuatro ejes y valores de correlación de los 15 componentes principales de la cobertura coralina (*nombredeespecieC*) y del número de colonias por especie (*nombredeespecieCo*).

| Nombre | Eje 1 | Eje 2 | Eje 3 | Eje 4 | Varianza | % Explicativo |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|----------|---------------|
| Eigenvalor | 0.3199 | 0.1413 | 0.0314 | 0.0168 | | |
| Valores de Correlación | | | | | | |
| 1 <i>UndagaCo</i> | 0.6185 | 0.7787 | 0.7789 | 0.7807 | 3.89 | 78.17 |
| 2 <i>SidsidC</i> | 0.411 | 0.6051 | 0.6213 | 0.6284 | 3.02 | 62.87 |
| 3 <i>MilalcC</i> | 0.3853 | 0.4499 | 0.568 | 0.5827 | 1.02 | 58.93 |
| 4 <i>MonfavCo</i> | 0.1606 | 0.3841 | 0.4157 | 0.4365 | 0.49 | 47.79 |
| 5 <i>SidsidCo</i> | 0.0474 | 0.1236 | 0.3835 | 0.4726 | 0.49 | 47.67 |
| 6 <i>PorastCo</i> | 0.344 | 0.3696 | 0.3791 | 0.3906 | 0.51 | 47.58 |
| 7 <i>UndtenC</i> | 0.1025 | 0.2391 | 0.2633 | 0.2733 | 0.64 | 40.9 |
| 8 <i>SidradC</i> | 0.3499 | 0.3543 | 0.3556 | 0.3627 | 0.39 | 36.5 |
| 9 <i>ColnatC</i> | 0.1158 | 0.2301 | 0.2302 | 0.3369 | 0.24 | 35.9 |
| 10 <i>MonannC</i> | 0.0021 | 0.2791 | 0.2876 | 0.3468 | 1.18 | 34.79 |
| 11 <i>MilalcCo</i> | 0.0045 | 0.0127 | 0.2643 | 0.2705 | 0.21 | 28.06 |
| 12 <i>UndagaC</i> | 0.1539 | 0.1816 | 0.1894 | 0.2493 | 0.46 | 26.89 |
| 13 <i>MonfavC</i> | 0.0766 | 0.1821 | 0.2108 | 0.2164 | 1.7 | 22.88 |
| 14 <i>MoncavC</i> | 0.1346 | 0.1737 | 0.1838 | 0.1918 | 0.33 | 20.12 |
| 15 <i>PorastC</i> | 0 | 0.0782 | 0.1246 | 0.1323 | 0.44 | 13.44 |

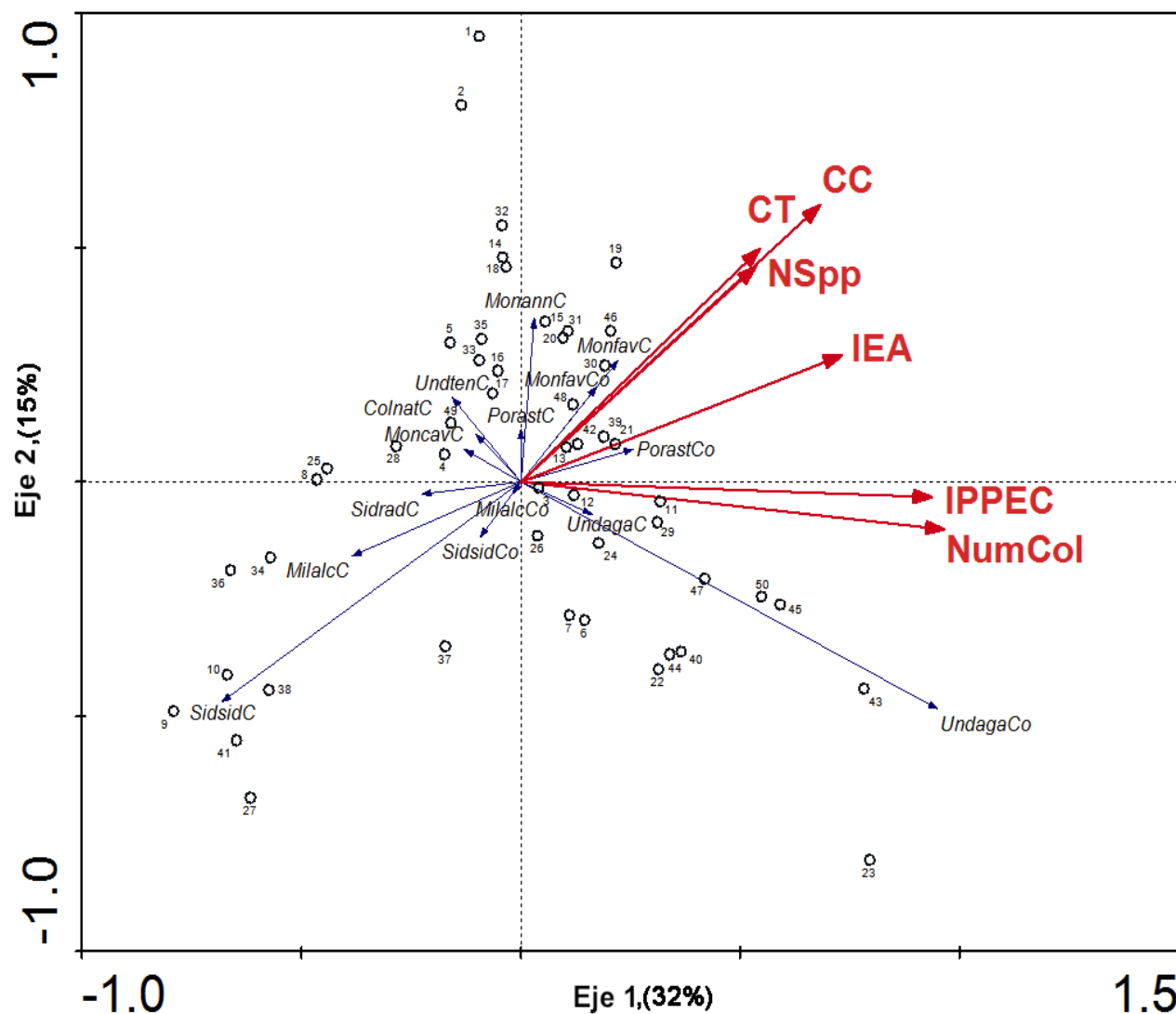


Fig. 4.15 Triplot RDA de los Indicadores, estaciones y especies. Indicadores: CT= Complejidad topográfica, CC= Cobertura Coralina, NSpp= Número de especies, IEA = Índice de Estructura Arrecifal, IPPEC= Índice de Preservación de Estructura Coralina, NumCol= Numero de Colonias. Los acrónimos empleados para la Cobertura Coralina (C) y Número de Colonias (Co) por especies fueron los siguientes: *Monfav*= *Montastrea faveolata*, *Porast*= *Porites astreoides*, *Unten*= *Undaria tenuifolia*, *Colnat*= *Colpophyllia nathans*, *Moncav*= *Montastrea cavernosa*, *Sidrad*= *Siderastrea radians*, *Milalc*= *Millepora alcicornis*, *Sidsid*= *Siderastrea siderea*, *Monann*= *Montastrea annularis* y *Undaga*= *Undaria agaricites*. Las estaciones están representadas por números: 1- 10 frente y 11-21 pendiente arrecifal de Akumal. Para el frente de Mahahual del 22-38 y para la pendiente del 39-50.

La mayoría de las estaciones del frente arrecifal de Mahahual y Akumal (eje superior e inferior izquierdo) tienen una importante asociación con la cobertura coralina de las especies *S. siderea* (principalmente), *U. tenuifolia*, *M. alcicornis*, *M. cavernosa* y *P. astreoides*. Con respecto a las estaciones de la pendiente arrecifal de ambos arrecifes (eje superior e inferior derecho), podemos encontrar una importante asociación con el número de colonias coralinas. Es decir que en la mayoría de las estaciones de la pendiente hay una abundante presencia de *M. faveolata*, *P. astreoides* y sobre todo *U. agaricites*.

El comportamiento de las variables Complejidad Topográfica (CT), Cobertura Coralina (CC), Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC), Riqueza de especies (Nspp), Índice de Estructura Arrecifal (IEA), resalta la asociación de los indicadores entre sí, ya que se encuentran en el eje izquierdo (superior e inferior), definiendo que todos los indicadores evaluados para el cálculo del IEA, están correlacionados en la misma magnitud. Además se hace evidente la importante relación entre el IEA y los indicadores NSpp, CC, CT, y la relación positiva de estos indicadores con la cobertura coralina de la *M. faveolata*, *M. annularis* y *P. astreoides* y el número de colonias de *M. faveolata* y *P. astreoides*.

Por último se determinó que el número de colonias de la especie *U. agaricites* (*UndagaCo*) y la cobertura coralina de la *S. siderea* (*SidsidC*), son las que más contribuyen a la variación estructural que existe en el frente y pendiente de los Arrecifes de Akumal y Mahahual.

4.6.3 Análisis de escalamiento Multidimensional no-métrico MDS

Se obtuvieron diagramas en donde se puede observar el comportamiento de cada una de las estaciones por arrecife y zona arrecifal, dependiendo de los indicadores evaluados. La ordenación de las estaciones por zona arrecifal presenta un buen ajuste estadístico (estrés de 0.14).

En el MDS de las 50 estaciones de Akumal y Mahahual (figura 4.16), se observa la agrupación de todas las estaciones de la pendiente (lado izquierdo del diagrama), sugiriendo que existe una similitud en la composición estructural arrecifal en ambos arrecifes. Sin embargo se puede observar una estación de la pendiente de Mahahual (MAP-D2T1) que por su composición estructural, es similar a las estaciones del frente arrecifal.

Respecto a las estaciones del frente arrecifal de ambos arrecifes, éstas se encuentran distribuidas (en su mayoría) de lado derecho del diagrama, suponiendo que existe una semejanza en la estructura arrecifal entre las estaciones de ambos arrecifes.

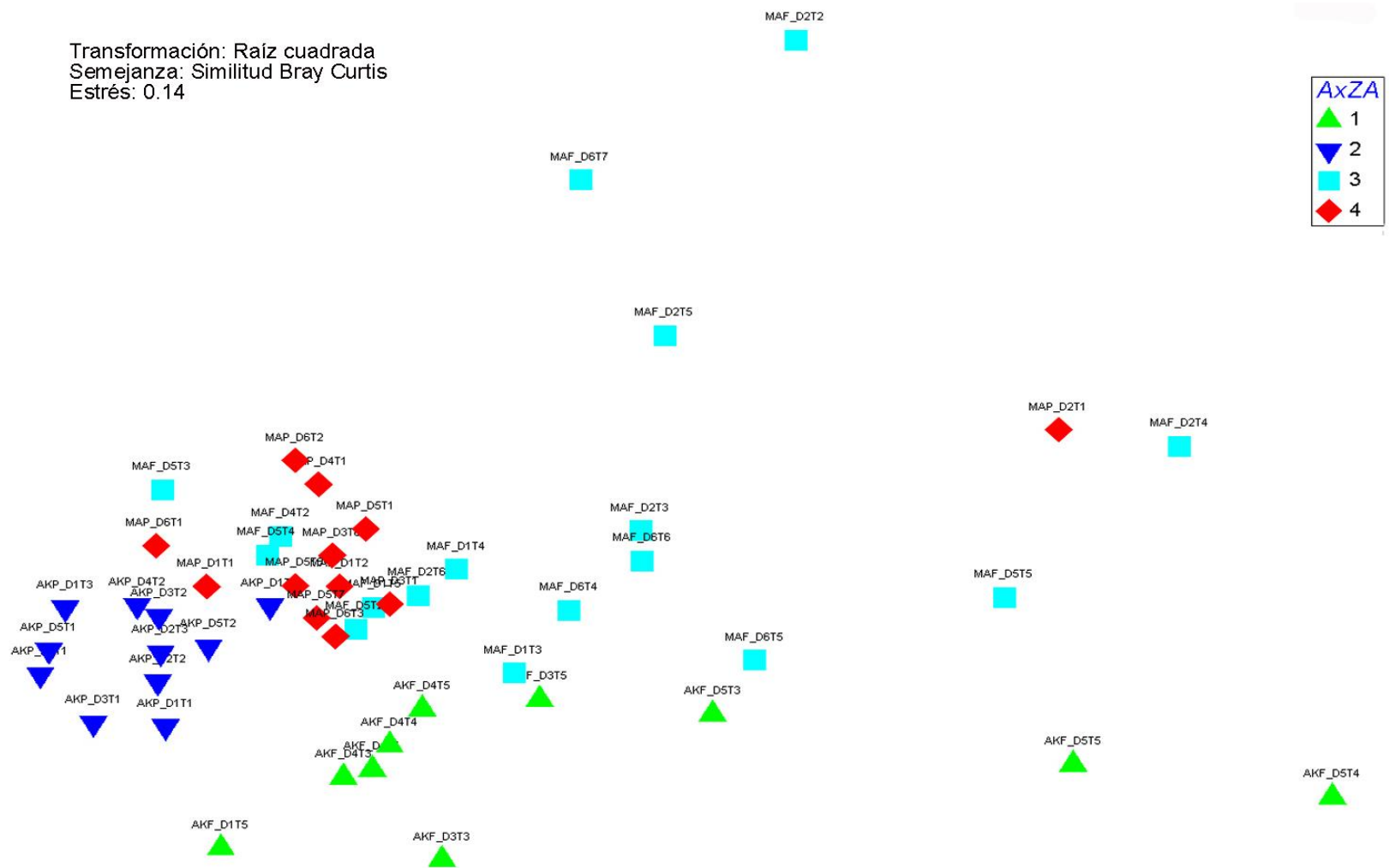


Fig. 4.16 Diagrama MDS, de la ordenación de 50 estaciones del arrecife de Akumal y Mahahual. Con base a la similitud de Bray Curtis, con estrés de 0.14. Simbología utilizada para las estaciones, triángulo= frente de Akumal, triángulo invertido= pendiente de Akumal, cuadrado= frente de Mahahual y rombo= pendiente de Mahahual.

Para definir la agrupación de las estaciones, se realizó un análisis de Cluster el cual sugiere una clasificación de las estaciones en 12 clases con una similitud del 60% (Anexo A10, pág. 89), de acuerdo a la asociación y composición estructural que existen entre ellas dada por los indicadores: CT, CC, IPPEC, NoCol y NSpp (Figura 4.17).

También define al 58% de similitud, que todas las estaciones de la pendiente de ambos arrecifes se encuentran clasificadas dentro del mismo grupo, y la mayoría de las estaciones del frente arrecifal de Akumal y Mahahual se encuentran clasificadas en diferentes grupos.

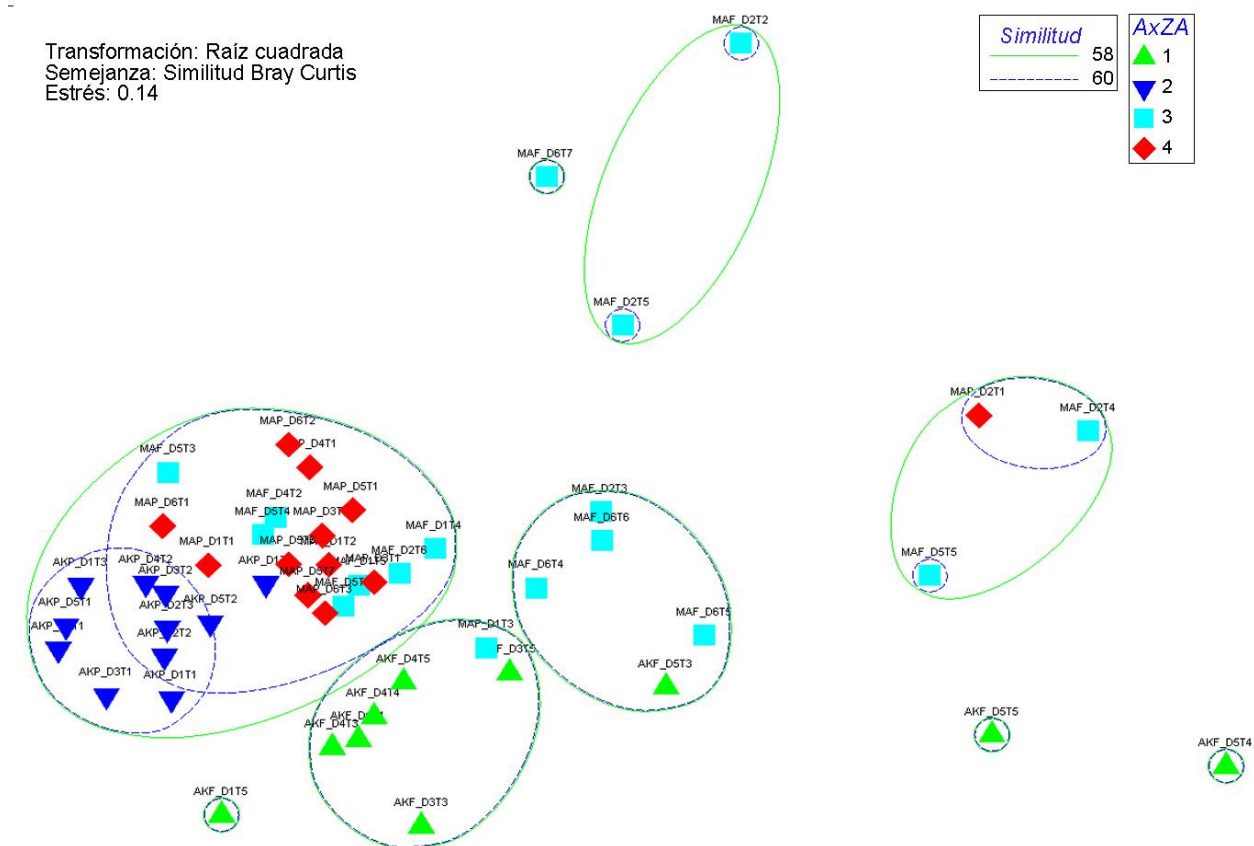


Fig 4.17 Diagrama MDS del comportamiento de las estaciones agrupadas (Cluster) de acuerdo al porcentaje de similitud (58 y 60%). Simbología utilizada para las estaciones, triángulo (1)= frente de Akumal, triángulo invertido (2)= pendiente de Akumal, cuadrado (3)= frente de Mahahual y rombo (4)= pendiente de Mahahual.

El comportamiento de cada uno de los indicadores; Número de Colonias (NoCol), Número de especies (NSpp), Índice de Potencial de Preservación Estructural Coralina (IPPEC), Cobertura Coralina (CC), Complejidad Topográfica (CT) (figuras 4.18 - 4.23) utilizados para el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal, se pueden observar con mayor claridad en los diagramas generados por el MDS (cuyo estrés fue de 0.14), al asociarse las estaciones y la ordenación de las mismas en el diagrama de acuerdo a la zonación arrecifal (frente y pendiente).

En cada uno de los diagramas de los indicadores, se puede observar que las estaciones que obtuvieron mayor valor pertenecen a la pendiente arrecifal (esto está directamente relacionado a características ecológicas y estructurales de esta zona). Por ejemplo las estaciones que registraron mayor número de colonias coralinas, también presentan una mayor riqueza de especies, y este patrón se repite con los demás indicadores, es decir que en todos los diagramas los rangos de cada uno de los indicadores son proporcionalmente igual.

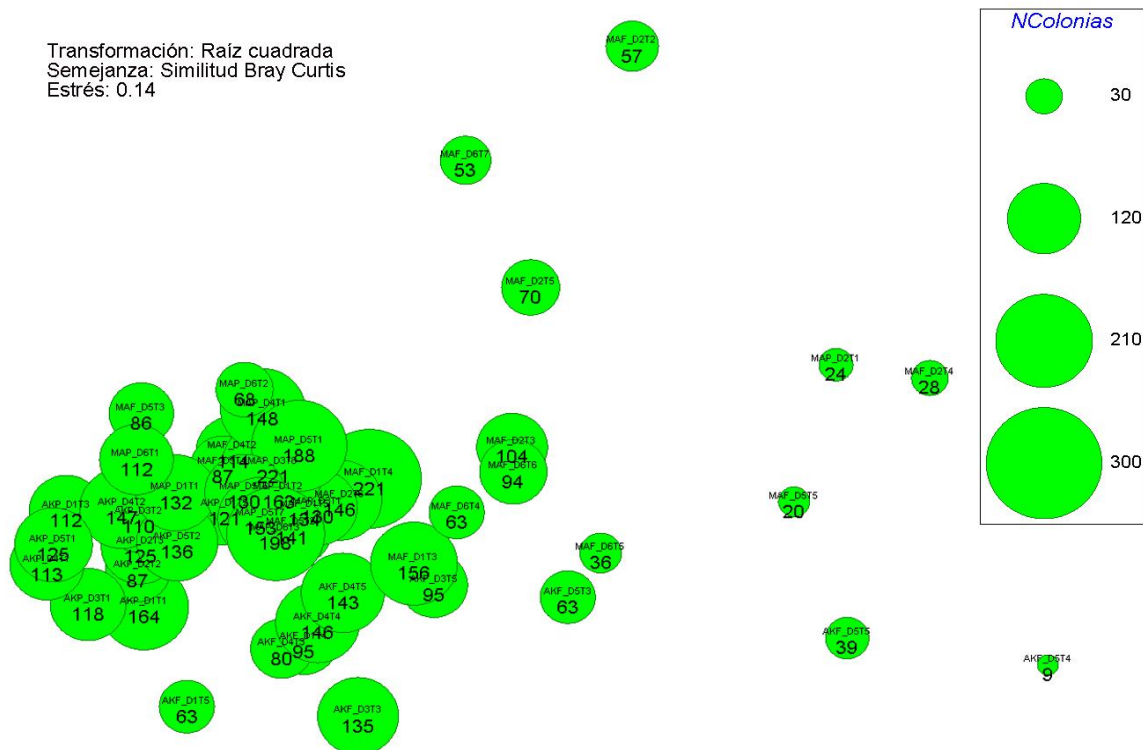


Fig. 4.18 Diagrama MDS de comportamiento del indicador Número de Colonias

Transformación: Raíz cuadrada
 Semejanza: Similitud Bray Curtis
 Estrés: 0.14

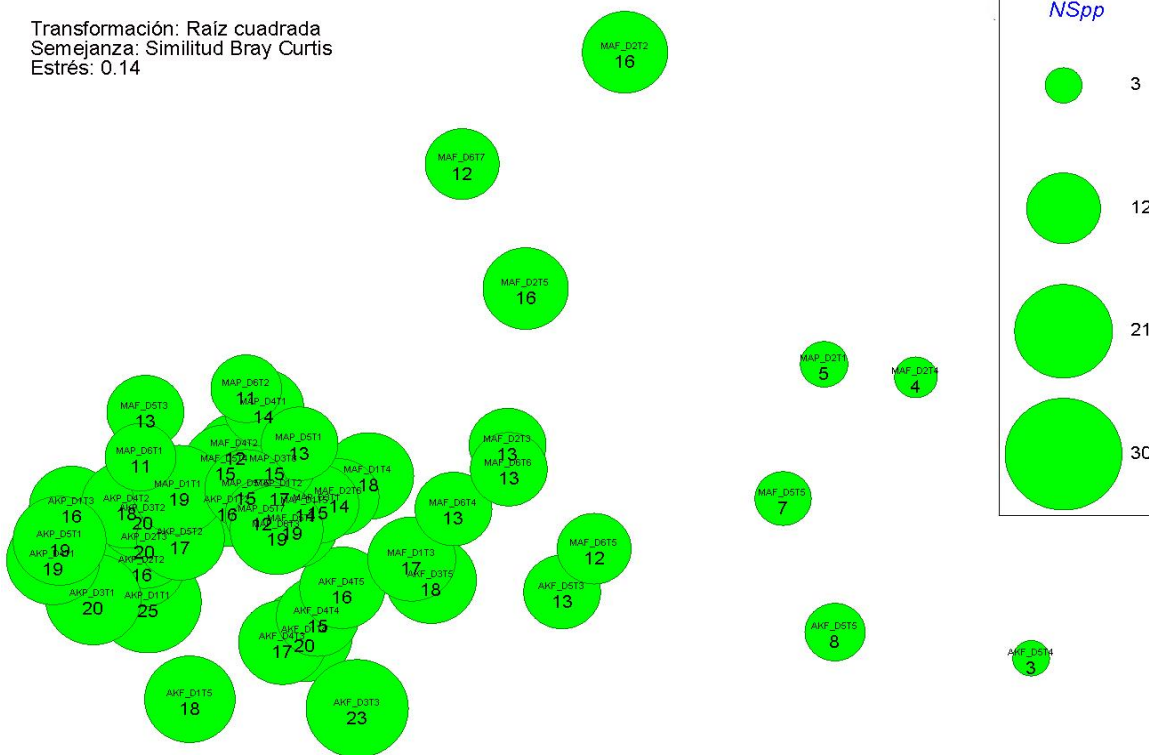


Fig. 4.19 Diagrama MDS de comportamiento del indicador Número de Especies

Transformación: Raíz cuadrada
 Semejanza: Similitud Bray Curtis
 Estrés: 0.14

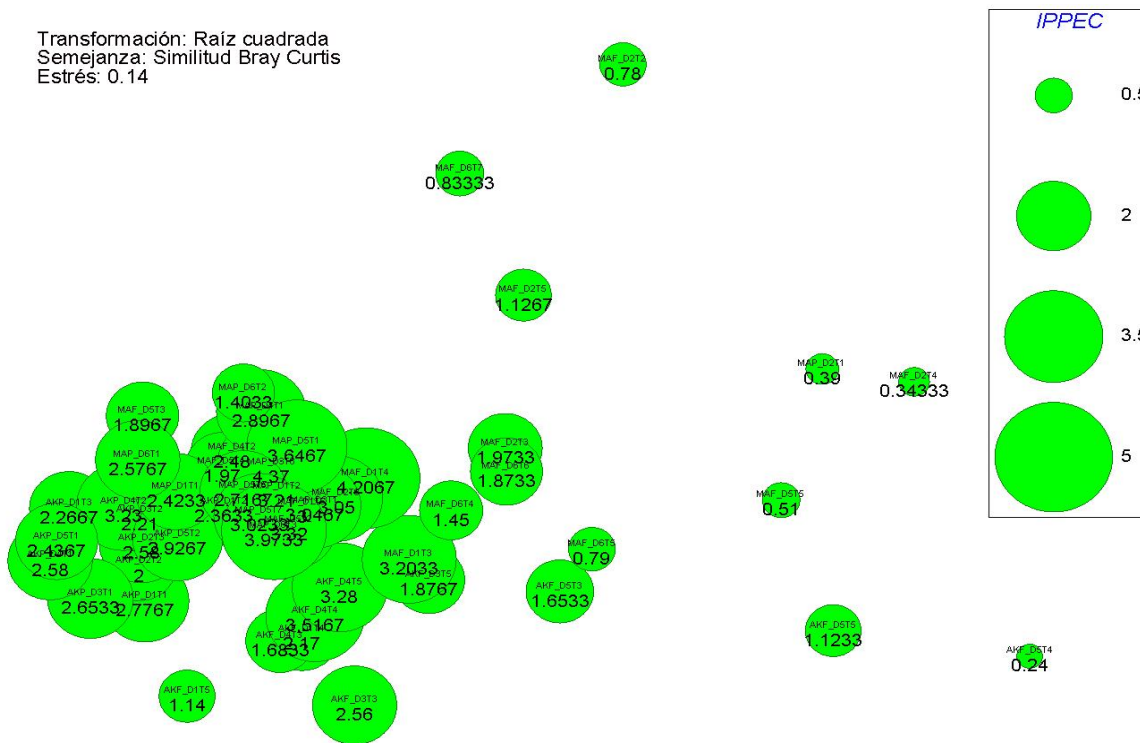
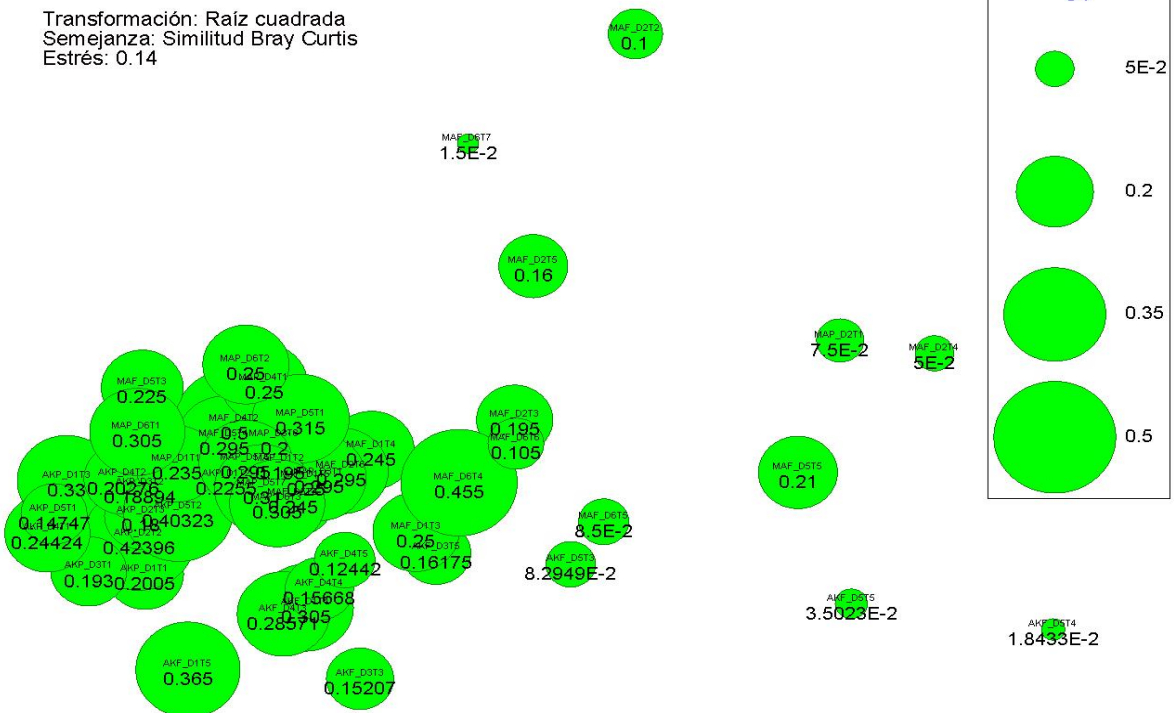
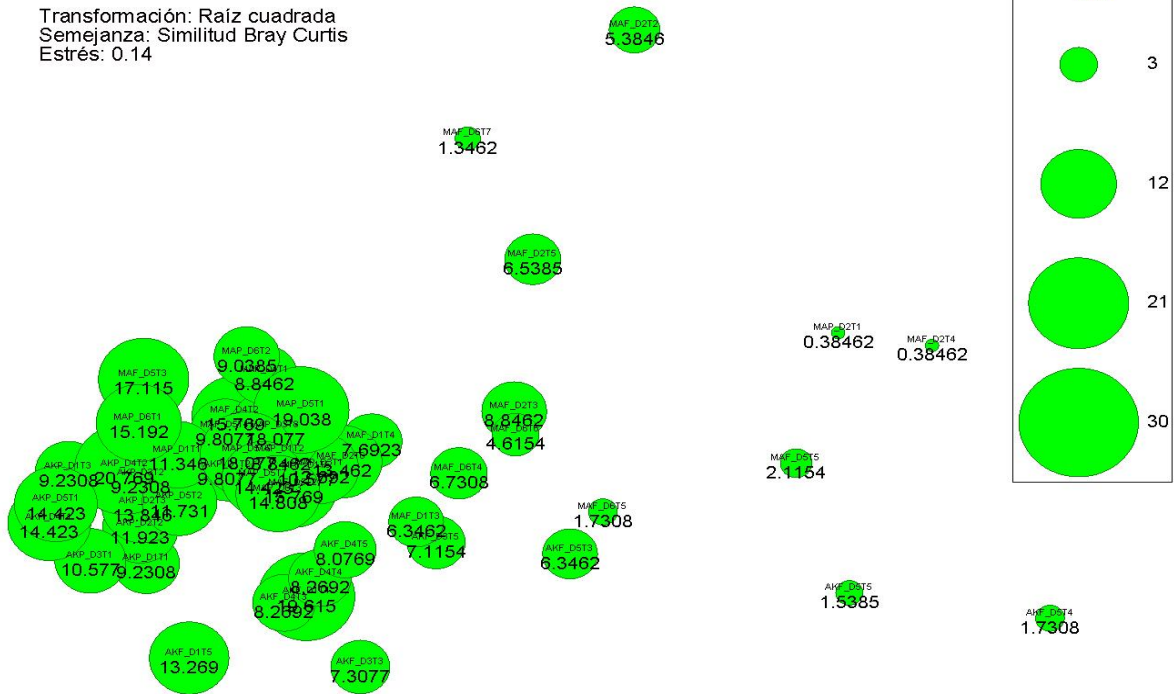


Fig. 4.20 Diagrama MDS de comportamiento del indicador Índice de Preservación Potencial de Estructura Coralina (IPPEC).



4.7 Ejemplificación de Valores Extremos (mínimo y máximo) del Rango de Valores del IEA

Para la ejemplificación de valores extremos en el rango del Índice de Estructura Arrecifal propuesto en esta tesis, se seleccionaron sitios arrecifales que representan de manera gráfica, numérica, visual y estructural, un valor mínimo y un valor elevado reales, que pueden ser obtenidos al calcular el IAE. Los sitios fueron los siguientes:

- Laguna arrecifal de Mahahual, Quinta Roo, México,
- Frente Arrecifal Montecristi, República Dominicana.

La laguna arrecifal de Mahahual es un ejemplo de un valor mínimo obtenido en el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal (0.01). Las características y composición estructural de este sitio son las siguientes:

1. Es una área plana, con nula estructura arrecifal (baja complejidad topográfica), con presencia ocasional de estructuras rocosas y corales duros muertos.
2. Mínima presencia de corales duros vivos, dominando especies cuyo potencial de construcción arrecifal es poco bajo (por ejemplo: *P. porites*, *P. astreoides*).
3. Bajo porcentaje de cobertura coralina, por la escasez de corales duros con tejido sano y poca abundancia de especies coralinas (Figura 4.24).



Fig. 4.24. Imagen representativa del fondo de la Laguna Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo, México. IEA= 0.01. Área arrecifal con poca presencia de colonias de corales.

El valor 0.01 del IAE, está directamente relacionado con la abundancia de especies presentes en la Laguna Arrecifal de Mahahual, en esta zona solo se registraron un total de 16 colonias, de las cuales la especie *P. asteroides* fue la más abundante (Figura 4.25). El valor obtenido en el IPPEC de 0.25, esta dado principalmente por la presencia de especies como *Solenastrea spp.* y *P. porites* (Figura 4.26).

Con respecto a la Cobertura Coralina, se determinó que solo tres de seis especies registradas (*P. astreoides*, *S. siderea* y *P. Divaricata*) fueron las que contribuyeron en este indicador (Figura 4.27).

Por último el valor estimado de la Complejidad Topográfica fué de 0.02, es decir que esta zona analizada carece de estructura arrecifal (fondo plano constituido principalmente por pavimento calcáreo).

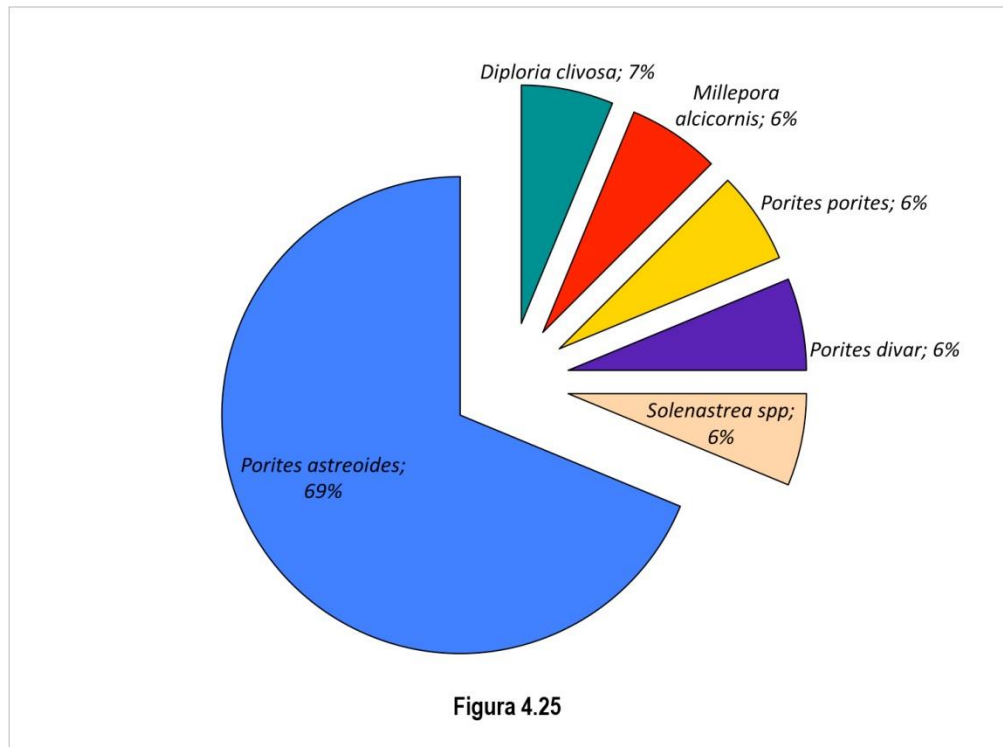


Fig. 4.25 Abundancia de especies de la Laguna Arrecifal de Mahahual, Quintana Roo, México. La especie *Porites astreoides* es la más dominante.

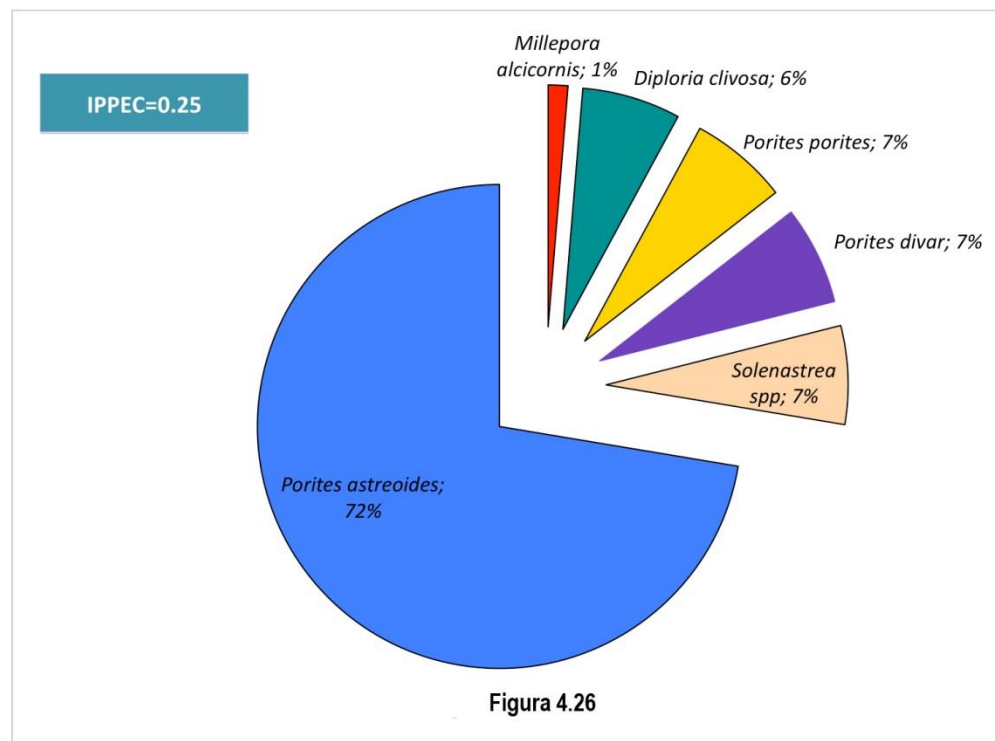


Fig. 4.26 Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en la Laguna de Mahahual, Quintana Roo, México. El IPPEC fue de 0.25 las especies *Porites astreoides*, y *Solenastrea spp* son las más importantes

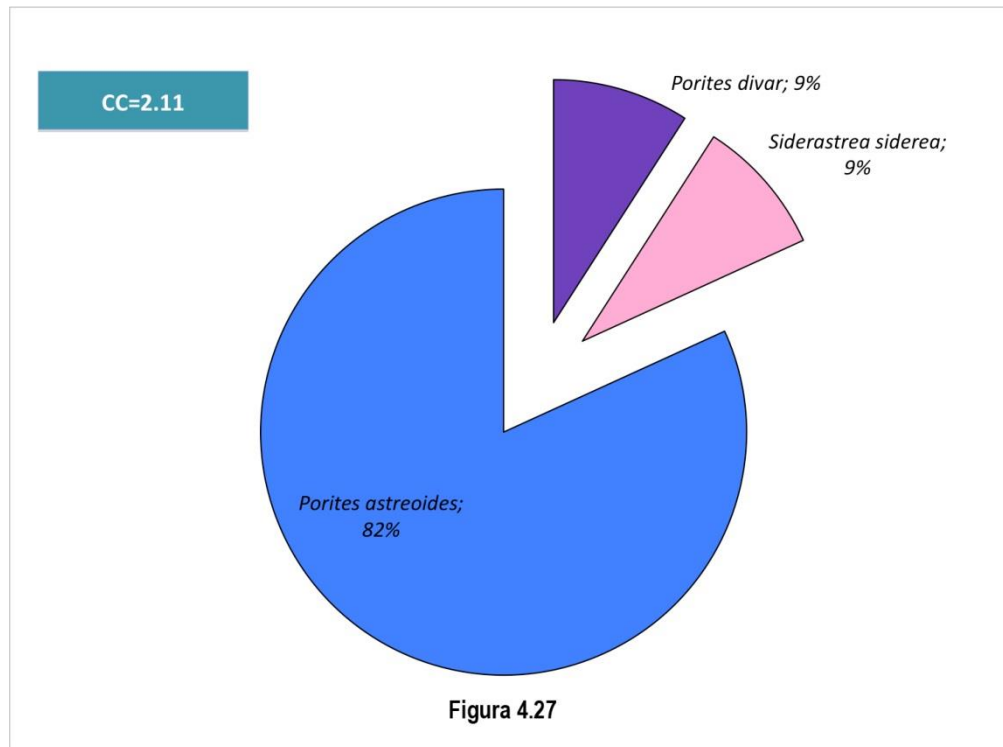


Fig. 4.27 Cobertura coralina de la Laguna de Mahahual, Quintana Roo, México. La cobertura total fue de 2.11 siendo las especies *Porites astreoides* la más abundante.

El ejemplo tomado de la zona de frente arrecifal de Montecristi en la República Dominicana, representa un valor elevado de IEA, con 56.39 que representa la composición estructural de éste sitio de la siguiente forma (Figura 4.28):

1. Presencia considerable o medianamente abundante de corales constructores de arrecifes.
2. Es un área de complejidad media, debido a la abundancia de especies coralinas no constructoras, octocorales, esponjas y otros organismos que no contribuyen significativamente a la complejidad topográfica.
3. Alto porcentaje de cobertura coralina.
4. Alto número de colonias coralinas por especie.

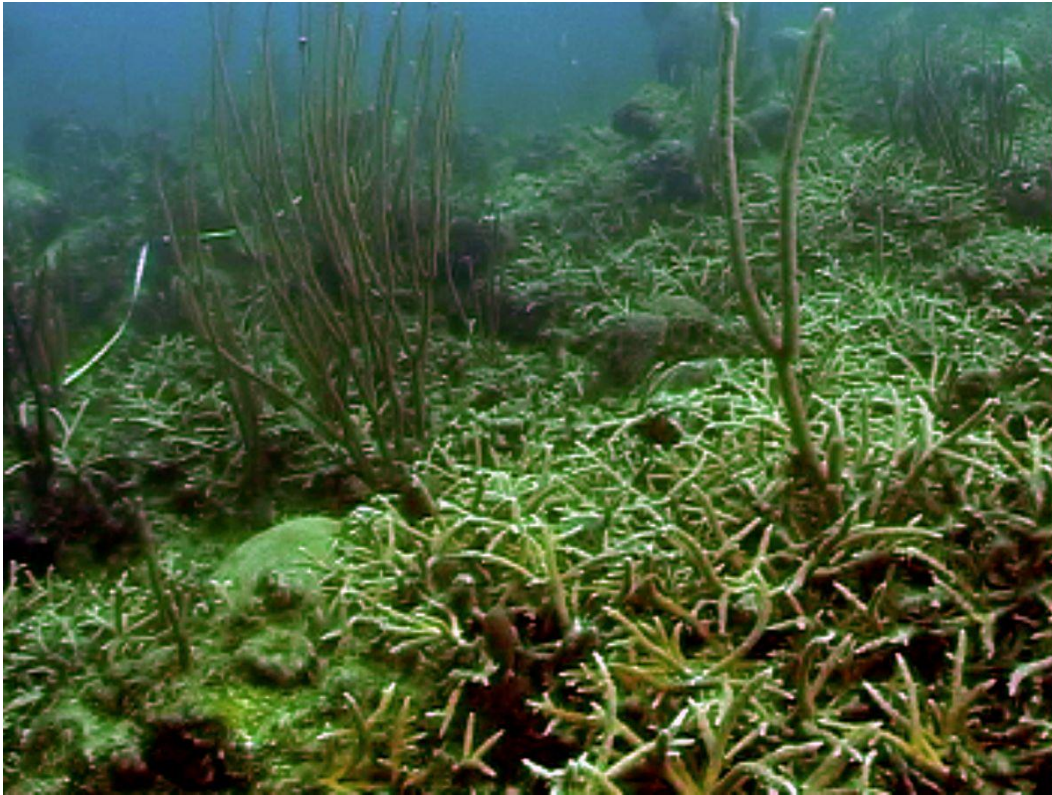


Fig. 4.28 Imagen real del Arrecife Montecristi, República Dominicana. IEA=56.39. Abundante presencia de colonias vivas de la especie constructora *Acropora cervicornis*.

El valor de 56.39 del IAE, está dado por la presencia de especies constructoras de arrecifes, principalmente por *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata* (Figura 4.29). Estas mismas especies contribuyen con diferente porcentaje al IPPEC (4.58) (Figura 4.36), y a pesar de la presencia de dichas especies se estimó una baja complejidad topográfica (0.27). Se calculó el 45.57% de cobertura coralina, dicha cobertura esta representada por las especies de *P. furcata*, *P. porites* y *Montastrea faveolata* (Figura 4.31).

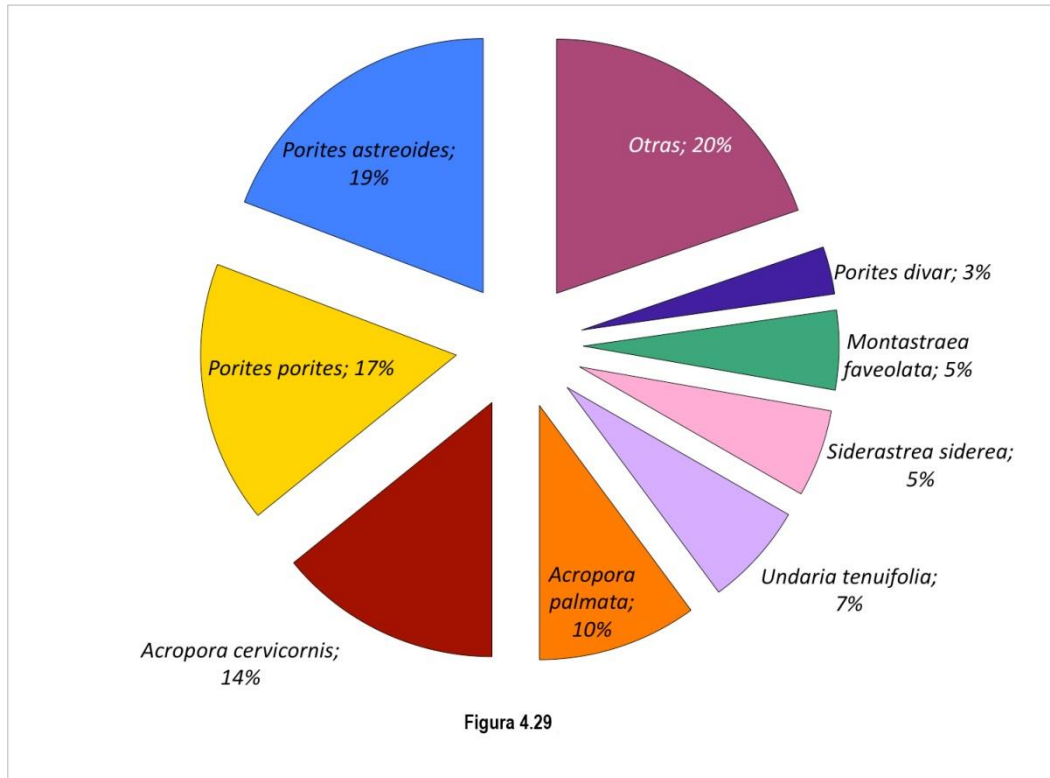


Fig. 4.29 Abundancia de especies coralinas del arrecife Montecristi, República Dominicana.

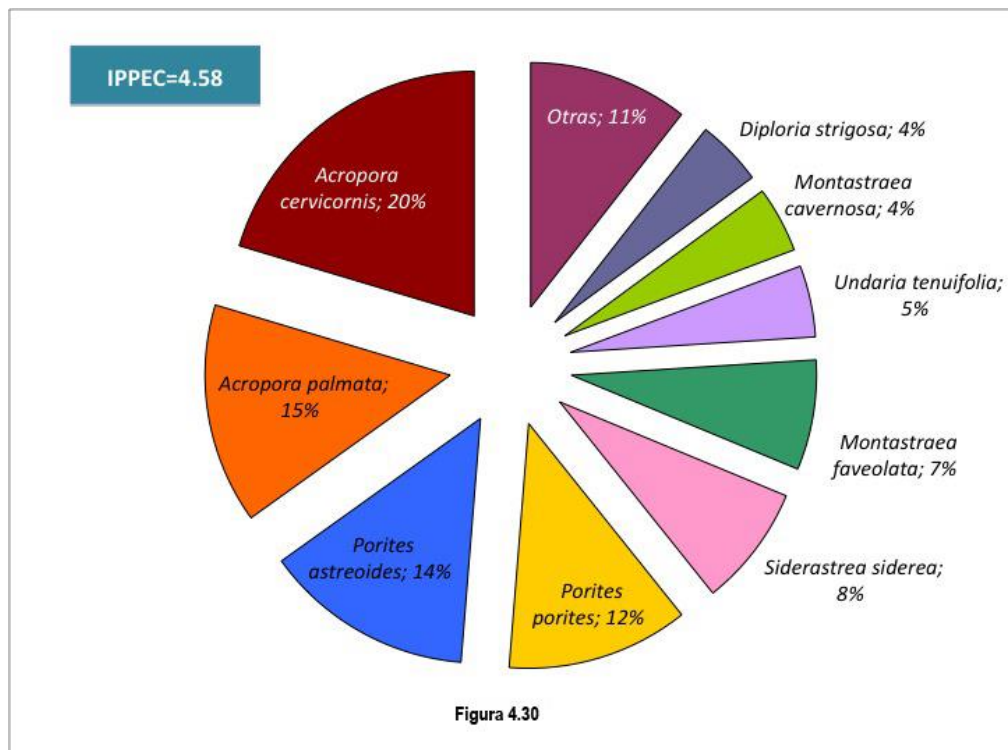


Fig. 4.30 Índice de Preservación de Estructura Coralina (IPPEC) en el arrecife Montecristi, República Dominicana. El IPPEC fue de 4.58 siendo las especies *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata*, las más importantes.

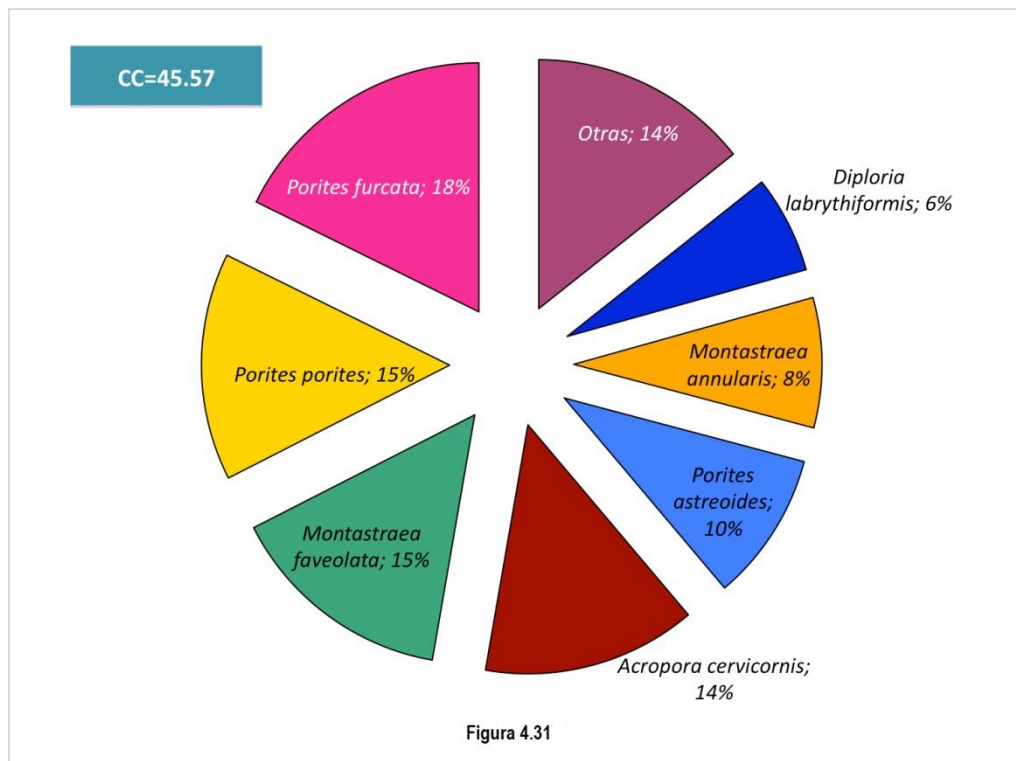


Fig. 4.31 Cobertura coralina del arrecife Montecristi, República Dominicana. La cobertura total fue de 45.57. Siendo *Porites furcata* y *Porites porites* las especies con mayor abundancia.

4.8 Aplicación del Índice de Estructura Arrecifal en los arrecifes de Akumal, Mahahual, Q. Roo, México y Montecristi, República Dominicana.

La aplicación y comparación del Índice de Estructura Arrecifal (IEA) en los Arrecifes de Akumal, Mahahual en Quintana Roo, y Montecristi en la República Dominicana, demostraron que el índice responde conforme a las diferencias en la composición estructural de cada uno de estos arrecifes. Siendo que la Laguna de Mahahual obtuvo el menor valor del IEA (0.01). El Arrecife de Akumal obtuvo 5.77 ± 4.11 y Mahahual 7.50 ± 6.46 y por último la estación empleada como ejemplo del arrecife de Montecristi, República Dominicana obtuvo el máximo valor del IEA calculado en este trabajo (56.39) (Figura 4.32).

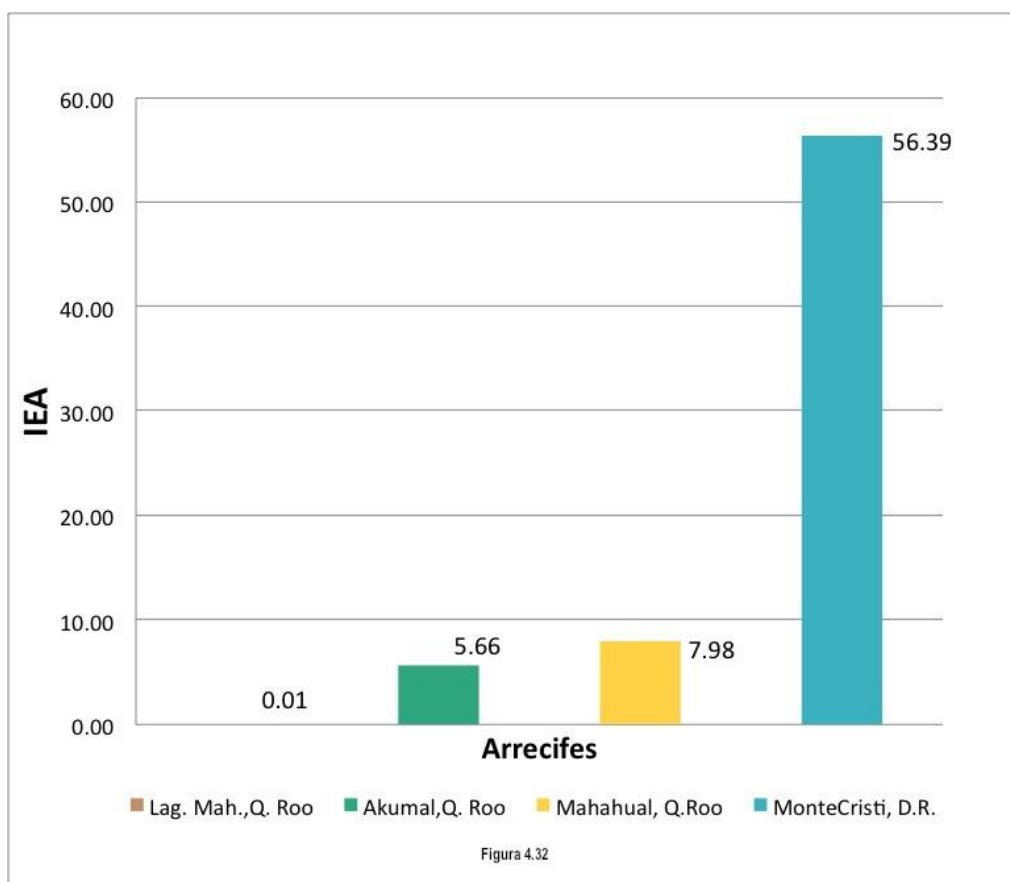


Fig. 4.32 Índice de Estructura Arrecifal aplicado en cuatro arrecifes: Mahahual (laguna y arrecife) y Akumal, Quintana Roo, México, y MonteCristi, República Dominicana.

4.9 Representación visual del Índice de Estructura Arrecifal en diferentes zonas y arrecifes.

Se realizó una representación visual de siete estaciones con diferentes valores del Índice de Estructura Arrecifal. Las imágenes que se encuentran en los extremos de la línea son los sitios ejemplo tanto del valor mínimo (0.01, laguna arrecifal de Mahahual), como de un valor elevado (56.39, arrecife frontal, Montecristi, Rep.Dom) calculado para este índice. Los demás sitios ejemplificados que se encuentran en el rango de 1.06 y 15.80, pertenecen al frente y pendiente arrecifales de Akumal y Mahahual.

Es importante observar el comportamiento, forma y estructura que tiene cada sitio en su imagen representativa, el cual está directamente relacionado con el valor calculado en el IEA (Figura 4.33).

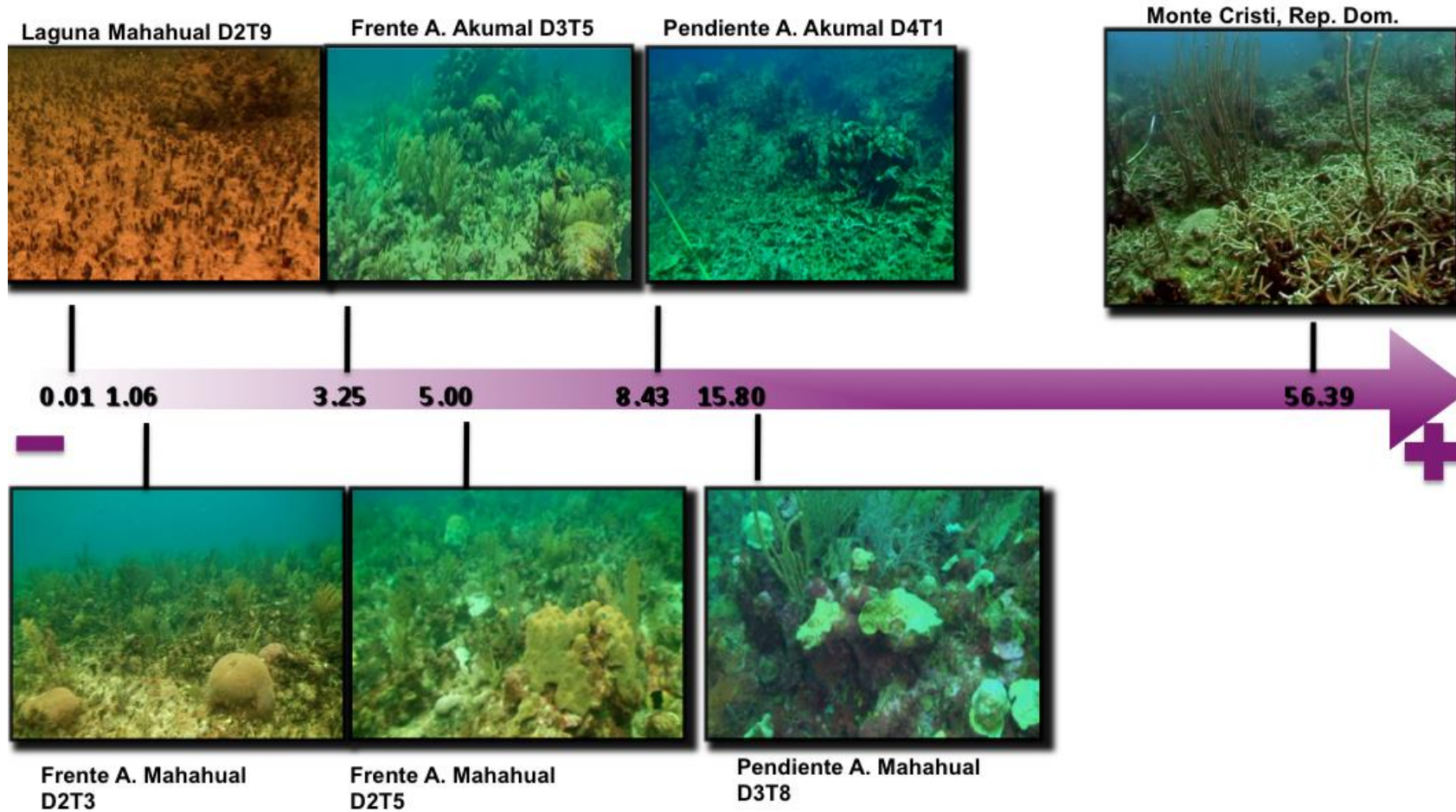


Figura 4.33. Representación visual del Índice de Estructura Arrecifal de siete sitios y dos zonas arrecifales de tres diferentes arrecifes; Mahahual y Akumal, Quinta Roo, México, y Montecristi República Dominicana

5. Discusión

La obtención de datos para el cálculo de los indicadores de complejidad topográfica, cobertura coralina e índice potencial de preservación de estructura coralina de los arrecifes de Akumal y Mahahual, fue realizado satisfactoriamente: estos indicadores fueron elementos fundamentales para ejecutar el objetivo principal al desarrollar y calcular el Índice de Estructura Arrecifal (IEA) en ambos arrecifes.

El Indicador de número de colonias coralinas vivas registradas (densidad de colonias por transecto) determinó que no existe una diferencia significativa ($\alpha=0.05$, $p= 0.62$) en la abundancia de corales en el arrecife de Akumal (3.53 ± 1.28 col/m²) con respecto a Mahahual (3.76 ± 1.90 col/m²). Sin embargo de manera general se identificaron cambios en la composición del ensamblaje de especies, dependiendo de la zona arrecifal y del arrecife.

Para el frente arrecifal de Akumal, Borges (2003) determinó que la especie con mayor abundancia era *M. annularis*. En 2010 (presente trabajo) se determinó que las especies que más abundan son *S. siderea* 20% y *U. agaricites* 17%. Para la zona de pendiente arrecifal, Muñoz-Chagúin & De la Cruz-Aguero (1993) definieron a *M. annularis* como la especie más abundante. Actualmente se definió a *M. faveolata* (17%) y *P. astreoides* (15%) como las más abundantes.

Para el frente arrecifal de Mahahual se definió en el presente trabajo (2011) que las especies *U. agaricites* (31%), *S. siderea* (11%) y *P. astreoides* (10%) son las más abundantes. En el 2003, Borges-Souza mencionó que las especies *P. astreoides* y *A. palmata* eran de mayor presencia, así mismo se destacan especies como *A. tenuifolia*, *Dendrogyra cylindrycus* y *M. annularis*. Para la pendiente arrecifal, la ONG Amigos de Sian Ka'an (2003) definió que las especies más abundantes eran *M. faveolata* y *M. cavernosa*. y en el presente trabajo las especies de mayor abundancia son *U. agaricites* (36%), *P. astreoides*

(15%) y *M. faveolata* (14%). En términos generales se puede establecer que en décadas pasadas las especies que predominaban en ambos arrecifes eran especies constructoras de gran tamaño (*A. palmata*, *M. faveolata*, *M. annularis*) y actualmente hay una mayor abundancia de especies masivas e incrustantes de menor tamaño entre las que más destacan *U. agaricites*, *S. siderea* y *P. asteroides*.

Los resultados obtenidos del Índice de Estructura Arrecifal (IEA), y por las características de los indicadores con los que fue desarrollado, no solo permitieron identificar cambios actuales en la composición de especies y en la estructura de los arrecifes evaluados, sino que también se identificó una posible tendencia de cambios en el futuro al calcular el IEA. Esta tendencia de cambio podría deberse a las tres especies más abundantes *U. agaricites*, *S. siderea* y *P. asteroides*, y por tres principales razones; 1. *Cambio de abundancia de especies*, se debe a que éstas especies de menor tamaño tienen una mayor capacidad de adaptación y resistencia a cambios ambientales, 2. Son *especies altamente competitivas* y 3. Su *crecimiento es más rápido*, reemplazando a las especies tradicionales (constructoras de gran tamaño), las cuales han sido diezmadas por enfermedades y principalmente por fenómenos naturales (huracanes, cambio de temperatura, blanqueamiento, fenómeno del niño). Estas tres premisas se explican a continuación.

Warner *et. al* (1996) determinó que la especie *M. annularis* es más sensible a temperaturas elevadas entre los 32 y 34° C de exposición. A esta temperatura se observa interrupción en el proceso de las zooxantelas para llevar a cabo la fotosíntesis, de manera contraria las especies *U. agaricites* y *S. Radians* no pierdan su capacidad de disipar el exceso de energía a través de vías no fotoquímicas, las cuales protegen su fotosistema de daños durante la exposición al calor (Cruz-Piñón *et al.*, 2003), y así tienen una mayor tolerancia a cambios ambientales, sobre todo al cambio de temperatura. *U. agaricites* es una especie altamente competitiva pues desarrolla su mecanismo de defensa “*sweeper tentacles*” específicamente como respuesta a encuentros competitivos con otros animales sésiles. Estos tentáculos tienen el potencial de dañar los tejidos de los

competidores y pueden afectar a largo plazo las interacciones competitivas. Por ejemplo la interacción de dicha especie y la especie *M. Annularis*, la distancia entre estas dos especies es de 1-2mm, pero *U. agaricites* daña el tejido de la *M. Annularis* después de que esta digiriendo o cuando ésta se encuentra herida (Chornesky, 1983).

En cuanto al cambio de composición en las comunidades y el aporte de las especies al índice de estructura arrecifal, existen trabajos que demuestran que las especies de coral a pesar de encontrarse en condiciones poco favorables su crecimiento no se ve afectado. Por ejemplo: Cruz-Piñón *et al.* (2003) determinaron la tasa de extensión de un año de las especies *M. annularis* (0.5mm/y^{-1}) y *M. faveolata* (0.6mm/y^{-1}), considerando variables ambientales como temperatura, coeficiente de extinción de la luz, tasa de sedimentación, nutrientes disueltos y energía de las olas. Según estos autores, obtuvieron que no hay diferencias significativas en la tasa de extensión de ambas especies, a pesar de encontrarse en condiciones ambientales poco favorables, para el desempeño de los corales, siendo capaces de agregar nuevo esqueleto con poca o ninguna oportunidad de hacerlo.

Con respecto a la tasa de extensión anual de los géneros *Agaricites* y *Porites* es mayor a las especies del género *Montastrea*, y ésta puede variar anualmente, ($85.2\text{-}195\text{mm/y}^{-1}$ y $68.4\text{-}87.2\text{ mm/y}^{-1}$ respectivamente) (Vermeij, 2006). De manera particular Elizalde *et al.* (2010), demostraron que la extensión anual de *P. astreoides* es de 3.67 mm/y^{-1} . En este contexto, se puede explicar por qué actualmente las especies del género *Agaricia* y *Porites* tienen una mayor influencia en la composición estructural en los arrecifes: esto puede deberse por su capacidad de tolerancia a cambios ambientales, alta competitividad y abundancia, además por una mayor tasa de extensión/crecimiento en comparación con las especies constructoras de arrecifes del género *Montastrea* y *Acropora* (las cuales hacen más complejo la estructura arrecifal por las dimensiones que llegan a tener estas especies).

Es importante considerar también que el crecimiento coralino puede ser influenciado por una variedad de parámetros de calidad del agua tales como la temperatura, penetración de luz, la velocidad de sedimentación, y concentraciones de nutrientes (Carricart-Ganivet, 2007). Estos factores pueden variar para cada especie, incluso dentro de un mismo ambiente, y dentro de una misma colonia (Dustan, 1975; Gladfelter et al., 1978). Por tanto el crecimiento coralino como tal no afecta el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal, pues es un factor intrínseco y que siempre ocurre en el sistema arrecifal. Sin embargo éste se puede ver afectado por procesos bioerosivos y por la disminución de la cobertura coralina, (pues es el tejido vivo de los corales el que permite dicho crecimiento) teniendo efectos directos en la medición de la complejidad topográfica.

Por las características de los indicadores utilizados en el IEA, principalmente por la aplicación del índice potencial de preservación coralina (IPPEC), se determinó que el IEA, puede tener el potencial de detectar cambios en la composición del arrecife (de corales constructores de gran tamaño a menor tamaño), dependiendo de la presencia de especies cuyo valor ponderativo sea 1, o por la abundancia de especies cuya ponderación es 0.5 o 0.1, pues al existir una mayor presencia de especies constructoras en el arrecife, mayor será el valor del IPPEC. Por ejemplo, el IPPEC obtenido en el arrecife de Montecristi, Rep.Dom. fue 4.58, ya que está conformado principalmente por especies constructoras del género Acroporidae, en comparación a los arrecifes de Akumal y Mahahual, cuyo IPPEC en promedio fue menor (2.29 y 2.25 correspondientemente) principalmente por la presencia de especies del género Agariciidae y Poritidae. Con respecto a los resultados obtenidos del IPPEC, en general en Akumal y Mahahual, no se encontraron diferencias significativas en ambos arrecifes ($p=0.88$), tampoco por zona arrecifal, pues existe una homogeneidad en la composición y abundancia de especies, identificando la importante abundancia de las especies *U. agaricites*, *S. Siderea* y *P. Astreoides*.

En el presente trabajo se reconoce la importancia de la especie *Acropora palmata*, ya es una de las más representativas en la región del Caribe y lo ha

sido por más de 500,000 años (Bruckner, 2003). Considerando el papel estructural y ecológico de esta especie en la región, se estipula que es único y no puede ser reemplazado por otra especie de coral (Jackson, 1994). Sin embargo, su abundancia ha experimentado un extenso y pronunciado declive regional (Aronson & Precht, 2001), y por tanto se relaciona con los bajos valores del IPPEC calculados en este trabajo. Existen trabajos en otros arrecifes (Curaçao, Antillas Holandesas) que mencionan una disminución de corales y cobertura coralina del género *Acropora* y *Millepora* en aguas someras y cercanas a la costa, siendo la actividad antropogénica y/o desarrollo costero las principales causantes en la disminución de las poblaciones coralinas (Bak & Nieuwland, 1995; Debrot *et al.*, 1998; Nagelkerken *et al.*, 2005).

Esta disminución de cobertura coralina también se presenta en el arrecife de Akumal y Mahahual, pues Garza-Pérez en 2004, definió que la cobertura coralina promedio era de 14.56% y 11.58% respectivamente. En el presente trabajo se obtuvo una cobertura coralina promedio de $10.32 \pm 4.78\%$ en el arrecife de Akumal (2010) y 9.77 des. Est. $\pm 5.77\%$ en Mahahual (2011), sin encontrar diferencias significativas entre ambos arrecifes ($p=0.72$) ni por zona arrecifal. Esta disminución en la cobertura de los arrecifes se remonta a décadas pasadas. En 1998 se estima que los corales escleractíneos habían estado sujetos a condiciones extremas por el efecto en la región de las altas temperaturas superficiales del mar, causadas por el fenómeno de “El Niño” (Garza-Pérez, 1999; Ruiz *et al.*, 2003; Somerfield *et al.*, 2008), tal fue el impacto en el arrecife de Mahahual que el porcentaje de cobertura de coral escleractíneo afectado por el blanqueamiento fue del 57.92% (es decir un 14.62%) del 31.40% de cobertura total del arrecife. Los principales géneros y especies afectadas en orden de magnitud fueron el género *Montastraea spp.*, el género *Agaricia spp.* (solo formas foliosas) y *Diploria labyrinthiformis* (Garza-Pérez, 1999). Somerfield *et al.* (2008) sugiere que a falta de recuperación y baja cobertura de coral, los arrecifes han disminuido drásticamente su capacidad de resiliencia. Mata- Lara (2013) reportó que en el Arrecife de Akumal 2009 y 2010 se encontró una alta incidencia de enfermedades coralinas, en especial la Banda Amarilla que afecta

principalmente a corales del género *Montastrea* spp. (Revees, 1994; Foley et al., 2005; Bruckner & Bruckner, 2006), y la Banda Blanca afecta únicamente a los Acropóridos (Smith & Ritchie 1995, Ritchie & Smith 1998). Estas enfermedades que atacan principalmente a las especies con mayor aporte para la construcción de arrecifes, pueden efectivamente cambiar la estructura comunitaria bentónica de regiones enteras y al parecer esto es parte de lo que se ve reflejado en el IEA valor promedio estimado para Akumal y Mahual, pues en ambos arrecifes existía una importante cobertura coralina del género Acroporidae, y actualmente dominan los géneros Siderastreidae y Poritidae.

Con respecto al indicador complejidad topográfica (CT), se encontró que el arrecife de Mahahual es ligeramente más complejo (0.23 ± 0.10) que el arrecife de Akumal (0.21 ± 0.11), pero sin tener diferencias significativas ($F=0.4310$, $p=0.5146$), a pesar de que en Akumal existe mayor abundancia de la especie *M. Annularis* (especie constructora), y que probablemente podría haber contribuido a una mayor complejidad topográfica. Sin embargo con la información obtenida de los indicadores (número de colonias y cobertura coralina) sobre la disminución de sus valores en las últimas décadas, se esperaba una menor complejidad topográfica, con respecto a los valores promedio reportados por Garza-Pérez en el 2004 (0.17 de CT para Akumal y 0.16 para Mahahual). Estas diferencias en la medición de la complejidad topográfica obtenida, entre 2004 y 2010-2011 pueden deberse a diferentes factores; como las variaciones entre observadores, las diferencias entre los sitios evaluados o el tipo de cadena usada. Para las estimaciones reportadas en 2004 se utilizó una cadena de plástico de eslabón grande, lastrada, de 16 m de longitud (Com. Pers. Garza Pérez) y para las de 2010-2011 se utilizó una cadena de acero de eslabón pequeño de 20 m de longitud.

La variación de los resultados obtenidos de cada indicador entre el arrecife de Akumal y Mahahual, por medio de la desviación estándar, demuestran que el arrecife de Akumal tiene una mayor homogeneidad en su composición estructural ($CC=10.32\% \pm 4.78$, $IPPEC=2.25 \pm 0.78$, $Ct=0.21 \pm 0.11$), y Mahahual es más variable estructuralmente ($CC=9.77\% \pm 5.77$, $IPPEC= 2.29 \pm 1.17$,

$Ct=0.23\pm 0.10$). Estas diferencias estructurales, se demuestran al comparar las estimaciones del Índice de Estructura Arrecifal obtenidas entre los sitios estudiados, determinando que el uso de los indicadores (IPPEC, cobertura coralina y complejidad topográfica) para el cálculo del IEA, de manera conjunta, realzan variaciones y diferencias en la composición estructural en cada zona y arrecife evaluado, pues de manera general el arrecife de Mahahual (7.98) es estructuralmente más complejo que Akumal (5.66) ($F=1.17$, $p=0.2845$). Las diferencias que se pueden llegar a encontrar en distintos arrecifes al aplicar el IEA, se contextualizaron al calcular y comparar dicho índice en una estación de la laguna arrecifal de Mahahual, y en una estación en el arrecife frontal de Montecristi, República Dominicana. La aplicación del índice en estos dos últimos arrecifes permitió establecer un rango en el cual se puede identificar diferencias estructurales, comunitarias, numéricas y visuales (Fig. 4.33, pág. 59).

A través de este rango se observó lo siguiente: de manera general, los arrecifes de Akumal y Mahahual se caracterizan actualmente por la dominancia de especies como *U. agaricites*, *P. astreoides* y *S. radians*, presentan bajas coberturas coralinas, son similares en la complejidad topográfica y en el IPPEC. Por lo tanto, ambos arrecifes obtuvieron menores valores en el IEA con respecto al valor calculado en la estación del frente arrecifal de Montecristi, Rep. Dom. (el cual sirvió como ejemplo del máximo valor obtenido en el rango). En éste arrecife se identificó mayor cobertura coralina (45.57%), alto valor del IPPEC (4.58) y mayor complejidad topográfica (0.27). La cobertura coralina en Montecristi está representada principalmente por el género *Porites*, *Montastrea* y *Acropora*, en cuanto al valor del IPPEC, éste se constituye principalmente por las especies *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis*.

Esta comparación entre arrecifes, finalmente reflejó los resultados que esperábamos; a mayor cobertura coralina, complejidad topográfica, y alto IPPEC (abundancia de especies constructoras), mayor será el valor del IEA. De tal manera, que al obtener un alto valor del IEA, el arrecife será estructuralmente más complejo. Un arrecife altamente complejo es ecológicamente más funcional,

proporciona mayor diversidad de peces arrecifales, mayor superficie para la fijación de algas, corales y diversos invertebrados sésiles (Rooney, 1993; Mumby, 2006; Zainul, 2010). Por lo tanto el establecimiento del rango sirve como base para demostrar que el IEA es un indicador sinóptico, que integra adecuadamente a los indicadores tradicionales al compararse con otros arrecifes.

Con el uso de las herramientas multivariadas, se definieron por medio del PCA las variables más importantes representadas por las especies que caracterizan el arrecife de Akumal y Mahahual, ya sea por cobertura coralina y/o número de colonias. A través del RDA se corroboró el comportamiento individual de los indicadores, y la manera en la que influyen en el cálculo del Índice de Estructura Arrecifal. Por último se utilizó el MDS para demostrar mediante el diagrama de ordenación, la correspondencia de los valores del IEA con la distribución espacial de todas las estaciones en cada zona arrecifal.

El PCA definió que las especies más relevantes en los arrecife de Akumal y Mahahual (de acuerdo al peso contribuido al análisis) son: *Undaria agaricites* y *Siderastrea siderea* por su abundancia de colonias, y por la dominancia en la cobertura coralina; *Millepora alcicornis* y *Undaria tenuifolia*. A través del RDA (Figura 4.15, pág.43) se exploró el aporte de cada indicador (variable) en la composición del índice de estructura arrecifal, determinando que los indicadores utilizados, están correlacionados en la misma ó similar magnitud, por lo tanto, los valores calculados en el IEA no son susceptibles a ningún indicador.

Por otra parte, el RDA permitió conocer cómo está compuesta la estructura comunitaria de ambos arrecifes, y su correlación de acuerdo a la zonación arrecifal. Se observó que la estructura de Akumal y Mahahual está constituida principalmente por la cobertura coralina de *S. siderea*, *M. alcicornis* y *U. tenuifolia*, cuya presencia es mayor en el frente arrecifal. Este resultado demuestra que a pesar de no ser especies abundantes (a excepción de *S.*

siderea), se presume que las colonias de dichas especies están cubiertas casi en su totalidad de tejido vivo.

Respecto al número de colonias, nuevamente se destaca la importante abundancia de la especie *U. agaricites* (principalmente en la pendiente arrecifal de ambos arrecifes), seguido por *S. siderea* y *P. asteroides*.

Además, el RDA determinó que todos los indicadores están correlacionados en la misma magnitud respecto al Índice de Estructura Arrecifal, de tal forma que el resultado obtenido en el cálculo del índice, varía en sentido y magnitud similar a los tres indicadores evaluados, estableciendo así la utilidad del IEA como una medida de la estructura arrecifal, e integradora de los indicadores. Por otra parte, se encontró la relación que existe entre el número de colonias (NumCol) y el IPPEC, esta fuerte relación entre los dos últimos indicadores demuestra la dependencia que existe entre ellos (pues dependiendo de la abundancia de ciertas especies, influirá en la ponderación evaluada en el IPPEC). La asociación de cada uno de los indicadores (NColonias, Nsp, IPPEC, CC, CT y IEA) con los valores de cada estación, crean una ordenación espacial, la cual coincide con la teoría de la zonación arrecifal (Glynn 1974, Done 1984), pues los valores más altos se encuentran en la pendiente y los de menor valor en el frente arrecifal. Esta ordenación espacial de los arrecifes se corrobora con los resultados del MDS, pues por sus valores de similitud, el frente y pendiente de ambos arrecifes son similares espacialmente, probablemente por su ubicación geográfica, condiciones ambientales, y composición bentónica. Los diagramas obtenidos a través de este análisis (Figuras 4.17-4.23, págs. 47-50) demostraron que en cada indicador evaluado (Nsp, CC, CT e IEA), las estaciones con mayor valor se encontraban efectivamente en la pendiente arrecifal y los de menor valor en el frente arrecifal de ambos arrecifes.

Las diferentes evaluaciones a las que fue sometido el IEA y los indicadores que lo componen, demuestran la utilidad del índice, pues tiene el potencial de describir estructural, comunitaria y espacialmente el estado de condición de los

arrecifes, por la valiosa y basta información que proporciona sintetizadamente, puede ser utilizado como base para un plan de manejo integral costero.

Actualmente existe un grupo de expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP, 1999). Ellos mencionan que el manejo y la planificación integral de las áreas marinas, son esenciales para mantener a largo plazo la integridad ecológica, la productividad, y el beneficio económico de las regiones costeras. Haciendo indispensable el análisis y el conocimiento científico, para evaluar la efectividad de las acciones de manejo con las cuales se busca proteger el océano. Por tanto, resulta esencial que se logre una interacción cercana entre los científicos y los tomadores de decisiones.

Estos expertos concluyen que bajo el rubro de los programas de Manejo Integral Costero (MIC), la mayoría de estos programas necesitan tratar una o varias de las siguientes condiciones:

1. Sobreexplotación: destrucción, modificación de hábitats e interrupción de las relaciones predador/presa, y otras relaciones ecológicas;
2. Conflictos: que surgen allí donde algunas actividades humanas que dependen de la misma área y/o recurso; y
3. Daños insidiosos: pérdida de la diversidad y productividad biológica, que puede resultar de los impactos acumulados de las distintas prácticas.

De acuerdo a la información que proporciona el IEA, éste índice puede ser considerado dentro de un programa de MIC, pues tiene el potencial de describir a largo plazo los daños insidiosos en los arrecifes, a través de la descripción de la situación actual del ambiente arrecifal, la posibilidad de establecer tendencias de cambio (programa de monitoreo), y la posibilidad de asociar este indicador a los tipos e intensidades de presiones ó amenazas que pueden llegar a tener los arrecifes.

6.- Conclusión

Durante el desarrollo del Índice de Estructura Arrecifal, se utilizaron indicadores básicos para la evaluación de arrecifes (cobertura coralina, densidad de colonias y complejidad topográfica), los cuales son evaluados, monitoreados y utilizados comúnmente por científicos y expertos en ecología de arrecifes. Estos indicadores por su base científica y características, proporcionan información sobre el estado de condición del arrecife, sin embargo su interpretación requiere una formación académica/científica particular.

En el contexto de la escala numérica y visual, dado por los ejemplos de IEA mínimo e IEA elevado (0.01 y 56.39 respectivamente), y la obtención de los promedios del IEA para Mahahual (7.50 ± 6.46) y Akumal (5.77 ± 4.11), se demuestra que el IEA refleja de forma integral la composición de la comunidad coralina (riqueza de especies y abundancia de colonias por especie), la complejidad topográfica y la abundancia de corales en términos de cobertura coralina presentes en cada arrecife, y así el IEA constituye un aproximación efectiva para la evaluación de arrecifes coralinos.

Con la aplicación del Índice de Estructura Arrecifal desarrollado en este trabajo se puede tener una fácil y rápida interpretación integrada y sinóptica de éstos indicadores (en un solo valor), pues sintetiza información de manera comprensible y sencilla. Además es fácil de calcular, lo que permite su utilización como herramienta en el manejo y toma de decisiones. Además al desarrollar dicho índice, se implementó la primera fase: *Identificación y evaluación de asuntos claves* de las cinco fases para el desarrollo de un plan costero (mencionadas en el apartado 2.1.4, pág. 08). Esta primera fase consistió en compilar e integrar información en el contexto ambiental, a través de la caracterización del ambiente y la identificación de la tendencia en la condición y uso de los recursos de acuerdo al valor y función del ecosistema.

Para concluir y hacer énfasis en el objetivo principal de esta tesis, se determinó satisfactoriamente que el desarrollo y aplicación del IEA, podría utilizarse como base para la toma de decisiones y sobre todo fungir como una herramienta para el Manejo Integrado Costero (MIC) de arrecifes coralinos. Así mismo permite realizar comparaciones, monitoreos y evaluaciones temporales a diferentes escalas territoriales dentro de la región Atlántico Noroccidental.

7. Bibliografía

- Aguilar, O. D. 1995. Estructura de la Comunidad bentónica del Arrecife de Mahahual, Quintana Roo. México. Tesis. CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, 60 pp.
- Almada-Villela, Sale, P.F., Gold-Bouchot, G., Kjerfve, B. 2003. Manual de métodos para el programa de monitoreo sinóptico del SAM.
- Amigos de Sian Ka'an. 2003. Manejo Integrado de Recursos Costeros en Mahahual. Quinta Roo, México. Reporte, 31 pp.
- Arias-González, J.E, Nuñez-Lara, E., González-Salas, C., Galzin, R. 2004. Trophic models for investigation of fishing effect on coral reef ecosystems. *Ecological Modelling* 172:197-212
- Arias-González, J.E. 1998 Geomorphological trophic models of semi-protected and unprotected reef ecosystems in the south of the mexican Caribbean. *Fish Biology* 53: 236-255 pp.
- Arias-González, J.E., Núñez-Lara, E., Rodríguez-Zaragoza, F.A., Legendre, P. 2011. Indicadores del paisaje arrecifal para la conservación de la biodiversidad de los arrecifes de coral del Caribe. *Ciencias Marinas* 37(1): 87–96
- Aronson, R.B. & Precht, W.F. 2006. Conservation, precaution and Caribbean reefs. *Coral reefs*: 25:441-450
- Aronson, R.B. & Swanson, D.W. 1997. Video surveys of coral reefs: uni and multivariate applications. Proc. 8th Int. Coral Reef Sym. 2:1923-1926 pp.
- Aronson, R.B. & W.F. Precht. 2001. White band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. *Hydrobiology* 430: 25- 38.
- Aronson, R.B., Edmunds, P.J., Precht, W.F., Swanson, D.W., Levitan, D. R.1994. Large scale, long-term monitoring of Caribbean coral reefs: simple, quick, inexpensive techniques. *Atoll Res Bull* 421:1–19
- Bak, R. P. M. & Nieuwland, G. 1995. Long-term change in coral communities along depth gradients over Leeward reefs in the Netherlands Antilles. *Bulletin of Marine Science* 56: 609–619.
- Barnes R.S.K. 1999. An introduction to marine ecology. Blackwell Science, Oxford, England.
- Beck, M.W. 1998. Comparison of The Measurement and Effect of Habitat Structure on Gastropods in Rocky Intertidal and Mangrove Habitats. *Marine Ecology Progress Series* 169:165-178
- Bellwood, D.R. Hughes, T.P., Folke, C. Nyström, M. 2004. Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429:87-833.
- Birkeland, C. 1997. Life and death of coral reefs. Chapman and Hall Ed., New York, 536 pp.
- Borges-Sauza, J.M. 2003. Estructura y composición de la comunidad bentónica de los Arrecifes de Quintana Roo. IPN- CICIMAR. 47 pp.
- Bozec, Y. M., Acosta-González, G., Núñez-Lara, E., Arias-González, J.E. 2008. Impacts of coastal development on ecosystem structure and

- function of Yucatan coral reefs, Mexico. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008 Session number 18
- Bozec, Y.M., Acosta-González, G., Núñez-Lara, E., Arias-González, J.E. 2008. Impacts of coastal development on ecosystem structure and function of Yucatan coral reefs, Mexico. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008 Session number 18
 - Brock J.C., Wright C.W., Clayton T., Nayegandhi A. 2004. LIDAR optical rugosity of coral reefs in Biscayne National Park, Florida. *Coral Reefs* 23:48–59
 - Brock J.C., Wright C.W., Kuffner I.B., Hernandez R., Thompson P. 2006. Airborne LIDAR sensing of massive stony coral colonies on patch reefs in the northern Florida reef tract. *Remote Sensing of Environmental*, 104:31–42
 - Brown, B.E. 1997. Disturbances to reefs in recent times. En: Birkeland, C. (Ed.). Life and death of coral reefs. Chapman and Hall, Nueva York, pp 354-379 pp.
 - Bruckner, A.W. & Brucker, R.J. 2006. Consequences of Bellow band disease (YBD) on *Montastrea annularis* (species complex) populations on remote reefs off Mona Island, Puerto Rico. *Diseases of Aquatic Organisms* 69 (1): 67-73 pp.
 - Bruckner, A.W. 2003. Proceedings of the Caribbean Acropora Workshop: potencial Application of the U.S. Endangered Species Act as a Conservation Strategy, 199 pp
 - Buddemeier, R., Kleypas, J., Aronson, R. 2004. Coral reefs and global climate change: Potential contributions of climate change to stresses on coral reef ecosystems. Pew Center on Global Climate Change, Arlington, E.E.U.U. 44 pp.
 - Caballero, H.A. 2002. Estructura de la comunidad coralina de tres sitios de la costa norte de La Habana, Cuba. Tesis de Maestría, Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de La Habana. 60 pp.
 - CARICOMP. 1994. CARICOMP manual de métodos nivel 1: manual de métodos para el mapeo y monitoreo de parámetros físicos y biológicos en la zona costera del Caribe. DMC CARICOMP, Univ. West Indies, Kingston. 68 pp.
 - Carricart-Ganivet, J.P. 2007. Annual density banding in massive coral skeletons: result of growth strategies to inhabit reefs with high microborers' activity?. *Marine Biology* 153:1–5
 - Chávez Ortiz, E. 2006. Distribución e inventario de algunas especies bentónicas (hexacorales, octocorales, esponjas, y especies misceláneas) en arrecifes del Caribe mexicano. Instituto Politécnico Nacional. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. AS018 México D. F.
 - Chornesky, E.A. 1983. Induced development of sweeper tentacles on the reef coral *A. agaricites*: a response to direct competition. Division of

- Biological Sciences, The University of Texas, Austin, Texas 78712. *Biol. Bull* 165: 569-581.
- Clarke, K.R, Green, R.H. 1988. Statistical design and analysis for a 'biological effects' study. *Marine Ecology Prog Ser* 46, 213-226 pp.
 - Clarke, K.R. 1993. Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian Journal of Ecology* 18, 117-143 pp.
 - Clarke, K.R., & Warwick, R.M., 1994. Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation. Chapter 5. Plymouth: Plymouth Marine Laboratory, pp 144.
 - Creel, L. 2003. Ripple Effects: Population and Coastal Regions. Washington, D.C.: Population Reference Bureau)
 - Croux, C. & Haesbroeck, G. 2000. Principal component analysis based on robust estimators of the covariance or correlation matrix: influence functions and efficiencies. *Biometrika* 87(3): 603-618
 - Cruz-Piñon, G., Carricart-Ganivet, J. P., Espinoza-Avalos, J. 2003. Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: biological and environmental controls. *Marine Biology* 143: 491–500 DOI 10.1007/s00227-003-1127-3.
 - Cruz-Piñon, G., Carricart-Ganivet, J.P., Espinoza-Avalos, J. 2003. Monthly skeletal extension rates of the hermatypic corals *Montastraea annularis* and *Montastraea faveolata*: biological and environmental controls.
 - Cruz-Toledo, J.C. 2011. Influencia de las actividades antropogénicas en ecosistemas costeros carbonatados de Quintana Roo, México. Tesis de Maestría. UAM-Iztapala, México, D.F.
 - Curran, S., Kumar, A., Lutz, W., Williams, M. 2002. Interactions Between Coastal and Marine Ecosystems and Human Population Systems: Perspectives on How Consumption Mediates This Interaction. *Ambio: A Journal of the Human Environment* 31, no. 4, pp. 264–68.
 - Debrot, A. O., Kuenen, M. M. C. E., Dekker, K.,. 1998. Recent declines in the coral fauna of the Spaanse Water, Curacao, Netherlands Antilles. *Bulletin of Marine Science* 63: 571–580.
 - Done T.J. 1999. Coral community adaptability to environmental change at the scales of regions, reefs and reefs zones. *American Zoologist* 39:66-79
 - Done, T.J. 1992. Effects of tropical cyclone waves on ecological and geomorphological structures on the Great Barrier Reef. *Continental Shelf Research*, 12:859–872
 - DRNA-NOAA. 2002. El Arrecife de Coral. Programa de Manejo de la Zona Costanera de Puerto Rico.
 - Dunn D, Halpin P. 2009. Rugosity-based regional modeling of hard-bottom habitat. *Marine Ecology Progress Series* 377:1-11
 - Dunn D.C. & Halpin, N. P. 2009. Rugosity-based regional modeling of hard-bottom hábitat. Marine Geospatial Ecology Lab, Nicholas School of the Environment, Box 90328, Duke University, Levine Science Research Center, Durham, North Carolina 27708, USA
 - Dunteman, G.H., 1989. Principal Components Analysis. (En línea). Febrero, 2012. Disponible.

http://books.google.com.mx/books/about/Principal_Components_Analysis.html?id=Pzwt-CMMt4UC&redir_esc=y

- Dustan, P. 1975. Growth and form in the reef-building coral *Montastrea annularis*. *Marine Biology* 33: 101-107.
- Dustan, P. and Halas, J.C. 1987. Changes in the reef-coral community of Carysfort Reef, Key Largo, Florida: 1974 to 1982. *Coral Reefs* 6: 91-106.
- Elizalde-Rendón, E. M., Horta-Puga, G., González-Díaz, P., Carricart-Ganivet, J. P. 2010. Growth characteristics of the reef-building coral *Porites astreoides* under different environmental conditions in the Western Atlantic. *Coral Reefs* 29:607–614
- Ferre-D'amare, A. R. 1985. Coral reefs of the Mexican Atlantic: a review. Proc. 5th Int. Coral Reef Congr. Tahiti. 6:349-354
- Foley, J.E., S. H., Sokolow, E. Girvetz, C.W. F. Foley, P. (2005). Spatial epidemiology of Caribbean Bellow band syndrome in *Montastrea* spp. Coral in the Eastern Yucatan, Mexico. *Hydrobiología* 548:33-40.
- Friedlander, A.M. & Parrish, J.D. 1998. Habitat characteristics affecting fish assemblages on a Hawaiian coral reef. *Experimental Marine Biology and Ecology* 224:1–30
- García-Salgado, M.A., Nava-Martínez, G.G., Vasquez, M., Jacobs, N.D., Majil, I., Molina-Ramírez, A., Yañez-Rivera, B., Cubas, A., Dominguez-Calderon, J.J., Hadaad, W., Maldonado, M.A., Torres, O. 2008. Declining Trend on the Mesoamerican Reef System Marine Protected Areas. Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008 Session number 18
- Gardner, T.A. Côté, I.M., Gill, J.A. Grant, A. Watkinson, A.R. 2003. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science* 301:958-960
- Garza, P.J.R., Mata, L.M., García, G. S., Schirp, G. E.A. Reporte de Evaluación de Estado de Condición Arrecifal, Akumal, Quintara Roo, 2010. PIESACOM.
- Garza-Pérez JR 1999 Análisis comparativo de cuatro comunidades coralinas arrecifales del Caribe Mexicano, Tesis de Maestría, CINVESTAV-IPN, México. 64 pp.
- Garza-Pérez, J.R., Lehmann A., Arias González, J.E. 2004. Spatial prediction of coral reef habitats: integrating ecology with spatial modeling and remote sensing. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 269: 141–152.
- GESAMP (Grupo Mixto de Expertos OMI/FAO/UNESCO-COI/OMM/OMS/OIEA/Naciones Unidas/ PNUMA sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino). 1999. La Contribución de la Ciencia al Manejo Costero Integrado. Inf.Estud.GESAMP, (61): 65 p.
- Gladfelter, E.H., Monahan, R.K., Gladfelter, W.B. 1978. Growth rates of five reef-building corals in the northeastern Caribbean. *Bulletin of Marine Science* 28: 728-734.
- Glynn, P.W. 1973. Aspects of the ecology of coral reefs in the western Atlantic region. *Biology and geology of coral reefs* Volume 2: Biology 1, 271-324pp.

- González, P., de la Guardia, E., González-Sansón, G. 2003. Efectos de efluentes terrestres sobre las comunidades bentónicas de arrecifes coralinos de Ciudad de La Habana, Cuba. *Rev. Investigaciones Marinas* 24(3): 193-204.
- González, S. 2000. Caracterización de tres comunidades de corales del litoral norte de La Habana y Ciudad de La Habana. Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de La Habana, Trabajo de Diploma, 41pp
- González-Díaz, S., González-Sansón, P., Piloto-Cubero, G., Cabrales, Y., Álvarez-Fernández, S. 2008. Estructura de las poblaciones de *Acropora palmata*, *Porites astreoides* Y *Agaricia agaricites* forma masiva (cnidaria; scleractinia) en el arrecife de playa Baracoa, Cuba. Centro de Investigaciones Marinas, Universidad de La Habana, Calle 16 No. 114, Playa, CP 11300, Ciudad Habana, Cuba.
- Goreau, F. T. 1963. Calcium carbonate deposition by coralline algae and corals in relation to their roles as reef-builders. *Annals of the New York Academy of Sciences. Comparative Biology of Calcified Tissue.* 109: 127-167.
- Gratwicke B. & Speight M.R. 2005. The relationship between fish species richness, abundance and habitat complexity in a range of shallow tropical marine habitats. *Fish Biology* 66:650 – 667
- Guardia, E., González, P., Trelles, J. 2001. Macrobentos del arrecife coralino adyacente al río Almendares, Cuba. *Rev. Investigaciones Marinas* 22(3): 167-178.
- Hernández, M.A. 2005. Transformación de los sistemas naturales por actividades antropogénicas. INEGI
- Hill, J. & Wilkinson, C. 2004. *Methods For Ecological Monitoring Of Coral Reefs : A Resource For Managers.* Version 1. Australian Institute of Marine Science (AIMS), Townsville, Australia. 117 p.
- Hoegh-Guldberg, O. 2011. The Impact of Climate Change on Coral Reef Ecosystems. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition.* Springer Science Business, p.p: 391-403
- Hoegh-Guldberg, O. 1999. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine Freshwater Research* 50:839–866
- Hollock, P., Müller, K. F.E., Halas, J.C. 1993. Coral reef decline. *Nat. Geogr. Res. Explor.*, 9 (3): 358-378.
- Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D. R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., Grosberg, R., Hoegh-Guldberg, O., Jackson, J. B. C., Kleypas, J., Lough, J. M., Marshall, P., Nyström, M., Palumbi, S. R., Pandolfi, J. M., Rosen, B., Roughgarden, J. 2003. Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs. *Science* 301:929-933.
- Hughes, T.P. & Conell, J.H. 1999. Multiple stressors on coral reefs: A long-term perspective. *Limnology and Oceanography* 44 (3, part 2): 932-940.
- Humann, P. 1993. Reef Coral Identification, Florida, Caribbean, Bahamas. New World Publications, Inc., Jacksonville, FL. 239 pp.

- INEGI. 2012. "Cuentame". En línea. Febrero, 2012. Disponible <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/qroo/territorio/clima.aspx?tema=me>
- Jackson, J.B.C. 1994. Community unity. *Science* 264: 1412- 1413.
- Jaramillo-González, J. & Acosta, A. 2009. Comparación temporal en la estructura de una comunidad coralina en primeros estados de sucesión, Isla de San Andrés, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 38 (2):29-53
- Jokiel, P. L., E. K. Brown, Friedlander, A., Rodgers, K., Smith, W. R. 2004. Hawaii coral reef assessment and monitoring program: Spatial patterns and temporal dynamics in reef coral communities. *Pacific Scientific*, 58: 159-174.
- Joliffe, I.T. & Morgan, B.J. 1992. Principal component analysis and exploratory factor analysis. *Statistical Methods in Medical Research*.
- Jordán- Dalghren, E. 1993. El ecosistema arrecifal coralino del atlántico mexicano. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*. 157-175 pp.
- Jordan, D. E. 1989. Gorgonian Community structure and reef zonation patterns on Yucatan coral reefs. *Bulletin of Marine Science*. 45(3):678-696.
- Kleypas, J.A., Buddemeier, R.W., Archer, D., Gattuso, J.P., Langdon, C., and Opdyke, B.N. 1999. Geochemical consequences of increased atmospheric carbon dioxide on coral reefs. *Science* 284: 118-120.
- Knowlton, N. 2001. The future of coral reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (10): 5419-5425.
- Kramer, P.A. & Kramer, P.R. 2002. Ecoregional conservation planning for the Mesoamerican Caribbean Reef. WWF, Washington, D.C.
- Kuffner, I., Brock, J., Grober-Dunsmore, R., Bonito, V., Hickey, T., Wright, C. 2007. Relationships Between Reef Fish Communities and Remotely Sensed Rugosity Measurements in Biscayne National Park, Florida, USA. *Environmental Biology of Fishes* 78:71-82
- Lang, J. C., 2003. Status of Coral Reef in the Western Atlantic: Results of Initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program. *Atoll research Bulletin* 496.
- Langdon, C., Takahashi, T., Sweeney, C., Chipman, D., Goddard, J., Marubini, F., Aceves, H., Barnett, H. and Atkinson, M.J. 2000. Effect of calcium carbonate saturation state on the calcification rate of an experimental coral reef. *Global Biogeochemical Cycles* 14: 639-654.
- Langmead, O. y C. Sheppard. 2004. Coral reef community dynamics and disturbance: a simulation model. *Ecological Modelling*, 175: 271-290.
- Lara, L.J.R., Arenas, F.V., Bazán, G. C., Díaz, C. V., Escobar, B. E., García A. M. de la C., Gaxiola, C. G., Robles, J. G., Sosa, Á. R., Soto, G.L.A., Tapia, G., M., Valdez, H. J. E. 2008. Los ecosistemas marinos, en Capital natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, pp. 135-159

- Legendre, P. & Legendre, L. 1998. Numerical Ecology. Chapter 11: Canonical analysis, 575:633. 2nd English edition. Elsevier Science. 853pp
- Leps, J. & Petr, S. 2003. Multivariate Analysis of Ecological Data Using Canoco. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press.
- Liddell, W.D. and Ohlhorst, S.L. 1992. Ten years of disturbance and change on a Jamaican fringing reef. Proceedings of the Seventh International Coral Reef Symposium 1: 144-150.
- Luckhurst B.E. and Luckhurst K. 1978. Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. *Marine Biology* 49:317–323
- Magno, M., & Villano, C. 2006. Quantifying the Complexity of Phillipine Coastline fro Estimating Entrainment Potential. 10th International Coral Reef Symposium:1471-1476
- Martínez, S. & Acosta, A. 2005. Cambio temporal en la estructura de la comunidad coralina del área de Santa María-Parque Nacional Natural Tayrona (Caribe Colombiano). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 34:161-191
- Mata-Lara, M. 2013. Evaluación de estrategias de manejo arrecifal en Akumal, Q.Roo: Disturbios antropogénicos y enfermedades coralinas. Tesis de Licenciatura, LMSZC, UMDI-Sisal, F. Ciencias, UNAM, 125 pag.
- McCormick M.I. 1994. Comparison of field methods for measuring surface topography and their associations with a tropical reef fish assemblage. *Marine Ecology Progress* 112:87–96
- McField, M. & Kramer, P.R. 2007. Healthy Reefs for healthy People: A guide to indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region. Pp 208.
- McNeil, B.I., Matear, R.J., Barnes, D.J. 2004. Coral reef calcification and climate change: The effect of ocean warming. *Geophysical Research Letters* 31
- Medellín, R.A., Abreu, G. A., Arizmendi, M.C., Mellink, E., Ruelas, E. Santana, E. C., Urbán, J. 2009. Conservación de especies migratorias y poblaciones transfronterizas, en Capital natural de México, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. Conabio, México, pp. 459-515.
- Membrillo- Venegas, N. 1999. Descripción de los paisajes arrecifales en la laguna del arrecife Alacranes, Yucatán México. Tesis de Maestría, CINVESTAV, I.P.N. Unidad Mérida. 100 pgs.
- Mora, C. 2008. A clear human footprints in the coral reefs of the Caribbean. *Proceeding of the Royal Society Biology* 275:767-773.
- Morales, J. G. & Pérez J.L. 2006. Crecimiento poblacional e instrumentos para la regulación ambiental de los asentamientos humanos en los municipios costeros de México. Gaceta Ecológica, núm. 079. Instituto Nacional de Ecología. Distrito Federal, México. Pp. 53-57
- Mumby J. P. & Steneck, S. S. 2011. The Resilience of Coral Reefs and Its Implications for Reef Management. *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*, Springer Science Business, 509-519 pp.

- Mumby, P.J. 2006. The Impact Of Exploiting Grazers (Scaridae) On The Dynamics Of Caribbean Coral Reefs. *Ecological Applications* 16:747-769
- Muñoz-Chagín, R.F. & De la Cruz-Agüero, G. 1993. Corales del Arrecife de Akumal, Quintana Roo. Pp 761-771. In: Biodiversidad Marina y Costera de México. S.I. Salazar- Vallejo y N. E. González (eds) Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 865pp.
- Nagelkerken, I., Vermonden K., Moraes, O.C.C., Debrot, A.O., Nagelkerken, W.P. 2005. Changes in coral reef communities and an associated reef fish species, *Cephalopholis cruentata* (Lacépède), after 30 years on Curaçao (Netherlands Antilles). Department of Animal Ecology and Ecophysiology, Institute for Water and Wetland Research, Radboud University.
- National Research Council. 1990. Decline of the sea turtles: Causes and prevention. National Research Council. The National Academies Press, Washington, D.C.
- Nuñez-Lara, E. 2003. Análisis espacial de las comunidades de peces arrecifales y su relación con variables ambientales: Caribe mexicano y banco de Campeche. Tesis de doctorado CINVESTAV-IPN Unidad Mérida
- Núñez-Lara, E., & Arias-González, J.E. 1998. The relationship between reef fish community structure and environmental variables in the southern Mexican Caribbean. *Journal of Fisheries Biology* 53(A): 209-221.
- Núñez-Lara, E., Arias-González, J. E., Legendre, P. 2005. Spatial patterns of Yucatan reef fish communities: Testing models using a multi-scale survey design. *J. Experimental Marine Biology and Ecology* 324: 157–169.
- Pittman S.J., Christensen J.D., Caldow C., Menza C., Monaco M.E. 2007. Predictive mapping of fish species richness across shallow-water seascapes in the Caribbean. *Ecological Modelling* 204:9 – 21
- Porter, J.W. & Meier, O.W. 1992. Quantification of loss and change in Floridian reef coral populations. *American Zoologist* 32: 625-640.
- Purkis S., Graham N., Riegl B. 2008. Predictability of reef fish diversity and abundance using remote sensing data in Diego Garcia (Chagos Archipelago). *Coral Reefs* 27: 167 – 178
- Rao C. R. 1964. The use and interpretation of principal component analysis in applied research. *Sankhya A* 26, 329-58.
- Revees, L. 1994. Newly discovered: Yellow band disease Stripes Keys Reefs. *Underwater USA* 11 (8):16.
- Ritchie, K.B. & Smith, G.W. 1998. Type II White-band disease. *Revista de Biología Tropical* 46 (Supl. 5): 199-203.
- Roberts C.M. & Ormond R.F.G.1987. Habitat complexity and coral reef fish diversity and abundance on Red Sea fringing reefs. *Marine Ecology Progress Series* 41:1–8
- Rodríguez, D. 2009. Caracterización de la comunidad bentónica en el arrecife Mahahual, México. CICIMAR-IPN. Departamento de Tecnología y desarrollo.

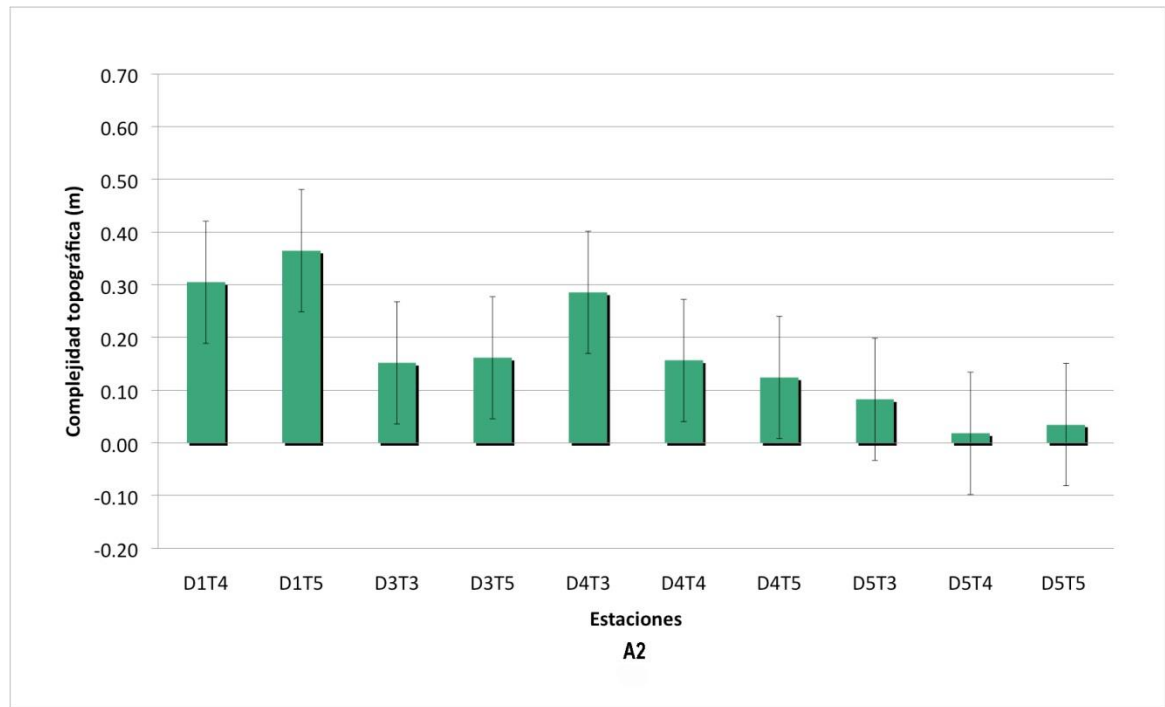
- Rooney J. 1993. Rugosity Measurements, Hawaii. http://cramp.wcc.hawaii.edu/LT_Monitoring_files/lt_Rugosity_measurement_s.htm
- Ruiz-Zárte M. A., Hernández-Landa, R. C., González-Salas, C., Nuñez-Lara, E., Arias-González, J. E. 2003. Condition of coral reef ecosystems in central-southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: Stony corals and algae), p. 318-337. In: J.C. Lang (Ed.) Status of coral reefs in the western Atlantic: results of initial surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment Program. Atoll Research Bulletin 496.
- Ruiz-Zárte, M.A., Hernández-Lara, R.C., González-Salas, C., Núñez-Lara, E. & Arias-González, E. A. 2003. Condition of coral reef ecosystems in Central-Southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: Story corals and algae). Laboratorio de Ecología de Ecosistemas de Arrecifes Coralinos, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN.
- SEMARNAT, 2010. Manual de Sistemas de Manejo Ambiental, SEMARNAT. México.
- SEMARNAT-SNIARN, 2010. Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, SNIA- Sistema Nacional de Indicadores Ambientales. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores11/conjuntob/00_conjunto/emas.html
- Shulman, M.J. & Robertson, D.R. 1996. Changes in the coral reefs of San Blas, Caribbean Panama: 1983 to 1990. *Coral Reefs* 15: 231-236.
- Smith, G.W. and Ritchie, K.B. 1995. Bacteriological Studies on White band disease of *Acropora cervicornis*. European Meeting of the International Society for Reef Studies, September 5-9, 1995.
- Somerfield, P. J., Jaap, W. C., Clarke, K. R., Callahan, M., Hackett, K., Porter, J., Lybolt, M., Tsokos, C. & Yanev, G. 2008. Changes in coral reef communities among the Florida Keys, 1996–2003. *Coral Reefs* 27:951–965
- Statsoft. 2003. STATISTICA (data analysis software system), ver. 6. Statsoft, Tulsa, OK. <http://www.statsoft.com>.
- Steneck, R. & Lang, R. 1999. “Akumal and Xcalak. AGRRA Field Report” . Consultado en: <http://www.agrra.org/reports/field-akumal.html>
- Van Woesik, R. & Done, T.J. 1997. Coral communities and reef growth in the southern Great Barrier Reef. *Coral Reefs* 16(2):103-115.
- Vermeij, M.J.A. 2006. Early life-history dynamics of Caribbean coral species on artificial substratum: the importance of competition, growth and variation in life-history strategy. *Coral Reefs* 25: 59–71
- Veron J. 1986. Corals of Australia and the Indo-Pacific. Angus & Robertson, North Ryde, NSW, Australia
- Veron, J. 2000. *Corals of the World*. AIMS, Australia, Vol.1. 469 pp.
- Warner, M. E., Fitt, W. K., Schmidt, G. W. 1996. The effects of elevated temperature on the photosynthetic efficiency of zooxanthellae in hospite from four different species of reef coral: a novel approach. 19 (3): p291-299.

- Wilkinson T., E. Wiken, J. Bezaury Creel, T. Hourigan, T. Agardy, H. Herrmann, L. Janishevski, C. Madden, L. Morgan y M. Padilla. 2009. *Ecorregiones marinas de América del Norte*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. 200 pp.
- Wilkinson, C. 2002. Status of coral reefs of the World: 2000. Australian Institute of Marine Science, Townsville.
- Wilkinson, C. 2004. Status of coral reefs of the World: 2004. Australian Institute of Marine Science, Townsville.
- Wilkinson, C.R., Buddemeier, R.W. 1994. Global Climate Change and Coral Reefs: Implications for People and Reefs. Report of the UNEP-IOC-ASPEI-IUCN Global Task Team on the implications of climate change on coral reefs. IUCN, Gland, Switzerland 124
- Wilson, S.K., Graham, N.A.J., Polunin, N.V.C. 2007. Appraisal of visual assessments of habitat complexity and benthic composition on coral reefs. *Marine Biology* 151:1069–1076
- Wold, S. 1987. Principal component analysis. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*.
- Zainul-Fuad, M.A. 2010. Coral Reef Rugosity and Coral Biodiversity. Thesis of Master Science in Geo-information Science and Earth Observation, ITG, Indonesia. 60 pp

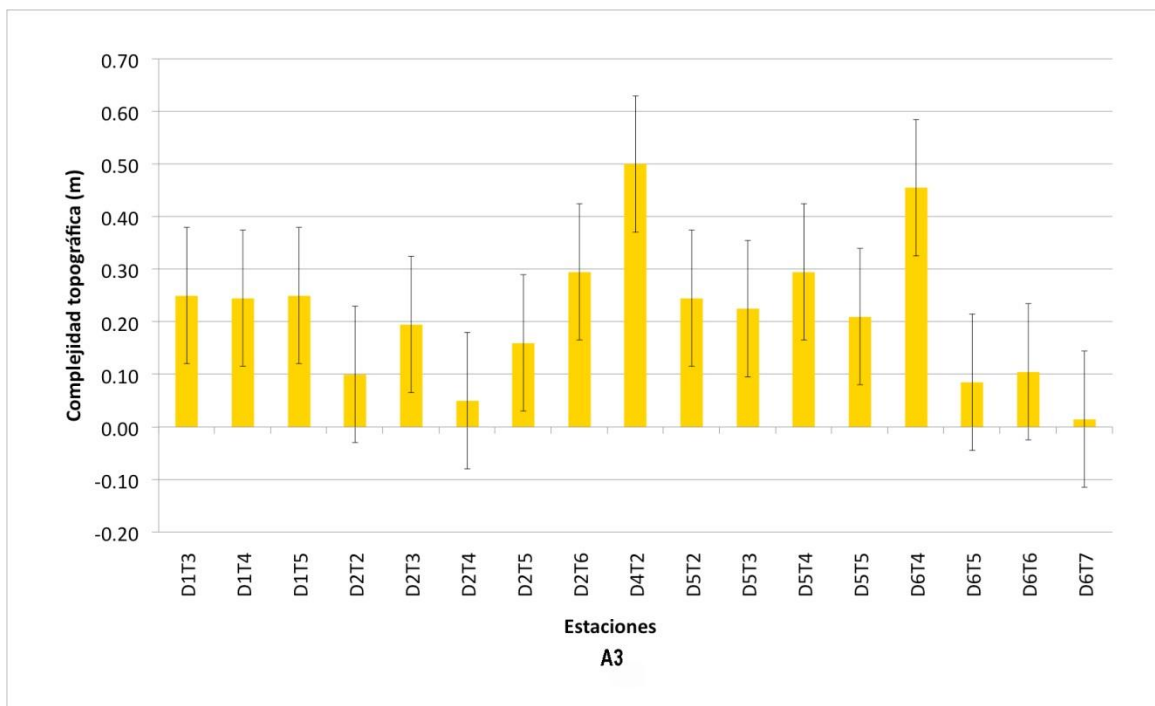
8. Anexos



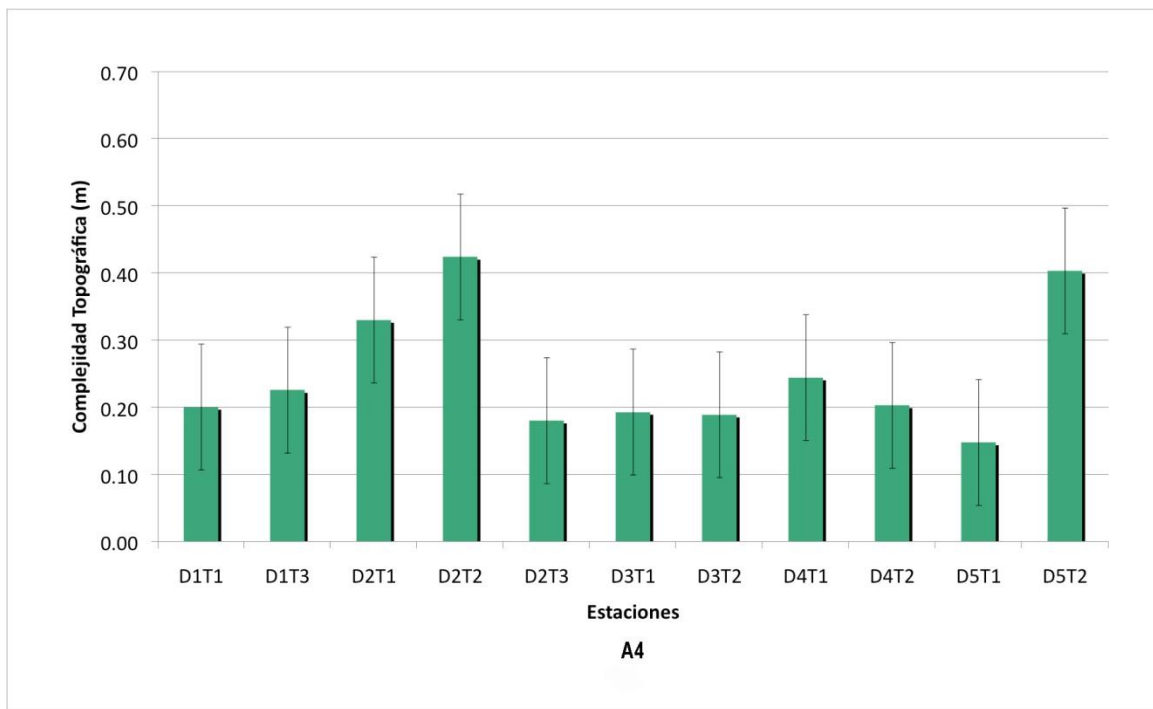
A1. Indicadores de salud de los arrecifes. Iniciativa *Arrecifes sanos, para gente sana*, 2008. (Tomado de McField & Kramer, 2007)



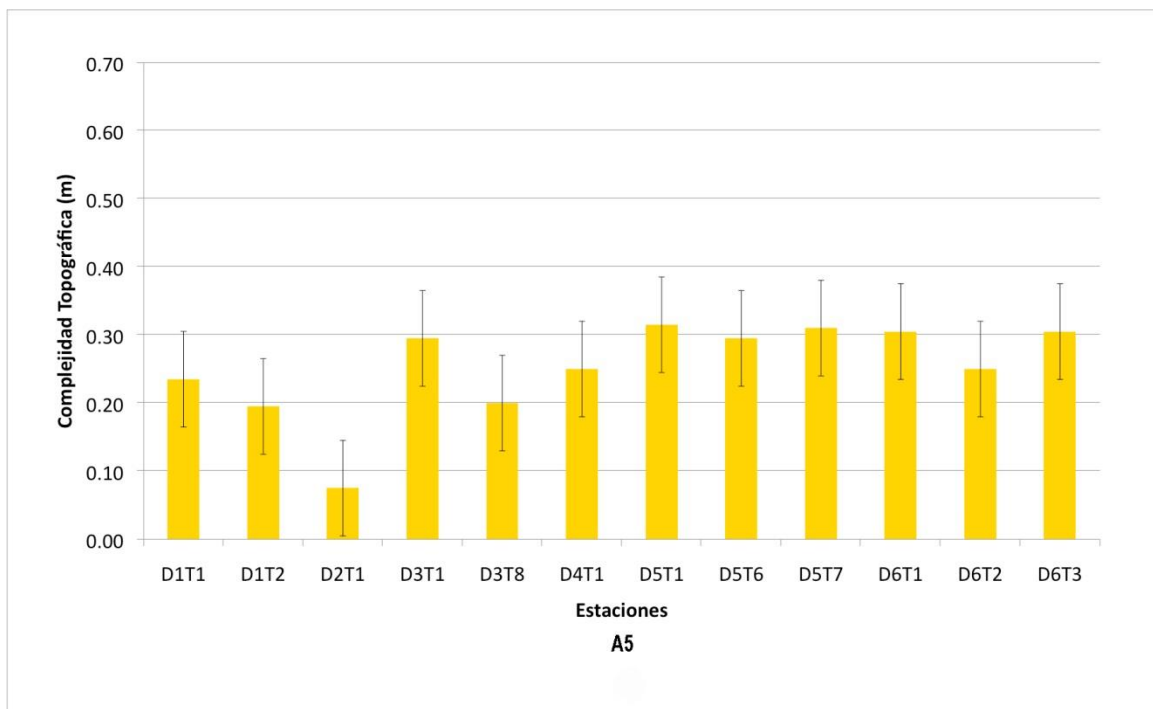
A2. Complejidad topográfica (CT) de 10 estaciones del Frente Arrecifal de Akumal. CT promedio= 0.17 ± 0.11 .



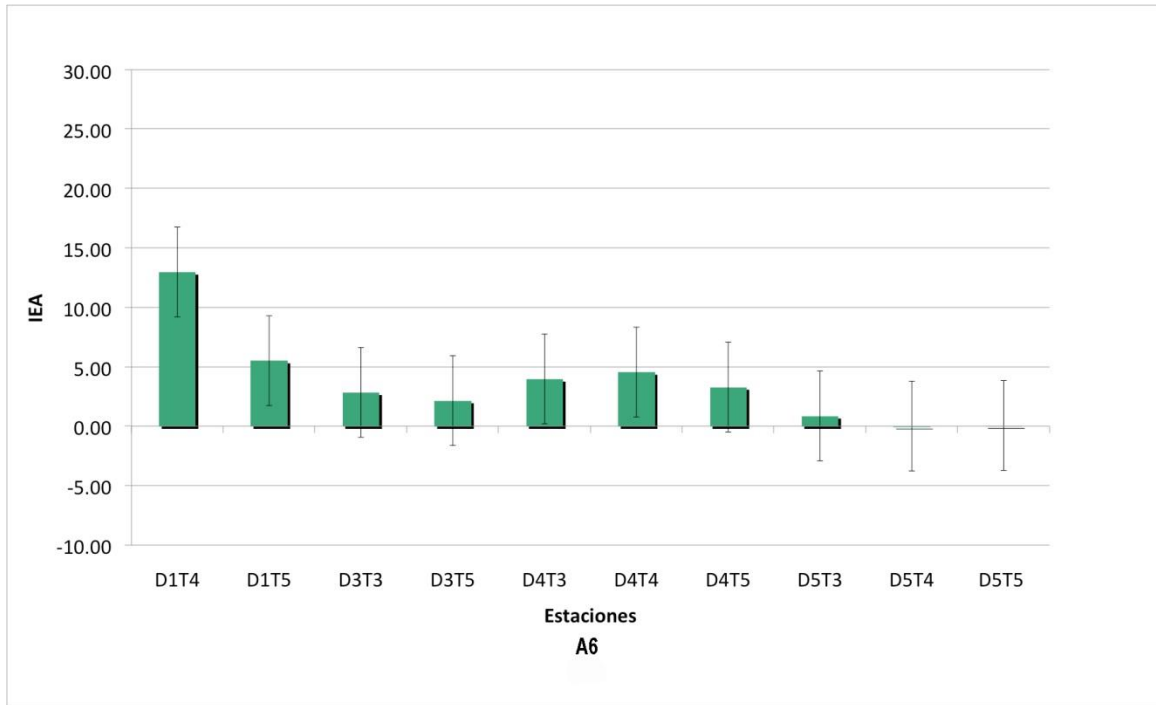
A3. Complejidad topográfica (CT) de 17 estaciones del Frente Arrecifal de Mahahual. CT promedio= 0.22 ± 0.12 .



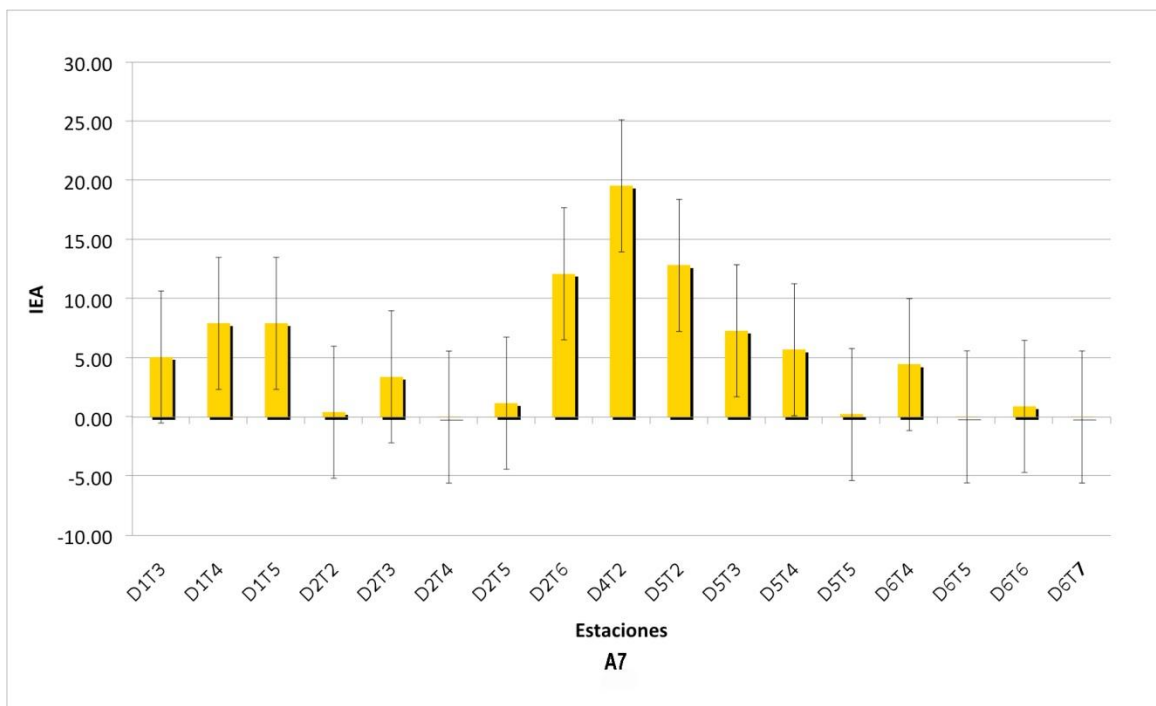
A4. Complejidad topográfica (CT) de 11 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Akumal. CT promedio = 0.25 ± 0.09 .



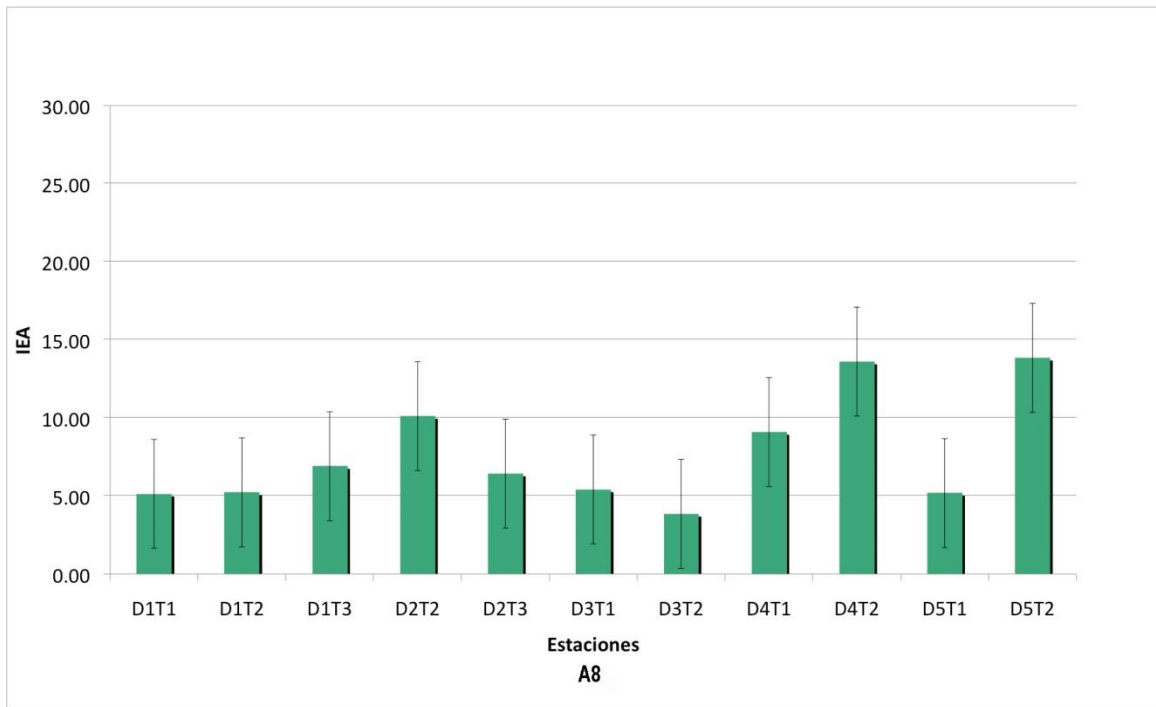
A5. Complejidad topográfica (CT) de 12 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Akumal. CT promedio = 0.25 ± 0.07 .



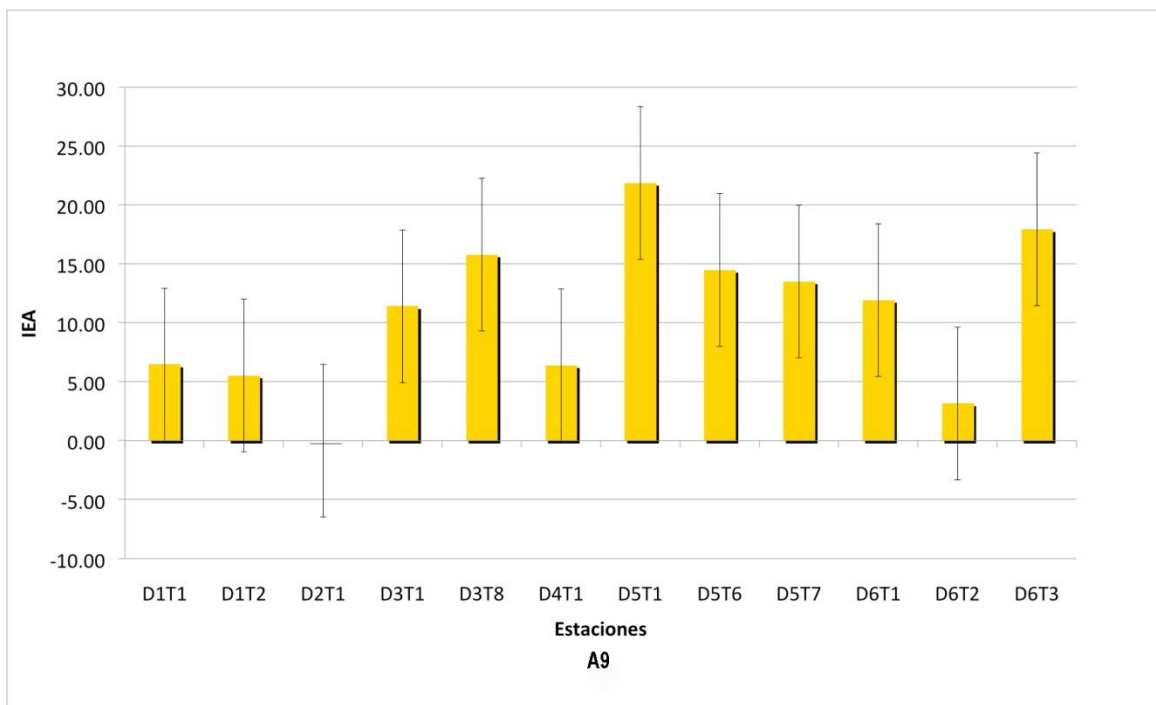
A6. Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 10 estaciones del Frente Arrecifal de Akumal. IEA promedio= 3.63 ± 3.77



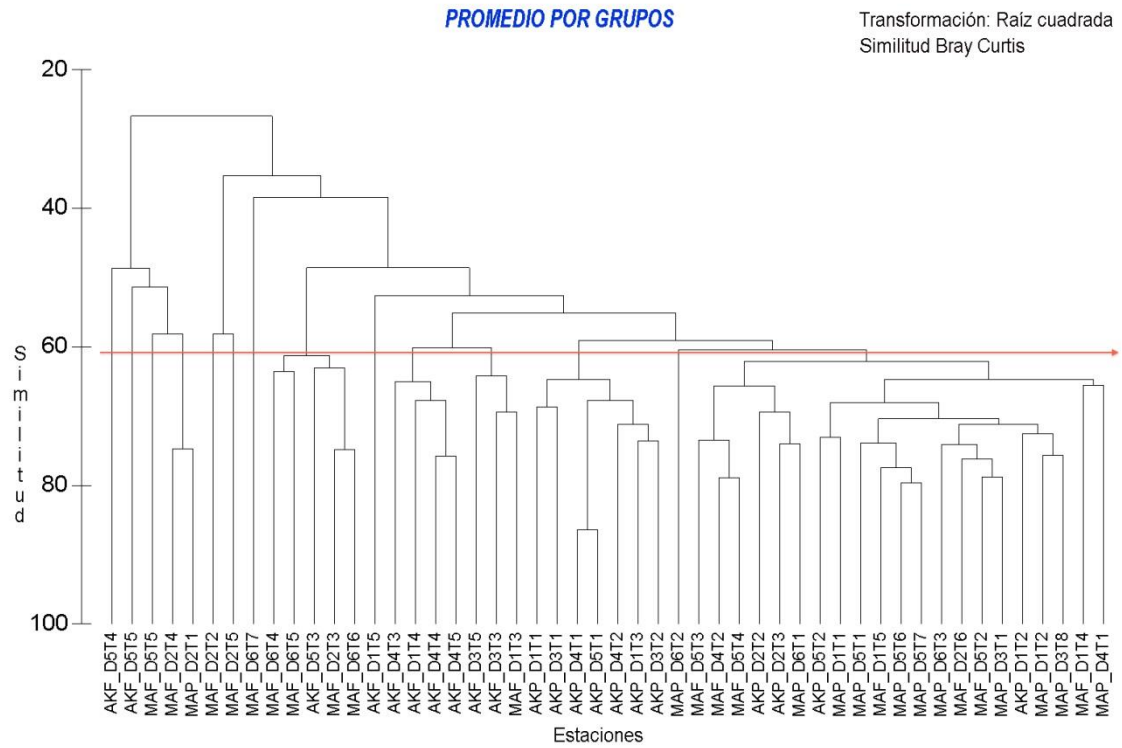
A7. Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 17 estaciones del Frente Arrecifal de Mahahual. IEA promedio= 5.24 ± 5.57



A8. Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 11 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Akumal. IEA promedio= 7.71 ± 3.48



A9. Índice de Estructura Arrecifal (IEA) de 12 estaciones de la Pendiente Arrecifal de Mahahual. IEA promedio= 10.71 ± 6.48 .



A10. Dendrograma obtenido del Análisis de Cluster. Se utilizaron todas las estaciones (frente y pendiente) del Arrecife de Akumal y Mahahual. Nótese el corte realizado considerando el 60% de similitud. Este análisis sugiere 12 agrupaciones de acuerdo a su similitud entre estaciones.