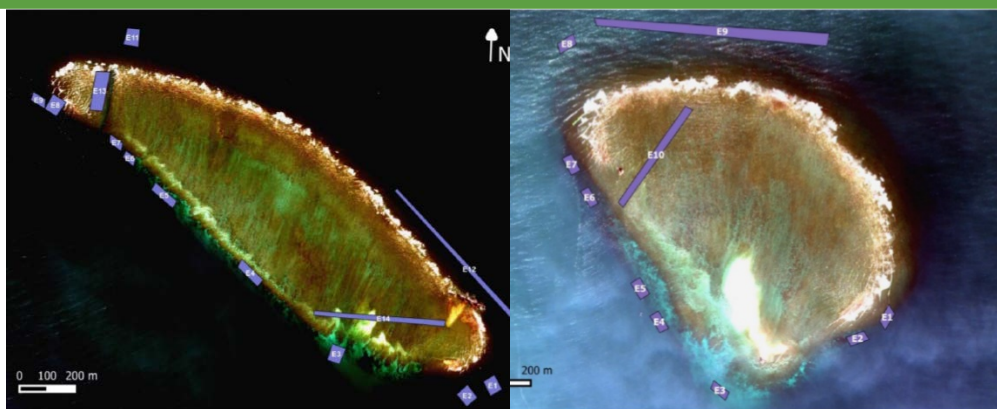


EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA CONDICIÓN DE ESPECIES CLAVE DE CORALES ESCLERACTINIOS EN ARRECIFES DEL GOLFO DE MÉXICO

Reporte Final del Proyecto



2015

Coordinación General de Adaptación al Cambio Climático



Coordinado por:

Coordinación General de Adaptación al
Cambio Climático

Elaborado por:

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología
Universidad Nacional Autónoma de México

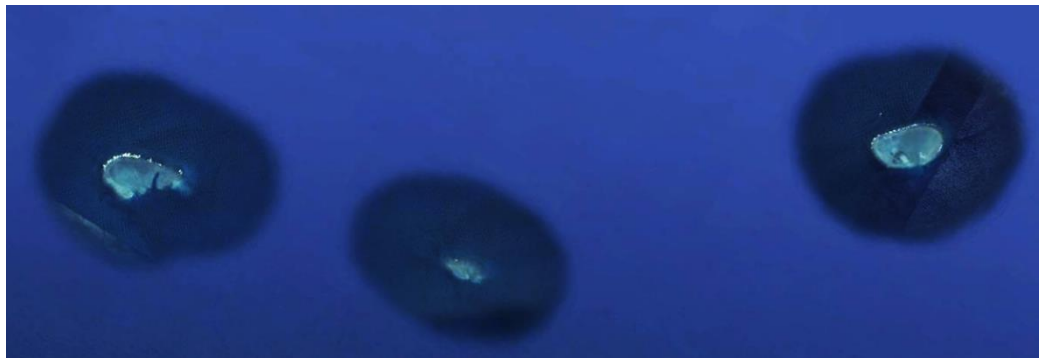
Responsable:

Dr. Eric Jordán Dahlgren

Boulevard Adolfo Ruiz Cortines 4209, 2° piso. Col. Jardines
en la Montaña, Del. Tlalpan C.P. 4210 Ciudad de México
Tel. +52 (55) 54246400.

www.inecc.gob.mx

EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA CONDICIÓN DE ESPECIES CLAVE DE CORALES ESCLERACTINIOS EN ARRECIFES DEL GOLFO DE MÉXICO



Diciembre
2015

Reporte Final del Proyecto

Presentado por: Dr. Adán Guillermo Jordán Garza, Dr. Eric Jordán Dahlgren y M. en C. Rosa Elisa Rodríguez Martínez en colaboración con Biól. Rosalinda Abeytia Sánchez y M. en C. Sergio Guendolain García.

Responsable: Dr. Eric Jordán Dahlgren

**Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
Universidad Nacional Autónoma de México.**

ÍNDICE GENERAL

LISTADO DE TABLAS	1
LISTADO DE FIGURAS	3
RESUMEN EJECUTIVO	11
INTRODUCCIÓN	14
Origen del Proyecto	15
Objetivos del Estudio	15
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS ARRECIFALES CORALINOS EN EL GOLFO DE MÉXICO	17
1.1 Distribución de los arrecifes	17
1.2 Áreas de protección	17
1.2.1 El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV)	18
1.2.2 El Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT)	19
1.2.3 El Sistema Arrecifal del Banco de Campeche (BC)	19
1.2.4 El Sistema Arrecifal de Los Tuxtlas (SAT)	20
1.3 Amenazas locales y cambio climático	20
1.4 Vulnerabilidad al cambio climático	21
CAPÍTULO 2. DISEÑO Y PROTOCOLOS DE MUESTREO	24
2.1 Área de estudios cuantitativos	24
2.2 Muestreo	24
2.2.1 Premuestreo	25
2.2.2 Técnica de muestreo y tamaño de muestra	25
2.3 Muestreos por arrecife	28
2.3.1 Muestreos en el arrecife Anegada de Adentro (SAV)	29
2.3.2 Muestreos en el arrecife Blanquilla (SAV)	29
2.3.3 Muestreos en el arrecife Tuxpan (SALT)	30
2.3.4 Muestreos en el arrecife Enmedio (SALT)	31
2.4 Análisis de los video-transectos	32

CAPÍTULO 3. ESTRUCTURA COMUNITARIA Y ZONACIÓN	33
3.1 Métodos	34
3.1.1 Estructura comunitaria	34
3.1.2 Poblaciones	34
3.2 Resultados	35
3.2.1 Abundancias relativas	
3.2.2 Zonación en el arrecife de Anegada de Adentro (SAV)	36
3.2.3 Zonación en el arrecife de La Blanquilla (SAV)	40
3.2.4 Zonación en el arrecife de Tuxpan (SALT)	43
3.2.5 Zonación en el arrecife de Enmedio (SALT)	46
3.2.6 Abundancia de especies clave por arrecife y zona	47
CAPÍTULO 4. CONDICIÓN DE LOS ENSAMBLES CORALINOS	52
4.1 Métodos	53
4.2 Resultados	54
4.2.1 Prevalencia de signos y frecuencia de otras afecciones en especies clave	56
4.2.1.1 Prevalencias a escala de arrecifes y de especies	57
4.2.1.2 Signos amarillos por arrecife y especie	59
4.2.1.3 Signos blancos por arrecife y especie	60
4.2.1.4 Manchas blanqueadas por arrecife y especie	62
4.2.1.5 Manchas oscuras por arrecife y especie	63
4.2.1.6 Puntos blancos múltiples por arrecife y especie	65
4.2.2 Otras afecciones	66
4.2.2.1 Frecuencia de tapetes de algas a escala de arrecifes y de especie	66
4.2.2.2 Tapetes de algas por arrecife y especie	67
4.2.2.3 Frecuencia de otros organismos a escala de arrecife y especie	69
4.2.2.4 Algas coralináceas en costra por arrecife y especie	72
4.2.2.5 Algas filamentosas por arrecife y especie	73
4.2.2.6 <i>Erythropodium caribaeorum</i> por arrecife y especie	75
4.2.2.7 Esponjas por arrecife y especie	76

CAPÍTULO 5. MODELADO DE RIESGO	78
5.1 Métodos	79
5.2 Resultados	86
5.2.1 Escenarios para <i>Orbicella faveolata</i>	86
5.2.2 Escenarios para <i>Orbicella annularis</i>	88
5.2.3 Escenarios para <i>Colpophyllia natans</i>	91
5.2.4 Escenarios para <i>Acropora palmata</i>	93
CAPÍTULO 6. SIG CON LOS ARRECIFES DEL GOLFO DE MÉXICO	95
6.1 Antecedentes	95
6.2 Métodos	96
6.2.1 Delineación de arrecifes emergentes mexicanos del Golfo de México	96
6.2.2 Delineación de polígonos de áreas protegidas	96
6.2.3 Mapas de variables ambientales	96
6.2.4 Mapas de zonas en los arrecifes muestreados	96
6.2.5 Mapa de densidad relativa de cuatro especies en los arrecifes muestreados	96
6.3 Productos generados	97
6.3.1 Forma de los arrecifes	97
6.3.2 Polígonos de áreas protegidas	99
6.3.3 Mapas de variables ambientales	99
6.3.4 Mapas de densidad de las especies más importantes	100
CAPÍTULO 7. RECOPIACIÓN DE LITERATURA CIENTÍFICA	105
7.1 Método	106
7.2 Resultados	106
7.3 El conocimiento de los arrecifes mexicanos en el Golfo de México	116

CONSIDERACIONES FINALES	117
REFERENCIAS CITADAS	119
ANEXOS	
Anexo 1. Códigos de Especies	130
Anexo 2. Signos y otras interacciones registradas	131
Anexo 3. Archivos digitales del SIG	
Anexo 4. Base de datos de la literatura científica y artículos en formato pdf	

LISTADO DE TABLAS

Tabla M-1. Estaciones y número de transectos que se muestrearon en cuatro arrecifes del Golfo de México en el verano de 2014.

Tabla R-1. Abundancia relativa de especies de coral escleractinio registradas en cuatro arrecifes del Golfo de México en el Verano de 2014. En negritas se muestran las especies que, en conjunto, contribuyen con más del 90% de la abundancia relativa de colonias por arrecife.

Tabla R-2. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Anegada de Adentro. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Tabla R-3. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Blanquilla. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Tabla R-4. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Tuxpan. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Tabla R-5. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Enmedio. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Tabla R-6. Número de colonias por especie de coral registradas en cinco zonas de cuatro arrecifes estudiados en el Golfo de México en el verano de 2014. Zonas arrecifales: Bar: Barlovento, Lag: laguna, Pta: Punta, Sot: sotavento. Úni: Único, Tran: Transectos, Den: Densidad. Los nombres de los códigos de las especies se presentan en el Anexo 1.

Tabla CC-1. Modelo logístico de prevalencia de signos entre arrecifes: glm (cbind(signos, N) ~ arrecife, binomial). Los coeficientes estimados corresponden al tamaño del efecto en momios, el primer contraste (valor de p) corresponde a la hipótesis nula del intercepto (en este caso Enmedio) significativamente distinto de 0 y los demás contrastes indican la significancia de la diferencia entre cada uno de ellos con el arrecife de Enmedio, no entre ellos.

Tabla CC-2. Modelo logístico de proporción de tapetes de algas entre arrecifes: glm (cbind(TA, N) ~ arrecife, binomial). Los coeficientes estimados corresponden al tamaño del efecto en momios, el primer contraste (valor de p) corresponde a la hipótesis nula del intercepto (en este caso Enmedio) significativamente distinto de 0 y los demás contrastes indican la significancia de la diferencia entre cada uno de ellos con el arrecife de Enmedio, no entre ellos.

Tabla CC-3: Modelo logístico de proporción entre arrecifes: glm (cbind(otros, N) ~ arrecife, binomial). Los coeficientes estimados corresponden al tamaño del efecto en momios, el primer contraste (valor de p) corresponde a la hipótesis nula del intercepto (en este caso Enmedio) significativamente distinto de 0 y los demás contrastes indican la significancia de la diferencia entre cada uno de ellos con el arrecife de Enmedio, no entre ellos.

Tabla MR-1. Tasa de crecimiento de cinco especies de coral escleractinio utilizadas en las simulaciones del efecto de signos. Se reporta la media y la desviación estándar.

Tabla MR-2- Tasas de avance promedio, mínima y máxima, de los signos de enfermedad y de los tapetes algales que afectan a corales escleractinios en el Golfo de México y Caribe. Se reporta la media y la desviación estándar.

Tabla MR-3. Área de las zonas arrecifales estudiadas en cuatro arrecifes del Golfo de México y número de transectos realizados por zona.

Tabla MR-4. Número de colonias de coral estimado y estandarizado por categoría de tamaño para cuatro especies de coral en cuatro arrecifes del Golfo de México en 2014. AA: Anegada de Adentro, BI: Blanquilla, Tx: Tuxpan, En: Enmedio, xs: extra-chica, s: pequeña, m: mediana, l: grande, xl: extra-grande, C1: Colonias estimadas, C2: Colonias estandarizadas.

Tabla MR-5. Mortalidad parcial (MP: media \pm SD), porcentaje de colonias con mortalidad (CMP) y afecciones con mayor prevalencia (Afe) registradas en cuatro especies de coral en cuatro arrecifes del Golfo de México en 2014. AA: Anegada de Adentro, BI: Blanquilla, Tx: Tuxpan, En: Enmedio, SA: Signos amarillos, SB: Signos blancos, SO: Signos oscuros, PBM: Puntos blanqueados múltiples, TAS: Tapetes de algas y sedimento.

Tabla MR-6. Resultado de las simulaciones del efecto de signos de afecciones en cuatro especies de constructores arrecifales clave en los cuatro arrecifes muestreados. DE: Desviación estándar, SA: Signos amarillos, SB: Signos blancos, SO: Signos oscuros, MPB: Puntos blancos múltiples, TA: Tapetes de algas.

Tabla L-1. Número de especies reportadas en la literatura para los grupos béticos más importantes en el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT), en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), en los Arrecifes de los Tuxtles (AT) y en los Arrecifes del Banco de Campeche (ABC). NA: no hay información. Los corales duros incluyen escleractinios e hidrocorales.

Tabla L-2. Corales escleractinios e hidrocorales pétreos reportados para los arrecifes mexicanos del Golfo de México en diferentes publicaciones. SALT: Sistema Arrecifal

Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, AT: Arrecifes de los Tuxtlas (AT), ASC: Arrecifes del Banco de Campeche.

Tabla L-3. Gorgonáceos reportados para los arrecifes mexicanos del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, BC: Arrecifes del Banco de Campeche.

Tabla L-4 – Esponjas reportadas para los arrecifes mexicanos del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano.

Tabla L-5 – Macroalgas registradas en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y en el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT). Algunas especies se re-clasificaron en familias de acuerdo con las claves utilizadas en algaeBASE (www.algaebase.org).

LISTADO DE FIGURAS

Figura ZE-1. Mapa que muestra la ubicación de los cuatro sistemas arrecifales en el Golfo de México. La forma de los arrecifes se muestra en negro.

Figura M-1. Simulación (100 iteraciones) de la exactitud y la precisión en la estimación de la prevalencia de signos de enfermedad con transectos de diferentes dimensiones comúnmente usados en estudios de comunidades coralinas. Simulación realizada con un programa diseñado expofeso en R (R Core Team 2014).

Figura M-2. Ejemplo del método de muestreo cuantitativo utilizado. A) Se muestran dos estaciones de muestreo colocadas aleatoriamente en el sotavento del Arrecife Tuxpan. En cada estación se colocó un transecto guía (color amarillo), de 10 metros de largo en posición perpendicular al borde del arrecife, que sirvió para colocar al azar transectos perpendiculares de 50 metros de largo. B) Un buzo con una cámara colocada sobre un monopie, que permitió controlar la distancia al substrato, registraba en video el bentos en cada transecto de 50 x 1 m. C) Ejemplo de una colonia de *Orbicella annularis* con signos oscuros tomada del video. Las coordenadas geográficas de cada transecto guía fueron registradas por medio de un aparato de posicionamiento global (GPSmap76 Garmin).

Figura M-3. Imagen de satélite del arrecife Anegada de Adentro en Veracruz en la que se señalan las 14 estaciones de muestreo. El área señalada en azul corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

Figura M-4. Imagen de satélite del arrecife Blanquilla en Veracruz en la que se señalan las 10 estaciones de muestreo. El área señalada en azul corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

Figura M-5. Imagen de satélite del arrecife Tuxpan en la que se señalan las 12 estaciones de muestreo. El área señalada en verde corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

Figura M-6. Imagen de satélite del arrecife Enmedio en la que se señalan las 9 estaciones de muestreo. El área señalada en verde corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

Figura R-1. Densidad relativa (proporción) de corales escleractinios juntando los datos de cuatro arrecifes estudiados en el Golfo de México en el Verano de 2014. Los nombres de los códigos de las especies se presentan en el Anexo 1.

Figura R-2. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Anegada de Adentro.

Figura R-3. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Anegada de Adentro.

Figura R-4. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Blanquilla.

Figura R-5. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Blanquilla.

Figura R-6. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

Figura R-7. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Tuxpan.

Figura R-8. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Enmedio.

Figura R-9. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Enmedio.

Figura R-10. Número promedio de colonias de coral de los constructores arrecifales más importantes por transecto en cinco zonas arrecifales de cuatro arrecifes registradas en el verano de 2014.

Figura CC-1 Prevalencia promedio de SIGNOS de enfermedad en las especies registradas con más de 50 colonias en los arrecifes Anegada (An), Blanquilla (Bl), Enmedio (Em) y Tuxpan (Tx) en el verano de 2014. BN: banda negra, MB: manchas blanqueadas, MO: manchas oscuras, LNC: lesión no colonizada, MPB: múltiples puntos

blancos, PAL: pálida, SB: signos blancos, SA: signos amarillos (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-2. SIGNOS por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial bayesiano. Las especies incluidas (Cnat, Mcav, Oann, Ofav, Ofra, Pstr y Ssid; ver código de especies en Anexo 1) tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas por signos blancos, amarillos, manchas oscuras, manchas blanqueadas y puntos blancos múltiples. Las letras sobre las barras indican el resultado de comparaciones múltiples *post hoc*, donde letras iguales indican que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$) entre arrecifes.

Figura CC-3. SIGNOS por ESPECIE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) en los cuatro arrecifes, estimados mediante el método binomial exacto (ver Anexo 1 para el código de especies). Las especies seleccionadas tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas por signos blancos, amarillos, manchas oscuras, manchas blanqueadas y puntos blancos múltiples.

Figura CC-4. SIGNOS AMARILLOS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-5. SIGNOS BLANCOS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de especies clave por arrecife, estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-6. MANCHAS BLANQUEADAS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-7. MANCHAS OSCURAS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-8. PUNTOS BLANCOS MÚLTIPLES en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-9. TAPETES de ALGAS por ARRECIFE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de estimados mediante el método binomial bayesiano. Las especies incluidas: Apal, Cnat, Mcav, Oann, Ofav, Ofra, Past, Pcli, Pstr, Sint y Ssid tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas. Las letras sobre las barras indican el resultado de las comparaciones múltiples, donde letras iguales indican que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$) entre arrecifes.

Figura CC-10. TAPETES de ALGAS por ESPECIE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) en los cuatro arrecifes, estimados mediante el método binomial exacto (ver Anexo 1 para el código de especies). Las especies seleccionadas tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas.

Figura CC-11. TAPETES DE ALGAS en ESPECIES clave por ARRECIFE (TA): Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-12. PRESENCIA de OTROS ORGANISMOS por ARRECIFE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de estimados mediante el método binomial bayesiano. Las especies incluidas (Cnat, Mcav, Oann, Ofav, Past, Pcli, Pstr y Ssid; ver código de especies Tabla Z-1), tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas con algas coralináceas en costra, algas filamentosas, esponjas y *Erithropodium caribaeorum*. Las letras sobre las barras indican el resultado de las comparaciones múltiples, donde letras iguales indican que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$) entre arrecifes.

Figura CC-13. PRESENCIA de OTROS ORGANISMOS por ESPECIE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) en los cuatro arrecifes, estimados mediante el método binomial exacto (ver Tabla Z-1 para el código de especies). Las especies seleccionadas tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas con algas coralináceas en costra, algas filamentosas, esponjas y *Erithropodium caribaeorum* (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-14. ALGAS CORALINÁCEAS EN COSTRA: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de colonias de coral afectadas estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora*

cervicornis a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-15. ALGAS FILAMENTOSAS: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-16. *Erythropodium caribaeorum*: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura CC-17. ESPONJAS: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

Figura MR-1. Incremento en la superficie de una colonia de coral.

Figura MR-2. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Orbicella faveolata* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas de color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas, tasas de avance mínimas y tasas de avance máximas de enfermedades sin considerar el efecto de los tapetes de algas.

Figura MR-3. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Orbicella annularis* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas sin considerar el efecto de tapetes de algas y tasas de avance mínimas.

Figura MR-4. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Colpophyllia natans* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas color negro muestran la pérdida

de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas sin considerar el efecto de tapetes de algas y tasas de avance mínimas.

Figura MR-5. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Acropora palmata* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas sin considerar el efecto de tapetes de algas y tasas de avance mínimas.

Figura SIG-1. Ejemplo que muestra la vista general de las formas y nombres de los arrecifes mexicanos emergentes del Golfo de México.

Figura SIG-2. Acercamiento de la figura SIG-1, detallando las formas de los arrecifes de Enmedio y Tuxpan en el sistema arrecifal Lobos-Tuxpan.

Figura SIG-3. Tres arrecifes del sistema arrecifal Lobos-Tuxpan (Tanguijo al norte, Enmedio al centro y Tuxpan al sur) y el polígono que delimita la zona del área natural protegida.

Figura SIG-4. Concentración de clorofila a en el Golfo de México en 2014.

Figura SIG-5. Densidad relativa del coral *Acropora palmata* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

Figura SIG-6. Densidad relativa del coral *Colpophyllia natans* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

Figura SIG-7. Densidad relativa del coral *Orbicella annularis* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

Figura SIG-8. Densidad relativa del coral *Orbicella faveolata* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

Figura L-1. Número de publicaciones científicas relevantes para cinco sistemas arrecifales del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, ASV: Arrecifes al sur de Veracruz, AT: Arrecifes de los Tuxtlas, BC: Banco de Campeche, General: Publicaciones sobre el Golfo de México en general.

Figura L-2. Número de publicaciones por tema de estudio para cuatro sistemas arrecifales del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema

Arrecifal Veracruzano, AT: Arrecifes de los Tuxtlas, BC: Banco de Campeche, General: Publicaciones sobre el Golfo de México en general.

Figura 1. A. Tejido en apariencia sano (1) rodeado por un signo blanco en forma de banda (2) en una colonia de *Pseudodiploria strigosa*. La parte oscura sobre el esqueleto expuesto (3) corresponde a la presencia de ciliados (ver más adelante) B. Tejido en apariencia sano (1) con una zona recientemente muerta correspondiente a un signo blanco (2) afectando una colonia de *Colpophyllia natans*.

Figura 2. La flecha señala una banda blanca en una colonia de *Acropora palmata*.

Figura 3. Signos amarillos en *Orbicella faveolata*. A. El signo puede ser una mancha que forma una banda relativamente gruesa generalmente en un borde u orilla del coral. B. El signo puede observarse como una banda o línea delgada generalmente en el borde u orilla del coral.

Figura 4. A. Signos oscuros en *Siderastrea siderea* (las flechas señalan unas manchas oscuras en el tejido). B. Signos oscuros en *Orbicella annularis* que pueden observarse como manchas o bandas en el tejido (ver flechas).

Figura 5. Banda negra en el coral *Orbicella faveolata*. La flecha señala la banda de color oscuro que separa tejido en apariencia sano y esqueleto recientemente expuesto.

Figura 6. Manchas decoloradas en *Pseudodiploria strigosa*.

Figura 7. Puntos blancos múltiples en *Colpophyllia natans*. A. Se observan bandas blancas (1) que corresponden a esqueleto recientemente expuesto rodeando a una zona de tejido que muestra decoloración y áreas muertas (2). B - D. Muestran otros ejemplos que carecen de las bandas blancas pero muestran el tejido decolorado y áreas recientemente muertas (2).

Figura 8. Lesión no colonizada en *Orbicella annularis*. La flecha señala el esqueleto de color blanco con corallitos desgastados pero sin sobrecrecimiento de algas u otros organismos, sin señal evidente de indicios de depredación.

Figura 9. Colonia de *Orbicella annularis* mostrando nódulos que han perdido su coloración casi por completo y un nódulo central (flecha) que muestra distintos grados de palidez.

Figura 10. Tapetes de algas junto al tejido de *O. faveolata*. La flecha señala una proyección del tapete algal sobre el tejido del coral.

Figura 11. Macrofotografía que muestra la interface entre el tejido de una colonia de *Orbicella* y un alga coralinácea encostrante. La flecha muestra una zona en donde se aprecia que el alga crece invadiendo el tejido coralino.

Figura 12. Macroalgas del género *Halimeda* creciendo al lado del coral *Pseudodiploria clivosa*. Las flechas muestran zonas en donde el alga crece sobre el tejido del coral.

Figura 13. La fotografía muestra un crecimiento de algas filamentosas adyacente a una colonia del coral *Meandrina meandrites*.

Figura 14. Fotografía que muestra una colonia de *Erythropodium caribaeorum* creciendo sobre tejido del coral *Orbicella faveolata*.

Figura 15. Ejemplo de una esponja del género *Ircinia* creciendo sobre una colonia de *Siderastrea siderea*.

Figura 16. Se muestran varios erizos *Diadema antillarum* escondidos entre nódulos del coral *Orbicella annularis*.

Figura 17. Mordidas de peces en una colonia de *Siderastrea siderea*. Las flechas muestran lesiones alargadas que corresponden a la forma de los dientes.

Figura 18. Colonia del coral *Pseudodiploria strigosa* afectada por un signo blanco. Al lado del signo blanco (flecha) se observa una mancha de color oscuro formada por ciliados del género *Halofoliculina* sp.

RESUMEN EJECUTIVO

Los arrecifes de coral se han degradado a nivel mundial a tasas alarmantes en los últimos 40 años, en mucho debido a un deterioro en la calidad del ambiente marino como resultado de los diferentes efectos del cambio climático global y de otros de escala local/regional. Entre los factores más importantes en causar mortalidades masivas de corales, en todos los arrecifes del mundo, están las enfermedades de coral, incluyendo el blanqueamiento masivo.

Considerando los eventos catastróficos pasados, causados por enfermedades y otras afecciones a los corales, los índices usados tradicionalmente para estudiar a las comunidades coralinas, como son la riqueza específica y la cobertura del sustrato, se han vuelto insuficientes para evaluar su condición. Por lo tanto, en este estudio nos avocamos a evaluar el estado actual de los ensamblajes coralinos y el efecto de interacciones que tienen el potencial de causar mortalidad a las colonias de coral.

Capítulo 2. Diseño y Protocolos de Muestreo. Como se explica en detalle en este capítulo, se diseñó un protocolo comparativo para detectar patrones y tendencias y el análisis se enfocó a estimar con precisión estadística adecuada la proporción de signos de enfermedades y de otras afecciones. Los modelos utilizados son específicos para la naturaleza binomial de los datos de proporciones.

Capítulo 3. Estructura Comunitaria y Zonación. En este capítulo se analizan un total de 32,245 colonias de coral, pertenecientes a 26 especies de corales escleractinios y aun hidrocoral. Los ensamblajes coralinos en los arrecifes muestreados estuvieron dominados por ocho especies de corales constructores, de las cuales *Acropora palmata*, *Colpophyllia natans*, *Montastraea cavernosa*, *Pseudodiploria strigosa*, *P. clivosa*, *Orbicella annularis*, *O. faveolata* y *Siderastrea siderea* fueron las consideradas como clave en este trabajo. Distintos arreglos espaciales, en términos de presencia y abundancia de las especies anteriores, y la presencia de algunas especies raras como *Oculina diffusa*, *Scolymia* spp. y *Leptoseris cuculata*, crean distintas zonas dentro del patrón general de zonación en barlovento, cresta, laguna y sotavento. No obstante en términos de las especies clave en la construcción y mantenimiento de la estructura arrecifal, el patrón general se aplica a los cuatro arrecifes estudiados y por ende permitió hacer comparaciones válidas entre arrecifes.

Capítulo 4. Condición de los Ensamblajes Coralinos. En los arrecifes estudiados se registraron 17 signos indicadores de algún tipo de afección (Anexo 2) con potencial para dañar a las colonias de coral en el futuro, e incluso causar su muerte. Hubo signos de enfermedades que se asocian a especies hospederas específicas, como lo son signos amarillos casi exclusivamente en los corales del género *Orbicella* o los puntos blancos múltiples en *Colpophyllia natans*, mientras que los signos blancos y las manchas blanqueadas afectaron a varias especies de coral. En general, los corales en

el arrecife Enmedio fueron los más afectados y los de Tuxpan los menos, pero en los cuatro arrecifes las especies más afectadas fueron las del género *Orbicella*, lo que obedece principalmente a que los signos amarillos tendieron a una mayor prevalencia en los arrecifes de Enmedio y Tuxpan. Los patrones generales para los otros signos fueron diversos así, los signos blancos mostraron una tendencia inversa a los signos amarillos, las manchas blanqueadas tuvieron prevalencias similares entre arrecifes, las manchas oscuras fueron más prevalentes en los arrecifes de Tuxpan y Enmedio, mientras que los puntos blancos múltiples en *C. natans* fueron más prevalentes en Anegada de Adentro y Blanquilla. Por otro lado, la afección más frecuente y con niveles muy altos en los cuatro arrecifes fueron los tapetes de algas, lo que probablemente está relacionado con eventos de mortalidad coralina parcial, producida por otras causas, porque al momento del muestreo no se apreció que estos tapetes cubrieran áreas extensas de las colonias, teniendo más bien una distribución en parches sobre zonas muertas de las colonias. El arrecife La Blanquilla presentó las mayores proporciones de afecciones, las cuales estuvieron presentes en la mayoría de las especies de corales constructores. Las interacciones de competencia con otros organismos tendieron a tener una baja frecuencia y fueron relativamente variables entre arrecifes.

La mayor proporción de colonias de coral afectadas por signos se encontró en el arrecife de Enmedio, mientras que la menor en el de Tuxpan, ambos en el SALT, mientras que los arrecifes del SAV tienden a valores intermedios sin diferencias significativas. La mayor proporción de colonias afectadas por tapetes de algas se encontró en La Blanquilla (SAV) y la menor en el arrecife de Enmedio (SALT), pero las diferencias de éste último con los otros intermedios son relativamente pequeñas. La mayor proporción de colonias afectadas por otros organismos macroscópicos se encontró en La Blanquilla (SAV) y la menor en el arrecife de Tuxpan (SALT), pero no se encontró una diferencia significativa en las proporciones estimadas en los otros dos arrecifes, la que es intermedia entre los anteriores.

Aunque aparentemente los arrecifes La Blanquilla y Tuxpan presentaron tendencia a tener los valores de afecciones mayores y menores respectivamente, es evidente que este patrón no es reflejado por el otro arrecife del sistema correspondiente. Por lo tanto, no hay evidencia de que la condición de los corales clave, a esta escala, sea diferente entre el SALT y el SAV, aunque sí hubo diferencias entre arrecifes individuales.

Capítulo 5. Modelado de riesgo. Como se explica en detalle en este capítulo, los modelos utilizados se aplican a los casos extremos y son deterministas en el sentido de que una colonia que sufre de una afección perderá tejido a lo largo del tiempo, pero el resultado de la modelación dependerá de la prevalencia de enfermedades y la relación entre las tasas de avance de las afecciones y crecimiento de las colonias. El resultado nos da una idea del destino de las poblaciones bajo la hipótesis de que lo observado durante el muestreo no cambie significativamente en el tiempo.

De acuerdo con el modelado de riesgo, el coral masivo *Orbicella faveolata*, fue el más afectado por signos de enfermedad y sobrecrecimientos de tapetes algales y en el peor

escenario los modelos predicen una pérdida de colonias de hasta el 90% a 10 años y un mínimo de 10% en el escenario más benigno. Espectro que no es irreal pues estas magnitudes ya han sido documentadas en diferentes sitios del Caribe.

Para el caso de *Orbicella annularis* en el peor escenario los modelos predicen una pérdida de colonias de hasta el 70% a 10 años y un mínimo de 25% en el escenario más benigno.

Para el caso de *Colpophyllia natans*, el coral masivo menos afectado, en el peor escenario una pérdida de colonias de hasta el 62% del total a 10 años, pero del 2.5% en el escenario más benigno.

En el caso de *Acropora palmata*, los modelos arrojaron predicciones de efecto mucho menos severo, con pérdidas del orden del 5% a 10 años en el peor escenario y prácticamente sin pérdida en el escenario más benigno. Algo muy alentador porque a corto plazo *A. palmata* es el constructor arrecifal más importante. Sin embargo, la mortalidad masiva que sufrió esta especie en la década de los ochenta del siglo pasado en todo el Caribe recuerda que una epizootia en esta especie puede ser repentino y “fulminante”.

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son ecosistemas de alta productividad, biodiversidad y belleza, lo que repercute en una serie de beneficios para los habitantes de las comunidades locales y foráneas (Spurgeon 1992, Pendleton 1995, Moberg y Folke 1999). De manera local, los arrecifes sostienen importantes pesquerías, son una fuente de carbonato de calcio (lo que repercute, por ejemplo, en la existencia de hermosas playas), atraen turismo y protegen la costa de la erosión, en particular la causada por tormentas y huracanes. De manera global, los arrecifes juegan un importante papel en el ciclo del carbono, en la cultura de distintos pueblos, en la investigación básica y médica y tienen un valor inherente global y económico por el turismo de buceo SCUBA que mantienen. Distintos países han reconocido este valor al establecer protección especial para áreas de arrecifes de coral (Pendleton 1995). México no es la excepción, y ya cuenta con áreas arrecifales protegidas tanto en el Atlántico como en el Pacífico.

En las últimas décadas, se ha incrementado la degradación de los sistemas arrecifales coralinos a nivel mundial (Hughes et al. 1994, Bellwood et al. 2004), particularmente por el efecto del cambio climático (Hoegh-Gulberg et al. 1999, 2007) y de factores locales, como la contaminación de las aguas costeras con nutrientes y patógenos (Aguirre-Macedo et al. 2008; Baker et al. 2010). El calentamiento del agua superficial del océano se ha asociado con un aumento en los eventos de blanqueamiento de corales, y de otros organismos simbióticos (Bruno et al. 2003), y con un aumento en el número de enfermedades de coral y en su prevalencia (Harvell et al. 2007). Si bien estos factores, globales y locales, afectan a un gran número de especies de coral, provocando disminuciones en su cobertura y cambios en la composición específica y funcionalidad (Gardner et al. 2003, Graham et al. 2014), es de particular preocupación el impacto negativo que tienen en especies de corales escleractinios, consideradas como clave para el crecimiento y mantenimiento de la estructura arrecifal (Goreau 1959, Alvarez-Filip et al. 2009). La magnitud del impacto que estas enfermedades letales llegan a tener se puede apreciar considerando que en la década de los setenta, en el siglo pasado, la enfermedad conocida como banda blanca fue la causante de la mortalidad masiva de los grandes cinturones formados por uno de los constructores arrecifales más importantes, el coral *Acropora palmata*, en arrecifes del Caribe y del Golfo de México (Bruckner y Bruckner 1997, Aronson y Precht 2001, Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003). Hoy en día, lo mismo está ocurriendo en estos arrecifes con otros constructores arrecifales clave, pertenecientes al género *Orbicella*, por efecto de la enfermedad de la banda amarilla, (Jordán-Dahlgren et al. 2004, Carricart-Ganivet et al. 2011, Randall et al. 2014). El cambio climático también puede tener un efecto negativo en otros organismos arrecifales, como algas, esponjas, tunicados, que compiten por espacio con los corales escleractinios y provocar cambios de fase en la estructura de las comunidades coralinas a corto plazo (Hughes et al. 2003). Dada la rapidez con la que pueden ocurrir los cambios en el sistema arrecifal, es necesario implementar sistemas de monitoreo, con indicadores dinámicos que permitan detectar señales de degradación del ecosistema y tomar decisiones de manejo adecuadas en el momento adecuado (Rogers et al. 2015).

Los arrecifes del Golfo de México han sido menos estudiados que los del Caribe respecto a las enfermedades que afectan a los corales constructores de arrecifes, pero los resultados hasta ahora sugieren que éstos presentan una menor prevalencia de enfermedades que la reportada para el Caribe (Carricart-Ganivet et al. 2011, Randall et al. 2014). Sin embargo, al tener los arrecifes del Golfo de México una composición de especies constructoras similar a la del Caribe (Beltrán-Torres y Carricart-Ganivet 1999), su riesgo de degradación por efecto de las enfermedades es alto. Este riesgo aumentado dado que se pronostica que el aumento en la temperatura, por causa del cambio climático, favorecerá la proliferación de enfermedades infecciosas (Lafferty 2009). Por un lado, las temperaturas cálidas aceleran las reacciones bioquímicas aumentando funciones fisiológicas como la actividad, crecimiento, desarrollo y reproducción de los organismos. Sin embargo, esto tiene un costo pues un aumento en el metabolismo requiere un consumo mayor de energía y esto puede afectar a distintas etapas de desarrollo, particularmente a etapas que no se alimentan, como huevos y larvas (King y Monis 2007), pero también el sistema inmune de los corales (Reed et al. 2010). Aunque se ha propuesto que los organismos pueden adaptarse a temperaturas más elevadas (Bradshaw y Holzapfel 2001), esto será más fácil que ocurra en organismos patógenos que en aquellos que ya se encuentran cerca de sus límites fisiológicos. En el caso de los patógenos de los corales, es posible que crezcan mejor cuando la temperatura sea cercana o exceda la temperatura óptima para los corales (Harvell et al. 2001, Hoegh-Guldberg y Bruno 2010). Además, las enfermedades no infecciosas, como el blanqueamiento del coral, son causadas por estrés térmico y lumínico (Douglas 2003) y hacen que los corales sean más susceptibles a infecciones secundarias (Harvell et al. 2001, Muller et al. 2008). Por otro lado, no sólo los procariontes pueden ser potencialmente favorecidos por el cambio en las condiciones ambientales, sino también los competidores de los corales, algunos de los cuales pueden sobrecrecer corales vivos (Roy 2004, Rodríguez-Martínez et al. 2012).

Origen del Proyecto: El 20 de abril de 2010, en el Golfo de México ocurrió el derrame petrolero más grande de la historia tras el colapso de la plataforma petrolera Deepwater Horizon. El Gobierno Federal de México, como parte de su plan de acción, acordó establecer una línea base ambiental para, a través del monitoreo a largo plazo, identificar los posibles impactos presentes y futuros ocasionados por el incidente. Dentro de los trabajos realizados destacan: la modelación del desplazamiento del petróleo, la caracterización ambiental y el monitoreo de la porción marina y costera, y los estudios con pastos y tortugas marinas como especies indicadoras de conectividad y de la salud del ecosistema. Como parte del fortalecimiento de la línea base, se programó realizar un estudio sobre la distribución geográfica y el estado de salud de los arrecifes coralinos de aguas someras en el Golfo de México.

Objetivo del Estudio: Por lo anterior, el objetivo principal de este estudio se enfoca a:

1. Conocer la condición en la que se encuentran los corales de los arrecifes Tuxpan y Enmedio en el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SATL) Anegada de Adentro y Blanquilla en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), utilizando como indicadores de condición el nivel de prevalencia de signos relacionados con

enfermedades de corales y con la presencia de otros organismos sobre las colonias de coral.

2. Modelar escenarios futuros posibles para especies de coral clave considerando que las causas que determinaron la condición de salud encontrada en el presente se mantiene a corto y mediano plazo.

Como objetivos adicionales:

3. Generar un sistema de información geográfico sencillo que incluya a todos los arrecifes someros del Golfo de México en aguas nacionales y variables ambientales, como la temperatura superficial del mar, cuyas anomalías son la principal amenaza del cambio climático global al bienestar de los corales (Blanchon et al. 2012).
4. Compilar la información existente sobre los arrecifes del Golfo de México en una base de datos bibliográfica, que incluye los artículos científicos en formato pdf.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS ARRECIFALES CORALINOS EN EL GOLFO DE MÉXICO

El Golfo de México es un mar tropical a subtropical, oligotrófico en partes, y con una circulación marina dominada por corrientes de lazo y por el aporte de agua dulce de los ríos (Carrillo et al. 2007). El clima en la zona es caluroso y húmedo, con lluvias abundantes en verano y otoño y un corto período seco en Abril-Mayo. La temperatura media del aire es de 26°C, con una mínima de 18°C en Enero-Febrero. La temperatura del agua de mar varía durante un ciclo de marea entre 26 y 28°C y la salinidad entre 34 y 36.4 psu (Salas-Monreal et al. 2009). La dinámica oceánica está determinada principalmente por la Corriente de Lazo y por el viento. La marea diurna alcanza de 95 a 105 cm (Salas-Pérez et al. 2008). Anualmente existen dos sistemas de oleaje, uno generado por los vientos alisios durante la mayor parte del año, y el otro por los Nortes, durante la temporada invernal (Okolodkov et al. 2011). Los huracanes y tormentas tropicales ocurren principalmente en primavera y verano (Okolodkov et al. 2011).

1.1. Distribución de los arrecifes

En la región suroeste del Golfo de México existen 88 arrecifes emergentes, o casi-emergentes, que han sido nombrados (Anexo 1) los cuales se agrupan en cuatro sistemas arrecifales: el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT), el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), el Sistema Arrecifal de los Tuxtlas (SAT) y los arrecifes de la Sonda de Campeche (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003, Ortíz-Lozano et al. 2013, Fig. ZE-1).

Aunque estos arrecifes ocupan, en conjunto, menos del 1% de la plataforma continental somera (< 50 m de profundidad), albergan una gran diversidad biológica de importancia histórica, cultural, científica y económica (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003, Arceo et al. 2010).

1.2 Áreas de Protección

En la porción mexicana del Golfo de México existen cuatro áreas arrecifales protegidas: 1) Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, 2) Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, 3) Parque Nacional Arrecife Alacranes, y 4) Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas. En general, el objetivo de estas áreas protegidas es conservar, proteger y en su caso, recuperar los ecosistemas, sus elementos y sus funciones. Además, deben orientar las actividades humanas de manera que el beneficio social provisto por el ecosistema se encuentre dentro de un marco de sustentabilidad. Los esfuerzos de protección de los arrecifes en México desafortunadamente son aún

insuficientes, ya que no existe una regulación específica para estos ecosistemas y las leyes destinadas a conservarlos están fragmentadas en distintas normas, lo que dificulta su aplicación y su vigilancia (AIDA 2015).



Figura ZE-4. Mapa que muestra la ubicación de los cuatro sistemas arrecifales en el Golfo de México. La forma de los arrecifes se muestra en negro.

1.2.1 El Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV): El Sistema Arrecifal Veracruzano se localiza frente al Puerto de Veracruz y cuenta con 28 arrecifes, cuatro de ellos de tipo bordeante y el resto de tipo plataforma, distribuidos frente a los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado (Horta-Puga et al. 2007, Tunnel 2007). Diecinueve de los arrecifes son emergentes y cuatro están sumergidos. El SAV puede dividirse en dos grupos de arrecifes (norte y sur) divididos por la salida del río Jamapa. El grupo norte, cerca de la Ciudad de Veracruz, consiste de 13 arrecifes y el grupo sur, cerca de Antón Lizardo, tiene 15 arrecifes (Larson et al. 2014). El tamaño de los arrecifes varía entre 0.3 y 3.2 km de largo, cubren áreas de 1 a 19 km² y tienen alturas promedio que varían entre 20 y 45 m sobre el suelo marino (Jordán-Dahlgren 2004). La turbiedad en el SAV

es naturalmente alta, con visibilidad menor a 1 m durante la época de lluvias (Junio-Octubre), como resultado de altas concentraciones de partículas suspendidas transportadas por ríos (Antigua, Jamapa, Papaloapan) que descargan cerca de los arrecifes (Horta-Puga 2003). El área es afectada por frentes fríos en invierno, lo que disminuye la temperatura del agua e incrementa la turbiedad.

Los arrecifes del SAV tienen estructuras bien desarrolladas, con pendientes barlovento, al este y al norte, que se extienden a profundidades de aproximadamente 30 m y que tienen cobertura de corales duros más altas que a sotavento, en donde si bien la diversidad de corales duros es mayor la distribución se limita hasta los 21 m aproximadamente (Gutiérrez et al. 1993; Vargas-Hernández et al. 1993). Las plataformas arrecifales están generalmente dominadas por macroalgas, el pasto marino *Thalassia testudinum* y algunos corales duros. Las crestas arrecifales, localizadas en los márgenes de sotavento, son acumulaciones de pedacera de coral depositada por oleaje de tormenta y corrientes (Kühlmann 1975; Gutiérrez et al. 1993).

El SAV tiene tres categorías de protección, fue decretado Parque Nacional, en 1992, cubriendo un área de 52,238 hectáreas dentro de las coordenadas 19°02'16" y 19°15'32" Latitud Norte y 95°46'55" y 96°11'45" Longitud Oeste, sitio Ramsar, en 2004, y Reserva de la Biosfera de la UNESCO en 2006. Sin embargo, a la fecha no cuenta con un programa de manejo.

1.2.2 El Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT): El Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, se localiza, frente a las costas de los municipios de Tamiahua y Tuxpan, en el estado de Veracruz. El SALT está conformado por siete arrecifes coralinos, de tipo plataforma, que se encuentra a profundidades de entre uno y 30 metros. El SALT puede dividirse en dos subsistemas, o unidades arrecifales, con tres arrecifes emergentes cada uno. El subsistema Lobos, incluye a los arrecifes Blanquilla, Medio y Lobos, y el subsistema Tuxpan, incluye a los arrecifes: Pantepec, Tanhuijo, Enmedio y Tuxpan.

El SALT fue decretado Área de Protección de Flora y Fauna, mediante Decreto Federal, el 5 de junio de 2009, con una superficie de 30 mil 571-15-03.44 hectáreas. Sus coordenadas son 20°45' y 21°35' Latitud Norte, y 96°55' y 97°2' Longitud Oeste. Su Programa de Manejo se publicó en agosto de 2014.

1.2.3 El Sistema Arrecifal del Banco de Campeche (BC): La mayoría de los arrecifes coralinos del Banco de Campeche se encuentran cerca del borde de la plataforma continental, a una distancia de entre 80 y 130 km de tierra firme. Cerca de la costa solamente existe un grupo de tres arrecifes pequeños, frente a Sisal, Yucatán. La mayoría de los arrecifes son de tipo banco y están emergidos formando islas (Cayos), aunque algunos están sumergidos unos 10 m bajo el nivel medio del mar. Los arrecifes oscilan en tamaño entre tres y más de 20 km², excepto por el arrecife Alacranes que tiene una superficie mayor a 650 km² (Jordán-Dahlgren 2004). La profundidad máxima a la que llegan los arrecifes es de 40 m. La comunidad coralina es diversa y abundante (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003). Entre las zonas de barlovento y

sotavento existen variaciones morfológicas aunque una característica común es la presencia de una plataforma extensa y poco profunda en la zona de sotavento. Históricamente la parte somera estaba dominada por *Acropora palmata* y *A. cervicornis*, con abundancia alta de algas filamentosas y coralináceas. A profundidades intermedias el relieve es bajo y predominan corales de tallas pequeñas, gorgonáceos y esponjas (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003).

El arrecife Alacranes, se localiza en la parte norte del Banco de Campeche y es un arrecife excepcionalmente grande con forma de atolón que tiene una laguna profunda (~20m) y segmentada por una compleja red de arrecifes internos (Bonet 1967).

El único arrecife en el Banco de Campeche que ha sido decretado como área natural protegida es Alacranes, que fue decretado bajo la categoría de Parque Nacional en junio de 1994.

1.2.4 El Sistema Arrecifal de Los Tuxtlas (SAT): Consiste en un sistema de 32 formaciones coralinas pequeñas creciendo sobre un sustrato rocoso frente a la costa de los Tuxtlas. La formación más grande (La Perla del Golfo) tiene 13 km de largo y 0.5 km de ancho. Debido a su difícil acceso este sistema es poco conocido (Pérez-España et al. 2008). La riqueza de especies de coral reportada a la fecha para estos arrecifes es menor a la del SAV y el SALT al igual que la abundancia.

1.3 Amenazas locales y cambio climático

La diversidad y cobertura coralina en los arrecifes del sureste del Golfo de México está limitada principalmente por el clima, especialmente los frentes fríos (nortes), y por la turbiedad producida por descarga de ríos (Chávez et al. 2007, Horta-Puga et al. 2007). El estado de Veracruz cuenta con 48 ríos y presenta el 33% del escurrimiento nacional. Muchos de estos ríos desembocan en el mar cargados de sedimentos, pesticidas, fertilizantes, metales pesados y coliformes (Ponce-Velez y Botello 2005). Estos ríos han aumentado su carga de sedimentos debido a la deforestación y a cambios en el uso de suelo, lo cual resulta en un exceso en sedimentos suspendidos en las zonas arrecifales (Martínez-Arroyo et al. 2011), lo que puede afectar a la comunidad coralina de diferentes formas. Un estudio realizado por Carricart-Ganivet y Merino (2001) indicó que en los arrecifes del sur del Golfo de México, la densidad esquelética y las tasas de calcificación, en el coral *Orbicella annularis*, fueron menores en sitios de alta sedimentación y turbiedad. Otro factor que disminuye la densidad esquelética y la tasa de calcificación en especies del género *Orbicella* es el aumento en la temperatura superficial del mar (Carricart-Ganivet 2004).

Tanto el SAV, como el SALT, están amenazados también por actividades antropogénicas que se realizan en las zonas urbanas costeras, y en los puertos, que

deterioran la calidad del agua, tales son los casos del aumento en la contaminación por los drenajes urbanos, que en muchos casos desembocan al mar sin ningún tipo de tratamiento, y en los residuos generados por las industrias metalúrgicas, textiles y alimentarias. Actualmente, la concentración de metales pesados en los sedimentos marinos del SAV sobrepasa el límite establecido para sedimentos no contaminados por metales pesados con Cadmio, Cobre y Zinc, y esto se ha asociado a las descargas de aguas residuales, aportes industriales, de minería, tenería, galvanoplastia y de fertilizantes, que a su vez se pueden atribuir a nuevos crecimientos poblacionales y a la ausencia de programas efectivos de vigilancia y control de la aplicación de normas ambientales (Zamudio-Alemán et al. 2014). Otros impactos a los arrecifes incluyen el encallamiento de buques, los derrames de combustibles, la sobrepesca (Martínez-Caballero 2007) y la extracción de corales, conchas y otros organismos para su venta.

En los arrecifes de Los Tuxtlas, los problemas ambientales que se han detectado son la desaparición de especies de peces ornamentales, la disminución en el tamaño de los peces atrapados para pesca comercial y la contaminación generada por productos de aceite y petróleo (Ortiz-Lozano et al. 2013).

En el Banco de Campeche los arrecifes están más alejados de la costa y por lo tanto tienen menos influencia de las actividades realizadas en el continente. Los impactos negativos a la comunidad coralina ocurren principalmente por sobrepesca y encallamientos. En algunos casos, como en Cayos Arcas, también hay impactos de origen industrial por la construcción y operación de una plataforma petrolera.

Una amenaza más reciente para la biodiversidad nativa de los arrecifes del Golfo de México es la llegada de especies invasoras, como el pez león *Pterois* spp., el alga *Asparagopsis taxiformis*, el coral *Tubastrea coccinea* y el pomacéntrido *Neopamacentrus cyanomos* (González-Gándara y Cruz-Francisco, 2014), las cuales pueden afectar a las pesquerías y a la salud del ecosistema.

1.4 Vulnerabilidad al Cambio Climático

El cambio climático, particularmente el aumento en la temperatura de la atmósfera y del océano, y el incremento de la radiación UV-B, tienen numerosos efectos negativos en la comunidad coralina. El aumento en la temperatura del océano provoca eventos masivos de blanqueamiento de coral y de otros organismos arrecifales, así como un aumento en el número y en la prevalencia de enfermedades. El fenómeno de blanqueamiento de coral consiste en la pérdida de las algas simbiotas, o en la reducción en la concentración de pigmentos fotosintéticos en las algas (sin cambios en la densidad de población de las mismas); ambos casos se manifiestan como una pérdida de coloración del animal. El blanqueamiento de coral resulta en una disminución en el crecimiento, en su reproducción y en su habilidad para regenerar lesiones. El blanqueamiento puede tener un efecto pasajero, o provocar mortalidades masivas en un arrecife.

Afortunadamente, en los arrecifes del Golfo de México no se han reportado eventos de blanqueamiento masivo a la fecha.

El calentamiento del océano, por otra parte, puede disminuir la resistencia del coral, y de otros organismos arrecifales, ante las infecciones, volver más virulentas a las bacterias o aumentar su tasa de crecimiento (Daszak et al. 2001). En los arrecifes del Golfo de México ya se ha registrado mortalidades masivas de corales por efecto de enfermedades, tal fue el caso de la mortalidad de Acropóridos, por efecto de la enfermedad de la banda blanca, en la década de los años ochenta (Jordán-Dahlgren 1992) y la alta prevalencia de enfermedades en corales del género *Orbicella* (Jordán-Dahlgren et al. 2004).

Otra consecuencia del cambio climático es la acidificación del océano, resultante de la elevación en la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, la cual, como se mencionó antes, afecta la densidad del esqueleto y la tasa de crecimiento de corales y de otros organismos con exoesqueleto calcáreo (Gattuso et al. 1998, Carricart-Ganivet y Merino 2001). Si los esqueletos de los corales se vuelven más frágiles serán incapaces de formar una estructura arrecifal tridimensional que permita que miles de especies lo puedan habitar y no podrán resistir el embate del oleaje durante huracanes.

El cambio climático también ha resultado en un aumento en la frecuencia de huracanes de alta intensidad (categorías IV y V). Holland y Bruyère (2014) comprobaron que si bien no hay evidencia de que en las últimas décadas haya ocurrido un aumento en la frecuencia anual total de huracanes tropicales, los huracanes categorías IV y V han aumentado a una tasa de 30% por °C de calentamiento global, mientras que los de categoría I y II han disminuido a una tasa similar. Los huracanes de alta intensidad ocasionan perturbaciones violentas a los arrecifes, produciendo efectos a corto y largo plazo lo cual se refleja también en una disminución en la protección que estos ecosistemas brindan a la inversión urbana y hotelera en zonas costeras.

El calentamiento global también acelerará la tasa de incremento del nivel del mar. Los modelos de proyección presentados en el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC Technical Paper VI 2008) estiman incrementos de 9 a 88 cm en el promedio global para el año 2100. Este aumento en el nivel del mar puede provocar erosión sobre el margen litoral afectando a los manglares, que sirven como zonas de alimentación y refugio para una variedad de organismos arrecifales.

El ciclo hidrológico también se ha visto afectado por el calentamiento global y ya han ocurrido cambios en los patrones de precipitación, intensidad de lluvia, tormentas extraordinarias, derretimiento de glaciares, etc. (Bates et al. 2008). En el caso del Golfo de México, se cree que el aumento en la temperatura media del planeta provocará una disminución en la precipitación (Ospina et al. 2010) y que la descarga total de afluentes al Golfo de México podría reducirse de 5,382.3 m³/s a 4,630.3 m³/s para fines del siglo XXI (Arcos-Espinosa et al. 2010).

Un deterioro severo de los arrecifes no solo afectaría a las especies que los habitan, sino que también tendría un efecto negativo en la economía de los países por la disminución en el turismo y la pesca. Por lo tanto, la pérdida del arrecife resultaría no solo en una catástrofe ecológica, sino que también se vería reflejada en pobreza y malnutrición para muchos de los países que de por sí ya se encuentran entre los más pobres del mundo.

Entre los indicadores de los impactos del cambio climático en los arrecifes coralinos se han propuesto los siguientes: (1) Cambio en la temperatura del agua, (2) Cambio en el nivel medio del mar, (3) Cambio en las corrientes marinas, (4) Cambio en la descarga de ríos en la zona y aporte de sedimentos, (5) Cambio en la riqueza de especies, (6) Cambio en la estructura comunitaria de grupos, (7) Aumento en los eventos de blanqueamiento masivo en organismos simbióticos con microalgas y (8) Aumento en las enfermedades de flora y fauna.

CAPÍTULO 2. DISEÑO Y PROTOCOLOS DE MUESTREO

2.1 Áreas de estudios cuantitativos

La estimación adecuada del valor de los indicadores de condición, requiere considerar dos fuentes principales de variación que interactúan: a) Variabilidad de condición que resulta del efecto diferencial del estrés ambiental ligado a efectos del cambio climático y de los impactos locales (Harvell et al. 2007) y b) Variabilidad en la estructura de la comunidad coralina arrecifal, que es reflejada en patrones de zonación más o menos diversos (Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003, Jordán-Dahlgren 2004, Reyes-Bonilla y Jordán-Dahlgren 2013).

Por lo anterior, para obtener estimadores estadísticamente válidos de la condición de las especies dominantes clave en zonas/habitas principales (determinadas con base en la literatura y recorridos durante los pre-muestreos), se requiere muestrear con replicación suficiente utilizando un diseño de muestreo del tipo estratificado al azar. Esto determinó restringir la evaluación a un número limitado de arrecifes coralinos en los principales Sistemas Arrecifales costeros del Golfo de México. Los arrecifes se seleccionaron por su similitud estructural (Jordán-Dahlgren 2004), a fin de hacer más directa la comparación entre ellos y fueron:

- 1) Sistema Arrecifal de Isla Lobos y Tuxpan (SALT): Arrecife Tuxpan y arrecife de Enmedio
- 2) Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV): Arrecife Anegada de Adentro y arrecife de la Blanquilla

2.2 Muestreo

El muestreo en ecología busca cumplir con uno o varios objetivos: 1) caracterizar una comunidad o población, 2) obtener indicadores de deterioro del ambiente y de las comunidades o poblaciones, 3) evaluar el efecto de actividades antropogénicas o naturales, 4) clasificar los hábitats con base en sus ambientes y su biota, 5) medir el cambio en el tiempo del ambiente y las comunidades (Green 1979). Para que los datos del muestreo sean válidos estadísticamente, hay que asegurar que el diseño incluya aleatoriedad para asegurar independencia en las réplicas, un número suficiente de muestras para obtener una precisión adecuada, un tamaño adecuado de la unidad de muestra y un conocimiento previo del área de estudio para evitar muestrear ambientes distintos que aumentarían la variabilidad en los datos (Green 1979). Esto es particularmente importante en el muestreo de arrecifes coralinos en donde la variación a distintas escalas espaciales es alta (Edmunds y Bruno 1996) y más cuando se busca estimar la prevalencia de afecciones.

Los estudios epidemiológicos en vida silvestre buscan detectar la presencia de una enfermedad (o afección), estimar su prevalencia y distribución en las poblaciones y ser capaz de estimar cambios en el tiempo (Nusser et al. 2010). Idealmente, para un estudio epidemiológico se realizaría un muestreo de animales escogidos al azar de la población, lo que permitiría detectar la presencia de las afecciones y obtener indicadores estadísticamente válidos. Sin embargo, esta aproximación es raramente utilizada por la dificultad de numerar a todos los individuos de una población y de escoger al azar una muestra representativa. En lugar de esto se recurre a distintas técnicas diseñadas originalmente para muestreos comunitarios o poblacionales (Raymundo et al. 2008). Estas técnicas tienen la desventaja de ser un muestreo por conveniencia y pueden introducir diferentes probabilidades en la selección de las muestras. Una opción para solventar estos problemas es colocar de manera óptima las unidades de muestreo para obtener tamaños de muestra suficientes y comparar la eficiencia de distintos diseños (Lohr 1999, Thompson 2002). Un forma de hacer esto es usar simulaciones con base en datos previos (Nusser et al. 2010).

En este capítulo describimos el diseño de muestreo utilizado, comenzando por un pre-muestreo que permitió hacer simulaciones para escoger el tamaño de transecto más adecuado para estimar la prevalencia de afecciones, y seguido por un muestreo cuantitativo, dirigido a las zonas más representativas con base en la abundancia de los principales constructores arrecifales.

2.2.1 Premuestreo: Para cada uno de los cuatro arrecifes estudiados se analizaron imágenes de satélite a fin de definir los ambientes principales desde la superficie del mar hasta los 15 m de profundidad. En julio y agosto de 2014, se realizaron recorridos en las zonas delimitadas. En los arrecifes de Tuxpan los recorridos se realizaron por medio de arrastres tipo manta (Done 1981), mientras que en los arrecifes de Veracruz no fue posible utilizar esta técnica debido a la poca visibilidad en los primeros tres metros de agua, por lo que los recorridos se realizaron por medio de buceo autónomo. En los recorridos se registró la composición del bentos en términos de (1) Abundancia relativa de especies dominantes de corales escleractinios, (2) Cambios evidentes en la composición de la comunidad coralina y (3) Abundancia relativa de signos de enfermedad. Con base en esta información se definieron los sitios más adecuados para realizar el muestreo cuantitativo y se utilizaron los datos para alimentar las simulaciones para determinar el tamaño ideal de la unidad de muestra que permitiera una estimación precisa, y estadísticamente válida, de la prevalencia.

2.2.2 Técnica de Muestreo y Tamaño de Muestra: La técnica seleccionada fue el uso de video-transectos porque, a diferencia de observaciones directas o de fotografía fija, permiten registrar áreas grandes con relativa rapidez, por lo que el registro de la condición de las colonias de coral en los cuatro arrecifes se hizo de forma prácticamente simultánea y por ende las comparaciones entre arrecifes fueron temporalmente y espacialmente válidas.

La unidad de muestra utilizada en este estudio fue el transecto y su tamaño se determinó mediante simulaciones en un espacio de muestreo virtual utilizando los dos tipos de distribución que se observaron en las colonias de coral durante los recorridos: al azar y agregada. El espacio de muestreo utilizó una densidad media de 0.7 colonias por m^2 y una prevalencia de signos de enfermedad de 15.8%, ambos parámetros estimados a partir de los primeros registros de campo. Con base en las simulaciones, se determinó que el tamaño más adecuado para los transectos era de 50 metros de largo por 1 metro de ancho ($50m^2$), ya que fue el tamaño que, con menores dimensiones, permitió obtener valores de prevalencia de cada signo particular con una exactitud y precisión adecuadas (Fig. M-1).

El inicio de cada transecto (50 x 1m) se escogió al azar sobre una línea guía de 10 metros de largo colocada perpendicularmente al eje mayor de la estructura arrecifal. Una vez definido el inicio del transecto, éste se extendió a lo largo de la estructura arrecifal, a una profundidad constante, disminuyendo así la variabilidad que resultaría de que un transecto cruzara gradientes de profundidad (Fig. M-2).

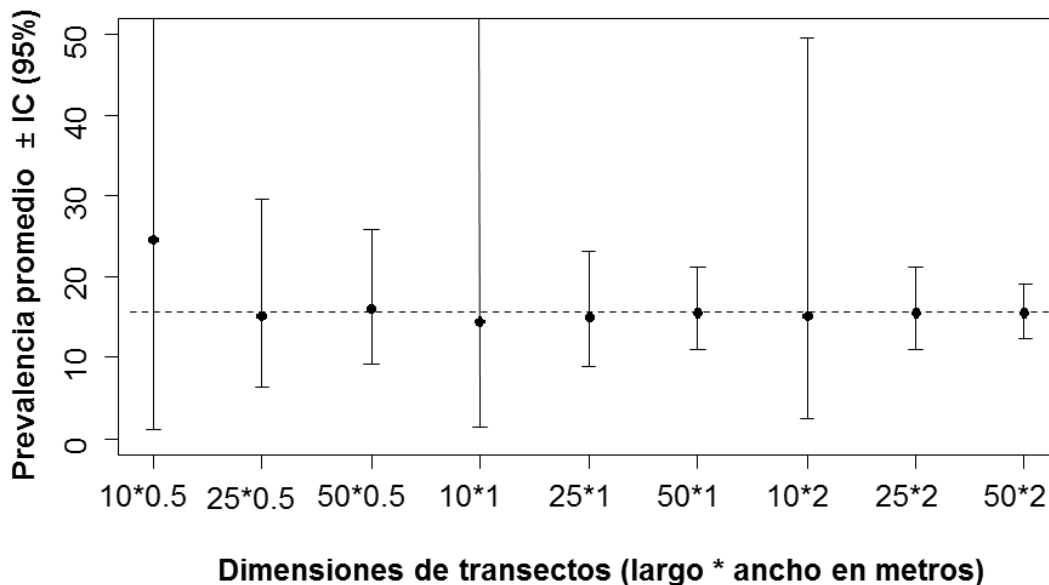


Figura M-1. Simulación (100 iteraciones) de la exactitud y la precisión en la estimación de la prevalencia de signos de enfermedad con transectos de diferentes dimensiones comúnmente usados en estudios de comunidades coralinas. Simulación realizada con un programa diseñado exprofeso en R (R Core Team 2014).

El video transecto se hizo con cámaras de video digital, marca GoPro (black edition), montadas en una estructura de PVC que portó una escala al final de 8.2 cm. La distancia entre la cámara y el fondo fue de 90 cm. El eje del lente de la cámara se mantuvo en posición vertical al sustrato, manteniendo el extremo de la varilla lo más cerca posible de la superficie ($\pm 3-10$ cm), para que el ancho del transecto fuera de aproximadamente 1.1 m y se obtuviera una resolución menor a medio centímetro.

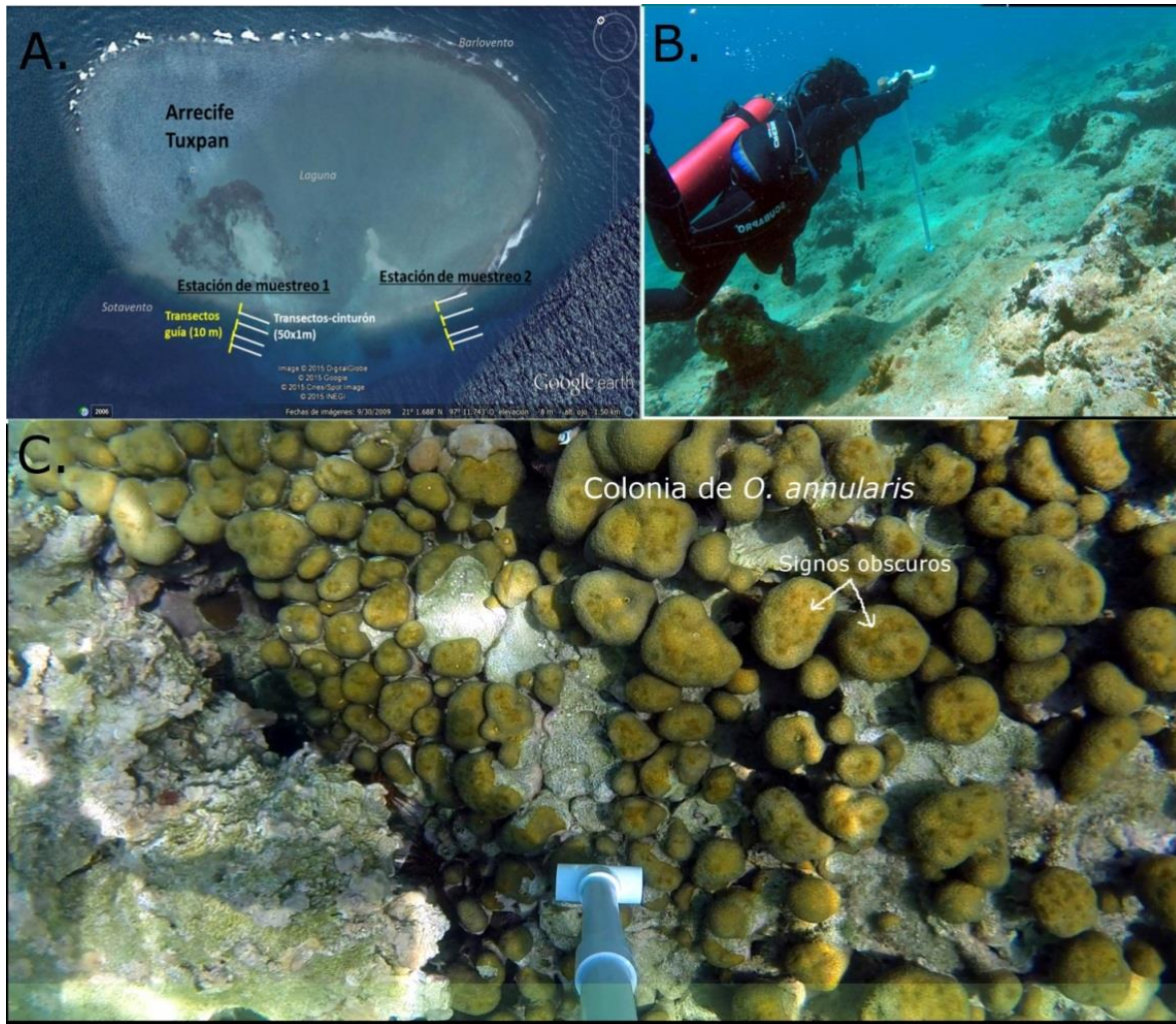


Figura M-5. Ejemplo del método de muestreo cuantitativo utilizado. A) Se muestran dos estaciones de muestreo colocadas aleatoriamente en el sotavento del Arrecife Tuxpan. En cada estación se colocó un transecto guía (color amarillo), de 10 metros de largo en posición perpendicular al borde del arrecife, que sirvió para colocar al azar transectos perpendiculares de 50 metros de largo. B) Un buzo con una cámara colocada sobre un monopie, que permitió controlar la distancia al sustrato, registraba en video el bentos en cada transecto de 50 x 1 m. C) Ejemplo de una colonia de *Orbicella annularis* con signos oscuros tomada del video. Las coordenadas geográficas de cada transecto guía fueron registradas por medio de un aparato de posicionamiento global (GPSmap76 Garmin).

En zonas con muy baja cobertura coralina (p.e. laguna, frontal) se grabaron sólo uno o dos transectos largos –de más de 150m-, que posteriormente fueron divididos en transectos de 50m, a partir del tiempo de grabación y de la distancia total recorrida. El video fue tomado con luz natural. Dependiendo de la extensión de cada estación, en cada zona, de cada arrecife, el número de transectos varió entre 4 y 20 (Tabla M-1). La distancia entre dos transectos consecutivos varió entre 1 y 10 metros.

2.3 Muestreos por arrecife

En julio y agosto de 2014, se realizó un intenso muestreo de los cuatro arrecifes (Tuxpan, Enmedio, Anegada de Adentro y Blanquilla). El diseño de muestreo fue jerárquico, utilizando transectos dentro de estaciones, con áreas menores a 3000 m², que a su vez estuvieron dentro de zonas, con áreas menores a 700 000 m². En cada zona, de cada arrecife, se colocaron varias estaciones de muestreo para tener replicación (Tabla M-1). En las zonas de muy baja cobertura coralina sólo se muestreo con propósitos descriptivos.

Tabla M-2. Estaciones y número de transectos que se muestrearon en cuatro arrecifes del Golfo de México en el verano de 2014.

<i>Estación</i>	<i>Arrecife</i>			
	Anegada de Adentro	Blanquilla	Tuxpan	Enmedio
<i>E1</i>	8	4	8	4
<i>E2</i>	8	4	8	5
<i>E3</i>	7	4	8	6
<i>E4</i>	8	4	4	4
<i>E5</i>	5	4	4	8
<i>E6</i>	4	4	5	4
<i>E7</i>	4	4	8	8
<i>E8</i>	6	4	6	20
<i>E9</i>	4	19	8	5
<i>E10</i>	8	11	21	-
<i>E11</i>	4	-	8	-
<i>E12</i>	19	-	9	-
<i>E13</i>	14	-	-	-
<i>E14</i>	11	-	-	-
TOTAL	110	62	97	64

2.3.1 Muestreos en el arrecife de Anegada de Adentro (SAV): El arrecife se dividió en 14 estaciones, el número de transectos en cada estación fue dependiente de la morfología del arrecife (Tabla M-1, Fig. M-3). En la parte noroeste de la laguna arrecifal se encontró un área de aproximadamente 150 x 60 m que presentó una alta densidad del coral *Acropora palmata*. En ésta área se colocó una estación (E14) para estimar la densidad y el estado de las colonias de este importante constructor arrecifal.

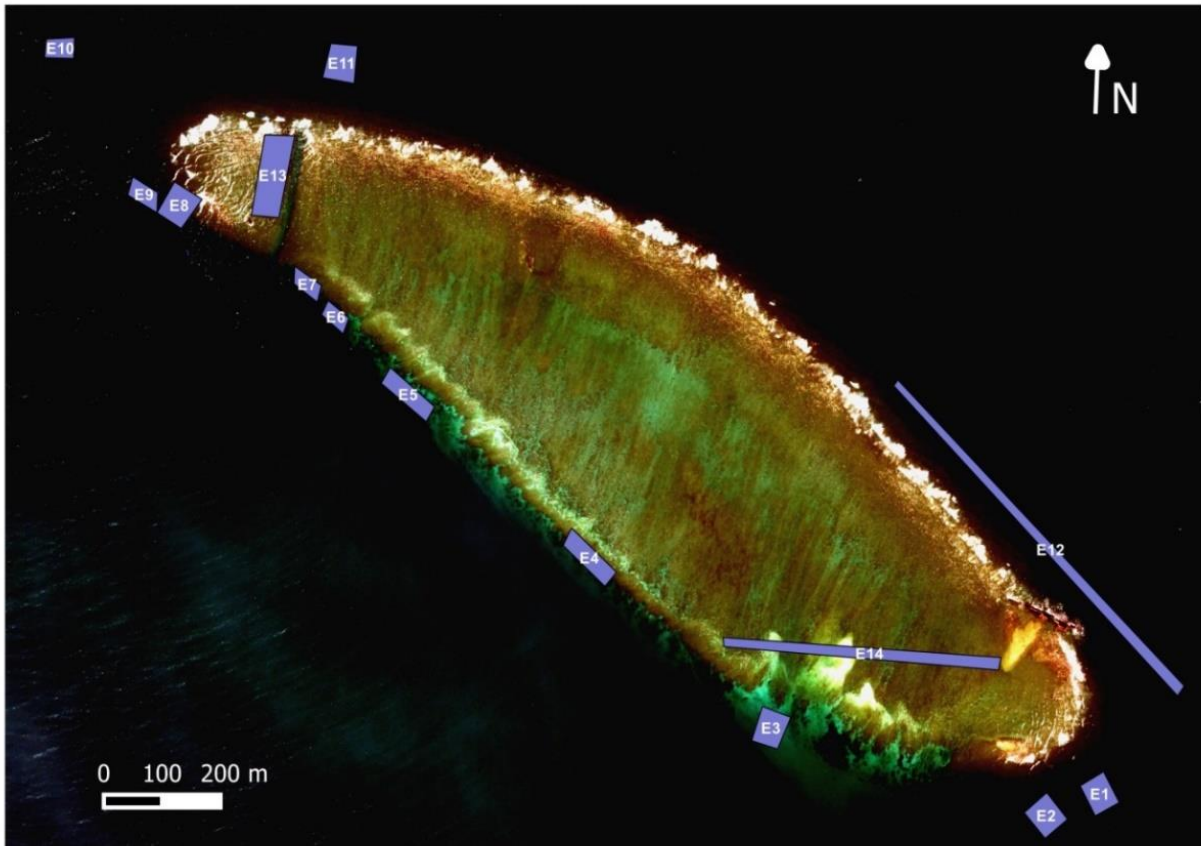


Figura M-6. Imagen de satélite del arrecife Anegada de Adentro en Veracruz en la que se señalan las 14 estaciones de muestreo. El área señalada en azul corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

2.3.2 Muestreos en el Arrecife Blanquilla (SAV): El arrecife se dividió en 10 estaciones de muestreo. El número de transectos en cada estación dependió de la morfología del arrecife (Tabla M-1, Fig. M-4).

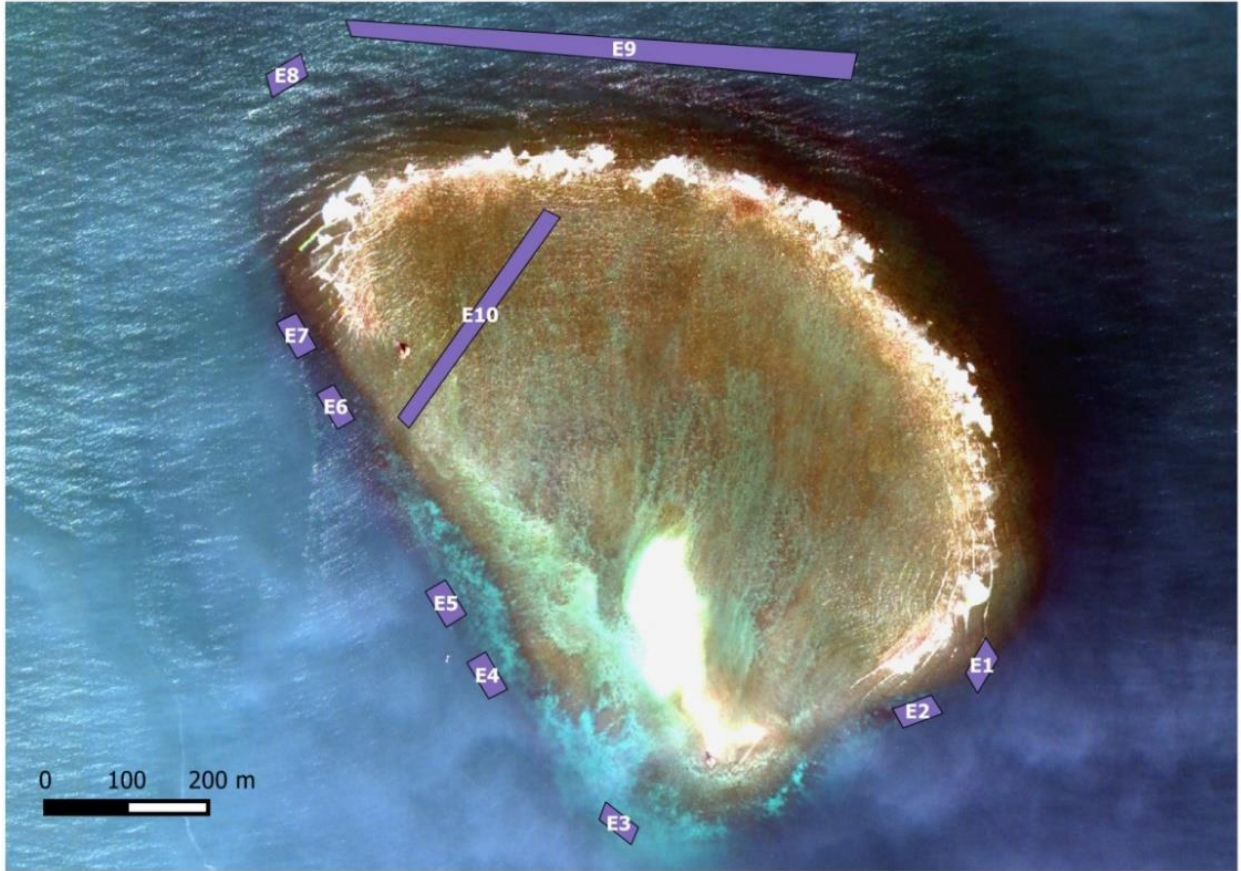


Figura M-4. Imagen de satélite del arrecife Blanquilla en Veracruz en la que se señalan las 10 estaciones de muestreo. El área señalada en azul corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

2.3.3 Muestreos en el arrecife Tuxpan (SALT): El arrecife se dividió en 12 estaciones de muestreo. El número de transectos en cada estación dependió de la morfología del arrecife (Tabla M-1, Fig. M-5).



Figura M-5. Imagen de satélite del arrecife Tuxpan en la que se señalan las 12 estaciones de muestreo. El área señalada en verde corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

2.3.4 Muestreos en el Arrecife En medio (SALT): El arrecife se dividió en 9 estaciones de muestreo. El número de transectos en cada estación dependió de la morfología del arrecife (Tabla M-1, Fig. M-6).

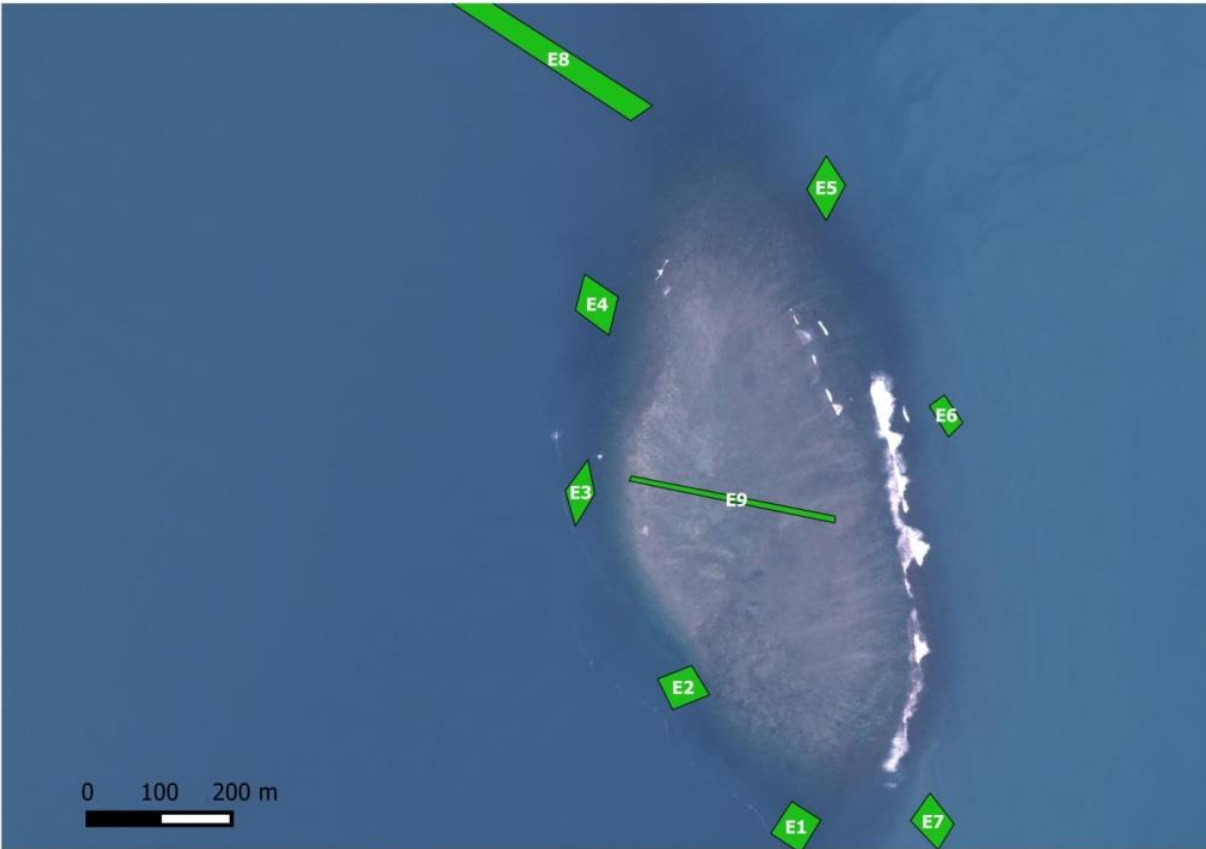


Figura M-6. Imagen de satélite del arrecife Enmedio en la que se señalan las 9 estaciones de muestreo. El área señalada en verde corresponde al área aproximada dentro de la cual se colocaron los transectos.

2.4 Análisis de los videos-transectos

El video de cada transecto fue analizado usando el programa GoPro Studio que permite hacer correcciones de color, acercamientos y capturar imágenes a partir del video. En cada video-transecto se registraron todas las colonias de coral escleractinio presentes. A cada colonia se le estimó el diámetro máximo, el cual se clasificó en cinco categorías: a) <8.3 cm; b) 8.3-25 cm; c) 25.1-60 cm; d) 60.1-120 cm y e) >120 cm) y se le estimó también su mortalidad parcial la cual se clasificó en seis categorías : a) < 5%; b) 5.1-25%; c) 25.1-50%; d) 50.1-75%, e) 75.1-95% y f) >95%. Para cada colonia también se registró la presencia de signos de enfermedad y de interacciones de competencia y depredación.

CAPÍTULO 3. ESTRUCTURA COMUNITARIA Y ZONACIÓN

El número total de especies reportadas en los arrecifes del Golfo de México varía según la fuente y las técnicas taxonómicas utilizadas (Quintana y Molina 1991). Smith (1972; en Quintana y Molina 1991) reportó 60 especies de corales escleractinios para el Golfo de México, pero desde entonces el número de especies que han sido registradas ha sido menor. Quintana y Molina (1991) reportaron 34 especies de escleractinios y una de un hidrocoral (*Millepora alcicornis*), Horta-Puga (2003) reportó nueve especies para el arrecife Galleguilla, 13 para Isla de Sacrificios y 10 para Isla Verde (hasta 12 metros de profundidad), mientras que Jordán-Dahlgren (1993) reportó un total de 38 especies entre los arrecifes de Alacranes, Cayo Arcas, Veracruz e Isla Lobos. Por su parte, Beltrán-Torres y Carricart-Ganivet (1999) reportaron un total de 40 especies de corales escleractinios para el Golfo de México. Estos estudios demuestran que el número de especies de coral total que se registre dependerá del arrecife muestreado, de la intensidad del muestreo y de las técnicas taxonómicas utilizadas.

En cuanto a la composición de especies, los arrecifes del Golfo de México están dominados por unas cuantas especies arregladas espacialmente por zonas (Jordán-Dahlgren 1993, Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2003). Históricamente las crestas arrecifales, desde Alacranes hasta Isla Lobos, estaban dominadas por el coral *Acropora palmata* (Jordán-Dahlgren 1993), pero su presencia decreció fuertemente en los 1970's y 1980's. En otros ambientes dominan los corales masivos, entre los cuales *Orbicella annularis*, *Orbicella faveolata*, *Montastraea cavernosa*, *Pseudodiploria strigosa*, *P. clivosa* y *Siderastrea siderea* son las más abundantes (Horta-Puga 2003, Chávez et al. 2007).

De acuerdo a Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez (2003) y con Chávez et al. (2007) las comunidades de corales escleractinios de los arrecifes de Tuxpan y Veracruz muestran diferencias en las zonas de sotavento, barlovento, laguna y barrera arrecifal. Esta zonación responde a variables ambientales, en particular al efecto del oleaje, cuya dirección principal es del Este, por lo que la división entre barlovento (cuadrantes noreste + sureste de los arrecifes), laguna (zona somera detrás de la rompiente) y sotavento (cuadrantes noroeste y suroeste de los arrecifes) es de esperarse (Graus y Macintyre 1989, Dao-ru et al. 2013). Sin embargo, en el Golfo de México existen anualmente dos sistemas de vientos generadores de oleaje: los "Surestes" y los "Nortes" (Carrillo et al. 2007). Además las tormentas y huracanes que inciden en el Golfo de México tienen un efecto en la estructura de los ensambles dependiendo de la frecuencia, del ángulo de incidencia y fuerza de la tormenta (Harmelin-Vivien 1994). En este capítulo caracterizamos los ensambles coralinos y las poblaciones de los principales constructores arrecifales en los arrecifes de Tuxpan y Veracruz.

3.1 Métodos

3.1.1 Estructura Comunitaria: Las estaciones muestreadas en cada arrecife se analizaron usando un análisis multivariado con una aproximación en varios pasos. Primero, los datos de abundancia de las especies por transecto, y por estación, en cada arrecife se usaron para construir una matriz de similitudes (índice de Bray-Curtis, transformación raíz-cuadrada para minimizar la dominancia de especies muy abundantes). Con esta matriz se clasificaron, por su similitud en la estructura de los ensamblajes coralinos, cada una de las estaciones por medio de un análisis de conglomerados (clusters, método de distancias mínimas). La diferenciación de los grupos que se observaron en el conglomerado y nMDS se comprobó por medio de un análisis de similitudes (ANOSIM, por sus siglas en inglés), que es una prueba multivariada análoga a un análisis de varianza factorial (Clarke 1993). Los valores de R de las comparaciones múltiples del ANOSIM entre los grupos se utilizaron en una matriz de disimilitudes para luego realizar un análisis de conglomerado. Las estaciones se agruparon de acuerdo a los resultados del conglomerado y se comprobaron mediante un segundo análisis de ANOSIM. Las especies que determinaron las diferencias entre las estaciones se determinaron por medio de un análisis de similitud porcentual (SIMPER por sus siglas en inglés).

3.1.2 Poblaciones: Las poblaciones de las especies constructoras más importantes, presentes en los cuatro arrecifes, se analizaron en términos del número promedio de colonias que presentaron por transecto. Estas especies fueron: *Acropora palmata*, *Colpophyllia natans*, *Orbicella annularis*, *O. faveolata*, *O. franksi*, *Pseudodiploria strigosa*, *P. clivosa*, *Montastraea cavernosa* y *Siderastrea siderea*. El coral *Porites astreoides*, a pesar de no ser un constructor arrecifal importante, tuvo una abundancia relativamente alta por lo que fue incluido en los análisis.

Para estimar el número de colonias por transecto se utilizó una regresión lineal de Poisson con la siguiente fórmula:

$$(1) \ln(N_{sppi/t}) = a + bz$$

En dónde,

$N_{sppi/t}$ = Número promedio de colonias por transecto de la especie i

z = variable categórica que representa la zona de arrecife (utilizando las zonas definidas en el análisis comunitario por ejemplo: barlovento, sotavento, laguna, etc.)

a = intercepto

B = pendiente.

Se utilizó una aproximación Bayesiana, con valores previos normales no informativos, para evaluar la convergencia del modelo y la forma de las distribuciones posteriores (Ntzoufras 2009) usando el programa OpenBugs (3.2.3). Utilizando la fórmula (1) se calculó el número promedio de colonias por transecto, con sus intervalos creíbles del 95%. Se establecieron diferencias significativas entre las abundancias cuando los intervalos creíbles no compartían valores en común (McCarthy 2007).

3.2 Resultados

3.2.1 Abundancias Relativas: En total, se registraron 32,245 colonias de coral escleractinio, pertenecientes a 26 especies, dentro de nueve familias, y una especie de hidrocoral (*Millepora alcicornis*) (Anexo 1) que representó solamente el 0.45% del total de colonias muestreadas. De las 27 especies de coral registradas, 16 fueron comunes a los cuatro arrecifes. La abundancia relativa de las especies difirió fuertemente entre los arrecifes, así como dentro y entre las zonas de cada arrecife (Tabla R-1).

Tabla R-1. Abundancia relativa de especies de coral escleractinio registradas en cuatro arrecifes del Golfo de México en el Verano de 2014. En negritas se muestran las especies que, en conjunto, contribuyen con más del 90% de la abundancia relativa de colonias por arrecife.

Código de la Especie	Abundancia relativa por arrecife (%)			
	Anegada de Adentro	Blanquilla	Enmedio	Tuxpan
<i>Aaga</i>	0.77	0.00	0.00	0.64
<i>Acer</i>	0.10	0.08	0.10	0.06
<i>Alam</i>	0.18	0.02	0.00	0.00
<i>Apal</i>	10.19	0.49	6.80	1.26
<i>Apro</i>	0.01	0.00	0.46	0.00
<i>Cnat</i>	29.30	30.60	27.38	31.25
<i>Lcuc</i>	0.01	0.00	0.00	0.00
<i>Mare</i>	0.00	0.00	0.00	0.02
<i>Mcav</i>	10.43	29.67	4.04	9.79
<i>Mdan</i>	0.28	0.76	0.19	1.36
<i>Mdec</i>	0.12	0.00	0.02	0.00
<i>Mlam</i>	0.02	0.18	0.02	0.89
<i>Mmea</i>	0.00	0.00	0.00	0.04
<i>Oann</i>	2.38	0.67	21.01	16.90
<i>Odif</i>	0.00	0.02	0.00	0.00
<i>Ofav</i>	5.38	3.08	2.52	3.57
<i>Ofra</i>	2.49	0.67	0.51	1.31
<i>Past</i>	5.46	5.09	13.51	9.66
<i>Pcli</i>	7.98	3.67	4.17	3.76
<i>Pfur</i>	0.02	0.00	0.02	0.01
<i>Ppor</i>	0.53	0.02	0.02	0.02
<i>Pstr</i>	15.44	8.62	9.51	11.84
<i>Scol</i>	0.01	0.00	0.00	0.04
<i>Sint</i>	0.28	0.36	2.28	1.48
<i>Srad</i>	0.23	0.06	1.60	0.77
<i>Ssid</i>	5.64	14.01	5.71	4.74
<i>No identificado</i>	2.72	1.94	0.14	0.62
Total especies	23	18	19	21

Únicamente nueve especies de coral tuvieron una densidad relativa global igual, o mayor, a 3% (Fig. R-1) y fueron éstas las que se seleccionaron como especies clave para realizar los análisis de condición: *Colpophyllia natans*, *Montastraea cavernosa*, *Pseudodiploria strigosa*, *Orbicella annularis*, *Porites astreoides*, *Siderastrea siderea*, *Pseudodiploria clivosa*, *Acropora palmata* y *Orbicella faveolata*. Excepto por *Porites astreoides*, el resto del conjunto son especies típicas que juegan un papel constructor en arrecifes coralinos. *Orbicella franksi* y *Acropora cervicornis*, tuvieron densidades relativas bajas pero se incluyeron en los análisis por ser constructores arrecifales importantes. *Acropora cervicornis* presentó sólo 27 colonias en toda el área de estudio. Por otro lado, *Acropora palmata*, importantísimo constructor en los arrecifes del área de estudio, presentó una abundancia relativamente alta, aunque su distribución fue aún restringida.

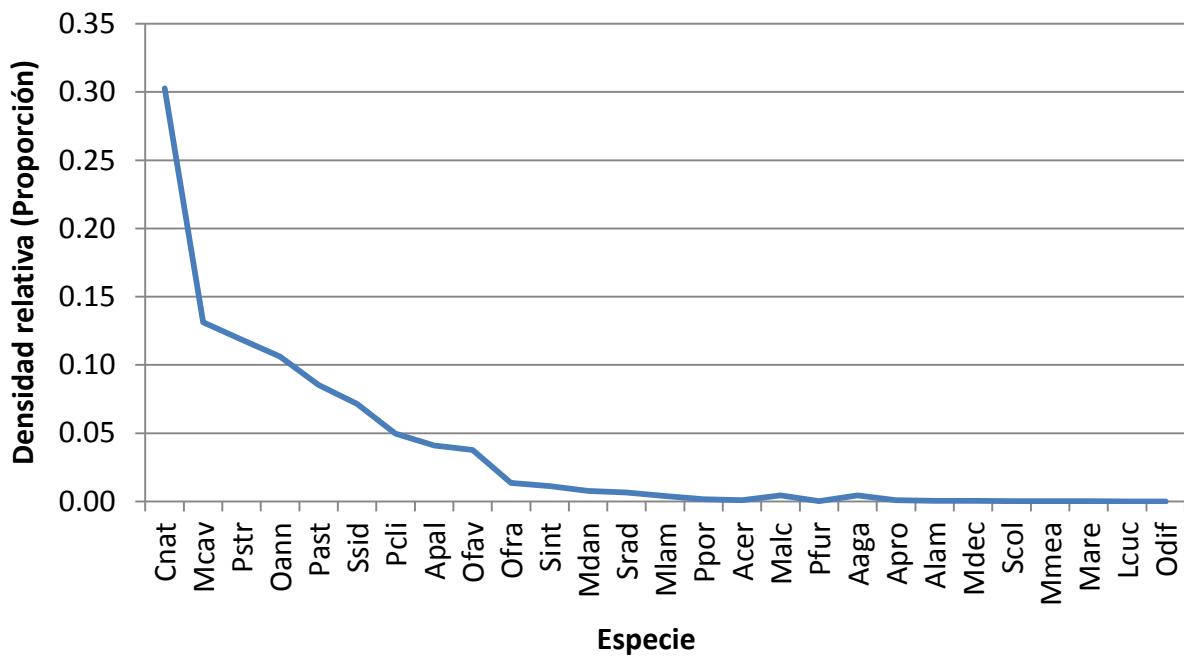


Figura R-1. Densidad relativa (proporción) de corales escleractinios juntando los datos de cuatro arrecifes estudiados en el Golfo de México en el Verano de 2014. Los nombres de los códigos de las especies se presentan en el Anexo 1.

3.2.2 Zonación en el arrecife de Anegada de Adentro (SAV): En las 14 estaciones de muestreo en el arrecife Anegada de Adentro se registraron 8,223 colonias, pertenecientes a 23 especies de corales escleractinios y a una especie de hidrocoral (*Millepora alcicornis*). Un análisis de conglomerados (Fig. R-2) mostró que las estaciones que se realizaron en la laguna (E13 y E14, ver Fig. M-3) y en barlovento (E12) se separaron en dos grupos bien definidos, mientras que las muestras de las demás estaciones fueron bastante similares.

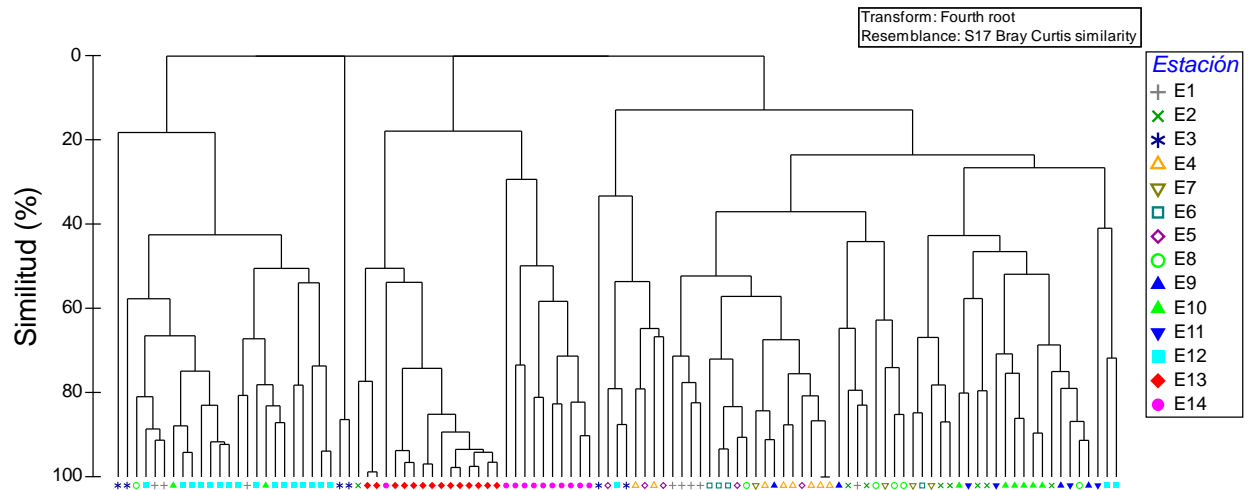


Figura R-2. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Anegada de Adentro.

Un análisis de similitudes (ANOSIM), mostró que había diferencias entre las estaciones de muestreo, con cierta similitud entre las muestras ($R= 0.68$, $p= 0.001$). Un análisis de conglomerado, con base en una matriz de disimilitud construida con los valores de R de las comparaciones múltiples del ANOSIM (Fig. R-3) muestra la similitud entre las estaciones, resumiendo la variabilidad entre las muestras observada en la figura R-2.

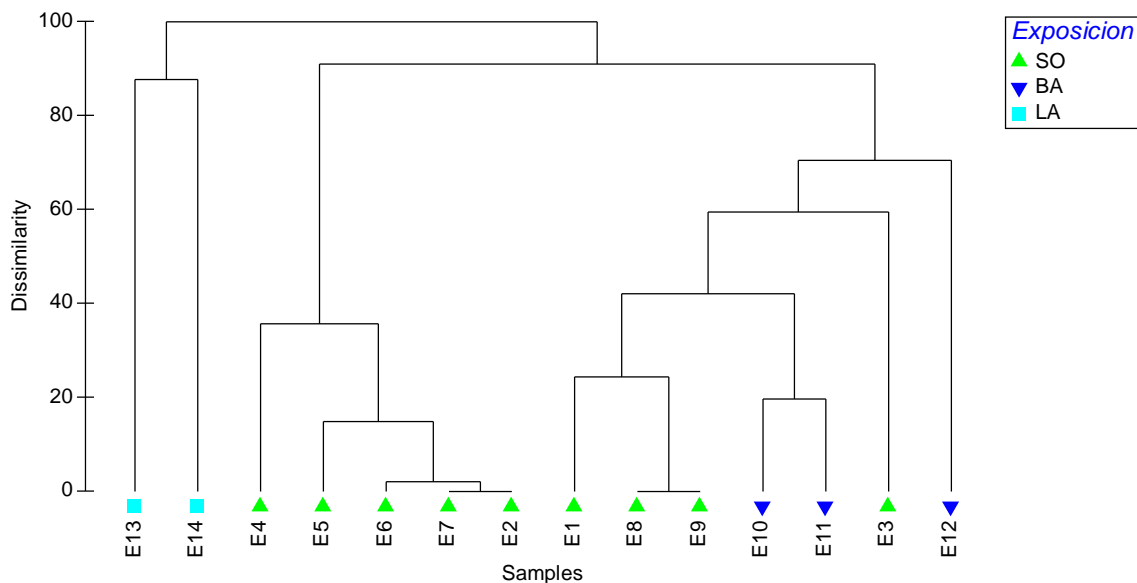


Figura R-3. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Anegada de Adentro.

Un análisis SIMPER mostró las especies que más contribuyeron a la similitud entre las zonas (Tabla R-2). Es de notarse la dominancia de las especies *Colpophyllia natans*, *Siderastrea siderea*, y *Montastraea cavernosa* en las zonas de Punta, Sotavento y Barlovento. El constructor *Orbicella faveolata* fue más común en las zonas de Punta y Sotavento y *O. annularis* en Sotavento (Tabla R-2). *Acropora palmata* fue importante en la laguna (Tabla R2) y *Pseudodiploria strigosa* en todas las zonas.

Tabla R-2. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Anegada de Adentro. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

<i>Grupo</i>	<i>Similitud promedio</i>		<i>Código de la Especie</i>									
			<i>Cnat</i>	<i>Ssid</i>	<i>Pstr</i>	<i>Mcav</i>	<i>Ofav</i>	<i>Past</i>	<i>Ofra</i>	<i>Pcli</i>	<i>Apal</i>	<i>Oann</i>
<i>Punta</i>	56.88	Ab. Med.	2.08	1.53	1.46	1.13	1.13	0.74	0.6	-	-	-
		Sim. Med	15.03	11.73	9.91	6.66	5.49	2.19	1.74	-	-	-
		Sim./SD	2.89	3.07	1.52	1.27	0.94	0.52	0.44	-	-	-
		Contrib%	26.43	20.63	17.43	11.71	9.65	3.85	3.05	-	-	-
<i>Sotavento</i>	68.56	Ab. Med.	2.55	0.95	2.14	2.06	1.18	-	-	-	-	1.29
		Sim. Med	18.62	4.81	14.54	13.54	5.81	-	-	-	-	6.75
		Sim./SD	5.65	1.09	2.32	4.6	1.12	-	-	-	-	1.29
		Contrib%	27.16	7.01	21.2	19.75	8.47	-	-	-	-	9.84
<i>Barlovento</i>	68.94	Ab. Med.	1.42	1.05	1.63	0.59	-	0.56	-	-	-	-
		Sim. Med	18.6	13.53	24.87	3.71	-	3.66	-	-	-	-
		Sim./SD	2.54	1.82	5.82	0.59	-	0.59	-	-	-	-
		Contrib%	26.98	19.63	36.08	5.38	-	5.31	-	-	-	-
<i>Laguna</i>	58.81	Ab. Med.	-	-	1.09	-	-	0.87	-	2.14	1.51	-
		Sim. Med	-	-	10.34	-	-	3.92	-	29.19	11.79	-
		Sim./SD	-	-	1.07	-	-	0.41	-	4.78	0.65	-
		Contrib%	-	-	17.58	-	-	6.66	-	49.64	20.06	-
<i>Único</i>	29.52	Ab. Med.	-	0.36	0.88	0.77	-	-	-	-	-	-
		Sim. Med	-	2.84	19.57	5.63	-	-	-	-	-	-
		Sim./SD	-	0.26	0.71	0.48	-	-	-	-	-	-
		Contrib%	-	9.62	66.28	19.08	-	-	-	-	-	-

3.2.3 Zonación en el arrecife de La Blanquilla (SAV): En las 10 estaciones en las que se realizó el muestreo en el arrecife Blanquilla (ver Fig. M-4) se registraron un total de 6,605 colonias de coral escleractinio, pertenecientes a 18 especies, y el hidrocoral *M. alcicornis*. Se hace notar que, durante un recorrido nocturno, se observaron colonias del coral *Colpophyllia natans* liberando gametos la noche del día 23 de Agosto de 2014 en la Punta Norte.

Un análisis de conglomerados (Fig. R-4) mostró que las estaciones de la laguna (E10; ver Fig. M-4) y de barlovento (E9) se separaron en dos grupos bien definidos, mientras que las muestras de las demás estaciones fueron bastante similares.

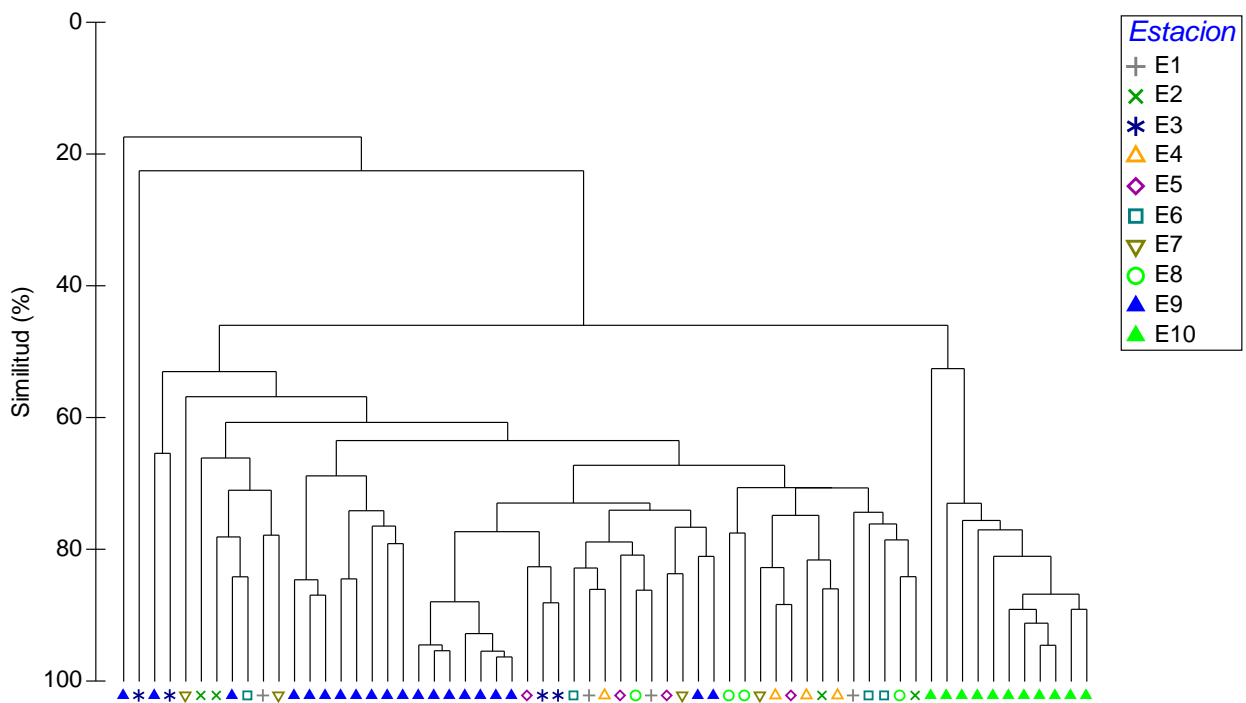


Figura R-4. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Blanquilla.

Un análisis de similitudes (ANOSIM) mostró que había diferencias entre las estaciones de muestreo con cierto solapamiento entre las muestras ($R= 0.53$, $p= 0.001$). Un análisis de conglomerado, con base en una matriz de disimilitud construida con los valores de R de las comparaciones múltiples del ANOSIM (Fig. R-5) muestra la similitud entre las estaciones, resumiendo la variabilidad entre las muestras que se observa en la figura R-4.

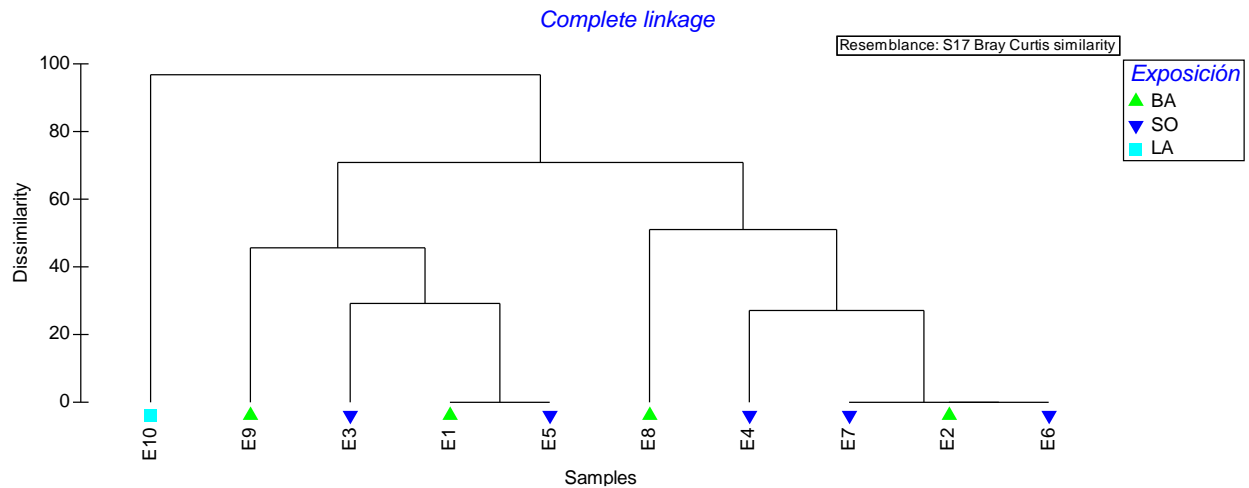


Figura R-5. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Blanquilla.

Las estaciones se reclasificaron en cinco zonas, con base en el análisis de conglomerado y a su posición en el arrecife: a) Zona de Barlovento (E9); b) Zona de Laguna (E10); c) Zona de Puntas (E1, E2, E8); d) Zona de Sotavento (E4, E5, E6 y E7) y e) Zona única (E3). Un análisis de similitudes en base a estos grupos comprobó sus diferencias ($R= 0.53$, $p= 0.001$) con todas las comparaciones múltiples significativas ($p \leq 0.008$ en todos los casos), excepto Punta y Sotavento ($R= -0.009$, $p=0.053$). Un análisis SIMPER mostró las especies que más contribuyeron en la estructura de las zonas (Tabla R-3).

Tabla R-3. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Blanquilla. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Grupo	Similaridad promedio		Código de la Especie						
			Cnat	Ssid	Mcav	Pstr	Ofav	Past	Pcli
<i>Punta</i>	66.77	Ab. Med.	2.56	1.48	2.52	1.87	1.24	0.89	-
		Sim. Med	15.86	7.67	17.22	12.82	5.28	3.81	-
		Sim/SD	4.04	1.4	6.67	3.68	1.05	0.77	-
		Contrib%	23.74	11.49	25.78	19.21	7.91	5.71	-
<i>Sotavento</i>	67.23	Ab. Med.	2.52	1.58	2.55	1.71	1.13	0.71	-
		Sim. Med	17.33	9.75	16.85	10.38	5.75	3.01	-
		Sim/SD	5.7	2.4	3.29	1.93	1.3	0.75	-
		Contrib%	25.78	14.51	25.07	15.43	8.55	4.48	-
<i>Barlovento</i>	67.97	Ab. Med.	1.97	1.67	1.65	0.97	0.81	-	-
		Sim. Med	19.78	15.92	15.6	6.87	4.99	-	-
		Sim./SD	6.44	2.78	2.74	1.08	0.81	-	-
		Contrib%	29.1	23.41	22.95	10.1	7.34	-	-
<i>Laguna</i>	75.23	Ab. Med.	1.31	2.29	-	1.32	-	1.73	2.06
		Sim. Med	10.77	22.02	-	9.19	-	11.17	22.08
		Sim/SD	1.91	8.05	-	1.29	-	1.26	5.4
		Contrib%	14.31	29.28	-	12.21	-	14.84	29.35
<i>Único</i>	61.72	Ab. Med.	1.12	-	2.31	-	-	-	-
		Sim. Med	12.26	-	44.21	-	-	-	-
		Sim/SD	0.9	-	5.24	-	-	-	-
		Contrib%	19.86	-	71.63	-	-	-	-

3.2.4 Zonación en el arrecife Tuxpan (SALT): En las 12 estaciones en las que se realizó el muestreo en el arrecife Tuxpan (ver Fig. M-5), se registraron en total 12,388 colonias de coral escleractinio, pertenecientes a 21 especies, y el hidrocoral *M. alcornis*.

Un análisis de conglomerados (Fig. R-6) mostró que las estaciones de la laguna (E12; ver Fig. M-5) y de barlovento (E9) se separaron en dos grupos bien definidos, mientras que las muestras de las demás estaciones fueron bastante similares.

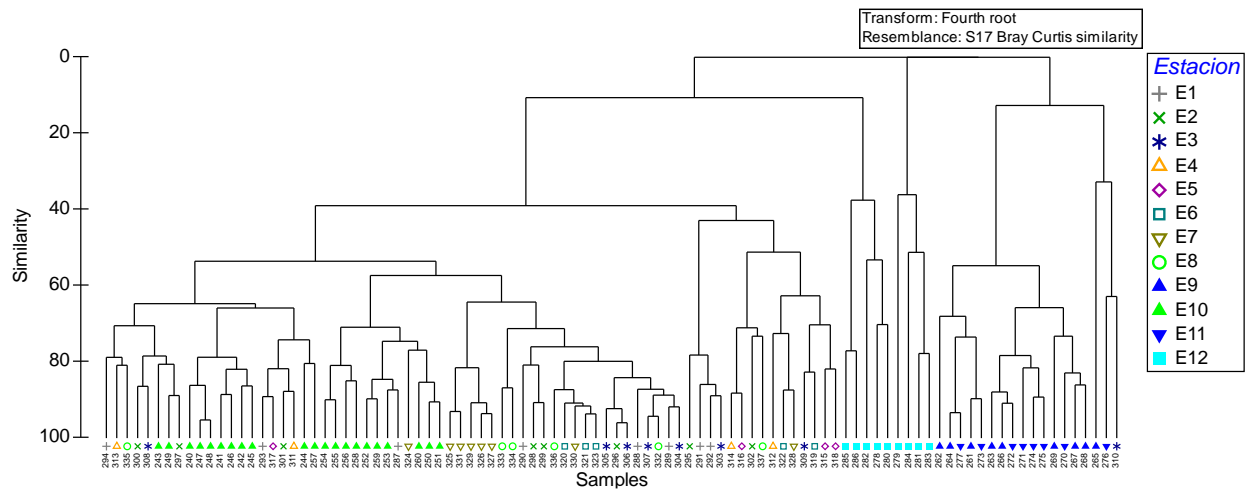


Figura R-6. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

Un análisis de similitudes (ANOSIM) mostró que había diferencias entre las estaciones de muestreo con cierto solapamiento entre las muestras ($R = 0.53$, $p = 0.001$). Un análisis de conglomerado en base a una matriz de disimilitud construida con los valores de R de las comparaciones múltiples del ANOSIM (Fig. R-7) muestra la similitud entre las estaciones, resumiendo la variabilidad entre las muestras que se observa en la figura R-6.

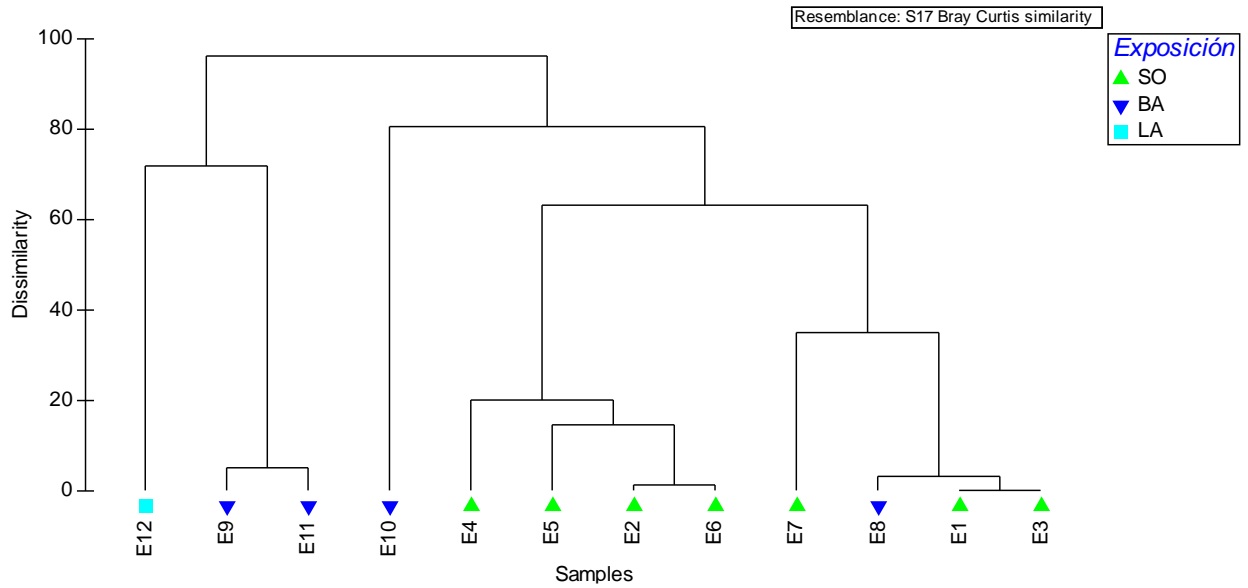


Figura R-7. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Tuxpan.

Las estaciones de muestreo se reclasificaron en cuatro zonas, con base en el análisis de conglomerado y a la posición de las estaciones en el arrecife (ver Fig. M-5): a) Zona de Barlovento (E10); b) Zona de Laguna (E12); c) Zona de Puntas (E9, E11); y d) Zona de Sotavento (E1, E2, E3, E4, E5, E6, E7 y E8). Un análisis de similitudes en base a estos grupos comprobó sus diferencias ($R= 0.61$, $p= 0.001$); las comparaciones múltiples fueron significativas en todos los casos ($p\leq 0.002$). Un análisis SIMPER mostró las especies que más contribuyeron en la estructura de los ensambles de cada zona (Tabla R-4).

Tabla R-4. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Tuxpan. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Grupo	<i>Similaridad promedio</i>		<i>Código de la Especie</i>										
			Cnat	Oann	Pstr	Past	Mcav	Ofav	Ssid	Pcli	Apal	Mlam	Srad
Punta	65.4	Ab. Med.	-	-	1.46	1.71	0.79	-	0.86	1.84	1.31	-	-
		Sim. Med	-	-	14.58	13.23	3.41	-	3.78	15.94	10.67	-	-
		Sim/SD	-	-	3.4	1.7	0.69	-	0.69	2.42	2.1	-	-
		Contrib%	-	-	22.29	20.23	5.21	-	5.77	24.37	16.32	-	-
Sotavento	69.58	Ab. Med.	2.5	2.28	1.92	1.73	1.69	1.32	1.31	-	-	-	-
		Sim. Med	13.24	12.81	9.9	8.55	7.67	7.55	5.16	-	-	-	-
		Sim/SD	3.48	2.89	2.4	2.07	1.72	2.58	1.2	-	-	-	-
		Contrib%	19.03	18.41	14.22	12.29	11.02	10.84	7.41	-	-	-	-
Barlovento	76.87	Ab. Med.	2.47	1.84	1.53	1.41	1.82	1.74	1.28	-	-	0.94	-
		Sim. Med	14.52	10.71	8.61	6.81	10.35	10.34	7.05	-	-	2.81	-
		Sim/SD	11.89	5.59	6.11	1.89	4.31	5.97	2.81	-	-	0.73	-
		Contrib%	18.89	13.93	11.2	8.86	13.46	13.45	9.18	-	-	3.66	-
Laguna	40.27	Ab. Med.	0.58	-	-	0.56	-	-	0.72	-	-	-	1.33
		Sim. Med	5.61	-	-	4.6	-	-	9.42	-	-	-	18.2
		Sim/SD	0.57	-	-	0.59	-	-	0.75	-	-	-	0.92
		Contrib%	13.92	-	-	11.44	-	-	23.38	-	-	-	45.2

3.2.5 Zonación en el Arrecife de Enmedio (SALT): En las nueve estaciones en las que se realizó el muestreo en el arrecife Enmedio (Fig. M-6), se registraron en total 5,464 colonias de coral escleractinio, pertenecientes a 19 especies, y el hidrocoral *M. alcornis*.

Un análisis de conglomerados (Fig. R-8) mostró que las estaciones de la laguna (E9; ver Fig. M-6) y las de una zona que se extiende desde la punta norte (E8) se separaron en dos grupos bien definidos, mientras que las muestras de las demás estaciones fueron bastante similares.

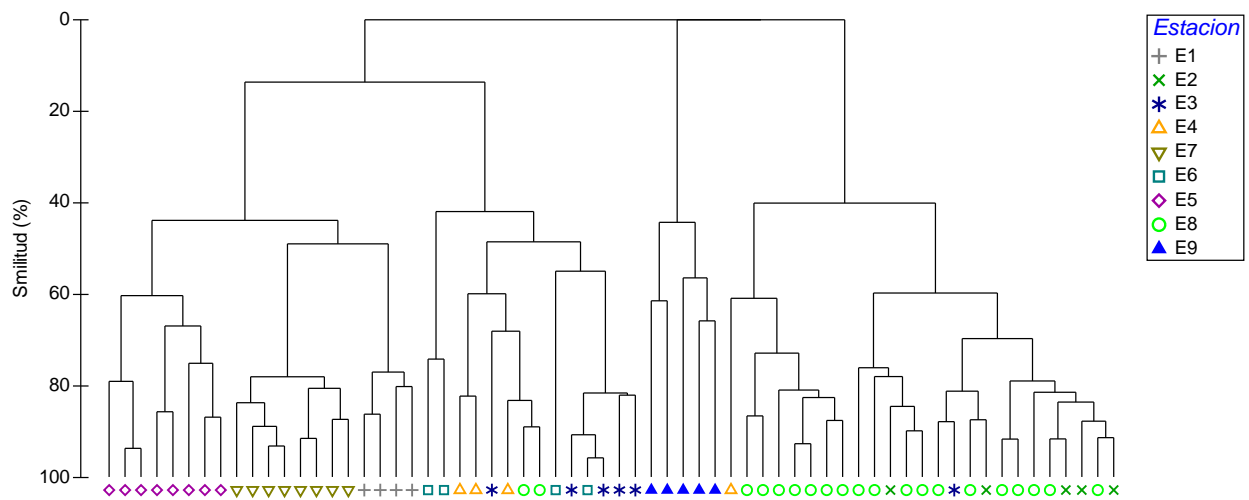


Figura R-8. Análisis de conglomerados de las estaciones de muestreo del arrecife Enmedio.

Un análisis de similitudes (ANOSIM) muestra que hay diferencias entre las estaciones de muestreo con poco solapamiento entre las muestras ($R= 0.73$, $p= 0.001$). Un análisis de conglomerado en base a una matriz de disimilitud construida con los valores de R de las comparaciones múltiples del ANOSIM (Figura R-9) muestra la similitud entre las estaciones, resumiendo la variabilidad entre las muestras que se observa en la figura R-8.

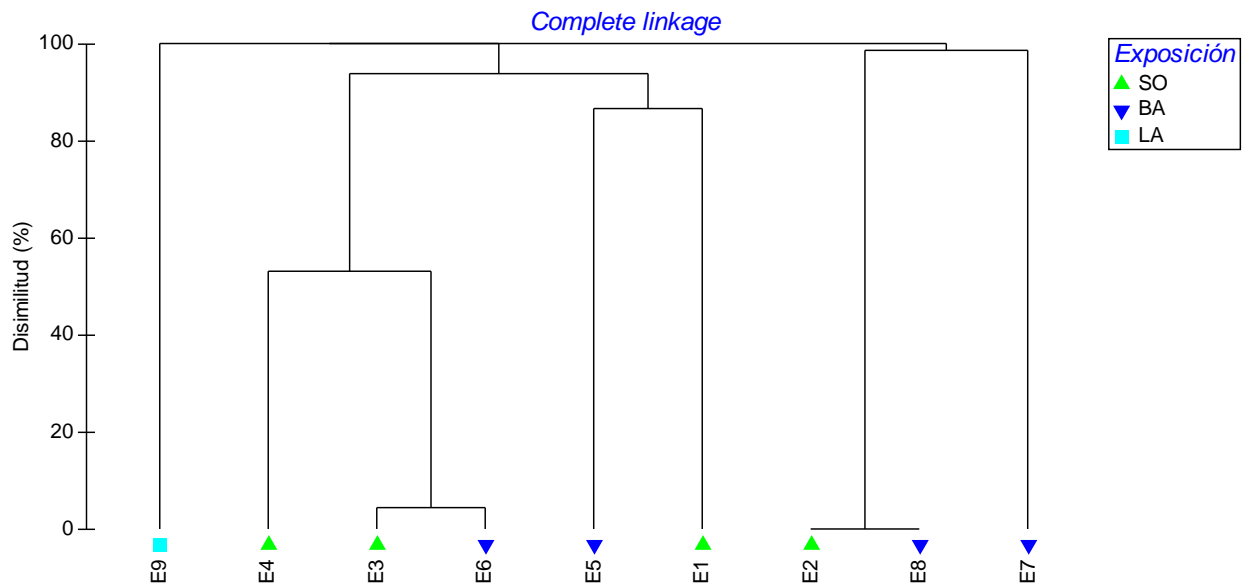


Figura R-9. Análisis de conglomerado con base en las distancias obtenidas a partir de un análisis de similitudes de las estaciones del arrecife Enmedio.

Las estaciones de muestreo se reclasificaron en cuatro zonas, con base en el análisis de conglomerado y a la posición de las estaciones en el arrecife (ver Fig. M-6): a) Zona de Barlovento (E6); b) Zona de Laguna (E9); 3) Zona de Puntas (E1, E5 y E7); 4) Zona de Sotavento (E2, E3, E4) y e) Zona única (E8). Un análisis de similitudes en base a estos grupos comprobó sus diferencias ($R= 0.65$, $p= 0.001$); las comparaciones múltiples fueron significativas en todos los casos ($p\leq 0.008$). Un análisis SIMPER muestra las especies que más contribuyen en la estructura de las zonas (Tabla R-5).

3.2.6 Abundancia de Especies Clave por Arrecife y Zona: Como se mostró en el análisis de comunidades, los ensambles de corales en los cuatro arrecifes estuvieron dominados por poblaciones de unas pocas especies de corales escleractinios constructores. De estas especies, la que presentó la mayor abundancia relativa, en el total del muestreo, fue la especie *Colpophyllia natans* (30% del total de las colonias registradas), seguida por *Montastraea cavernosa* (15%) y el conjunto de las tres especies del género *Orbicella* (16%) (Fig. R-1). En la tabla R-6 se presenta el número total de colonias observadas por especie en las distintas zonas de los cuatro arrecifes y su densidad.

Tabla R-5. Análisis SIMPER que muestra la importancia relativa de las especies que determinan las similitudes entre las zonas del arrecife Enmedio. El nombre de los códigos de las especies se presenta en el Anexo 1.

Grupo	Similaridad promedio	Código de la Especie	Código de la Especie											
			Past	Pcli	Pstr	Apal	Mcav	Cnat	Oann	Ofav	Pstr	Srad	Ssid	Sint
<i>Punta</i>	58.53	Ab. Med.	4.29	3.18	3.53	2.59	1.67	1.5	-	-	-	-	-	-
		Sim. Med	16.01	13.37	10.38	6.81	4.99	2.14	-	-	-	-	-	-
		Sim/SD	2.93	2.24	1.79	1.32	1.05	0.6	-	-	-	-	-	-
		Contrib%	27.35	22.84	17.73	11.64	8.52	3.65	-	-	-	-	-	-
<i>Sotavento</i>	57.32	Ab. Med.	2.39	-	-	1.5	-	4.46	5.79	1.29	2.19	-	-	-
		Sim. Med	7.02	-	-	2.95	-	9.9	23.31	2.45	6.94	-	-	-
		Sim/SD	1.14	-	-	0.59	-	1.08	2.77	0.69	1.98	-	-	-
		Contrib%	12.24	-	-	5.15	-	17.26	40.67	4.27	12.11	-	-	-
<i>Barlovento</i>	73.76	Ab. Med.	-	-	-	-	-	-	5.26	-	1.14	-	-	-
		Sim. Med	-	-	-	-	-	-	60.38	-	8.2	-	-	-
		Sim/SD	-	-	-	-	-	-	14.67	-	0.91	-	-	-
		Contrib%	-	-	-	-	-	-	81.87	-	11.11	-	-	-
<i>Laguna</i>	52.92	Ab. Med.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.84	0.95	-
		Sim. Med	-	-	-	-	-	-	-	-	-	41.28	9.46	-
		Sim/SD	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.77	1.12	-
		Contrib%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78	17.87	-
<i>Único</i>	66.22	Ab. Med.	2.47	-	-	-	1.93	6.7	3.53	1.53	-	-	3.05	1.82
		Sim. Med	6.37	-	-	-	6.91	24.32	7.91	4.31	-	-	8.62	3.4
		Sim/SD	1.25	-	-	-	3.61	6.44	0.88	1.42	-	-	1.57	0.71
		Contrib%	9.62	-	-	-	10.43	36.72	11.94	6.51	-	-	13.02	5.13

El número de colonias promedio por transecto, para las principales especies de corales constructores (*Acropora palmata*, *Orbicella* spp., *Pseudodiploria clivosa*, *P. strigosa*, *Siderastrea siderea*, *Montastraea cavernosa* y *Colpophyllia natans*) y el coral no constructor pero muy abundante *Porites astreoides* se estimaron por medio de modelos generales con una distribución de Poisson. Los resultados se muestran en la figura R-10 y nos da una estimación más exacta del número de colonias presentes en las comunidades y de su variación entre las zonas definidas en los análisis multivariados.

En la figura R-10, se observa que el mayor número de colonias del constructor *Acropora palmata* se encontró en los arrecifes de Anegada de Adentro, Tuxpan y Enmedio y en menores números en la Blanquilla. En Anegada de Adentro, en una zona pequeña de la laguna, el número de colonias varió entre 50 y 60 colonias por transecto de 50m². El número de colonias fue menor en los otros arrecifes, variando entre 5 y 15 colonias por transecto.

Colpophyllia natans fue común a los cuatro arrecifes, con mayor abundancia (hasta 100 colonias por transecto de 50m²) en el sotavento de Tuxpan (Fig. R-10). *Montastraea cavernosa* también estuvo presente en todos los arrecifes y en la Blanquilla fue el principal constructor, con hasta 100 colonias por transecto.

El coral *Orbicella annularis* fue más común en los arrecifes del sistema Tuxpan (Fig. R-10), principalmente en zonas de Sotavento y Barlovento, registrándose hasta 60 colonias por transecto de 50m². Mientras que en los arrecifes de Veracruz el mayor número de colonias de esta especie fue inferior a 10 colonias por transecto en Anegada de Adentro y la especie fue rara en la Blanquilla.

Orbicella faveolata fue un constructor importante en todos los arrecifes, aunque su abundancia fue relativamente baja, no superando 14 colonias por transecto de 50m². El coral *O. franksi* también estuvo presente en los cuatro arrecifes pero en menor abundancia que las otras especies del género, particularmente en el arrecife Enmedio.

Pseudodiploria clivosa fue un importante constructor en ambientes más marginales, como las lagunas en Anegada de Adentro y en la Blanquilla, y en las puntas en Tuxpan y Enmedio (Fig. R.10), presentando de 37 a 45 colonias por transecto en Anegada de Adentro. *P. strigosa* estuvo presente en los cuatro arrecifes en prácticamente todas las zonas de los arrecifes presentando de 35 a 42 colonias por transecto en el sotavento de Tuxpan (Fig. R-10).

El coral *Siderastrea siderea* también estuvo presente en los cuatro arrecifes, fue particularmente abundante en la laguna de Blanquilla con entre 37 y 45 colonias por transecto. El coral no constructor *Porites astreoides*, estuvo presente en los cuatro arrecifes con mayor abundancia en Tuxpan y Enmedio (Fig. R-10).

Tabla R-6. Número de colonias por especie de coral registradas en cinco zonas de cuatro arrecifes estudiados en el Golfo de México en el verano de 2014. Zonas arrecifales: Bar: Barlovento, Lag: laguna, Pta: Punta, Sot: sotavento. Úni: Único, Tran: Transectos, Den: Densidad. Los nombres de los códigos de las especies se presentan en el Anexo 1.

Especie	Arrecife																				Total	# de arrecifes
	Anegada					Blanquilla					En medio					Tuxpan						
	Bar	Lag	Pta	Sot	Úni	Bar	Lag	Pta	Sot	Úni	Bar	Lag	Pta	Sot	Úni	Bar	Lag	Pta	Sot	Úni		
<i>Aaga</i>	0	0	52	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79	79	142	2
<i>Acer</i>	0	0	0	8	0	0	0	3	2	0	0	0	0	6	0	0	0	0	7	7	26	4
<i>Alam</i>	0	0	15	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	2
<i>Apal</i>	33	758	37	6	0	31	1	0	0	0	4	0	214	76	5	1	0	87	67	155	1320	4
<i>Apro</i>	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0	28	2
<i>Cnat</i>	113	14	1261	999	11	350	53	755	842	15	2	0	96	458	947	864	6	13	2961	3844	9760	4
<i>Lcuc</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<i>Malc</i>	0	0	8	30	2	0	0	17	2	0	0	0	0	0	0	0	0	8	78	86	145	3
<i>Mare</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	2	2	1
<i>Mcav</i>	17	0	219	590	28	188	0	557	1080	129	0	0	88	51	80	281	3	39	881	1204	4231	4
<i>Mdan</i>	0	0	22	1	0	2	0	39	9	0	0	0	0	3	8	147	0	2	18	167	251	4
<i>Mdec</i>	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	11	2
<i>Mlam</i>	0	0	1	1	0	2	0	0	10	0	0	0	0	0	1	107	0	0	2	109	124	4
<i>Mmea</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	5	5	1
<i>Oann</i>	0	1	60	134	0	9	1	28	6	0	111	1	51	539	401	273	2	2	1802	2079	3421	4
<i>Odif</i>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
<i>Ofav</i>	10	0	311	119	0	33	1	88	80	1	1	1	28	43	61	208	2	14	215	439	1216	4
<i>Ofra</i>	1	0	104	99	0	10	0	11	23	0	0	0	0	10	20	9	0	0	152	161	438	4
<i>Past</i>	13	276	150	8	0	3	280	32	20	0	5	2	481	121	170	141	5	258	783	1187	2748	4
<i>Pcli</i>	0	579	42	32	0	15	206	7	14	0	0	1	236	5	1	28	2	266	166	462	1600	4
<i>Pfur</i>	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	4	3
<i>Ppor</i>	0	43	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	3	48	4
<i>Pstr</i>	143	98	385	621	14	51	82	173	255	7	7	0	373	93	67	144	4	95	1214	1457	3826	4
<i>Scol</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	2	5	6	2
<i>Sint</i>	2	0	19	2	0	1	0	15	8	0	0	0	1	7	125	16	0	0	166	182	362	4
<i>Srad</i>	0	11	4	1	3	1	0	0	3	0	0	94	0	0	0	1	94	0	0	95	212	4
<i>Ssid</i>	39	63	311	46	3	192	420	117	191	3	0	6	32	53	242	73	9	52	449	583	2301	4
N	372	1845	3013	2708	61	888	1045	1843	2546	155	130	107	1600	1492	2129	2303	131	836	9042	12312	32246	
Tran (#)	19	14	37	20	7	19	11	9	11	4	4	5	18	13	20	21	9	16	31	77	288	
Den (col/m²)	0.39	2.64	1.63	2.71	0.17	0.93	1.90	4.10	4.63	0.78	0.65	0.43	1.78	2.30	2.13	2.19	0.29	1.05	5.83	3.20	2.24	

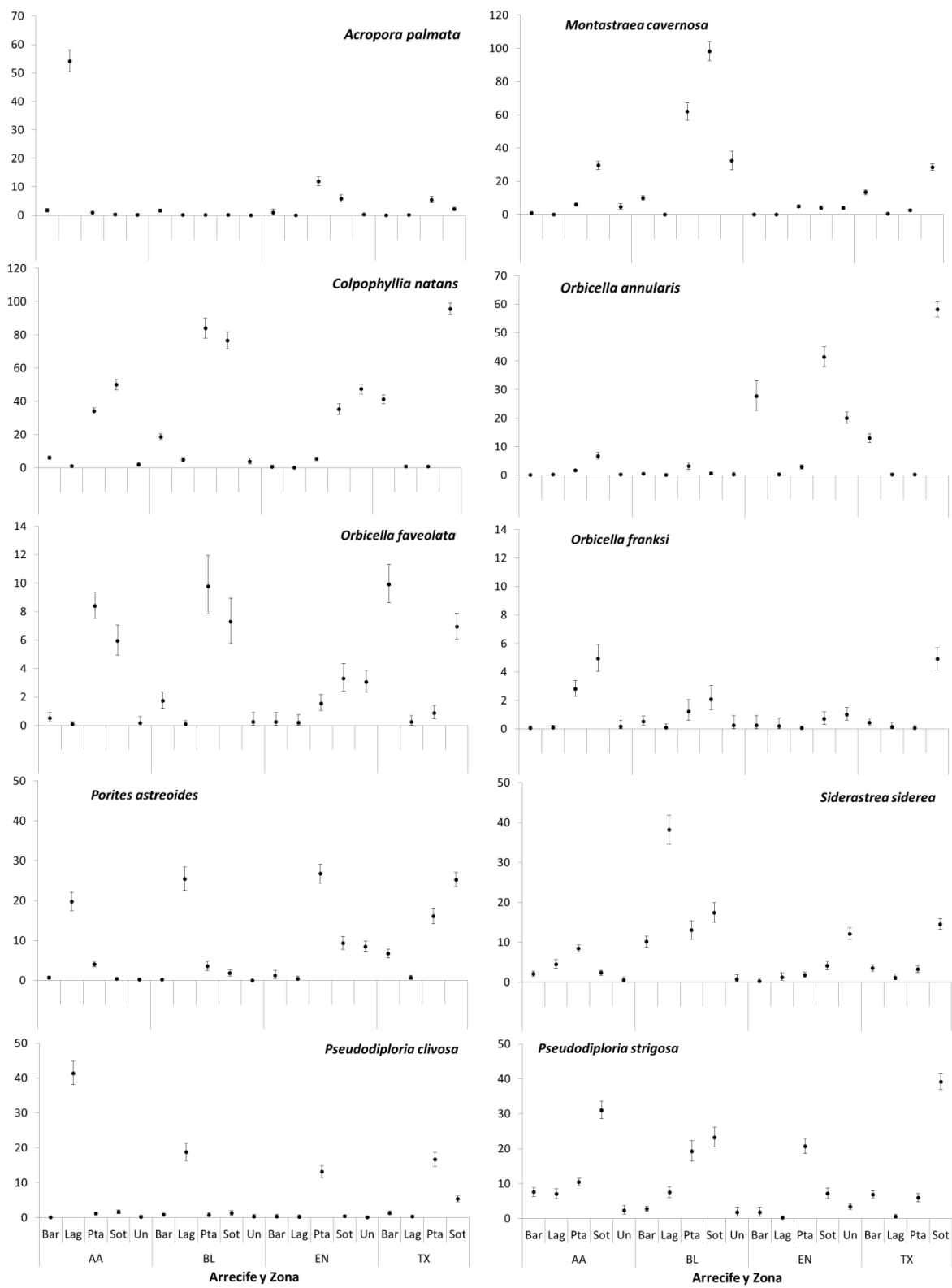


Figura R-10. Número promedio de colonias de coral de los constructores arrecifales más importantes por transecto en cinco zonas arrecifales de cuatro arrecifes registradas en el verano de 2014.

CAPÍTULO 4. CONDICIÓN DE LOS ENSAMBLES CORALINOS

Cuando se reconoció la presencia de enfermedades emergentes en corales, el término enfermedad se utilizaba en *sensu lato* implicando cualquier alteración en apariencia o funcionamiento. Posteriormente, los especialistas coincidieron en abordar un enfoque patogénico. El resultado fue una caracterización basada en signos observables y en la identificación de los supuestos agentes patogénicos (Tabla M-2). A la fecha, sin embargo, aún se desconocen los mecanismos de infección para muchas enfermedades (Harvell et al. 2007), así como la identidad de los agentes causales. En algunos casos la identidad de los patógenos ha sido comprobada en condiciones de laboratorio, pero se desconoce si en la naturaleza los supuestos agentes causales de enfermedades en corales son primarios u oportunistas, ya que en ocasiones los corales pueden presentar desequilibrios en la fauna bacteriana del mucus y esto puede resultar en crecimientos anómalos de bacterias simbióticas, o en la invasión por patógenos externos.

Actualmente, la identificación de una “enfermedad” en el campo se basa en sus características aparentes, no en la detección de los agentes patogénicos y/o ambientales que lo causan. En este sentido lo que se observa son signos, ya sea como patrones de pérdida de tejido, en lesiones claramente definidas, o como patrones de cambio de coloración en el tejido del coral. Si bien algunos signos tienen elementos diagnósticos característicos (banda negra, manchas negras en *Siderastrea siderea*, banda amarilla), otros como los signos blancos, signos amarillos, puntos blanqueados y palidez, tienen una apariencia muy similar independientemente de la especie de coral afectada y del agente causal.

Por otro lado, el deterioro ambiental producido por el calentamiento de las aguas superficiales en los mares, por efecto del cambio climático global, la eutroficación y la contaminación, particularmente en sistemas arrecifales cercanos a las costas, generan condiciones ambientales subóptimas y con ello un fuerte estrés fisiológico y eventualmente ecológico en los corales. Un claro ejemplo de esto es el blanqueamiento de corales, que se da por estrés térmico y que es una enfermedad de origen ambiental.

La construcción de modelos aceptables para evaluar el efecto potencial de diferentes enfermedades, en diferentes especies de corales escleractinios, es difícil cuando se desconocen los mecanismos de transmisión e infección y el efecto específico de los patógenos en diferentes condiciones ambientales. Por ello, en este capítulo analizamos la proporción de los signos de enfermedad observados en especies de coral consideradas como constructores arrecifales clave. Esta información será utilizada posteriormente para evaluar el efecto potencial que podría corresponder a un signo dado, asignando tasas de morbilidad reportadas, lo cual será reportado en el capítulo de modelado del riesgo.

4.1 Métodos de Análisis

El estudio se basa en el análisis de la proporción de colonias de coral afectadas por signos de enfermedad y por interacciones de competencia, depredación y sobrecrecimiento. Para el análisis estadístico de proporciones se utilizaron técnicas coherentes con la distribución binomial, en lugar de basarse en la distribución normal, ya que los datos obtenidos no fueron continuos sino dicotómicos: enfermo y no enfermo; afectado y no afectado.

En el análisis de las enfermedades, se estimó el tamaño del efecto de las prevalencias promedio para contrastar factores, mediante la razón de momios (odds ratio) entre los diferentes niveles de los factores analizados (arrecifes o especies); pero no así para estimar el tamaño del efecto en otro tipo de interacciones, en donde se limita a la diferencia entre las proporciones. Para facilitar la uniformidad y la comprensión en la interpretación de los resultados entre las diferentes variables de respuesta (enfermedades, competencia, depredación y sobrecrecimiento), en este trabajo el tamaño del efecto se estimó como la diferencia entre los porcentajes, en conjunto con el intervalo de confianza.

Para los contrastes entre arrecifes o especies se aplicaron dos enfoques:

1) *Sobreposición de los intervalos de confianza (IC al 95%)*. Se basa en el principio de que si dos o más intervalos de confianza comparten valores (sobre lapamiento de los intervalos de confianza) no hay diferencias significativas entre ellos, independientemente del valor de la proporción promedio, puesto que la magnitud del IC depende del error estándar de la estimación. Cuando en un contraste dado no hubo sobre lapamiento de los IC correspondientes, la diferencia se consideró significativa y el tamaño del efecto indicó la magnitud y el sentido de la diferencia (Nakawaga y Cuthill, 2007). En este estudio utilizamos intervalos de confianza binomiales creíbles mediante una aproximación Bayesiana, excepto cuando la convergencia no se podía alcanzar, en cuyo caso se utilizó el método binomial exacto.

2) *Pruebas múltiples pareadas post hoc* sobre modelos logísticos (modelos lineales generalizados binomiales con enlace logit). Para corroborar la interpretación de los resultados obtenidos mediante el análisis de intervalos de confianza, se aplicó una prueba de hipótesis. La prueba *post hoc* utilizada es específica para modelos lineales generalizados y utiliza la aproximación de Tukey (R multcomp: Hothorn et al. 2015). En este estudio la regresión logística se utilizó únicamente para determinar diferencias entre arrecifes mediante pruebas de hipótesis y no para hacer predicciones, por lo que se asumió que los modelos eran válidos cuando la razón entre la devianza nula y los grados de libertad no era significativamente diferente de uno; lo que indica que no existe sobre o sub dispersión. Todos los modelos utilizados cumplen con esta premisa y los resultados coincidieron con los de los intervalos de confianza.

Para comparar las prevalencias de signos, o los porcentajes de sobrecrecimientos, a nivel global se utilizaron todos los datos de arrecifes y especies, siempre y cuando la variable de respuesta tuviera un mínimo de 50 registros (siguiendo el Teorema del Límite Central para el caso binomial, cuando las proporciones son diferentes de 0.5, pero no muy cercanas a 0 ó 1). Las especies e interacciones poco abundantes (menos de 50 casos en total) fueron excluidas del análisis global.

4.2 Resultados

Como se detalló en la sección de estructura comunitaria, en el verano de 2014 se muestrearon cuatro arrecifes de tamaño y grado de exposición relativamente similares, dos en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y dos en el sistema arrecifal de Lobos-Tuxpan (SALT), para obtener una aproximación a las similitudes existentes entre ambos sistemas. En el SAV se muestreó en los arrecifes Anegada de Afuera y Blanquilla y en el SALT en los arrecifes Enmedio y Tuxpan.

En total se registraron 32,246 colonias, distribuidas en 27 especies, cuya abundancia relativa difirió fuertemente entre arrecifes, así como dentro y entre las zonas de cada arrecife (ver capítulo de estructura comunitaria). Sólo 16 especies se encontraron en los cuatro arrecifes y de éstas solamente 10 tuvieron una densidad global igual o mayor al 3% del total (Fig. R1), y fueron las que consideramos en este estudio como especies clave para los análisis de condición: *Acropora palmata*, *Colpophyllia natans*, *Montastraea cavernosa*, *Orbicella annularis*, *O. faveolata*, *O. franksi*, *Porites astreoides*, *Pseudodiploria strigosa*, *P. clivosa* y *Siderastrea siderea*. Excepto *Porites astreoides*, este conjunto está constituido por especies que juegan un papel constructor en arrecifes coralinos del Gran Caribe. La abundancia de *Acropora palmata* que se registró fue relativamente alta y aunque la distribución de esta especie fue aún restringida, indica un proceso de recuperación de este importantísimo constructor arrecifal, diezmado en los arrecifes Veracruzanos por la enfermedad de la banda blanca a fines del siglo pasado (Jordán-Dahlgren 1992). En contraste, *Acropora cervicornis*, otra especie constructora muy importante en los arrecifes veracruzanos y que también fue diezmada por la enfermedad de la banda blanca, se registró con muy baja abundancia en todos los arrecifes estudiados (27 colonias registradas en toda el área de estudio).

Las afectaciones registradas en las colonias de coral se detallan en el Anexo 2 y se catalogaron en tres tipos principales:

a) Signos: Cambio en la apariencia, textura o permanencia del tejido. Esta categoría incluye los signos de blanqueamiento incipiente, que estrictamente corresponden a una enfermedad ambiental por estrés térmico (Anexo 2).

b) Tapetes de Algas (TP): Colonización por asociaciones multiespecíficas de algas que forman tapetes definidos sobre áreas del esqueleto expuesto por lesiones del tejido que no regeneraron, comúnmente sobre áreas de esqueleto expuesto por otras interacciones que provocan mortalidad parcial (Anexo 2). Los TP implican una dualidad de interacciones posibles, no excluyentes, como recolonizador y como competidor (Roy 2004). La potencial dualidad de la naturaleza de la interacción entre los tapetes de algas y el coral depende tanto de la condición del coral como del estado en que se encuentren los tapetes de algas. Cuando son recolonizadores, los tapetes son pasivos y no se expanden más allá de los límites de la lesión original causada por la mortalidad parcial. Cuando los tapetes son competidores, resultan principalmente de la presencia de algas mucilaginosas (que atrapan y fijan las partículas de sedimento suspendido) y de que la condición del coral esté comprometida; en estas condiciones el tapete de algas se convierte en un tapete de algas-sedimento (TAS) que puede crecer activamente expandiéndose sobre el tejido vivo del coral (gracias a la estructura de soporte que forma el sedimento fijado), cobertura que no es rechazada eficientemente por el coral, por lo que eventualmente queda aislado del medio circundante causando su muerte (Roy 2004). En este estudio se observó que la mayor parte de los TP eran pequeños e internos, lo que sugiere que esos tapetes estaban en un estado de recolonizador predominantemente. Esto concuerda con la presencia de áreas pequeñas de esqueleto expuestas sin colonizar, o regenerar, al momento del muestreo y que fueron registradas como el signo “Lesión no colonizada” (LNC), que corresponde a áreas expuestas que pueden ser resultado de heridas por depredación o por efectos mecánicos desconocidos. Por lo anterior, no se debe considerar *a priori* que la proporción estimada de TP implica necesariamente una interacción negativa proporcional a su frecuencia ya que no es posible determinar, en un muestreo puntual, si se trata de un TP pasivo o de un TAS activo, pues esto requiere de un seguimiento en el tiempo.

c) Competencia: Principalmente por sustrato, lo que implica interferencia competitiva en diverso grado, particularmente si se considera que el esqueleto de un coral vivo es un sustrato potencial por el que se puede competir. Aunque puede haber competencia externa, en forma similar a como sucede con la recolonización, cuando hay mortalidad parcial se pueden asentar organismos, o consorcios de organismos, capaces de destruir el tejido vivo del coral y expandirse sobre parte, o la totalidad, del coral invadido. En este estudio se observó que los competidores animales correspondieron principalmente a esponjas y al gorgonáceo reptante *Erithropodium caribbeorum*, mientras que entre los vegetales, aparte de la potencial activación de los tapetes de algas, se registraron algas coralináceas encostrantes, macroalgas y algas filamentosas libres (Anexo 2).

d) Depredación: Principalmente mordidas y otras heridas producidas por peces, caracoles, el poliqueto *Hermodice carunculata* y quizás erizos (Raymundo et al. 2008), parte de las cuales quizás quedan incluidas en la categoría LNC, dentro de signos (Anexo 2).

4.2.1. Prevalencia de signos y frecuencia de otras afecciones en Especies Clave

4.2.1.1 Prevalencias a Escala de Arrecifes y de Especies: La susceptibilidad aparente de las especies clave a signos potencialmente relacionados con enfermedades descritas (ver Anexo 2) varió entre los arrecifes, pero en general su prevalencia por arrecife tendió a ser mayor en corales masivos de los géneros *Orbicella* y *Pseudodiploria* (signos amarillos, signos oscuros y lesiones expuestas), mientras que en corales ramificados del género *Acropora*, los signos blancos fueron relativamente bajos (excepto en *A. cervicornis*) (Fig. CC.1).

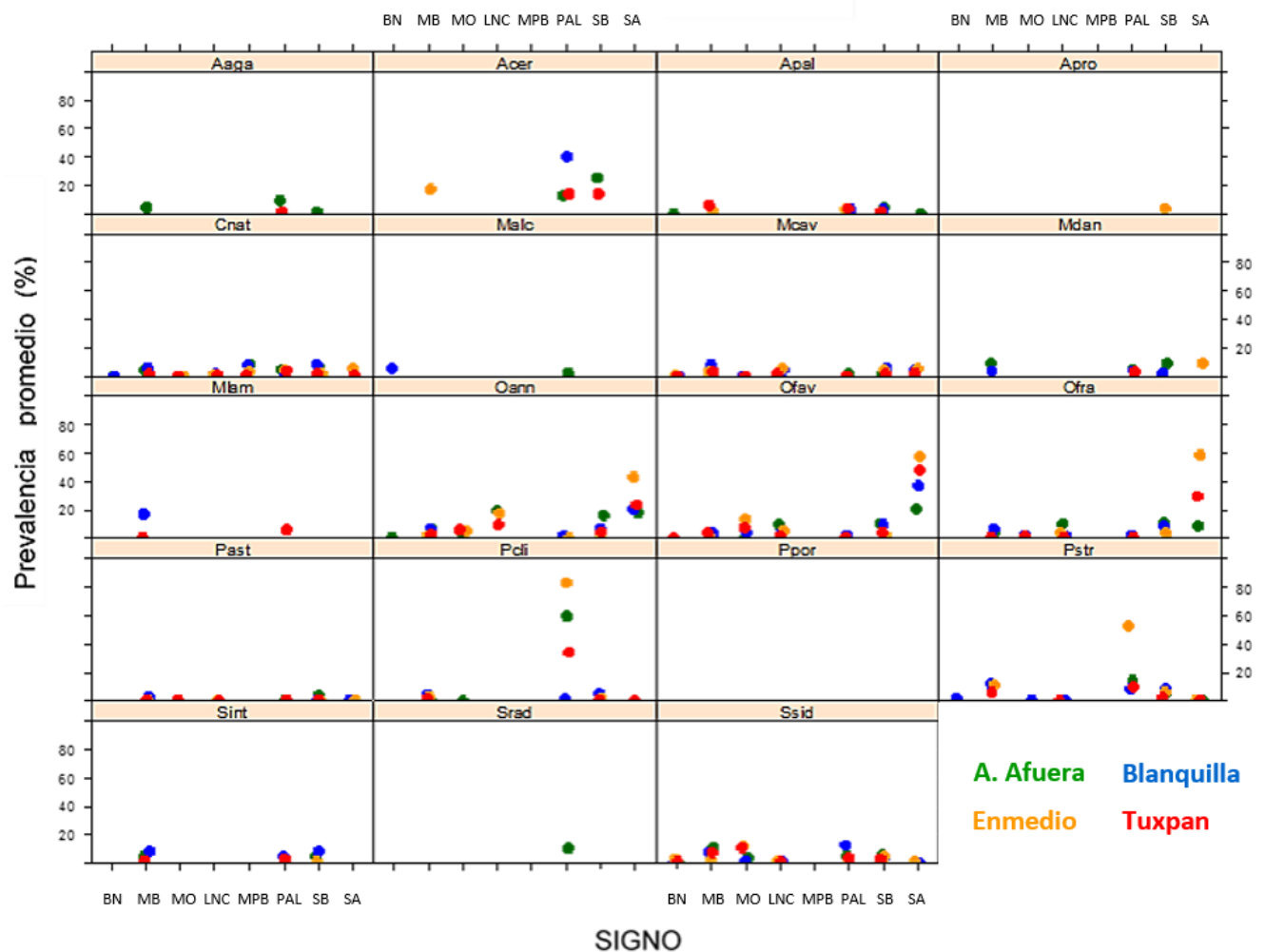


Figura CC-1 Prevalencia promedio de SIGNOS de enfermedad en las especies registradas con más de 50 colonias en los arrecifes Anegada de Afuera, Blanquilla, Enmedio y Tuxpan en el verano de 2014. BN: banda negra, MB: manchas blanqueadas, MO: manchas oscuras, LNC: lesión no colonizada, MPB: múltiples puntos blancos, PAL: pálida, SB: signos blancos, SA: signos amarillos (ver código de especies en Anexo 1).

Por otro lado hubo varias especies que no mostraron signos pero, con la excepción de *Siderastrea siderea*, éstas correspondieron a especies raras o poco abundantes (Fig. CC-1).

Para conocer si los cuatro arrecifes estudiados tenían los mismos niveles de prevalencia global, se estimó la prevalencia media de los signos abundantes en los cuatro arrecifes, utilizando únicamente las especies que tenían un mínimo de 50 colonias afectadas por signos.

La comparación con base en el solapamiento de intervalos de confianza creíbles, estimados con el método bayesiano, mostró que el arrecife de Enmedio era el más afectado por signos de enfermedad (media=24.0, IC= 22.6 a 25.3) y el de Tuxpan el menos (media=14.7, IC= 14.0 a 15.4), mientras que los arrecifes de Anegada de Adentro y la Blanquilla tuvieron valores intermedios que no fueron significativamente diferentes entre sí (Fig. CC-2). Estos resultados fueron similares a los obtenidos con una prueba pareada múltiple, aplicada a los coeficientes del modelo logístico (Tabla CC-1), que se expresan con un código de letras en la figura CC-2.

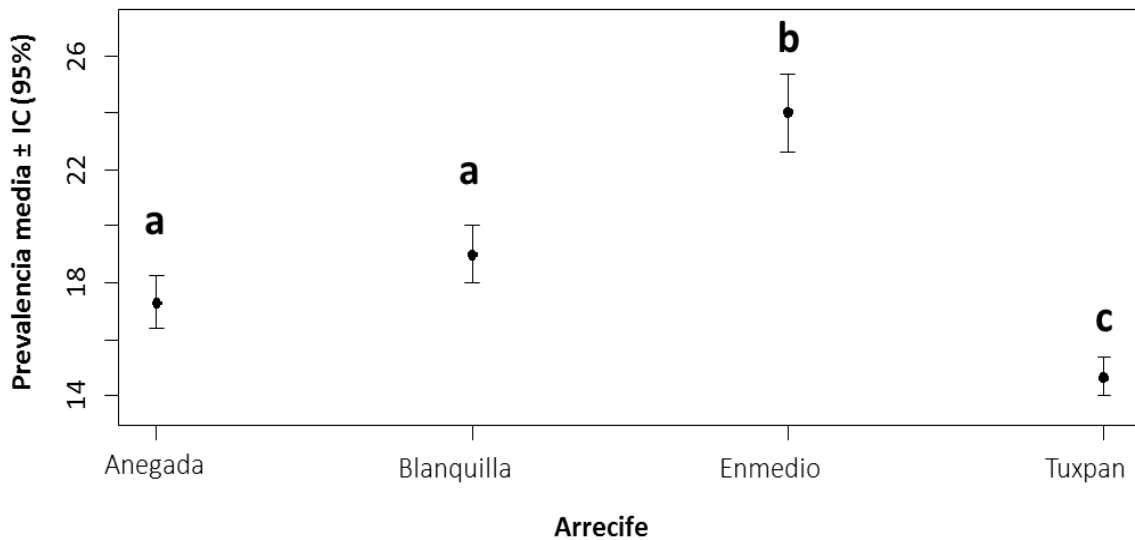


Figura CC-2. SIGNOS por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial bayesiano. Las especies incluidas (Cnat, Mcav, Oann, Ofav, Ofra, Pstr y Ssid; ver código de especies en Anexo 1) tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas por signos blancos, amarillos, manchas oscuras, manchas blanqueadas y puntos blancos múltiples. Las letras sobre las barras indican el resultado de comparaciones múltiples *post hoc*, donde letras iguales indican que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$) entre arrecifes.

Tabla CC-1. Modelo logístico de prevalencia de signos entre arrecifes: glm (cbind(signos, N) ~ arrecife, binomial). Los coeficientes estimados corresponden al tamaño del efecto en momios, el primer contraste (valor de p) corresponde a la hipótesis nula del intercepto (en este caso Enmedio) significativamente distinto de 0 y los demás contrastes indican la significancia de la diferencia entre cada uno de ellos con el arrecife de Enmedio, no entre ellos.

<i>Arrecife</i>	<i>Estimador</i>	<i>SE</i>	<i>z</i>	<i>p</i>	
<i>Enmedio</i>	1.1536	0.0377	30.61	2.00E-16	***
<i>A. Adentro</i>	0.4083	0.0512	7.98	1.51E-15	***
<i>Blanquilla</i>	0.2949	0.0505	5.84	5.18E-09	***
<i>Tuxpan</i>	0.6045	0.0473	12.78	2.00E-16	***

Devianza Residual: 23369 con 25189 grados de libertad

Devianza Nula: 23536 con 25192 grados de libertad

Párametro de dispersión con modelo quasibinomial: 1.000159

Los corales más afectados, por los signos de enfermedad que se registraron con mayor prevalencia (signos blancos, signos amarillos, manchas oscuras, manchas blanqueadas y puntos blancos múltiples) en el conjunto de los cuatro arrecifes estudiados, pertenecieron a las tres especies del género *Orbicella* (Fig. CC-3).

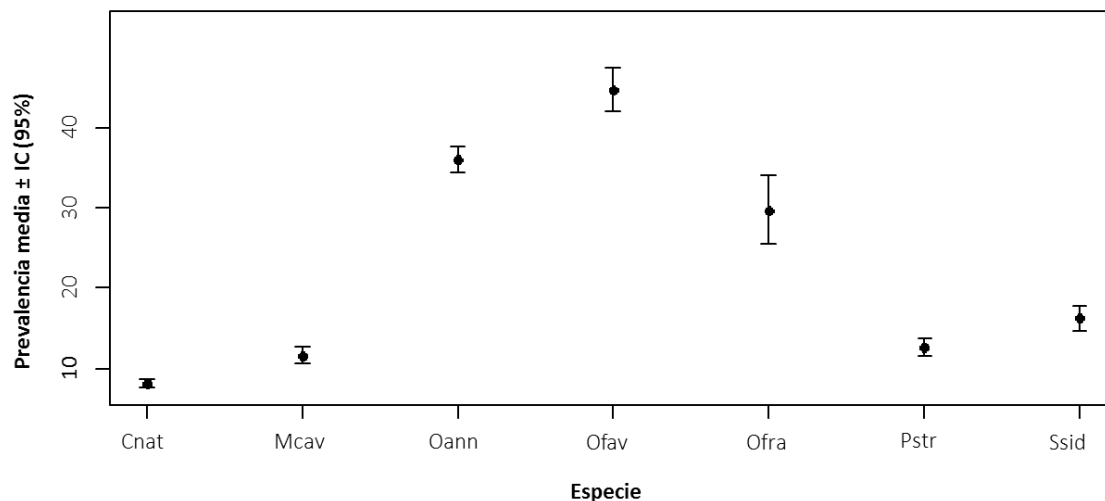


Figura CC-3. SIGNOS por ESPECIE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) en los cuatro arrecifes, estimados mediante el método binomial exacto (ver Anexo 1 para el código de especies). Las especies seleccionadas tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas por signos blancos, amarillos, manchas oscuras, manchas blanqueadas y puntos blancos múltiples.

A este nivel de análisis, basado en el promedio de todos los signos comunes de todas las especies abundantes, parece que las diferencias registradas se deben a particularidades de los arrecifes, más que a características generales del SALT o del SAV. Sin embargo, este enfoque, aunque útil para entender niveles de susceptibilidad generales, no permite discernir si esas diferencias corresponden a los mismos elementos, por lo que para evaluar formalmente las diferencias es necesario conocer los niveles de prevalencia por signo, por especie y por arrecife mediante el análisis de los intervalos de confianza.

4.2.1.2 Signos Amarillos por Arrecife y Especie: Para este análisis únicamente se incluyeron a las especies clave que tuvieron colonias afectadas por este signo (las del género *Orbicella*, *Colpophyllia natans* y *Montastraea cavernosa*).

La prevalencia promedio de signos amarillos fue considerablemente mayor en los arrecifes del SALT (10.5 %) que los arrecifes del SAV (2.9 %; Fig. CC-4). Sin embargo, la prevalencia de este signo a nivel de especies varió considerablemente como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT (Enmedio y Tuxpan), la mitad de las 10 especies de coral clave presentaron signos amarillos, pero la mayor prevalencia se encontró en las especies del género *Orbicella* (Fig. CC-4), que mostraron una prevalencia global promedio superior al 50%. Los valores de prevalencia de signos amarillos más altos se registraron en el arrecife de Enmedio en donde los valores promedio en *O. faveolata* y *O. franksi* fueron cercanos al 60%, aunque sólo en el caso de *O. franksi* la diferencia fue significativa. Para *O. annularis* también se observó una diferencia significativa en la prevalencia promedio de signos amarillos entre el arrecife Enmedio (cercano al 40%) y el arrecife Tuxpan (cercano al 25%). La prevalencia promedio en las otras dos especies afectadas por signos amarillos en los arrecifes del SALT, *Colpophyllia natans* y *Montastraea cavernosa*, fueron menores al 5%. En *C. natans* la mayor proporción correspondió a las colonias del arrecife de Enmedio, prevalencia que fue significativamente diferente de la del arrecife Tuxpan. Para *M. cavernosa* la diferencia entre arrecifes en prevalencia promedio de signos amarillos no fue significativamente diferente, pero se aprecia un valor promedio mayor en el arrecife de Enmedio (Fig. CC-4).

En los arrecifes del SAV (Anegada de Adentro y Blanquilla), cuatro especies de coral mostraron afectación por el signo amarillo: *M. cavernosa* y las tres especies del género *Orbicella*. En contraste con el SALT, la prevalencia promedio de las especies de *Orbicella* fue considerablemente menor, cercana a 25% (Fig. CC-4). En el arrecife La Blanquilla los niveles de prevalencia fueron significativamente mayores que los registrados en la Anegada de Adentro para *O. faveolata* y *O. franksi*, mientras que los valores para *O. annularis*, menores al 25%, fueron muy similares y no hubo diferencias significativas entre arrecifes. Los valores de prevalencia promedio también fueron significativamente mayores en el arrecife La Blanquilla para *M. cavernosa*, aunque el promedio en ambos casos fue menor al 5% (Fig. CC-4).

Globalmente, la especie que tuvo tendencia a tener la mayor prevalencia de signos amarillos fue *O. faveolata*, seguida en proporción de afectación por *O. franksi*. La menor prevalencia entre las *Orbicellas* se registró en *O. annularis*; hecho que tuvo una fuerte influencia en el contraste de prevalencia de signos por especie en el conjunto de los cuatro arrecifes (Fig. CC-2).

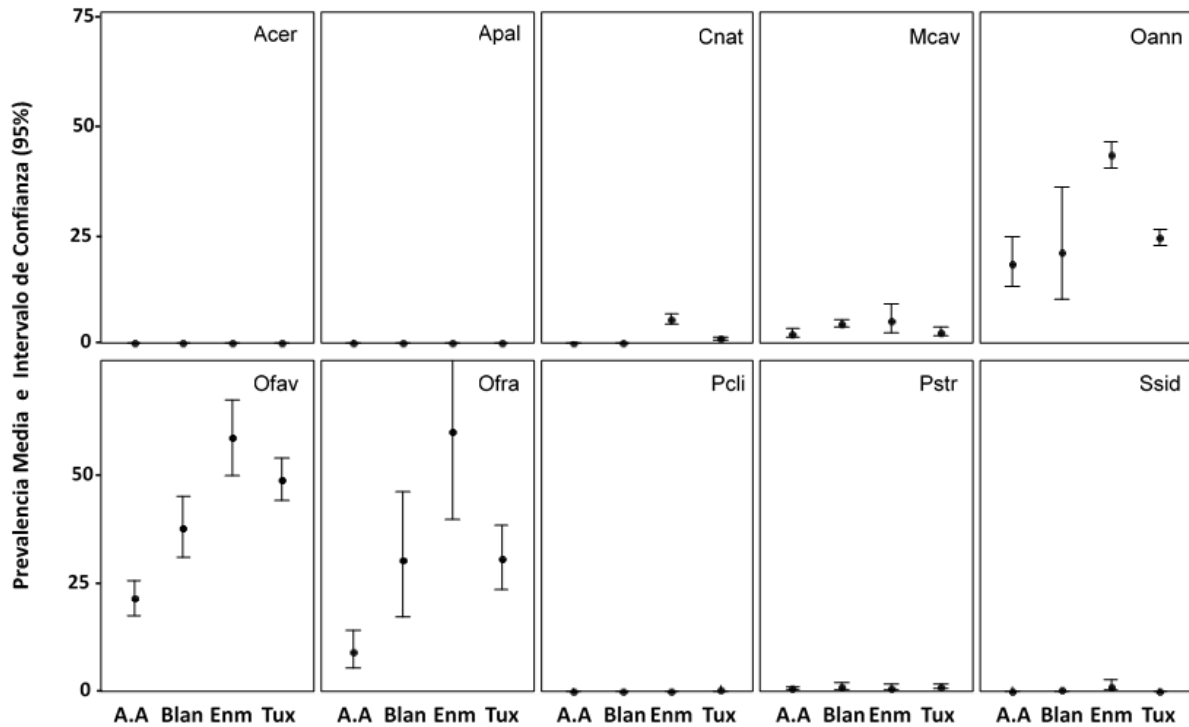


Figura CC-4. SIGNOS AMARILLOS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

4.2.1.3 Signos Blancos por Arrecife y Especie: A diferencia de lo observado con los signos amarillos, los signos blancos estuvieron presentes en todas las especies de coral clave y su prevalencia promedio fue considerablemente menor en los arrecifes del SALT (2.3 %) que en los arrecifes del SAV (5.9 %; Fig. CC-5). Sin embargo, la prevalencia de signos blancos varió considerablemente a nivel de especie, como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT, la prevalencia promedio de signos blancos tuvo tendencia a ser menor al 5% en todas las especies, excepto en *Acropora cervicornis* en el arrecife

Tuxpan en el que se registró una prevalencia del orden de 15% para este signo, aunque este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias de esta especie fue muy bajo. En contraste, la afectación por este signo en *A. palmata* fue muy baja, menor del 2%, y las diferencias entre los dos arrecifes no fueron significativas. El mismo patrón se observó en *C. natans* y *Pseudodiploria clivosa*. Valores de prevalencia promedio un poco mayores, pero menores al 5%, se registraron en *M. cavernosa*, *O. annularis*, *O. faveolata*, *O. franksi* y *Siderastrea siderea* (Fig. CC-5) En el caso de *Pseudodiploria strigosa* si se observaron diferencias significativas en la prevalencia promedio de signos blancos entre los dos arrecifes, en donde el mayor valor correspondió al arrecife de Enmedio, cercano a 5%, en contraste con el observado en el arrecife de Tuxpan, cercano a 2% (Fig. CC-5).

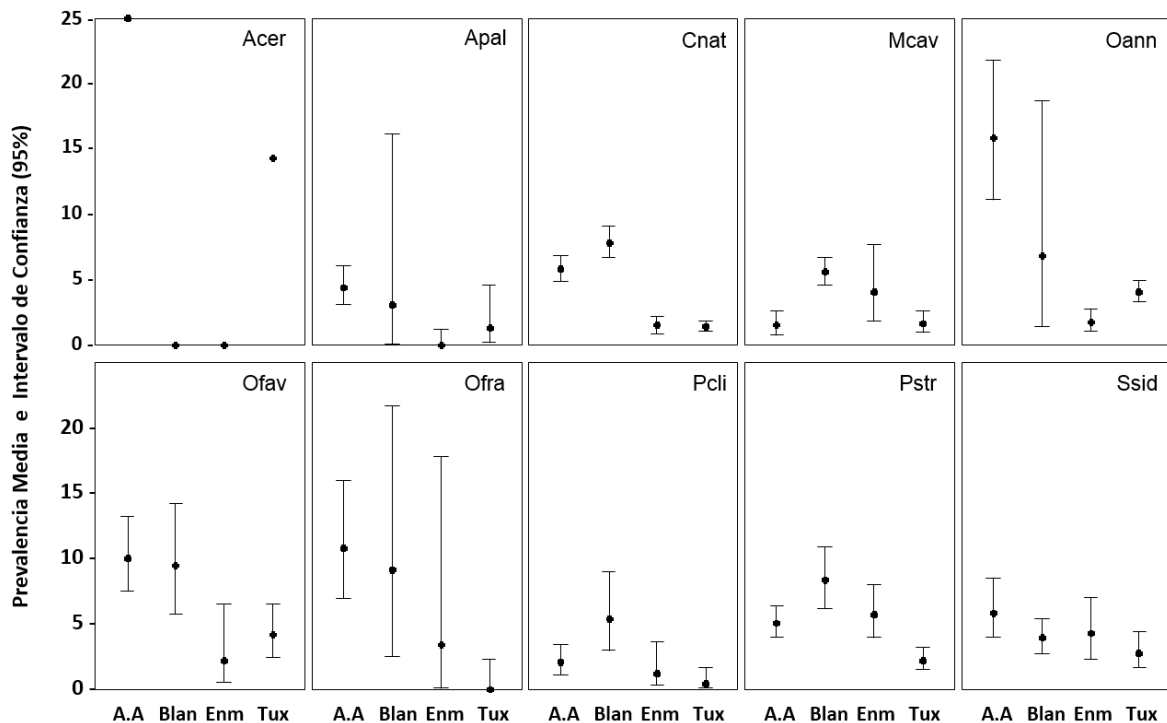


Figura CC-5. SIGNOS BLANCOS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de especies clave por arrecife, estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

En los arrecifes del SAV, los valores de prevalencia de signos blancos observados fueron mucho más variables. *Acropora cervicornis* en una estación de muestreo en el arrecife Anegada de Adentro mostró una prevalencia del orden de 25% (pero como se explicó antes este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias fue muy bajo). La prevalencia promedio de signos blancos en *A. palmata* fue menor del 5%, sin diferencias significativas entre los dos arrecifes. El mismo patrón, aunque con

valores un poco más elevados se observaron en *P. clivosa*, *P. strigosa*, y *S. siderea*. Tampoco se encontraron diferencias significativas entre los arrecifes para *O. faveolata* y *O. franksi*, aunque en este caso los valores de prevalencia fueron cercanos a 10%, y en el caso de *O. annularis*, que mostró una alta variación, tampoco hubo diferencia significativa, aunque Anegada de Afuera mostró una prevalencia promedio del 15%, mientras que en La Blanquilla la prevalencia promedio fue cercana a 7% (Fig. CC-5). Diferencias significativas se encontraron en *M. cavernosa* y *C. natans*, que si bien tuvieron prevalencias promedio menores a 10%, los valores más altos se encontraron en el arrecife La Blanquilla en ambos casos (Fig. CC-5).

Considerando a los cuatro arrecifes en conjunto, las especies que tendieron a presentar una mayor prevalencia por signos blancos fueron las del género *Orbicella*, lo que aunado a la alta prevalencia de signos amarillos contribuyó a los altos valores registrados para las especies de este género (Fig. CC-2). Por otro lado, aunque *P. strigosa* y *C. natans* mostraron valores relativos elevados en el caso particular de los arrecifes del SAV, su efecto global fue pequeño a esa escala.

4.2.1.4 Manchas Blanqueadas por Arrecife y Especie: En forma similar a lo observado con los signos blancos, el signo caracterizado por la presencia de manchas blanqueadas estuvo presente en todas las especies clave y el patrón general fue también similar, ya que la mayor prevalencia promedio se observó en los arrecifes del SAV (5.9 %), mientras que los arrecifes del SALT la prevalencia promedio fue considerablemente menor (3.0 %; Fig. CC-6). Sin embargo, la prevalencia a nivel de especies varió considerablemente como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT, la prevalencia promedio de manchas blanqueadas tuvo tendencia a ser menor al 5%, excepto para el arrecife Tuxpan en el que *S. siderea* mostró una prevalencia cercana al 7% (Fig. CC-6). En el arrecife En medio, *Acropora cervicornis* tuvo un valor de prevalencia del 17%, pero como ya se ha explicado este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias registradas fue muy bajo. La afectación por este signo en *A. palmata* fue muy baja, menor al 2%, sin diferencias entre los dos arrecifes. De hecho, la mayoría de las especies no presentaron diferencias significativas entre arrecifes, excepto *O. annularis* y *S. siderea* que mostraron un valor mayor en el arrecife de Tuxpan, mientras que *P. strigosa* mostró un patrón inverso, con mayor prevalencia en el arrecife de Enmedio (Fig. CC-6).

En los arrecifes del SAV los valores de prevalencia observados fueron mucho más variables. *A. cervicornis* no presentó este signo y la prevalencia promedio en *A. palmata* fue menor al 2%, sin diferencias significativas entre los dos arrecifes. Este mismo patrón, de diferencias no significativas entre los dos arrecifes, aunque con valores un poco más elevados, cercanos al 10%, se observó en *P. strigosa* y *S. siderea*. Las *Orbicellas* en este caso presentaron valores de prevalencia promedio menores: *O. annularis* con una prevalencia cercana al 7%, *O. franksi* cercana al 6% y *O. faveolata*

con valores promedio menores al 5%. Las tres especies que mostraron tener diferencias significativas entre arrecifes tuvieron valores mayores en el arrecife La Blanquilla: *M. cavernosa* con una prevalencia promedio cercana al 7%, *C. natans* al 5% y *P. clivosa*, menor al 5% (Fig. CC-6).

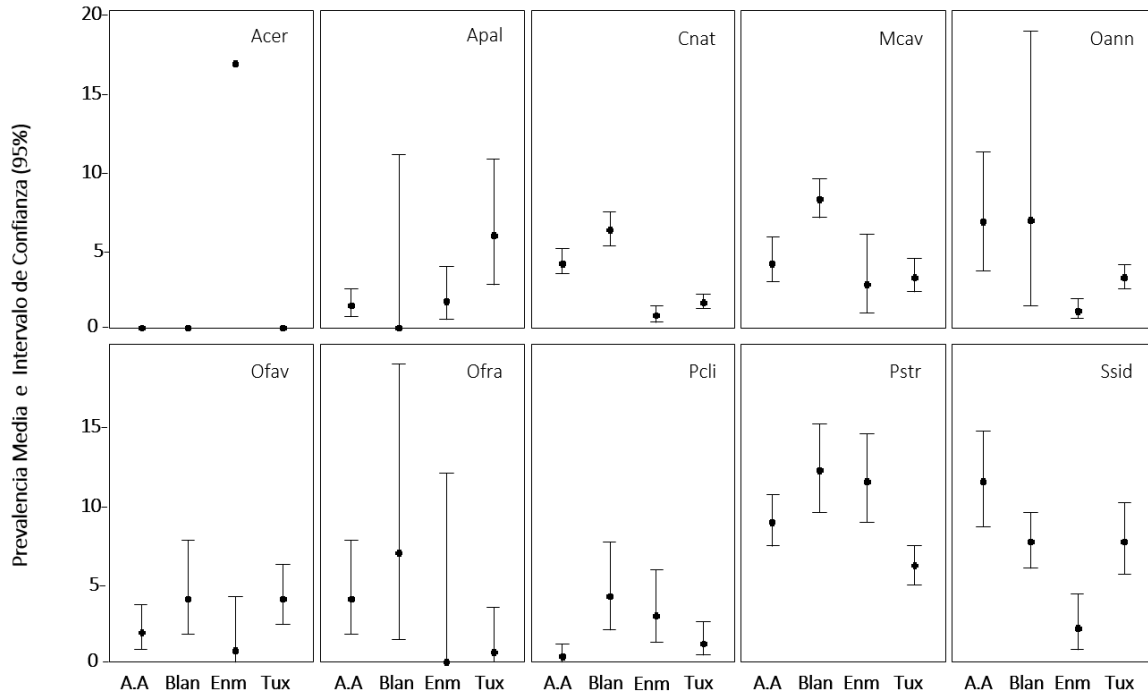


Figura CC-6. MANCHAS BLANQUEADAS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

En términos de las especies más afectadas por el signo de manchas blanqueadas se observó que *P. strigosa* mostró niveles de prevalencia mayores, mientras que en las otras especies no se pudieron identificar tendencias claras debido a los bajos valores y a la alta variabilidad entre sistemas arrecifales, lo que se refleja en que no hubo una influencia notable en el contraste de prevalencia de signos de enfermedad por especie cuando se consideraron a los cuatro arrecifes en conjunto (Fig. CC-2).

4.2.1.5 Manchas Oscuras por Arrecife y Especie: Este signo estuvo presente en todas las especies, excepto en *A. cervicornis*. En forma similar a lo observado con los signos amarillos, la mayor prevalencia promedio de manchas oscuras se observó en los arrecifes del SALT (3.0 %), mientras que los arrecifes del SAV presentaron una prevalencia promedio considerablemente menor (0.4 %; Fig. CC-7). Sin embargo, la

prevalencia a nivel de especies varió considerablemente como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT las especies *A. palmata*, *C. natans*, *M. cavernosa*, *O. franksi* y *P. strigosa* tuvieron valores de prevalencia promedio muy bajos, menores al 2%, y no se registraron diferencias significativas entre los arrecifes correspondientes. Tres especies presentaron valores de prevalencia promedio considerablemente mayores, pero sin diferencias significativas entre arrecifes: *O. faveolata* y *S. siderea*, cercanos al 10%, y *O. annularis*, cercano al 7% (Fig. CC-7).

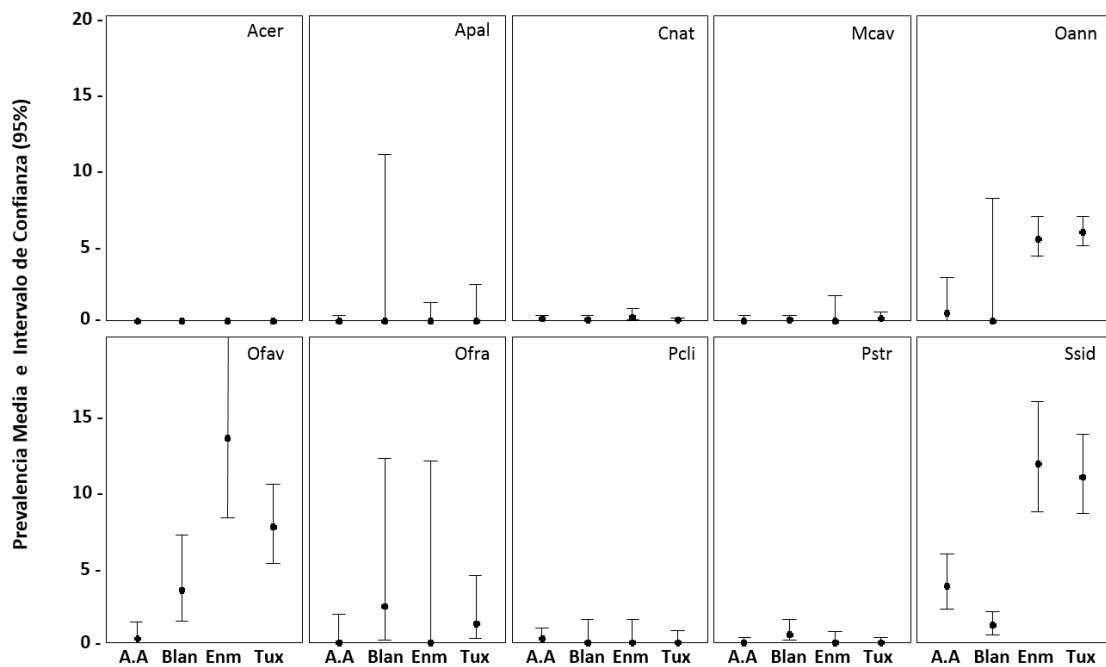


Figura CC-7. MANCHAS OSCURAS en ESPECIES clave por ARRECIFE: Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras, estimados mediante el método binomial exacto). Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

En los arrecifes del SAV todas las especies presentaron valores de prevalencia promedio de manchas oscuras menores al 5%. En forma parcialmente similar a lo observado en los arrecifes del SALT, y dentro del mismo intervalo, los corales *O. faveolata* en La Blanquilla y *S. siderea* en Anegada de Afuera presentaron los valores más altos de manchas oscuras, sin embargo, las diferencias en ambos casos fueron significativas entre arrecifes (Fig. CC-7).

En términos generales *O. faveolata*, *S. siderea* y *O. annularis* tuvieron tendencia a ser las especies más afectada por el signo de las manchas oscuras, particularmente en

los arrecifes del SALT. Esto tuvo una influencia moderada en el contraste de prevalencia de signos por especie considerando los cuatro arrecifes en conjunto (Fig. CC-2).

4.2.1.6 Puntos Blancos Múltiples por Arrecife y Especie: A diferencia de otros signos de enfermedad que se registraron afectando a múltiples especies de coral, el signo de puntos blancos múltiples únicamente se registró en una especie (*C. natans*) de las 27 registradas en los arrecifes estudiados. La etiología de este signo se desconoce y hasta donde sabemos no ha sido reportado previamente en la literatura para otros arrecifes del Golfo de México ni del Caribe.

La prevalencia promedio de este signo en el área de estudio fue relativamente baja, cercana a 5%, pero la diferencia en prevalencia promedio entre los arrecifes del SAV (7.8%) y los del SALT (1.5%) fue significativa. La diferencia entre arrecifes del SALT fue significativa, pero no así entre los arrecifes del SAV (Fig. CC-8).

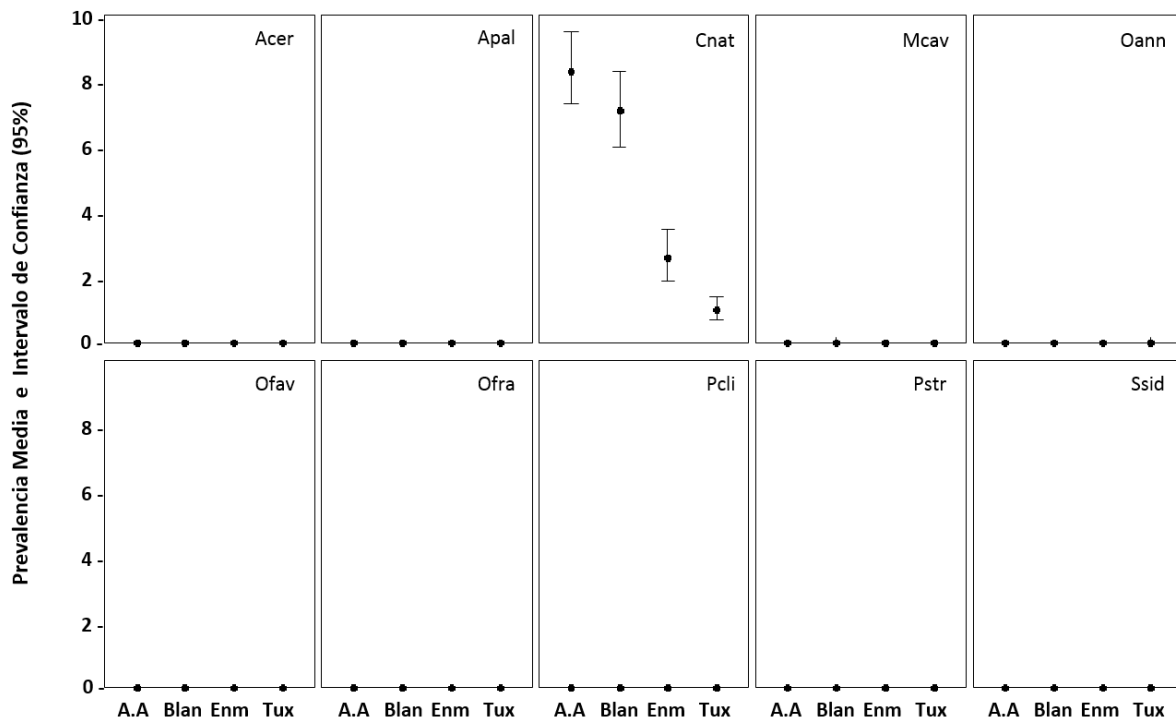


Figura CC-8. PUNTOS BLANCOS MÚLTIPLES en ESPECIES clave por ARRECIFE. Prevalencia media ajustada (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras), estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

4.2.2 Otras Afecciones

Además de los signos relacionados con enfermedades, se registraron también otros organismos creciendo encima de, o sobrecreciendo a, las colonias de coral en todas las especies. Los organismos registrados fueron: tapetes de algas, algas coralináceas en costra, algas filamentosas, el gorgonáceo *Erithropodium caribaeorum* y esponjas. En general, la frecuencia con la que se registraron estos organismos fue baja, a excepción de los tapetes de algas, por lo cual se analizan por separado.

4.2.2.1 Frecuencia de Tapetes de Algas a Escala de Arrecifes y de Especies: Los tapetes de algas se registraron en todas las especies de coral clave y en un alto porcentaje promedio en los dos sistemas arrecifales: SAV (50.1 %); SALT (47.3 %; Fig. CC-9). En el caso de esta afección se incluyó al coral *Stephanocoenia intersepta* en las estimaciones por presentar un alto número de colonias afectadas en el arrecife la Blanquilla.

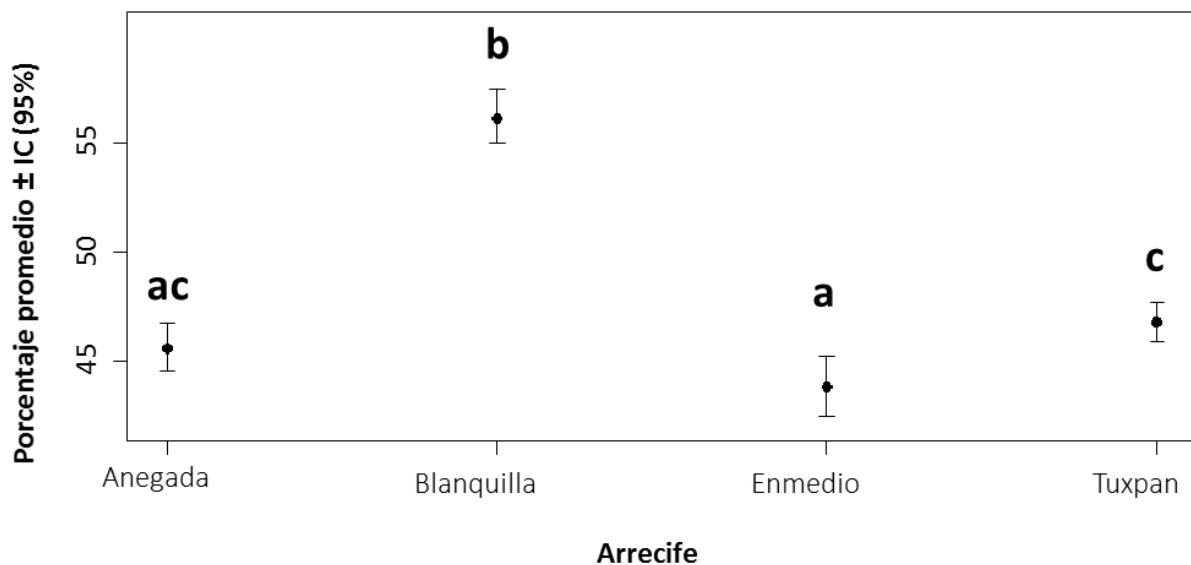


Figura CC-9. TAPETES de ALGAS por ARRECIFE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de estimados mediante el método binomial bayesiano. Las especies incluidas: Apal, Cnat, Mcav, Oann, Ofav, Ofra, Past, Pcli, Pstr, Sint y Ssid tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas. Las letras sobre las barras indican el resultado de las comparaciones múltiples, donde letras iguales indican que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$) entre arrecifes.

Para conocer si los arrecifes estudiados tenían los mismos porcentajes de afectación por tapetes de algas, se utilizaron los datos de aquellas especies que tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas. La comparación, con base en el solapamiento de intervalos de confianza creíbles estimados con el método bayesiano, mostró que el

arrecife La Blanquilla fue el más afectado, con un promedio mayor a 50%, y que sus valores fueron significativamente más altos que en los otros arrecifes (Fig. CC-9). Los otros tres arrecifes presentaron porcentajes de afectación menores al 50% y el arrecife de Enmedio presentó el valor menor, que fue significativamente diferente al registrado en el arrecife Tuxpan, pero no al de la Anegada de Afuera (Fig. CC-9). Estos resultados fueron similares a los obtenidos con una prueba pareada múltiple aplicada a los coeficientes del modelo logístico (Tabla CC-2) que se expresan con un código de letras en la Figura CC-9.

Tabla CC-2. Modelo logístico de proporción de tapetes de algas entre arrecifes: glm (cbind(TA, N) ~ arrecife, binomial). Los coeficientes estimados corresponden al tamaño del efecto en momios, el primer contraste (valor de p) corresponde a la hipótesis nula del intercepto (en este caso Enmedio) significativamente distinto de 0 y los demás contrastes indican la significancia de la diferencia entre cada uno de ellos con el arrecife de Enmedio, no entre ellos.

<i>Arrecife</i>	<i>Estimador</i>	<i>SE</i>	<i>z</i>	<i>p</i>	
<i>Blanquilla</i>	0.25131	0.02523	9.961	<2e-16	***
<i>A. Afuera</i>	-0.42703	0.03399	-12.564	<2e-16	***
<i>Emmedio</i>	-0.49981	0.03743	-13.354	<2e-16	***
<i>Tuxpan</i>	-0.37997	0.03128	-12.149	<2e-16	***

Devianza Residual: 43231 con 31222 grados de libertad

Devianza Nula: 42295 con 31219 grados de libertad

Parámetro de dispersión con modelo quasibinomial: 1.001493

A nivel de especies, los porcentajes de afectación promedio fueron relativamente similares, aunque con algunas excepciones, como es el caso de *A. palmata* quien fue la única especie que tuvo valores menores al 20% en ambos sistemas arrecifales, mientras que *O. franksi*, *S. intercepta* y *O. faveolata* presentaron valores muy elevados, mayores al 60% (Fig. CC-10).

4.2.2.2 Tapetes de Algas por Arrecife y Especie: Comparando los porcentajes promedio de afectación por tapetes de alga a nivel de arrecife y especie se encontró que, aun cuando los valores en general tuvieron tendencia a ser altos, hubo una variabilidad relativamente fuerte.

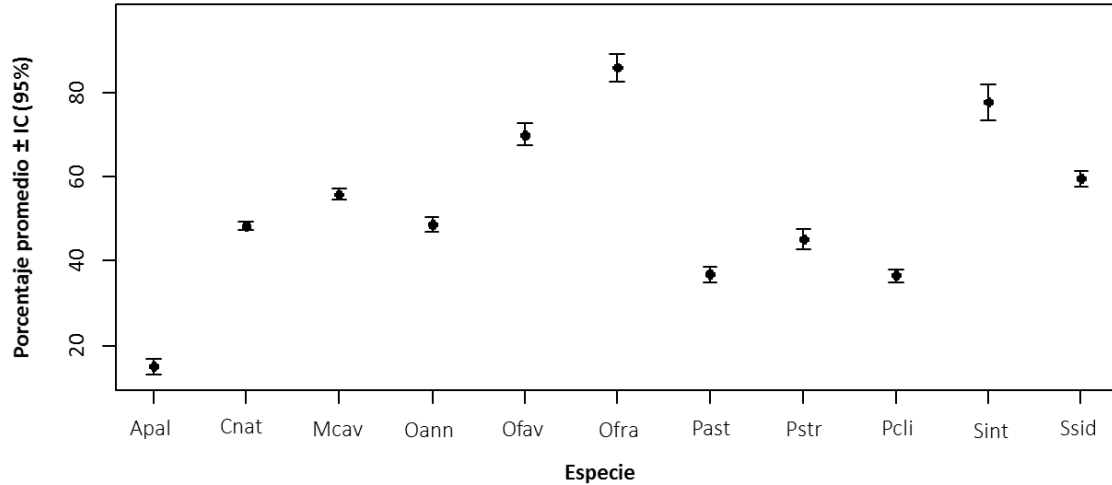


Figura CC-10. TAPETES de ALGAS por ESPECIE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) en los cuatro arrecifes, estimados mediante el método binomial exacto (ver Anexo 1 para el código de especies). Las especies seleccionadas tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas.

En los arrecifes del SALT, *A. cervicornis* mostró un porcentaje promedio de colonias afectadas del orden de 50%, pero, como se mencionó anteriormente, este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias fue muy bajo. En contraste el porcentaje de afectación en *A. palmata* fue relativamente bajo, menor al 10% (Fig. CC-10) y las diferencias entre los dos arrecifes no fueron significativas. Diferencias significativas y valores promedio de afectación del mismo orden (cercaos al 50%) se encontraron en las especies *C. natans* y *O. annularis*. El coral *O. franksi* presentó también diferencias significativas marginalmente, pero con valores muy elevados y que en el arrecife de Enmedio alcanzan el 100%; único caso de esta magnitud registrado en todo el estudio. En contraste *P. strigosa*, que también presentó diferencias marginalmente significativas, tuvo porcentajes de afectación promedio menores al 40% (Fig. CC-11). El resto de las especies clave no mostró diferencia significativa entre arrecifes, pero sí en niveles de afectación promedio, así *O. faveolata* y *S. siderea* mostraron valores cercanos al 70%, *M. cavernosa* al 57% y *P. clivosa* al 30% (Fig. CC-11).

En los arrecifes del SAV, *A. cervicornis* mostró un porcentaje promedio de colonias afectadas por tapetes de algas cercana al 30%, pero este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias fue muy bajo. En contraste, la afectación a *A. palmata* por tapetes de algas fue relativamente baja, aunque en el caso de Anegada de Afuera el porcentaje de colonias afectadas fue alto, cercano al 20% lo que representó más del doble de lo registrado en los otros arrecifes estudiados; esto determinó que la diferencia entre los dos arrecifes fue significativa (Fig. CC-11). Diferencias significativas, y valores promedio en un intervalo el 40% al 50%, se observaron en *P. strigosa* y *S. siderea*, mientras que *P. clivosa* en el arrecife La Blanquilla presentó valores

considerablemente más altos. *O. franksi* con diferencias marginalmente significativas, tuvo los valores más elevados, cercanos al 80%, patrón similar al observado en el SALT. El resto de las especies clave no mostraron diferencia significativas entre arrecifes, pero sí en los porcentajes promedio, así en *M. cavernosa* y *O. annularis* se estimaron valores cercanos al 50% y en *O. faveolata* al 70% (Fig. CC-11). *O. franksi* y *O. faveolata* y *Stephanocoenia intersepta*, pero no así *O. annularis*, tendieron a ser las más afectadas lo que contribuyó al contraste en el porcentaje de colonias afectadas por los tapetes de algas entre arrecifes (Fig. CC-9).

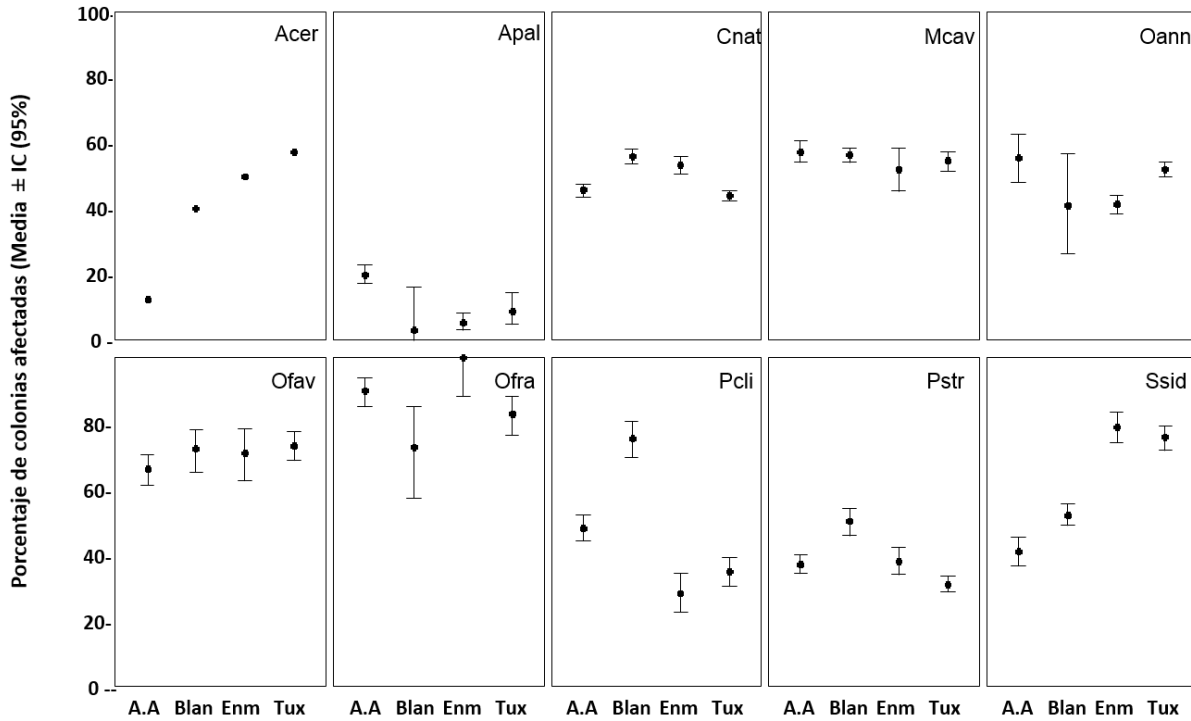


Figura CC-11. TAPETES DE ALGAS en ESPECIES clave por ARRECIFE (TA): Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

4.2.2.3 Frecuencia de Otros Organismos a Escala de Arrecifes y de Especies:

Como se explicó anteriormente, el porcentaje de colonias de coral afectadas por el sobrecrecimiento de algas coralíneas en costra, de algas filamentosas, del gorgonáceo *Erithropodium caribaeorum* y de esponjas, fue relativamente bajo, por lo que el análisis global (arrecifes o especies) se hizo considerando a estos grupos

bénticos en conjunto para las especies de coral clave. Sin embargo, su importancia relativa individual es analizada más adelante.

A escala global, el porcentaje promedio de colonias de coral que presentaron el conjunto de afecciones antes mencionado fue cercano al 10%. La comparación entre sistemas arrecifales mostró que el SAV tuvo un valor promedio significativamente más alto (12%) que el SALT (8%), aunque entre el arrecife Anegada de Afuera, del SAV, y el arrecife Enmedio, del SALT, no se encontró una diferencia significativa en dicho valor (Fig. CC-12). El número de colonias de coral afectadas por estos organismos en el arrecife Tuxpan fue considerablemente menor a la registrada en los otros tres arrecifes (Fig. CC-12).

Estos resultados fueron similares a los obtenidos en una prueba pareada múltiple aplicada a los resultados del modelo logístico (Tabla CC-3) que se expresan con un código de letras en la figura CC-11.

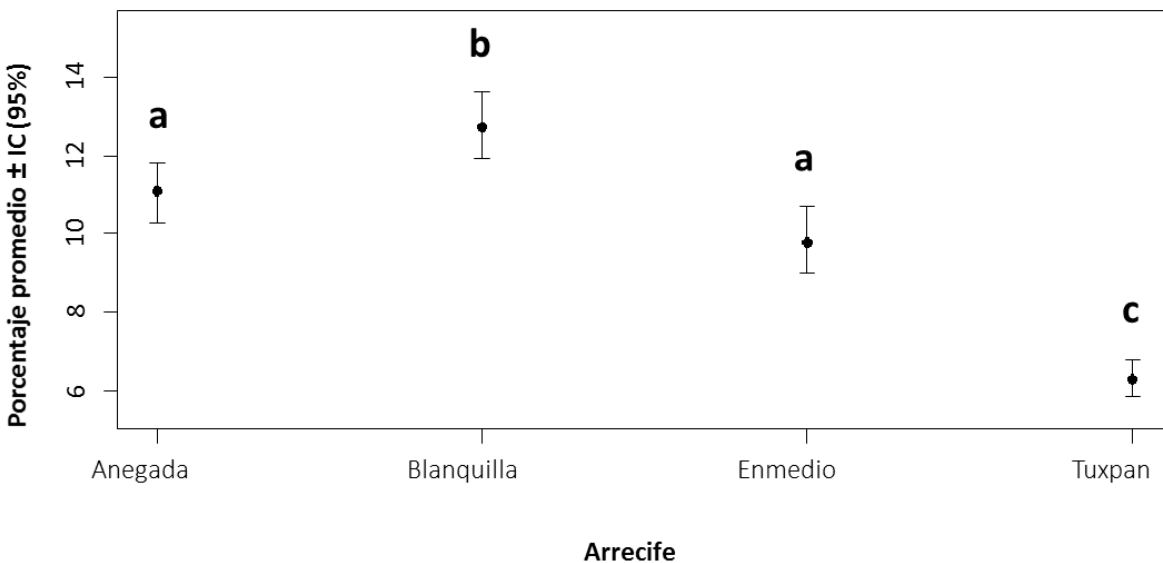


Figura CC-12. PRESENCIA de OTROS ORGANISMOS por ARRECIFE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de estimados mediante el método binomial bayesiano. Las especies incluidas (Cnat, Mcav, Oann, Ofav, Past, Pcli, Pstr y Ssid; ver código de especies Tabla Z-1), tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas con algas coralíneas en costra, algas filamentosas, esponjas y *Erithropodium caribaeorum*. Las letras sobre las barras indican el resultado de las comparaciones múltiples, donde letras iguales indican que no hay diferencia significativa ($p > 0.05$) entre arrecifes.

Tabla CC-3: Modelo logístico de proporción entre arrecifes: $\text{glm}(\text{cbind}(\text{otros}, N) \sim \text{arrecife}, \text{binomial})$. Los coeficientes estimados corresponden al tamaño del efecto en momios, el primer contraste (valor de p) corresponde a la hipótesis nula del intercepto (en este caso Enmedio) significativamente distinto de 0 y los demás contrastes indican la significancia de la diferencia entre cada uno de ellos con el arrecife de Enmedio, no entre ellos.

Arrecife	Estimador	SE	z	p	
Blanquilla	-2.1158	0.0407	-51.967	<2e-16	***
A. Afuera	-0.0217	0.0569	-0.381	0.7036	
Emmedio	-0.1362	0.0636	-2.141	0.0323	*
Tuxpan	-0.60363	0.05647	-10.689	<2e-16	***

Devianza Residual: 17249 con 29102 grados de libertad
 Devianza Nula: 17088 con 29099 grados de libertad
 Parámetro de dispersión con modelo quasibinomial: 1.0001

Considerando a los cuatro arrecifes en conjunto, las especies *O. annularis*, *P. strigosa* y en menor grado *O. faveolata*, tendieron a ser las más afectadas por sobrecrecimiento de otros organismos béticos (Fig. CC-13).

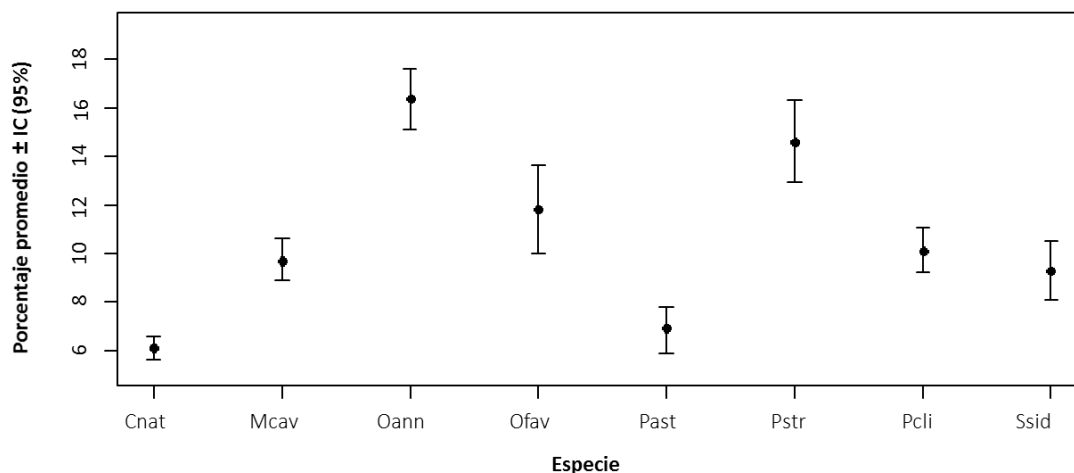


Figura CC-13. PRESENCIA de OTROS ORGANISMOS BÉTICOS por ESPECIE: Porcentaje (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) en los cuatro arrecifes, estimados mediante el método binomial exacto (ver Tabla Z-1 para el código de especies). Las especies seleccionadas tuvieron un mínimo de 50 colonias afectadas con algas coralináceas en costra, algas filamentosas, esponjas y *Erithropodium caribaeorum* (ver código de especies en Anexo 1).

4.2.2.4 Algas Coralináceas en Costra por Arrecife y Especie: Las algas coralináceas en costra se registraron creciendo encima de, o sobrecreciendo a, colonias de coral de todas las especies clave. El porcentaje promedio de colonias de coral afectadas fue mayor y más variable en el sistema arrecifal SAV (7.8%) que en el SALT (4.4 %; Fig. CC-14). Sin embargo, el porcentaje de afectación por estas algas varió entre las especies de coral considerablemente, como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT, el porcentaje de colonias de coral sobrecrecidas por algas coralináceas en costra tendió a ser menor al 10% en todas las especies, con excepción de *A. cervicornis* en el arrecife Enmedio, en donde se registró un valor del orden de 18%, aunque este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias fue muy bajo. El porcentaje promedio de colonias afectadas de *A. palmata* fue menor al 3% en ambos arrecifes. De todas las especies de coral solamente se observaron diferencias significativas en el porcentaje de colonias afectadas por estas algas entre arrecifes en *C. natans* y *O. annularis*, siendo los valores más altos en el arrecife Tuxpan que en el arrecife Enmedio, sin embargo, en ambas especies el porcentaje de colonias afectadas fue bajo en general, con valores promedio cercanos al 2% en la primera y a 6% en la segunda (Fig. CC-14). *S. siderea* destacó por presentar valores muy bajos, cercanos al 1%, en ambos arrecifes (Fig. CC-14).

En los arrecifes del SAV, no se registró la presencia de estos organismos en *A. cervicornis* y el porcentaje de colonias afectadas de *A. palmata* fue menor del 4%, sin diferencias significativas entre los dos arrecifes (Fig. CC-14). Otras especies que no mostraron diferencias significativas en el porcentaje de colonias afectadas entre arrecifes fueron *M. cavernosa*, *O. faveolata*, *O. franksi* y *P. strigosa*, todas con porcentajes promedio cercanos al 10% (Fig. CC-14). Aunque *S. siderea*, tampoco presentó diferencias significativas entre arrecifes el porcentaje de colonias de coral afectadas fue mayor a 10% en Anegada de Afuera (Fig. CC-14). *O. annularis* mostró diferencias claras en el valor promedio del porcentaje de colonias afectadas por algas coralináceas en costra entre los dos arrecifes del SAV, registrándose valores promedio mayores a 20% en el arrecife Anegada de Afuera y cercanos a 12% en el arrecife La Blanquilla, pero la variabilidad en ambos arrecifes fue muy alta por lo que las diferencias no fueron significativas (Fig. CC-14). Solamente *P. clivosa* mostró diferencias significativas entre arrecifes, siendo el porcentaje promedio de colonias afectadas por algas coralináceas en costra significativamente mayor en el arrecife La Blanquilla (38%) que en el arrecife Anegada de Afuera (< 10%; Fig. CC-14). En las demás especies el porcentaje de colonias afectadas por estas algas tendió a ser similar entre ambos arrecifes del SAV.

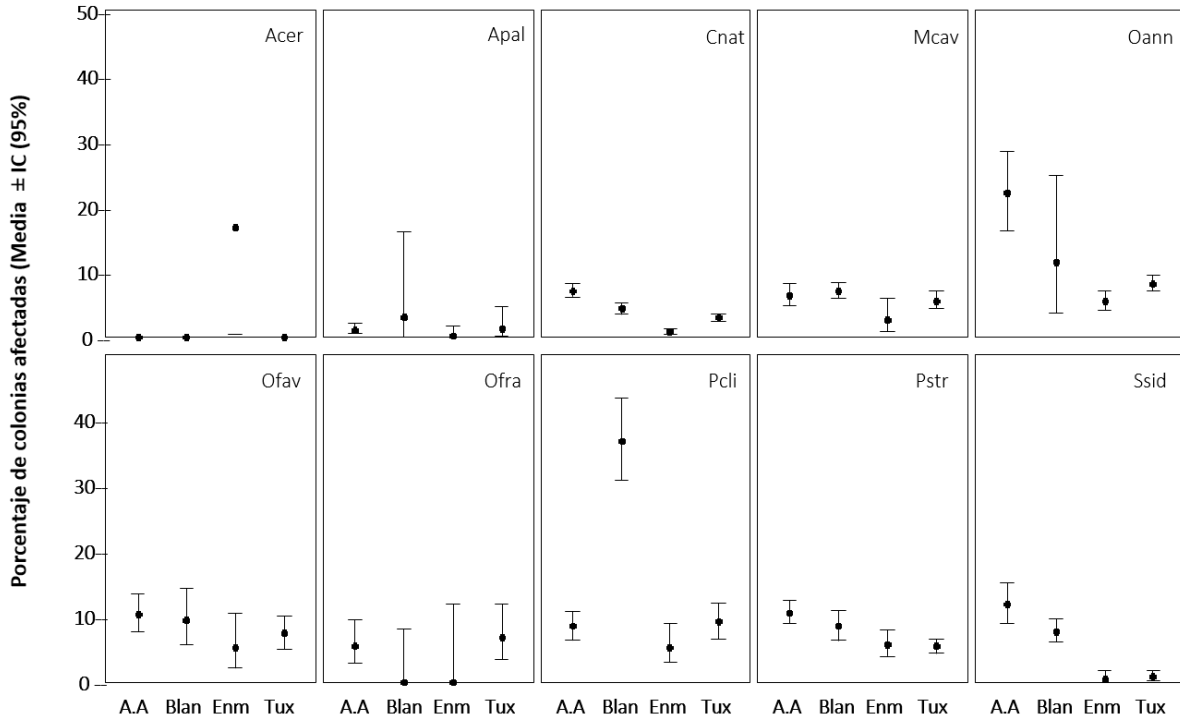


Figura CC-14. ALGAS CORALINÁCEAS EN COSTRA: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) de colonias de coral afectadas estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

4.2.2.5 Algas Filamentosas por Arrecife y Especie: Las algas filamentosas se registraron creciendo encima de, o sobrecreciendo a, colonias de coral de todas las especies clave en los dos sistemas arrecifales, excepto por *A. cervicornis* que no presentó colonias afectadas en ninguno de los dos. El porcentaje promedio de colonias de coral afectadas de manera global fue muy baja, del orden de 1.2%, aunque el porcentaje de colonias afectadas en los arrecifes del SAV fue considerablemente mayor (2.1 %) que en los arrecifes del SALT (0.2%; Fig. CC-15). Sin embargo, el porcentaje de afectación por estas algas varió entre las especies de coral considerablemente, como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT, no se encontraron colonias afectadas por estas algas en las especies *O. annularis*, *O. franksi* y *A. cervicornis*, y en el porcentaje de colonias afectadas fue menor al 1% en *C. natans*, *M. cavernosa*, *O. faveolata*, *P. clivosa* y *P. strigosa*, sin encontrarse diferencias significativas entre los arrecifes (Fig. CC-15). El porcentaje de colonias afectadas por algas filamentosas en *A. palmata* fue mayor en el

arrecife de Tuxpan que en el de Enmedio, mientras que para *S. siderea* el patrón fue inverso (Fig. CC-15).

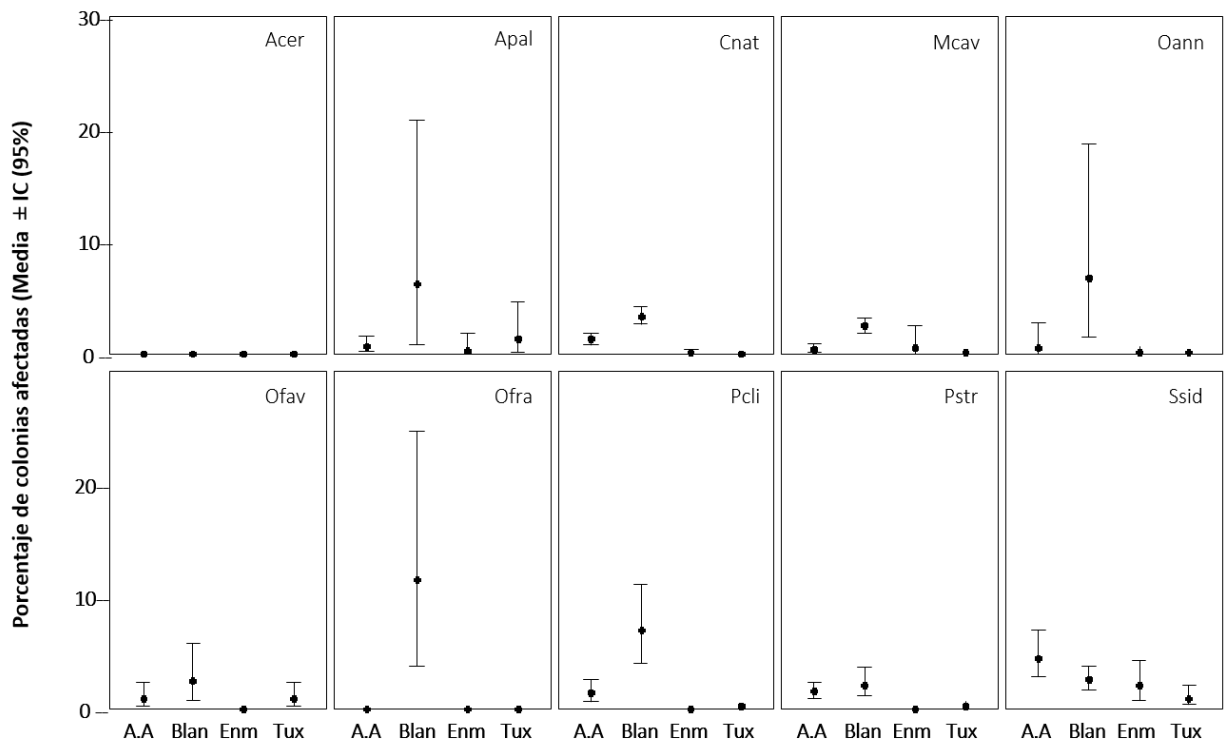


Figura CC-15. ALGAS FILAMENTOSAS: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

En los arrecifes del SAV el porcentaje promedio de colonias de coral afectadas por algas filamentosas tendió a ser más elevado y variable que en el SALT (Fig. CC-15). El valor más alto registrado para esta afección fue en *O. franksi* en el arrecife La Blanquilla (cercano al 12%), mientras que en Anegada de Afuera no se registraron colonias afectadas de esta especie. En *A. palmata* el valor más alto (cercano a 7%) también se registró en la Blanquilla, pero la variabilidad fue alta y por ende no se detectan diferencias entre los dos arrecifes. Un patrón similar se observó en *O. annularis*, *M. cavernosa*, *O. faveolata*, *O. franksi*, *P. clivosa* y *P. strigosa*. Con la excepción de *O. faveolata* y *P. clivosa* todas estas especies presentaron diferencias significativas en el porcentaje de colonias afectadas entre arrecifes. Solamente en *S. siderea* se observó una inversión de este patrón, registrándose los valores más altos en el arrecife Anegada de Afuera, pero sin diferencias significativas (Fig. CC-15).

En términos de las especies más afectadas por algas filamentosas, los valores tendieron a ser similares entre el SAV y el SALT, excepto para *A. palmata*, *O. annularis*, *P. clivosa* y *O. franksi*, pero sólo en los arrecifes del SAV y particularmente en La Blanquilla.

4.2.2.6 *Erythropodium caribaeorum* por Arrecife y Especie: Este gorgonáceo reptante en ocasiones puede sobrecrecer colonias vivas de coral y se registró en todas las especies de coral clave. Sin embargo, el porcentaje promedio de colonias afectadas en el área de estudio fue baja, del orden de 1.8%, pero con una fuerte diferencia entre los dos sistemas arrecifales; los arrecifes del SAV presentaron un porcentaje promedio considerablemente mayor (3.1 %) que la observada en los arrecifes del SALT (0.4%; Fig. CC-16). Sin embargo, estos valores están influenciados por la afectación a tres especies de coral, como se explica a continuación.

En los arrecifes del SALT, *A. cervicornis* mostró un alto número de colonias sobrecrecidas por *E. caribaeorum*, del orden de 15%, en el arrecife de Tuxpan, pero este valor debe ser tomado con precaución porque el número de colonias fue muy bajo. *O. annularis* mostró valores altos en los dos arrecifes del SALT, pero considerablemente mayor en el arrecife Enmedio, cercano al 18%, el cual constituyó el valor más alto registrado en la zona de estudio. *P. strigosa* también presentó el valor más alto de colonias afectas por este gorgonáceo en el arrecife Enmedio, y un valor considerablemente menor en el arrecife Tuxpan. En ambas especies la diferencia en el porcentaje de colonias afectas entre los dos arrecifes del SALT fue significativa. Para el resto de las especies, que tuvieron valores máximos del 3%, no se encontraron diferencias significativas entre arrecifes, aunque se aprecia una tendencia a valores mayores en el arrecife de Enmedio, excepto para *O. franksi* que mostró un patrón inverso (Fig. CC-16).

En los arrecifes del SAV todas las especies de coral presentaron valores muy bajos de afectación por *E. caribaeorum*, menores al 2%, excepto *O. annularis* que alcanzó un 3% en el arrecife de la Blanquilla. En ningún caso se encontraron diferencias significativas entre los dos arrecifes (Fig. CC-16).

En términos de las especies más afectadas, los valores tendieron a ser similares entre los dos sistemas arrecifales, excepto para *O. annularis* y *P. strigosa* que presentaron valores relativamente altos en el arrecife Enmedio y *A. cervicornis* en el arrecife Tuxpan (Fig. CC-16).

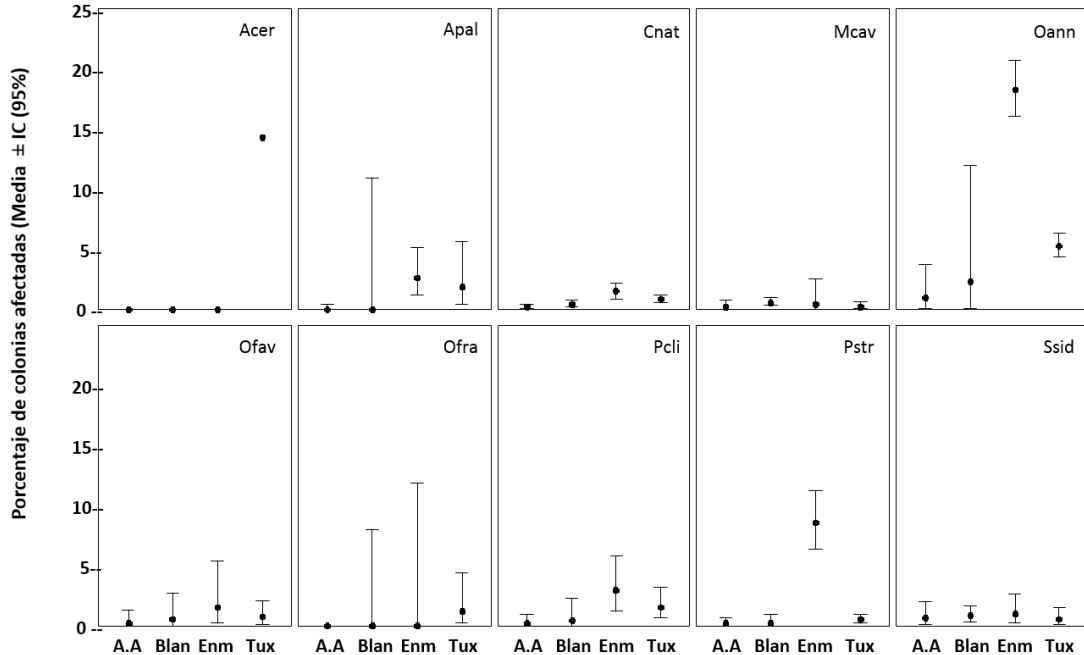


Figura CC-16. *Erythropodium caribaeorum*: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

4.2.2.7 Esponjas por Arrecife y Especie: No se registraron colonias sobrecrecidas por esponjas en *A. palmata* y *A. cervicornis* en ninguno de los arrecifes estudiados. En general el porcentaje de colonias afectas por esponjas fue muy baja, del orden de 1.3%, aunque los arrecifes del SAV presentaron un porcentaje promedio mayor (1.9%) que los arrecifes del SALT (0.4%; Fig. CC-17). Estos valores, sin embargo, reflejan el alto porcentaje de colonias sobrecrecidas por esponjas en tres especies, en modo similar a lo observado en el caso de colonias afectadas por *Erythropodium caribaeorum*, como se explica a continuación.

En los dos arrecifes del SALT, no se registraron esponjas creciendo sobre colonias de *A. palmata*, *A. cervicornis* y *P. clivosa* y en el caso de *O. franksi* tampoco se registraron en el arrecife de Enmedio. (Fig. CC-17). En el resto de las especies de coral clave los valores de sobrecrecimiento por esponjas fueron muy bajos, menores al 3% y en ningún caso se encontraron diferencias significativas entre arrecifes (Fig. CC-17).

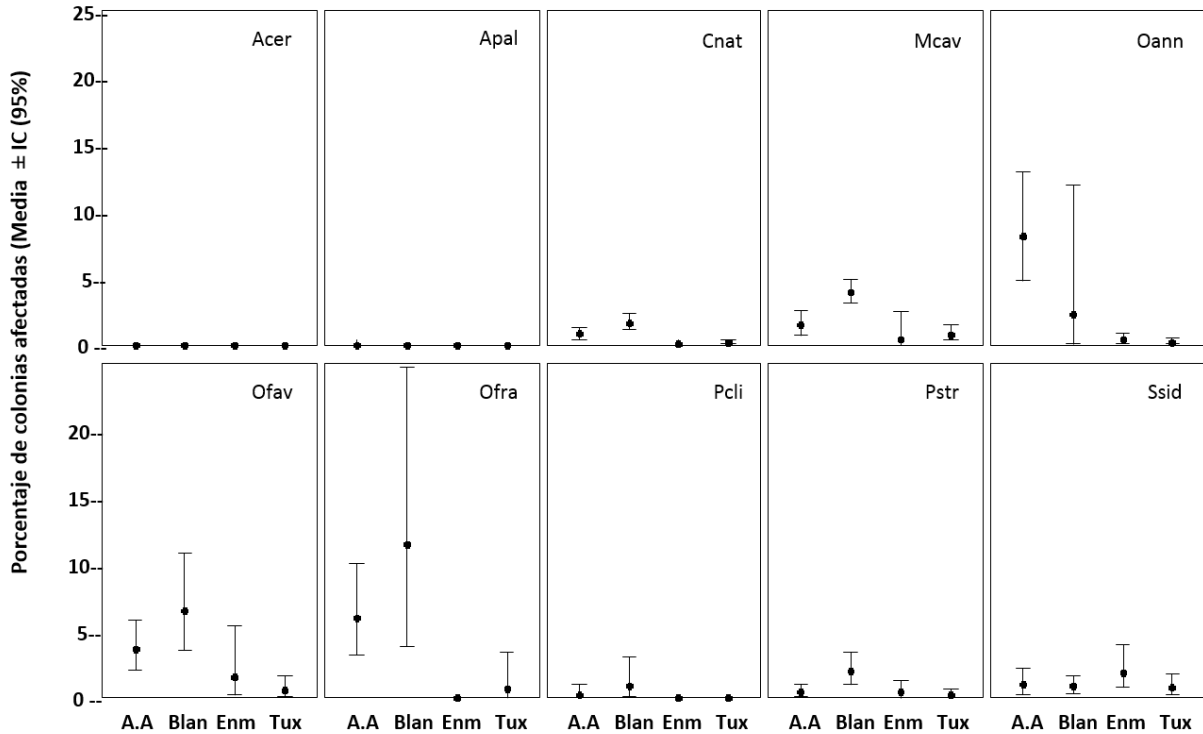


Figura CC-17. ESPONJAS: Porcentaje promedio (círculo) e intervalo de confianza al 95% (barras) estimados mediante el método binomial exacto. Para el cálculo del intervalo de confianza se utilizó un mínimo de 50 colonias por arrecife. Se incluye el valor promedio en *Acropora cervicornis* a pesar de la baja abundancia por arrecife dada su importancia como constructor arrecifal potencial (ver código de especies en Anexo 1).

En los dos arrecifes del SAV, *O. franksi* mostró valores altos de sobrecrecimiento por esponjas, siendo éste considerablemente mayor en La Blanquilla, cercano al 12%, el cual constituyó el valor más alto registrado en la zona de estudio. El mismo patrón, de mayor porcentaje de colonias afectadas por esponjas en La Blanquilla, se observó en *O. faveolata* aunque con un porcentaje de colonias afectadas más bajo (Fig. CC-17). En el resto de las especies clave, exceptuando *O. annularis*, los valores fueron relativamente altos en ambos arrecifes, pero mayores en Anegada de Afuera (cerca al 8%). En ninguna de las tres especies de *Orbicella* se encontraron, sin embargo, diferencias significativas entre los dos arrecifes por la alta variabilidad existente. Las otras especies presentaron valores menores al 5% y la única especie que presentó diferencia significativa entre arrecifes fue *M. cavernosa* (Fig. CC-17).

En términos de las especies más afectadas en ambos sistemas arrecifales, claramente las *Orbicellas* tuvieron las mayores proporciones de sobrecrecimiento por esponjas en los arrecifes del SAV, con tendencia a valores mayores en La Blanquilla.

CAPÍTULO 5. MODELADO DE RIESGO

Simular es una forma de resolver problemas, en la cual el sistema de estudio es reemplazado por un sistema de ecuaciones que lo describen de una forma simplificada. Las simulaciones son una clase de modelos matemáticos computarizados cuyo comportamiento es dictado por ecuaciones y algoritmos, que se basan en datos reales e imitan el funcionamiento del sistema. La simulación puede pensarse como una forma de conducir experimentos sobre un sistema que de otra manera sería imposible o impráctico (Peck 2004). Por ejemplo, dadas las bajas tasas de crecimiento de los corales y de avance de la mayoría de las enfermedades, medir el efecto de éstas en una población puede tomar años. Por lo que el poder tomar medidas preventivas necesita de un método que sea capaz de estimar el riesgo potencial a corto y mediano plazo en base a indicadores puntuales como, por ejemplo, la prevalencia de signos de enfermedad. Los modelos de simulación que describen el devenir de individuos autónomos o “agentes” (modelos basados en individuos) se han vuelto una herramienta común en disciplinas que tratan con sistemas complejos, como la ecología (DeAngelis y Gross 1992, DeAngelis y Mooij 2005, Grimm et al. 2006). Estos modelos son importantes pues permiten al investigador considerar aspectos que son generalmente ignorados en otro tipo de modelos, por ejemplo, la variabilidad entre organismos, las interacciones locales, los ciclos de vida y los efectos del ambiente.

En sistemas complejos, como lo son poblaciones expuestas a patógenos, las simulaciones a partir de modelos basados en individuos pueden aportar nuevas perspectivas sobre preguntas clave en las interacciones patógeno-hospedero. Por ejemplo, McEwan et al. (2015) utilizaron un modelo basado en individuos para mostrar que poblaciones salvajes de salmón pueden servir de refugio para limitar la evolución de resistencia a químicos que se usan en granjas de salmón de un copépodo parásito. En sistemas arrecifales, Mumby et al. (2006) y Mumby et al. (2007) utilizaron modelos basados en individuos para mostrar el efecto de la herbivoría en mantener la integridad de los arrecifes. Lirman (2003) utilizó modelos basados en individuos para simular el efecto de la intensidad y frecuencia de huracanes en la dinámica poblacional del coral *Acropora palmata*, mientras que Sokolow et al. (2009) utilizaron un modelo epidemiológico para mostrar que en metapoblaciones de corales escleractinios las enfermedades crónicas (es decir con relativas bajas tasas de avance pero larga duración) resultan en el mayor riesgo de extinción de poblaciones de corales a nivel regional.

En este capítulo del estudio, aplicamos un modelo basado en individuos que analiza el efecto potencial de los signos de afecciones en poblaciones de cuatro especies de corales constructores de arrecifes comunes a los arrecifes de Tuxpan y Veracruz. Considerando la variabilidad en las tasas de crecimiento de los corales, en las tasas de avance de las afecciones y en el ambiente, hacemos una proyección del devenir de las poblaciones con base en las prevalencias observadas.

5.1 Métodos

En epidemiología de corales escleractinios existen tres conjuntos de incógnitas que determinan los criterios primarios para estas simulaciones:

- 1) La diagnosis de las enfermedades de coral es un proceso complejo, subjetivo y que en muchos casos no puede completarse con una sola observación. Para solventar esto, en campo, registramos los signos, que son descripciones objetivas de estados anormales del tejido coralino. Salvo en algunos casos (por ejemplo, la banda negra), atribuir esos signos a una enfermedad conocida no es un proceso directo. En este trabajo registramos signos amarillos, signos blancos y manchas oscuras, entre otras afecciones. Es probable que los signos amarillos, los signos blancos y manchas oscuras, así como los tapetes de algas, correspondan probablemente a la enfermedad de la banda amarilla, a algún tipo de plaga (corales masivos) o banda blancas (si el hospedero es *Acropora* sp), la enfermedad de los lunares oscuros y a los tapetes de algas y sedimento, respectivamente.
- 2) Conociendo los signos presentes y su prevalencia, se requiere tener una idea de su efecto potencial en las colonias afectadas. Si bien se conoce que ciertas afecciones avanzan sobre el tejido del coral causando mortalidad a una tasa dada, para estimar el efecto potencial en las poblaciones de corales afectados solamente se puede hacer con modelos predictivos. Por ello, para estimar el potencial impacto de las prevalencias y frecuencias de afección observadas, construimos un modelo que simula el efecto de una o varias enfermedades o afecciones en las colonias de una población de coral. En base a datos observados, simulamos el efecto a 10 años de las afecciones en poblaciones de los corales *Orbicella annularis*, *O. faveolata*, *Colpophyllia natans* y *Acropora palmata* en los cuatro arrecifes y bajo tres escenarios distintos: enfermedades y tapetes de algas avanzando a tasas máximas, enfermedades y tapetes de algas avanzando a tasas mínimas y solamente enfermedades avanzando a tasas máximas.
- 3) Conociendo las afecciones presentes, su prevalencia y su efecto potencial nos queda conocer cuáles son las causas potenciales y la dinámica de estas afecciones, pero esto no responde a efectos lineales simples. Sabemos que, a causa del calentamiento global, el hospedero se encuentra en desventaja frente a patógenos potenciales, además de que es susceptible de sufrir blanqueamiento. Es probable que las anomalías térmicas expliquen en parte las altas prevalencias de afecciones; sin embargo, en este trabajo mostramos que existen diferencias significativas en la prevalencia de afecciones entre especies y entre arrecifes. Susceptibilidades distintas entre especies pueden explicar, en parte, que muestren distintos tipos de afecciones y distintas prevalencias. Pero el hecho de que existan diferencias entre los arrecifes, incluso entre arrecifes cercanos, apunta a posibles efectos locales puesto que las especies dominantes que componen los cuatro arrecifes son similares y aunque no se midió, dada la escala espacial, es poco probable que existan diferencias significativas en el régimen de temperaturas entre

arrecifes cercanos. La sinergia entre eutroficación, contaminación, sobrepesca, impactos portuarios, y de otra índole, en conjunto con la variabilidad en las condiciones naturales locales y en la historia de estrés en los corales puede contribuir a aumentar o a disminuir la susceptibilidad de los corales o la virulencia de patógenos potenciales. Determinar que causas locales son las responsables, y en qué medida, no es directo porque la etiología de cada afección es diferente.

Para realizar las simulaciones del efecto de los síndromes y de los signos de enfermedad sobre las poblaciones de los cuatro arrecifes estudiados en el Golfo de México, se utilizaron los datos de las cuatro especies de corales constructores más importantes (*Acropora palmata*, *Orbicella annularis*, *O. faveolata* y *Colpophyllia natans*).

Dependiendo de la especie, de su forma de crecimiento y del ambiente, los corales pueden tener largos tiempos generacionales (≈ 35 años estimado para colonias masivas; Babcock 1991). Así, muchas colonias constructoras tienen una larga esperanza de vida. Por ejemplo, una colonia de *Orbicella faveolata* de más de dos metros de diámetro, con una tasa de crecimiento de menos de 1 cm/año, puede tener más de 200 años. Además, la clonalidad de los corales constructores hace que una colonia original se divida en parches, cada uno, potencialmente, muy longevo.

Las enfermedades tienen la capacidad de reducir drásticamente la esperanza de vida de los corales constructores. El grave declive en la cobertura de coral en el Caribe, en los últimos 40 años, se debe, en parte, a la proliferación de enfermedades (Gardner et al. 2003). Por ejemplo, la banda blanca y la viruela blanca decimaron las poblaciones de *Acropora* spp. en el Caribe en las últimas décadas (Williams and Bunkley-Williams 1990, Aronson y Precht 1997, 2001, Ritchie y Smith 1998, Patterson et al. 2002), y la enfermedad de la banda amarilla redujo la abundancia de los corales del género *Orbicella* (antes *Montastraea*) (Edmunds and Elahi 2007, Bruckner and Hill 2009). Las colonias de coral tienen tasas de crecimiento que son bajas en comparación con las tasa de avance de las enfermedades (Tabla MR-1 y Tabla MR-2).

Tabla MR-1. Tasa de crecimiento de cuatro especies de coral escleractinio utilizadas en las simulaciones del efecto de signos. Se reporta la media y la desviación estándar.

Especie	Tasa de crecimiento (cm/año, DE)	Referencia
<i>Orbicella faveolata</i>	0.8 (0.28)	Datos Carricart-Ganivet (com. pers.)
<i>Orbicella annularis</i>	0.9 (0.27)	Carricart-Ganivet y Merino 2001
<i>Colpophyllia natans</i>	0.63 (0.28)	Crabbe 2009
<i>Acropora palmata</i>	9.0 (5.0)	Crabbe 2011

Tabla MR-2- Tasas de avance promedio, mínima y máxima, de los signos de enfermedad y de los tapetes algales que afectan a corales escleractinios en el Golfo de México y Caribe. Se reporta la media y la desviación estándar.

Signo/Condición	Tasa de avance (cm/año)		
	Promedio	Mínima	Máxima
Signos Amarillos/Banda Amarilla	7.3 (1.8)	3.7 (1.0)	10.9 (2.5)
Signos Blancos/Plaga Blanca	365.0 (73.0)	219.0 (50.0)	511.0 (125.0)
Signos Oscuros/ Manchas Oscuras	48.0 (4.0)	40.0 (9.0)	56.0 (11.0)
Tapetes de consorcios algales/ Tapetes de algas y sedimentos	4.7 (2.0)	0.7 (0.1)	8.7 (2.0)

El efecto de una enfermedad en una colonia de coral es difícil de estimar, ya que existen varias variables que pueden afectar el resultado de esta interacción como son: i) la tasa de recuperación de la colonia del coral, ii) cambios en la tasa de avance de la enfermedad, iii) estrés ambiental y iv) otras causas de mortalidad.

Para evaluar el efecto potencial de las enfermedades, y de otras afecciones, en las colonias de coral muestreadas, desarrollamos un modelo comportamental, iterativo y estocástico, que calcula la resultante entre el crecimiento del coral y la pérdida de tejido asociada a los signos, para una población teórica de colonias de coral. El objetivo del modelo fue describir el cambio en el número de colonias individuales en la población, tomando en cuenta la prevalencia de signos, el tamaño de las colonias, la mortalidad parcial media en la población y variables ambientales estocásticas (Judson 1994, Uchmanski y Grimm 1996). El tamaño de las colonias fue calculado como el área total de tejido, con base en el diámetro máximo estimado en campo, y considerando una forma colonial hemisférica. Los signos aumentan en área como un círculo y el efecto de dos o más signos se suma, es decir que dos signos, si sus tasas de avance son iguales, harían el doble de daño, tres signos el triple, etc. Esto resulta en una colonia que incrementa su tamaño en una superficie tridimensional y la(s) enfermedad(es) avanza(n) sobre una superficie bidimensional (Fig. MR-1).

En una población virtual estandarizada a 10,000 colonias individuales (con la misma estructura de tamaños observada en campo), se asignó al azar una (o hasta cuatro) afecciones según las prevalencias medias observadas (Tabla MR-5). De forma que la población inicial contiene colonias sanas, colonias con un signo 1, colonias con un signo 2, colonias con un signo 3, colonias con tapetes de algas y las combinaciones que se den por azar.

Para estimar el efecto de las afecciones, utilizamos las siguientes ecuaciones:

1. $R_t \text{ (cm)} = R_{t-1} \text{ (cm)} + Tc_t \text{ (cm/año)} \cdot t \text{ (años)} + \varepsilon$
2. $Re_t \text{ (cm)} = Re_{t-1} \text{ (cm)} + Tav1_t \text{ (cm/año)} \cdot t \text{ (años)} + Tav2_t \text{ (cm/año)} \cdot t \text{ (años)} + Tav3_t \text{ (cm/año)} \cdot t \text{ (años)} + Tav4_t \text{ (cm/año)} \cdot t \text{ (años)} + \varepsilon$
3. $S_t \text{ (cm}^2\text{)} = 2 \cdot \pi \cdot (R_t)^2 \text{ (cm}^2\text{)}$
4. $Se_t \text{ (cm}^2\text{)} = \pi \cdot (Re_t)^2 \text{ (cm}^2\text{)}$
5. $Efecto_t \text{ (cm}^2\text{)} = S_t \text{ (cm}^2\text{)} - Se_t \text{ (cm}^2\text{)}$

La ecuación 1 calcula el incremento en el radio de una colonia, dependiendo de la tasa de crecimiento (Tc) y del tiempo (t). El valor de la tasa de crecimiento toma en cada tiempo (t), un valor aleatorio, tomado a partir de una distribución normal con media y desviación estándar iguales a las reportadas para la tasa promedio de crecimiento de la especie (Tabla MR-1).

La ecuación 2 calcula el radio lineal de avance de uno, dos, o hasta tres signos de enfermedad o sobrecrecimiento. Este radio se incrementa según las tasas de avance ($Tav1$, $Tav2$, $Tav3$ y $Tav4$) en el tiempo. El término épsilon (ε) es un valor aleatorio, con media cero y desviación de cero punto cinco, y representa un efecto estocástico del ambiente que puede afectar tanto al crecimiento del coral como al avance de la enfermedad. La ecuación 3 calcula la superficie de una semiesfera que representa a la colonia de coral y que crece en el tiempo a la tasa de crecimiento de la especie. La ecuación 4 calcula el área de afectación (tejido muerto) causada por la enfermedad en el tiempo. La ecuación 5 calcula la pérdida de tejido de la colonia. Si el valor de $Efecto_t \leq 0 \text{ (cm}^2\text{)}$ entonces se considera que la colonia ha muerto.

Para hacer los modelos acordes a lo observado para cada especie en cada arrecife, los valores iniciales de las poblaciones de corales se usaron conforme a lo observado en el campo. Las colonias de coral fueron clasificadas según su tamaño en cinco categorías definidas a partir de la escala del video: a) $<8.3 \text{ cm}$, b) $8.3\text{-}25 \text{ cm}$, c) $25.1\text{-}60 \text{ cm}$; d) $60.1\text{-}120 \text{ cm}$ y e) $>120 \text{ cm}$. Con base en esta clasificación, se construyeron las estructuras de tamaños (Babcock 1991) para cada especie de coral clave utilizada en las simulaciones. Para evitar que diferencias en el esfuerzo de muestreo resultaran en diferencias en las estructuras de tamaño, se calculó la densidad de colonias de cada especie de coral por zona arrecifal (Barlovento, Laguna, Punta, etc.) y se hizo una estimación del área de la zona con base en su delimitación en el mapa (Tabla MR-3).

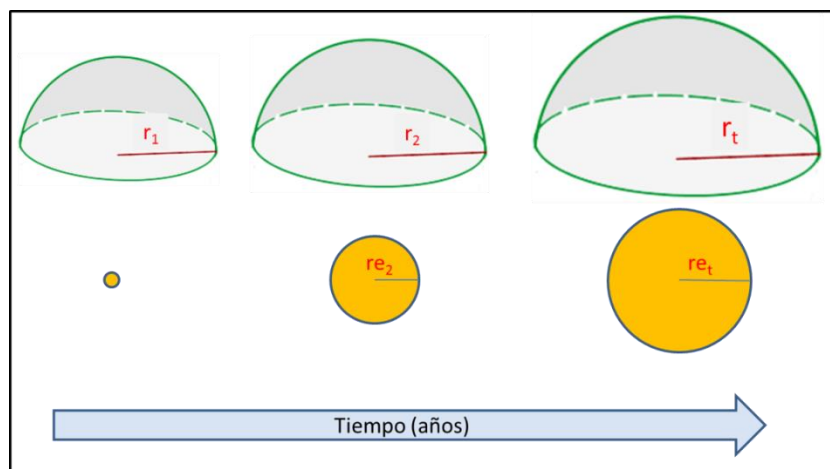


Figura MR-1. Incremento en la superficie de una colonia de coral.

Tabla MR-3. Área de las zonas arrecifales estudiadas en cuatro arrecifes del Golfo de México y número de transectos realizados por zona arrecifal.

Arrecife	Zona	Transectos	Área de la Zona (m ²)
Anegada de Adentro	Barlovento	19	415300
	Laguna	25	527520 (Área con <i>Acropora palmata</i> = 12800)
	Único	7	21740
	Punta	38	240680
	Sotavento	21	97810
Blanquilla	Barlovento	19	375700
	Laguna	11	330100
	Único	4	21550
	Punta	12	104810
	Sotavento	16	64820
Tuxpan	Barlovento	21	247420
	Laguna	9	689070
	Punta	16	107540
	Sotavento	51	214600
Enmedio	Barlovento	4	80990
	Laguna	5	217390
	Único	20	164560
	Punta	20	66290
	Sotavento	15	102320

El número total estimado de colonias de coral por categoría de tamaño para cada arrecife se obtuvo al multiplicar la densidad de colonias en cada zona arrecifal por el área de la zona y posteriormente se sumó el total de cada zona para cada arrecife. Los

valores iniciales para cada especie de coral y por arrecife que se usaron en los modelos se muestran en la tabla MR-4. En cada iteración del modelo, el valor de las tasas de avance de los signos de enfermedad, y de las tasas de crecimiento de las especies de coral, se escogieron al azar a partir de una distribución normal (10,000 datos) con media y desviación iguales a las reportadas para las tasas de avance mínimas y máximas de las afecciones y del crecimiento medio de los corales.

Tabla MR-4. Número de colonias de coral estimado y estandarizado por categoría de tamaño para cuatro especies de coral en cuatro arrecifes del Golfo de México en 2014. AA: Anegada de Adentro, BI: Blanquilla, Tx: Tuxpan, En: En medio, xs: extra-chica, s: pequeña, m: mediana, l: grande, xl: extra-grande, C1: Colonias estimadas, C2: Colonias estandarizadas.

Arrecife	Tamaño	Especie							
		<i>Orbicella faveolata</i>		<i>O. annularis</i>		<i>Colpophyllia natans</i>		<i>Acropora palmata</i>	
		C1 (N)	C2 (N)	C1 (N)	C2 (N)	C1 (N)	C2 (N)	C1 (N)	C2 (N)
AA	Xs	220	13	779	18	17763	136	1055	126
	S	8179	482	6207	147	141000	1080	11630	1387
	m	7129	420	3756	89	54294	416	5428	647
	l	17803	1049	4255	101	65597	502	7381	880
	xl	12498	737	2911	69	4086	31	1909	228
BI	xs	175	10	0	0	6942	53	2373	283
	s	6466	381	5398	128	122966	942	6328	755
	m	8088	477	2188	52	104528	801	2373	283
	l	13516	797	1426	34	110015	843	1186	141
	xl	5683	335	175	4	5916	45	600	72
Tx	xs	1683	99	43677	1033	55829	428	874	104
	s	14357	846	102704	2429	182382	1397	7649	912
	m	10974	647	22083	522	117431	899	5648	674
	l	19892	1172	20079	475	83213	637	2658	317
	xl	24287	1431	21006	497	11158	85	168	20
En	xs	367	22	22670	536	5856	45	2354	281
	s	1409	83	80587	1906	70453	540	11761	1403
	m	2850	168	20801	492	56127	430	8287	988
	l	4253	251	36973	874	77864	596	3710	443
	xl	9854	581	25212	596	12241	94	476	57

Para la estimación de la mortalidad parcial se utilizaron seis categorías: a) < 5%, b) 5-25%, c) 25.1-50%, d) 50.1-75%, e) 75.1-95% y f) >95%. Se estimó el valor promedio, considerando los valores registrados en todas las colonias de coral y la proporción de colonias que presentaron mortalidad parcial. Los valores iniciales para cada especie de coral y por arrecife que se usaron en los modelos se muestran en la tabla MR-5.

Tabla MR-5. Mortalidad parcial (MP: media \pm SD), porcentaje de colonias con mortalidad (CMP) y afecciones con mayor prevalencia (Afe) registradas en cuatro especies de coral en cuatro arrecifes del Golfo de México en 2014. AA: Anegada de Adentro, BI: Blanquilla, Tx: Tuxpan, En: Enmedio, SA: Signos amarillos, SB: Signos blancos, SO: Signos oscuros, PBM: Puntos blanqueados múltiples, TAS: Tapetes de algas y sedimento.

Arrecife	Especie			<i>Orbicella faveolata</i>			<i>Orbicella annularis</i>			<i>Colpophyllia natans</i>			<i>Acropora palmata</i>		
	MP (%)	CMP (%)	Afe (%)	MP (%)	CMP (%)	Afe (%)	MP (%)	CMP (%)	Afe (%)	MP (%)	CMP (%)	Afe (%)	MP (%)	CMP (%)	Afe (%)
AA	28.3 (5.5)	88.8	SA: 21 SB: 10 TAS: 65	28.6 (5.4)	87.8	SA: 18 SB: 16 TAS: 55.4	14.9 (2.3)	66.8	PBM: 8.3 SB: 5.8 TAS: 45.7	20.1 (3.6)	58	SB: 4.5 TAS: 20			
BI	31.6 (7.5)	92.3	SA: 37 SO: 3.4 SB: 9.4 TAS: 72	26.1 (8.2)	74.4	SA: 20.5 SB: 6.8 TAS: 41	15.5 (2.5)	80.2	PBM: 7.1 SB: 7.8 TAS: 55.8	3.6 (0.9)	9.7	SB: 3.1 TAS: 3.1			
Tx	23.5 (5.4)	85.7	SA: 47.8 SO: 7.51 TAS: 73.1 SB: 4.1	17.0 (4.0)	58	SA: 23.8 SB: 4.1 TAS: 52.14 SO: 5.8	12.5 (2.3)	51.3	PBM: 1.0 SB: 1.4 TAS: 44.0	10.7 (0.5)	12.7	SB: 1.3 TAS: 9.0			
En	23.2 (5.5)	89.6	SA: 57.5 SO: 13.43 TAS: 71 SB: 2.2	29.2 (5.2)	77.3	SA: 42.6 SB: 1.8 TAS: 41.25 SO: 5.4	11.0 (1.6)	67	PBM: 2.6 SB: 1.5 TAS: 53.2 SA: 5.2	1.4 (0.1)	8.8	TAS: 5.3			

5.2 Resultados

Para simular el efecto de las distintas afecciones en cuatro de las especies de corales constructores más importantes (*Orbicella faveolata*, *O. annularis*, *Colpophyllia natans* y *Acropora palmata*), que fueron comunes en los arrecifes muestreados, se utilizó un modelo basado en individuos (Huston et al. 1988, Uchmanski y Grimm 1996). El modelo tuvo como objetivo hacer más sencillo visualizar el cambio potencial en sus poblaciones dependiendo de las afecciones observadas.

Para los modelos se utilizaron las tasas de avance reportadas en la literatura científica para la enfermedad de la banda amarilla (Cervino et al. 2004), la enfermedad de los lunares oscuros (Cervino et al. 2004), los tapetes de algas y sedimentos (Roy 2004), las plagas blancas (Pantos et al. 2003) y la banda blanca (Gladfelter 1982, Ritchie y Smith 1998). Sin embargo, en el presente estudio únicamente se registraron signos de afecciones, por lo que se desconocen las tasas de avance reales de las diferentes afecciones en el área de estudio y es posible que éstas difieran de las reportadas en la literatura. Por esta razón se modelaron tres escenarios posibles, en el primero se considera que las tasas de avances de los signos de las enfermedades con mayor prevalencia (Tabla MR-5) eran máximas, en el segundo se excluye el efecto de los tapetes de algas y en el tercero se utilizan tasas de avance mínimas (Tabla MR-2).

El resultado de las simulaciones se muestra en las figuras MR-2, MR-3, MR-4 y MR-5. A continuación se describen los resultados para los diferentes casos y escenarios posibles por especie. En estas figuras se observa una disminución en el tejido de la población (líneas oscuras) que se corresponde con una consecuente pérdida en el número de colonias (líneas azules).

5.2.1 Escenarios para *Orbicella faveolata*

Escenario 1. Poblaciones de *O. faveolata* afectadas por enfermedades y por tapetes de algas avanzando a tasas máximas (Fig. MR-2, columna izquierda).

En los cuatro arrecifes estudiados se observó la misma tendencia, hacia una pérdida de tejido y de colonias en 10 años. Tanto la pérdida de tejido, como la de colonias, es constante a lo largo del tiempo, salvo al final de los 10 años de simulación, en donde se observa que las curvas se vuelven horizontales indicando que la tasa de pérdida de tejido y de pérdida de colonias disminuye. Esto es debido a que la mayoría de las colonias enfermas al inicio de la simulación se pierden y las colonias sin afecciones continúan creciendo. El efecto fue mayor en los arrecifes de Tuxpan y Enmedio en donde, según el modelo, un 90% de las colonias de *O. faveolata* de la población original se perderán en 10 años, mientras que en la Blanquilla se perderán el 85% y en Anegada de Adentro el 75%.

Orbicella faveolata

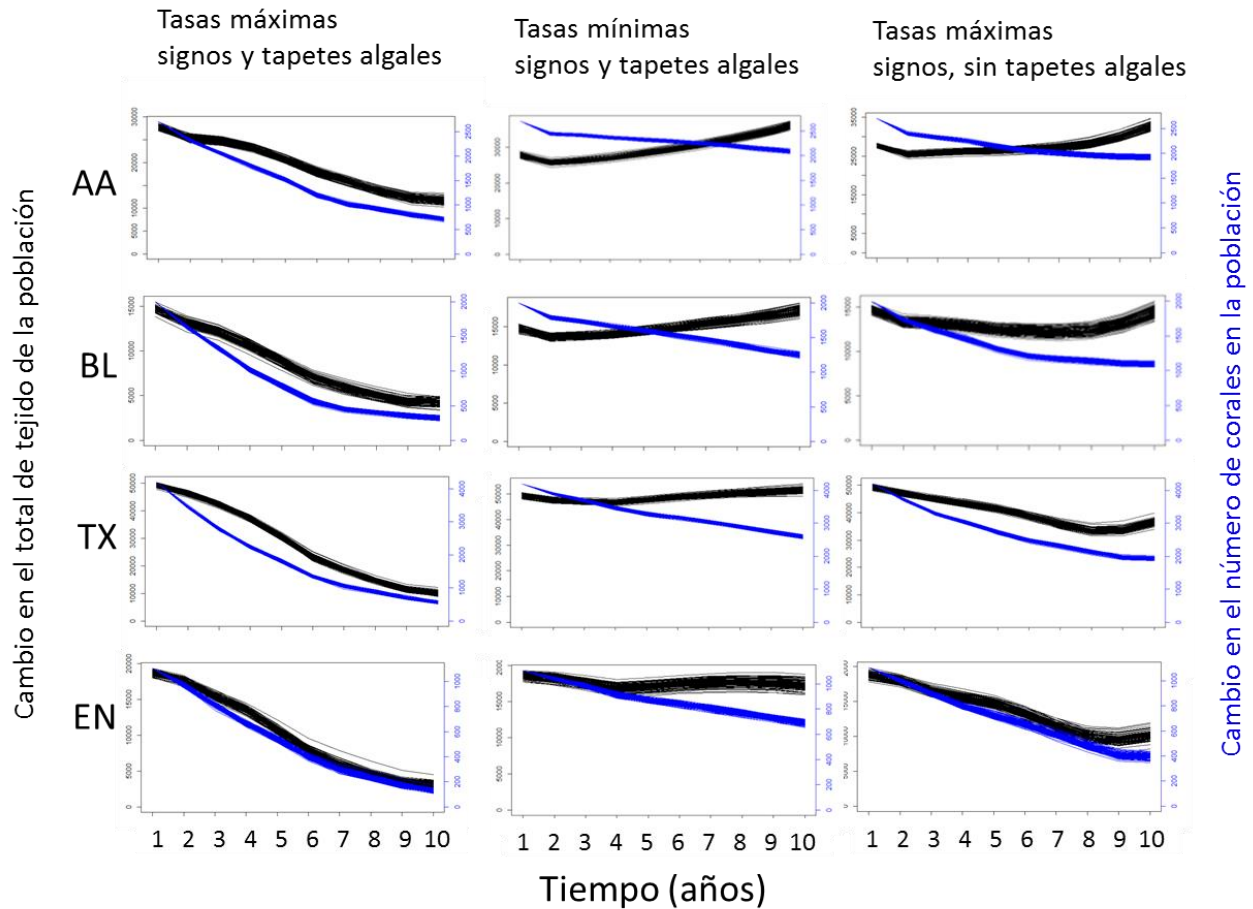


Figura MR-2. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Orbicella faveolata* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas de color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas, tasas de avance mínimas y tasas de avance máximas de enfermedades sin considerar el efecto de los tapetes de algas.

Escenario 2. Poblaciones de *O. faveolata* afectadas por enfermedades y tapetes de algas avanzando a tasas mínimas (Fig. MR-2, columna central).

La tendencia fue similar en los cuatro arrecifes, observándose una pérdida de tejido y de colonias mayor en los primeros años de la simulación, correspondiente a la pérdida de colonias pequeñas, después aunque las pérdida de colonias continúa el tejido en la población comienza a recuperarse. El efecto fue menor en el arrecife de Anegada de Adentro, en dónde un 20% de las colonias de la población original se perdieron, y fue

similar en los demás arrecifes dónde $\pm 40\%$ de las colonias de la población original se pierden en 10 años (Tabla MR-6).

Escenario 3. Poblaciones de *O. faveolata* afectadas por signos de enfermedad avanzando a tasas máximas sin tapetes de algas (Fig. MR-2, columna derecha).

La tendencia es similar en los cuatro arrecifes, la pérdida de tejido y de colonias es ligeramente superior al observado en el escenario 2 (tasas mínimas con signos y tapetes algales), las colonias enfermas se pierden en aproximadamente 8 años y posteriormente se observa una recuperación del tejido y una estabilización en el número de colonias. El arrecife menos afectado fue Anegada de Adentro, en donde se pierden 30% de las colonias en 10 años (Tabla MR-6) ya que en este arrecife fue en el que ésta especie fue afectada por una menor diversidad de signos (Tabla MR-6) y el efecto fue mayor en Tuxpan y en Enmedio (Tabla MR-6). En comparación con el primer escenario observamos que el efecto de las algas es alto debido a su prevalencia.

5.2.2 Escenarios para *Orbicella annularis*

Escenario 1. Poblaciones de *O. annularis* afectadas por signos de enfermedad y tapetes de algas avanzando a tasas máximas (Fig. MR-3, columna derecha).

En los cuatro arrecifes la tendencia fue similar y hacia una disminución en el tejido y en las colonias. La pérdida de colonias es mayor en los primeros años de la simulación debido a la pérdida de colonias pequeñas. Se observa una recuperación en los últimos años de la simulación debido a que la mayoría de las colonias enfermas al inicio de la simulación se han perdido y las colonias sin afecciones continúan creciendo. De acuerdo con la simulación en los cuatro arrecifes se pierden cerca del 70% de las colonias originales en 10 años.

Escenario 2. Poblaciones de *O. annularis* afectadas por signos de enfermedad y tapetes de algas avanzando a tasas mínimas (Fig. MR-3, columna central).

La tendencia es similar en los cuatro arrecifes, hay una mayor pérdida de tejido y de colonias en los primeros años de la simulación, correspondiente a la pérdida de colonias pequeñas, después la pérdida de colonias continúa pero el tejido en la población comienza a recuperarse. El efecto fue mayor en el arrecife de Enmedio en dónde un 40% de las colonias de la población original se pierden en 10 años, y fue similar en los demás arrecifes dónde $\pm 30\%$ de las colonias de la población original se pierden en dicho período (Tabla MR-6).

Escenario 3. Poblaciones de *O. annularis* afectadas por signos de enfermedad avanzando a tasas máximas sin tapetes de algas (Fig. MR-3, columna derecha).

Tabla MR-6. Resultado de las simulaciones del efecto de signos de afecciones en cuatro especies de constructores arrecifales clave en los cuatro arrecifes muestreados. DE: Desviación estándar, SA: Signos amarillos, SB: Signos blancos, SO: Signos oscuros, MPB: Puntos blancos múltiples, TA: Tapetes de algas. Los códigos de las especies se presentan en el Anexo 1.

Arrecife	Especie	Afecciones (Prevalencia %)	Tasas de avance	Reducción relativa del número poblacional en 10 años (% del total inicial)	Reducción promedio por sistema arrecifal (% del total inicial y DE)	
Anegada de Adentro	Ofav	SA (21), SB (10), TA (65)	Máximas	75	49 (26)	
Blanquilla			Máximas sin TA	30		
			Mínimas	20		
Tuxpan		SA (37), SO (3.4), SB (9.4), TA (72)	Máximas	85		
			Máximas sin TA	45		
			Mínimas	39		
Enmedio		SA (47.8), SO (7.5), SB (4.1), TA (73)	Máximas	90		63 (23)
			Máximas sin TA	57		
	Mínimas		40			
Anegada de Adentro	SA (57.5), SB (2.2), SO (13.4), TA (71.0)	Máximas	90			
		Máximas sin TA	65			
		Mínimas	38			
Oann	Anegada de Adentro	SA (18), SB (16), TA (55.4)	Máximas	70	43 (20)	
			Máximas sin TA	37		
			Mínimas	25		
	Blanquilla	SA (20.5), SB (6.8), TA (41)	Máximas	65		
			Máximas sin TA	30		
			Mínimas	28		
	Tuxpan	SA (23.8), SB (4.1), SO (5.8), TA (52.1)	Máximas	68		49 (17)
			Máximas sin TA	38		
Mínimas			30			
Enmedio	SA (42.6), SB (1.8), SO (5.4), TA 41.2)	Máximas	70			
		Máximas sin TA	46			
		Mínimas	40			

Continuación Tabla MR-6

Arrecife	Especie	Afecciones (Prevalencia %)	Tasas de avance	Reducción relativa del número poblacional en 10 años (% del total inicial)	Reducción promedio por sistema arrecifal (% del total inicial y DE)	
Anegada de Adentro	Cnat	MPB (8.3), SB (5.8), TA (45.7)	Máximas	58	32 (21)	
Blanquilla			Máximas sin TA	18		
			Mínimas	20		
Tuxpan		MPB (7.1), SB (5.8), TA (45.7)	Máximas	62		
			Máximas sin TA	18		
Mínimas			18			
Enmedio		MPB (1), SB (1.4), TA (44)	Máximas	48	22 (24)	
			Máximas sin TA	2.5		
Mínimas	5					
Anegada de Adentro	Apal	MPB (2.6), SB (1.5), TA (53.2)	Máximas	58		3 (1)
			Máximas sin TA	10		
Mínimas			10			
Blanquilla		SB (4.5), TA (20)	Máximas	5		
			Máximas sin TA	2.5		
Mínimas			2.5			
Tuxpan		SB (3.1), TA (3.1)	Máximas	2.5	1 (1)	
			Máximas sin TA	2		
Mínimas	2					
Enmedio	SB (1.3), TA (9)	Máximas	2.5			
		Máximas sin TA	2			
Mínimas		1				
Enmedio	TA (5.3)	Máximas	1			
		Máximas sin TA	0			
		Mínimas	0			

La tendencia es similar en los cuatro arrecifes, la pérdida de tejido y de colonias es ligeramente superior al escenario 2 (tasas mínimas con signos y tapetes algales), hay una mayor pérdida de colonias en los primeros años de la simulación. El efecto fue mayor en el arrecife Enmedio (46% pérdida de colonias) y Anegada de Adentro (37% pérdida de colonias), después Tuxpan (39% pérdida de colonias) y finalmente Blanquilla (30% pérdida de colonias). En comparación con el primer escenario observamos que el efecto de las algas es alto debido a su prevalencia.

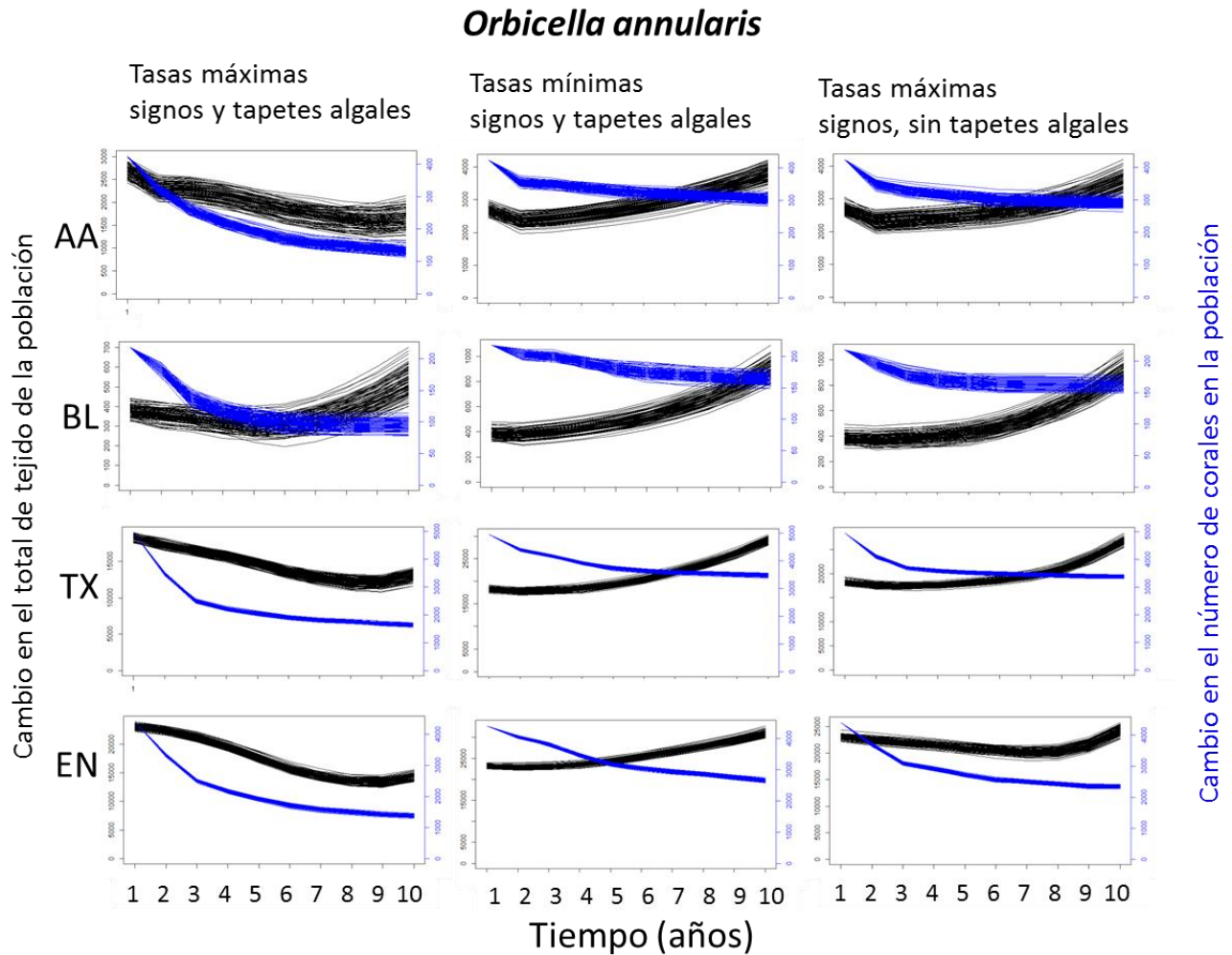


Figura MR-3. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Orbicella annularis* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas sin considerar el efecto de tapetes de algas y tasas de avance mínimas.

5.2.3 Escenarios para *Colpophyllia natans*

Escenario 1. Poblaciones de *C. natans* afectadas por signos de enfermedad y tapetes de algas avanzando a tasas máximas (Fig. MR-4, columna derecha).

La tendencia es similar en los cuatro arrecifes, hacia una pérdida de tejido y colonias. La pérdida de colonias es mayor en los primeros años de la simulación y se estabiliza

después de ± 6 años y el tejido comienza a recuperarse y aumentar. La mayor pérdida de colonias en un plazo de 10 años se observa en el arrecife La Blanquilla (62% de las colonias mueren), seguido por los arrecifes Anegada de Adentro y Enmedio (58% de las colonias mueren en ambos arrecifes) y Tuxpan (48% de las colonias mueren) (Tabla MR-6).

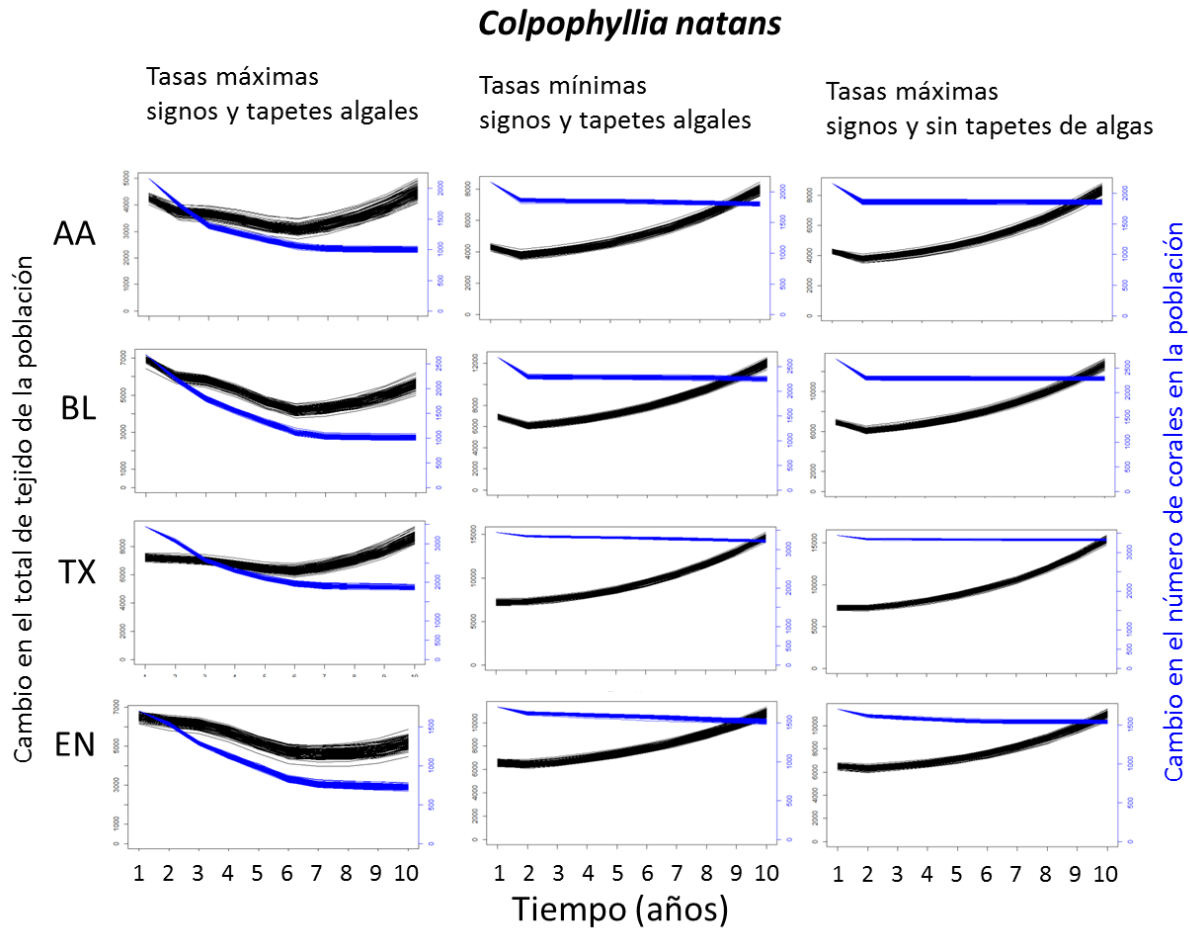


Figura MR-4. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Colpophyllia natans* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas sin considerar el efecto de tapetes de algas y tasas de avance mínimas.

Escenario 2. Poblaciones de *C. natans* afectadas por signos de enfermedad y tapetes de algas avanzando a tasas mínimas (Fig. MR-4, columna central).

De acuerdo con la simulación las poblaciones de *C. natans* en los arrecifes Anegada de Adentro y Blanquilla sufren una mayor pérdida de tejido y colonias (20 y 18% respectivamente) que los arrecifes de Tuxpan y Enmedio (5 y 10% respectivamente)

(TablaMR-6). Esto se debe a la mayor prevalencia de signos de enfermedad registrada para esta especie en los arrecifes de Veracruz que en los de Tuxpan (Tabla MR-6).

Escenario 3. Poblaciones de *C. natans* afectadas por signos de enfermedad avanzando a tasas máximas sin tapetes de algas (Fig. MR-4, columna derecha).

Este escenario es similar al segundo escenario para esta especie: Los arrecifes Anegada de Adentro y Blanquilla sufren una mayor pérdida de tejido y colonias (18% ambos) que los arrecifes de Tuxpan y Enmedio (2.5 y 10% respectivamente) (Tabla MR-6). Esto se debe a la mayor prevalencia de signos de enfermedad registrada en los arrecifes de Veracruz que en los de Tuxpan (Tabla MR-6). En comparación con el primer escenario observamos que el efecto de las algas es alto debido a su prevalencia.

5.2.4 Escenarios para *Acropora palmata*

Escenario 1. Poblaciones de *A. palmata* afectadas por signos de enfermedad y tapetes de algas avanzando a tasas máximas (Fig. MR-5, columna derecha).

La tendencia en los cuatro arrecifes es similar siendo el efecto en las poblaciones relativamente pequeño. En el arrecife Anegada de Adentro se pierden el 5% de las colonias originales al final de los 10 años de la simulación (Tabla MR-6), mientras que en los arrecifes La Blanquilla y Tuxpan se pierde el 2.5%, en cada uno, y en Enmedio solamente el 1%.

Escenario 2. Poblaciones de *A. palmata* afectadas por signos de enfermedad y tapetes de algas avanzando a tasas mínimas (Fig. MR-5, columna central).

La tendencia es similar en los cuatro arrecifes, el efecto en las poblaciones es menor que en el escenario 1 para esta especie, con $\pm 2.5\%$ de las colonias muertas al final de la simulación excepto en el arrecife En medio, en dónde de acuerdo con la simulación no se pierden colonias (Tabla MR-6).

Escenario 3. *Acropora palmata* afectada por signos de enfermedad avanzando a tasas máximas sin tapetes de algas (Fig. MR-5, columna derecha).

La tendencia es similar en los cuatro arrecifes, la pérdida de colonias es un poco menor que en el escenario 1 para esta especie pero, dado que la prevalencia de tapetes de algas es baja la diferencias es pequeña (Tabla MR-6).

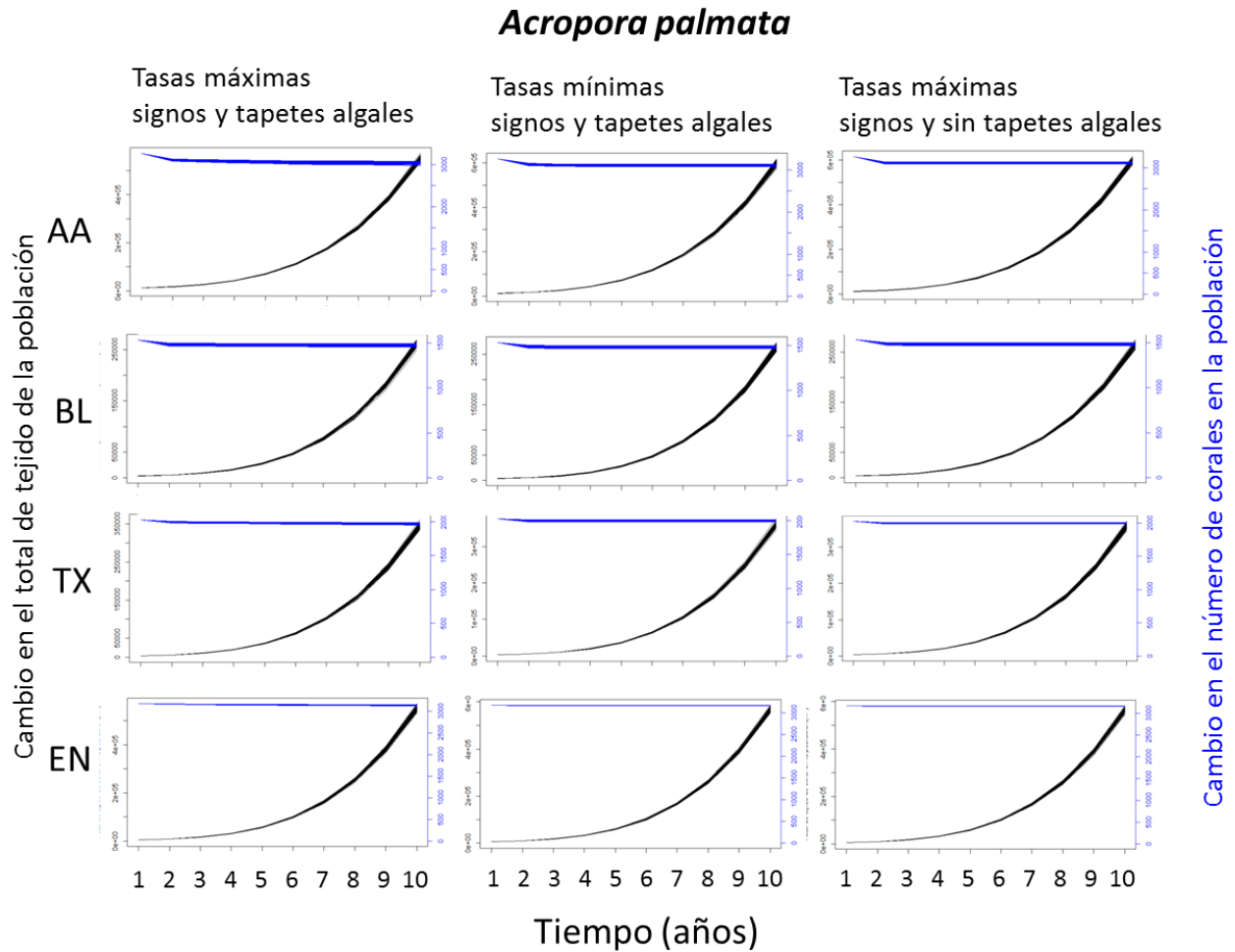


Figura MR-5. Efecto a 10 años de signos de enfermedades y tapetes de algas en poblaciones del coral *Acropora palmata* en los arrecifes de Anegada de Adentro (AA), Blanquilla (BL), Tuxpan (TX) y Enmedio (EN). Las líneas color negro muestran la pérdida de tejido en la población (suma del tejido de todas las colonias) y las líneas azules la pérdida de colonias. Se muestran tres escenarios posibles: Tasas de avance máximas, tasas de avance máximas sin considerar el efecto de tapetes de algas y tasas de avance mínimas.

Se calculó el promedio de pérdida de colonias por sistema arrecifal (Tuxpan vs Veracruz) para cada especie (Tabla MR-6). Los resultados muestran efectos diferentes dependiendo de la especie. En *Orbicella faveolata* y *O. annularis* el efecto de las afecciones causó una reducción poblacional promedio mayor en los arrecifes del sistema Tuxpan, en comparación con el sistema Veracruzano (Tabla MR-6X), principalmente como resultado de una mayor prevalencia de signos amarillos en Tuxpan y de su efecto crónico. En cambio, en el caso de *Colpophyllia natans* y *Acropora palmata* las poblaciones en Tuxpan fueron las menos afectadas (Tabla MR-6).

CAPÍTULO 6. SIG CON LOS ARRECIFES DEL GOLFO DE MÉXICO

Este capítulo describe la conformación del sistema de información geográfica (SIG), sobre los arrecifes mexicanos en el Golfo de México que se anexa al presente informe (Anexo 3). Este SIG es descriptivo, no está integrado como una herramienta de análisis entre capas, porque la relación entre factores causantes y la prevalencia de enfermedades no es lineal, ni es determinada únicamente por los factores ambientales incluidos en el SIG.

El objetivo de este capítulo es describir la información contenida en las diferentes capas del SIG: 1) delineación de la forma de los arrecifes emergentes de la parte mexicana del Golfo de México, 2) delineación de los polígonos de zonas protegidas, 3) mapas de variables ambientales (temperatura superficial del mar, concentración de clorofila) y 4) mapas de las zonas muestreadas en los cuatro arrecifes de estudio.

6.1 Antecedentes

La importancia del mapeo de arrecifes ha sido reconocida a nivel mundial y se han realizado varias iniciativas para compilar una base de datos global en sistemas de información geográfica. Por ejemplo los del “World Conservation Monitoring Centre” (<http://www.unep-wcmc.org/>) y de ReefBase (<http://www.reefbase.org/main.aspx>).

Utilizando estas nuevas tecnologías se han hecho nuevas estimaciones de las áreas totales ocupadas por arrecifes (Spalding y Grenfell 1997), se han hecho clasificaciones del tipo de sustrato en base a sus componentes bentónicos (Kutser et al. 2006), se ha modelado la susceptibilidad de los arrecifes al estrés ambiental (Maina et al. 2008) y se proyecta que la tecnología tiene la capacidad de orientar la investigación y el manejo a gran escala (Andréfouët 2008).

El mapeo de estos sistemas mediante la utilización de técnicas modernas de percepción remota es la única forma práctica de medir variaciones a gran escala y la manipulación de las bandas espectrales es lo que permite visualizar con mayor detalle un arrecife, en función de la transparencia y color del agua. Esto es factible porque cada objeto tiene una particular forma de reflejar la luz, a lo que se le conoce como firma espectral (Roelfsema et al. 2013). Uno de los primeros sensores utilizado es la fotografía, que tiene una sensibilidad similar a la del ojo humano, y guarda información de tonos en blanco y negro y de colores (azul, verde y rojo). En una primera aproximación, cambios en las tonalidades de la imagen pueden darnos información sobre la forma de los arrecifes, cambios de hábitats y una idea de la profundidad (CRTR 2010).

6.2 Métodos

6.2.1 Delineación de arrecifes emergentes mexicanos del Golfo de México: Gran parte de los arrecifes emergentes del golfo de México se encuentran delineados en la página de ReefBase (<http://www.reefbase.org/main.aspx>) y la información se encuentra disponible para su uso no comercial. Se descargó esta información en forma de capa (archivo tipo .shp) y se modificó agregando la forma de los arrecifes faltantes: Arrecife Alacranes, Arrecifes de Los Tuxtlas y Arrecifes de Sisal. La forma de los arrecifes agregados se delineó a mano utilizando el programa QGIS 2.8.2 a partir de fotografías áreas georeferenciadas o de fotografías satelitales del programa Google Earth Pro 7.1.2.

6.2.2 Delineación de polígonos de áreas protegidas: Los polígonos que delimitan los arrecifes mexicanos protegidos en el Golfo de México fueron digitalizados utilizando el programa QGIS 2.8.2. Para delimitar los extremos de los polígonos que fueron posteriormente trazados se utilizó la información contenida en los decretos y programas de manejo y (Diario Oficial de la Federación 2012, SEMARNAT 2006, 2014).

6.2.3 Mapas de variables ambientales: Se descargó información sobre la temperatura superficial del mar y la concentración de clorofila *a* utilizando la subrutina “NASA Oceancolor downloader” del programa QGIS 2.8.2. Los datos son derivados de observaciones del satélite AQUA MODIS, con resolución de 4 km.

6.2.4 Mapas de zonas en los arrecifes muestreados: Utilizando la información comunitaria registrada en este estudio (ver capítulo 5) y con base en la posición de las estaciones de muestreo y en los recorridos, se trazó el área aproximada de las distintas zonas en cada arrecife usando el programa QGIS 2.8.2. Como capa base se utilizaron las imágenes de satélite WorldView.

6.2.5 Mapa de la Densidad Relativa de cuatro especies en los arrecifes estudiados:

Las cuatro especies de constructores arrecifales de mayor importancia en los sistemas estudiados fueron: *Acropora palmata* (históricamente muy importante en el SAV y en el SALT, diezmada por una enfermedad de banda blanca y actualmente con indicios de recuperación), *Colpophyllia natans*, *Orbicella annularis* y *O. faveolata*. Para estas especies se calculó el número de colonias por transecto para cada estación de muestreo utilizando un modelo general con base en la distribución de Poisson con una aproximación Bayesiana. En el programa Google Earth, se colocaron una serie de puntos georeferenciados haciendo una cuadrícula dentro de cada estación de muestreo. A cada punto se le asignó de manera aleatoria un valor de densidad para cada especie. El valor fue asignado dentro de los límites de los intervalos creíbles calculados para el número de colonias por transecto por especie. El resultado se mapeó sobre las imágenes satelitales WorldView y el valor de la densidad de cada punto se muestra con una escala de color. Estos mapas no son una representación espacial exacta de la densidad de las colonias pero muestran las diferencias relativas en la

presencia de la especie entre las estaciones de muestreo. Con fines conservativos, no se hizo ninguna extrapolación a áreas del arrecife fuera del área de las estaciones muestreadas. Esto no implica que las especies no estén presentes en esas áreas.

6.3 Productos generados

Los mapas generados a partir de las capas del SIG se presentan en el Anexo 3. A continuación se presentan algunos ejemplos de los mapas generados.

6.3.1 Forma de los arrecifes: La figura SIG-1 muestra una vista general de todos los arrecifes mexicanos someros del Golfo de México, la figura SIG-2 muestra un acercamiento a los arrecifes de Enmedio y Tuxpan. En la carpeta “SIG/Forma Arrecifes” del archivo digital se presentan los datos de la forma de los arrecifes en forma de capas (FormaArrecifes.shp, FormaArrecifes.dbf, FormaArrecifes.prj, FormaArrecifes.shx y FormaArrecifes.qpj) y los nombres de los arrecifes también en capas (archivos NombresArrecifes.shp, NombresArrecifes.dbf, NombresArrecifes.prj, NombresArrecifes.shx y NombresArrecifes.qpj).

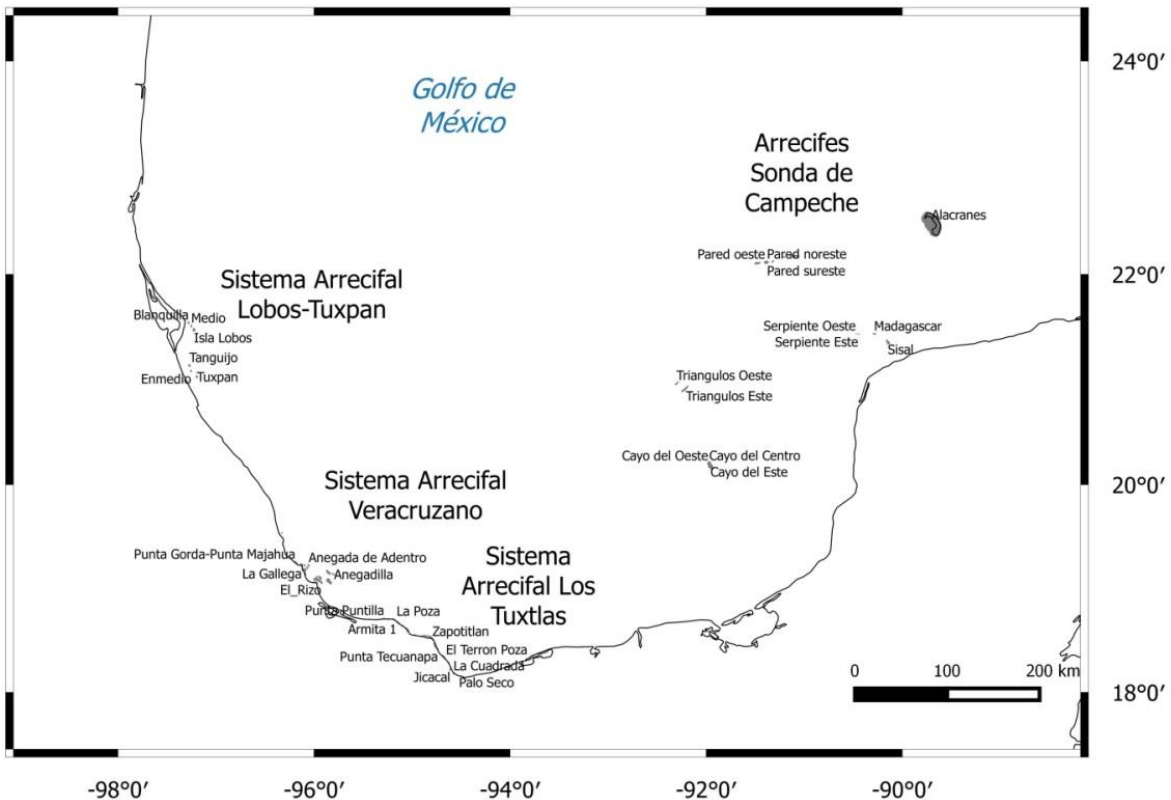


Figura SIG-1. Ejemplo que muestra la vista general de las formas y los nombres de los arrecifes mexicanos emergentes del Golfo de México.

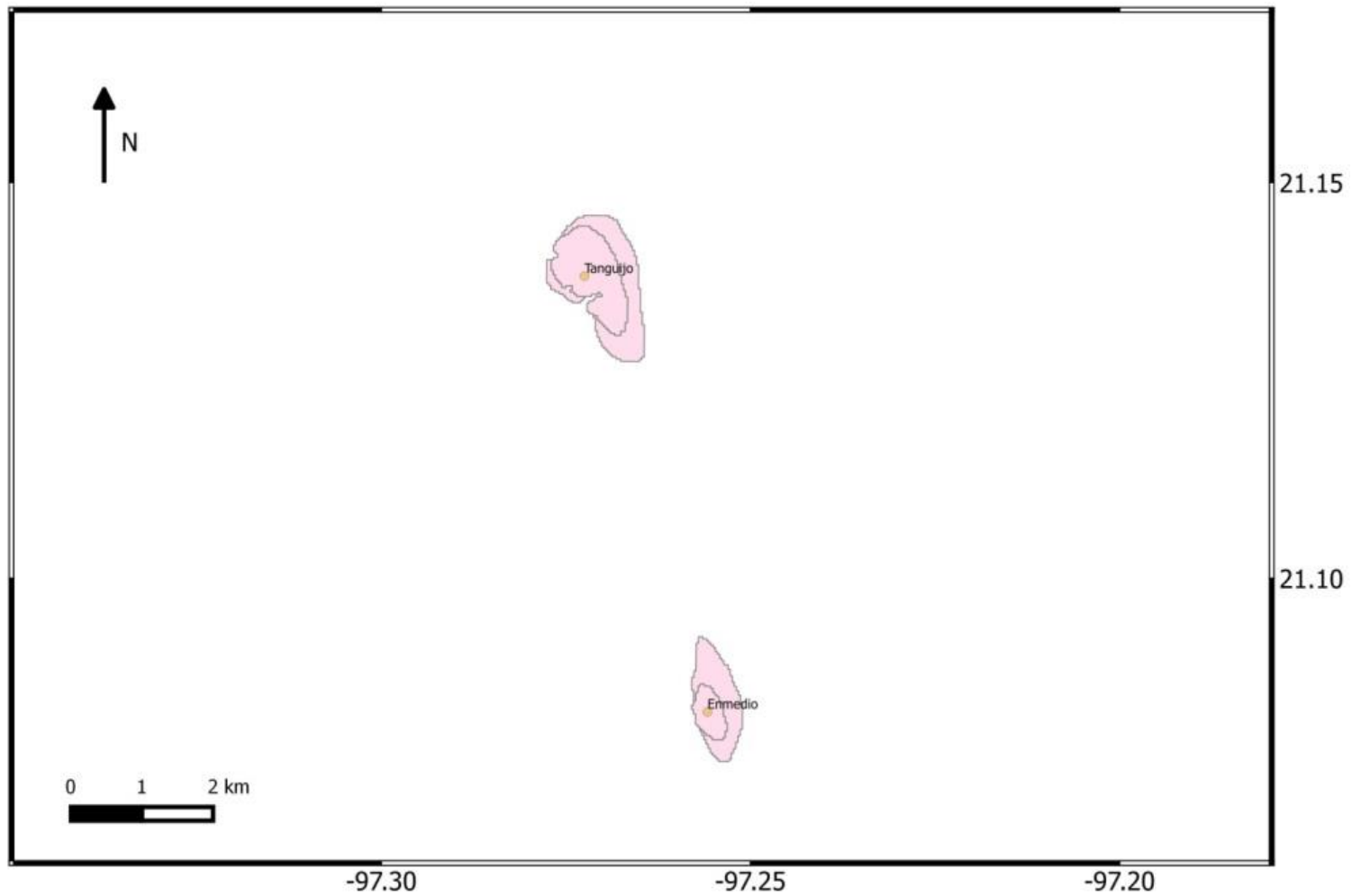


Figura SIG-2. Acercamiento de la figura SIG-1, detallando las formas de los arrecifes de Enmedio y Tuxpan en el sistema arrecifal Lobos-Tuxpan.

6.3.2 Polígonos de áreas protegidas: La figura SIG-3 muestra un ejemplo del polígono que delimita el área protegida de los tres arrecifes de la parte sur del sistema Lobos-Tuxpan. Las capas que contienen los polígonos de las áreas naturales se encuentran en la carpeta "SIG/Áreas Naturales Protegidas" del archivo digital.

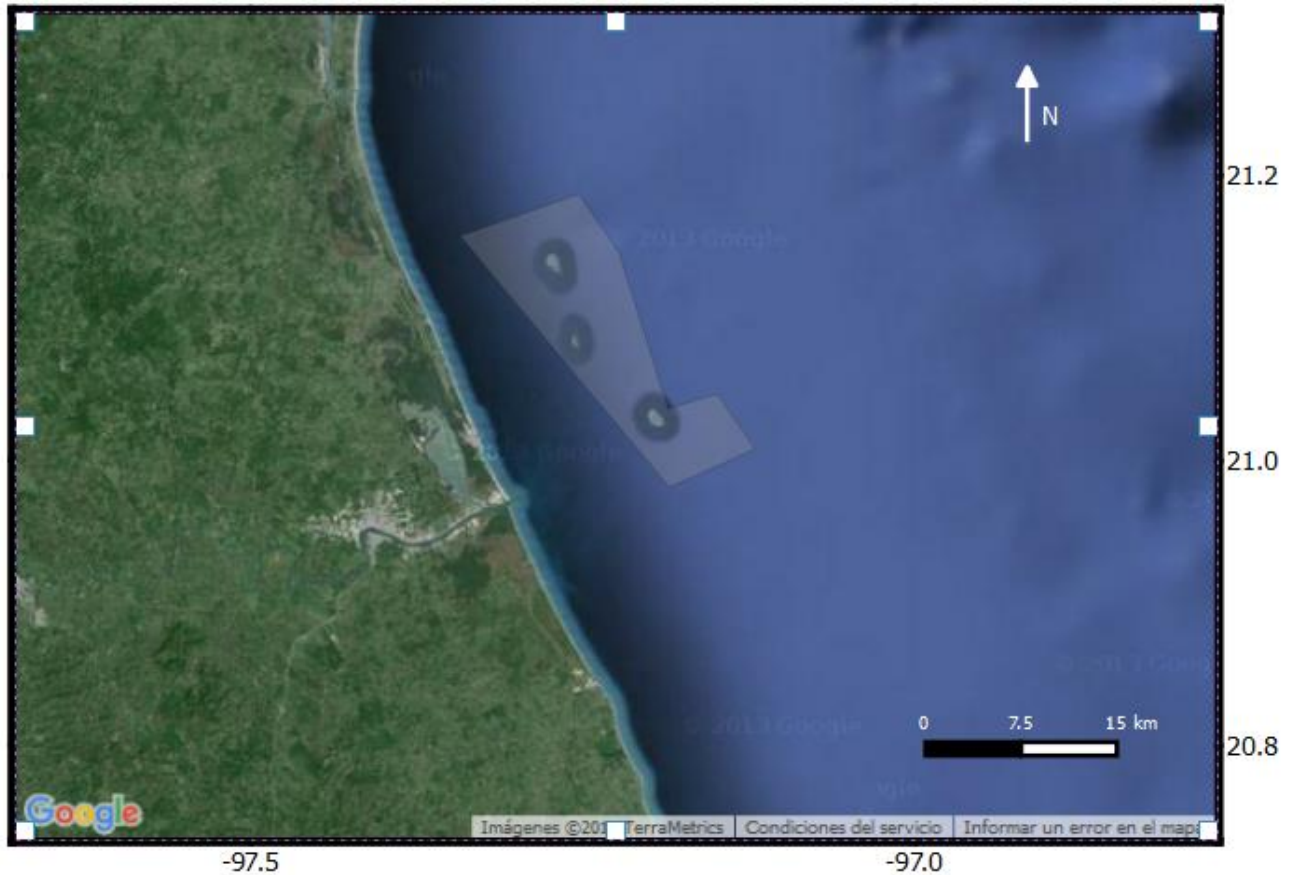


Figura SIG-3. Tres arrecifes del sistema arrecifal Lobos-Tuxpan (Tanguijo al norte, Enmedio al centro y Tuxpan al sur) y el polígono que delimita la zona del área natural protegida.

6.3.3 Mapas de variables ambientales: Se muestra como ejemplo la concentración de clorofila a en el Golfo de México en el año 2014 (Fig. SIG-4). Los datos se encuentran en la carpeta "SIG/Variables Ambientales/Clorofila a" y "SIG/Variables Ambientales/Temperatura Superficial del Mar" del archivo digital. Los datos son una media anual para el año 2014, y el valor mensual para cada mes de 2014.

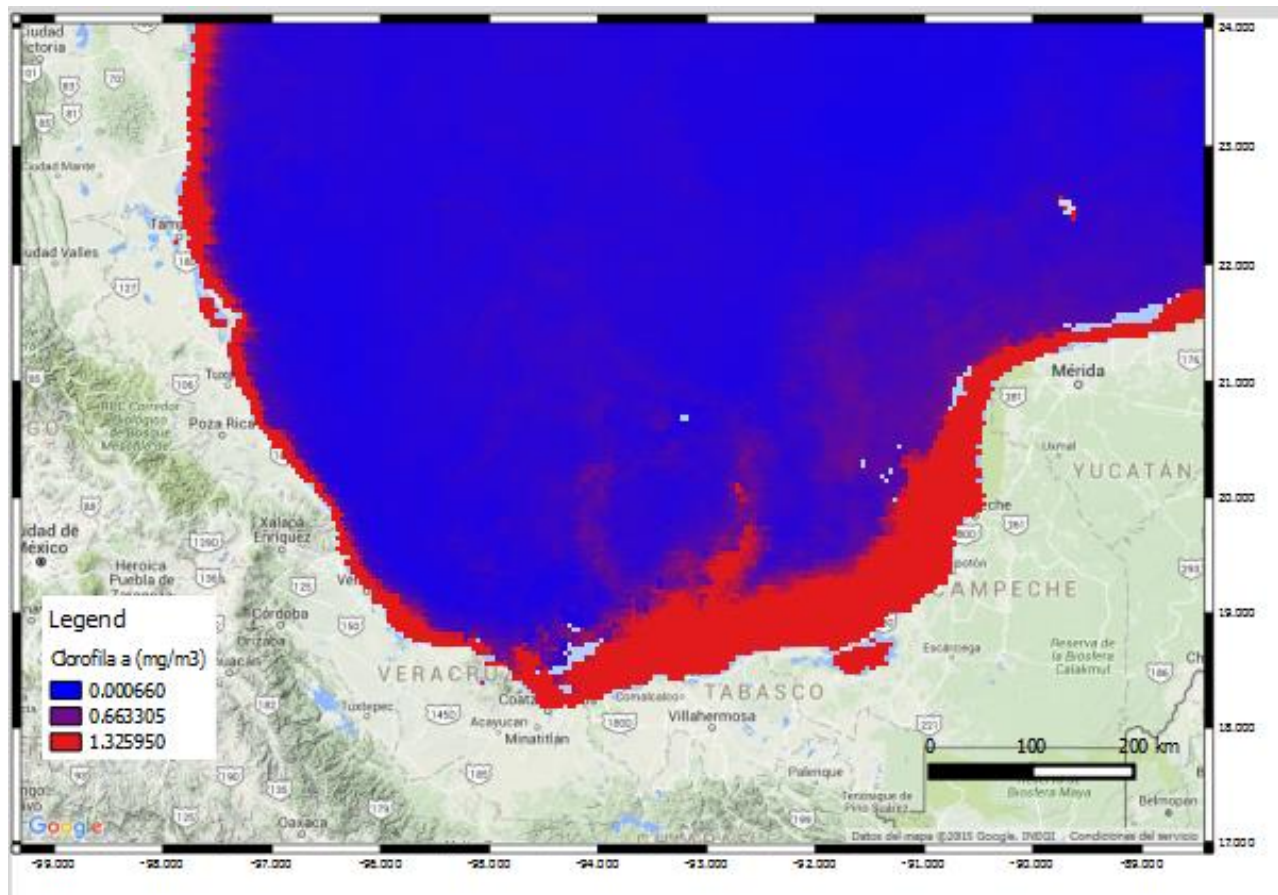


Figura SIG-4. Concentración de clorofila *a* en el Golfo de México en 2014.

6.3.4 Mapas de densidad de las especies más importantes: Se muestran como ejemplos los mapas de densidad relativa para *Acropora palmata* (Fig. SIG-5), *Colpophyllia natans* (Fig. SIG-6), *Orbicella annularis* (Fig. SIG-7) y *O. faveolata* (Fig. SIG-8) en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan. Los datos se encuentran en la carpeta “SIG/Mapas de densidad” del archivo digital.

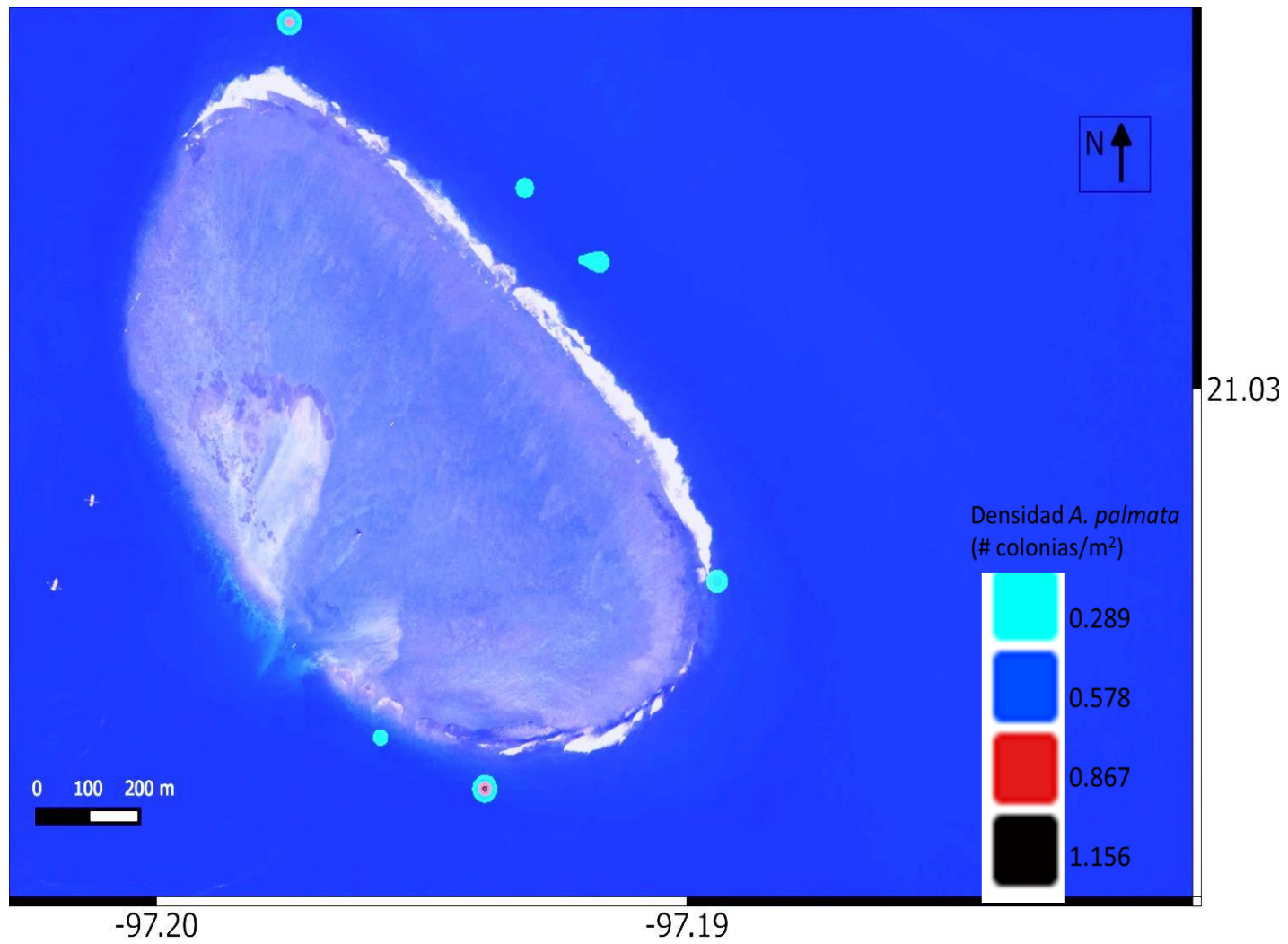


Figura SIG-5. Densidad relativa del coral *Acropora palmata* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

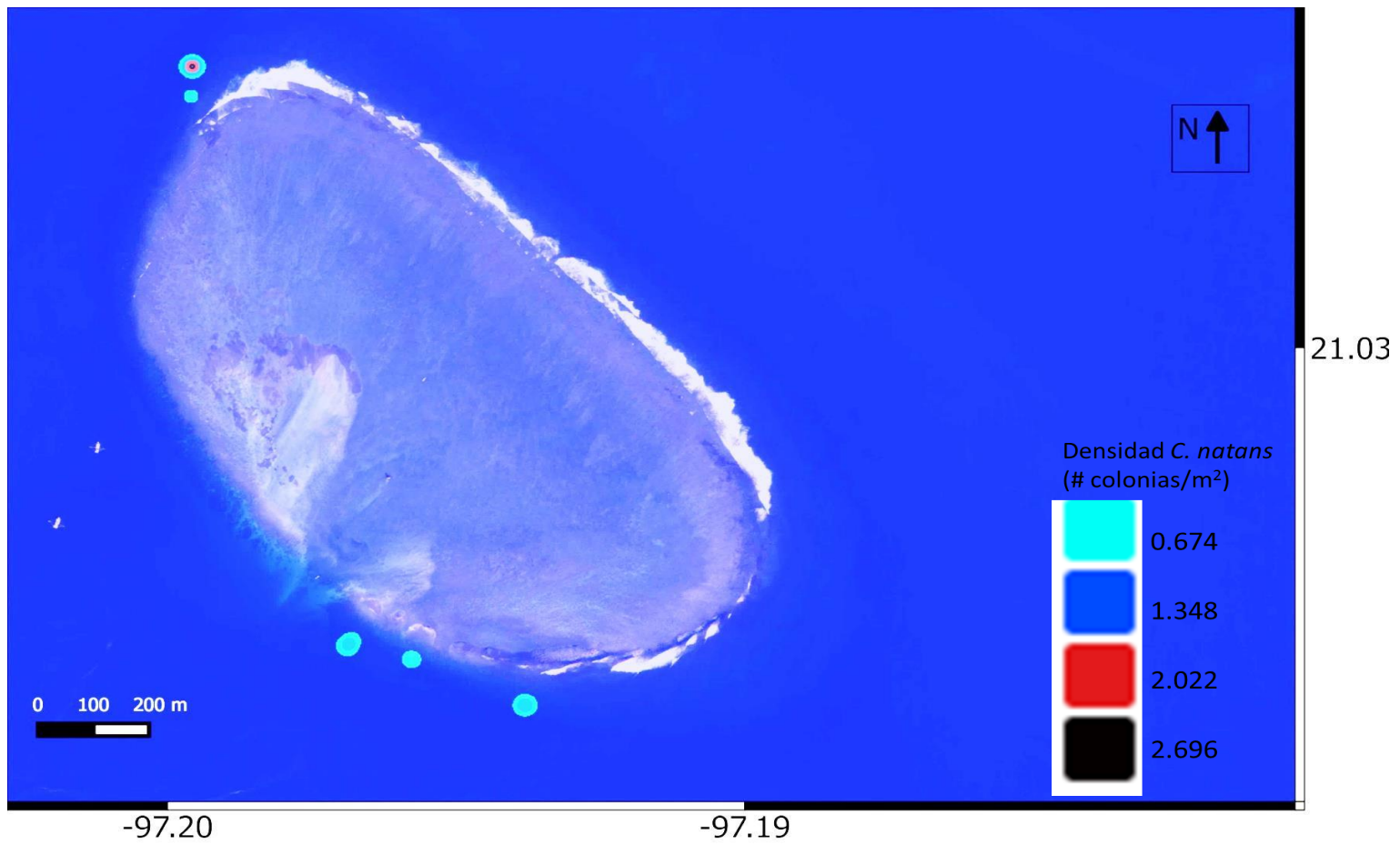


Figura SIG-6. Densidad relativa del coral *Colpophyllia natans* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

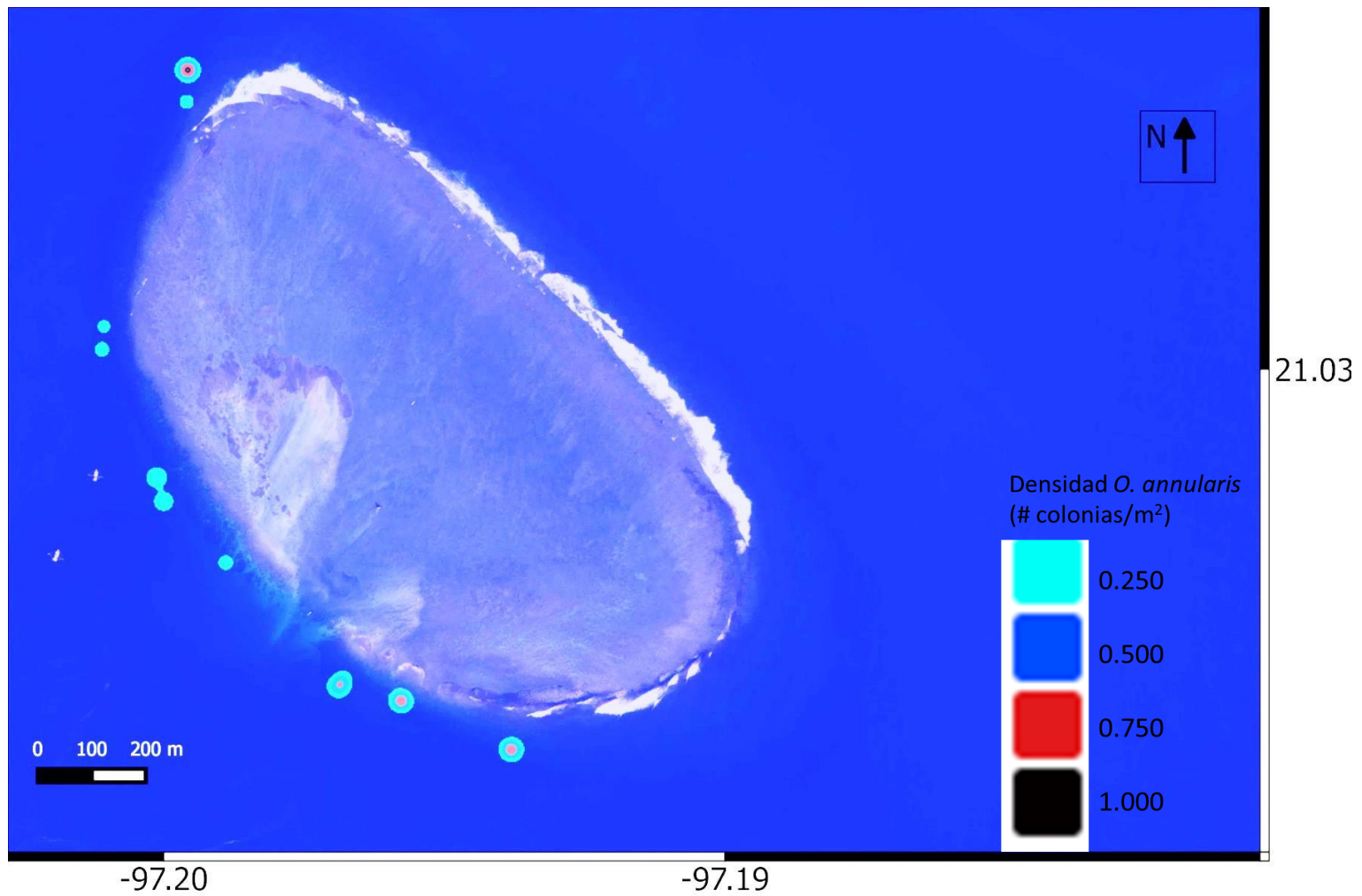


Figura SIG-7. Densidad relativa del coral *Orbicella annularis* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

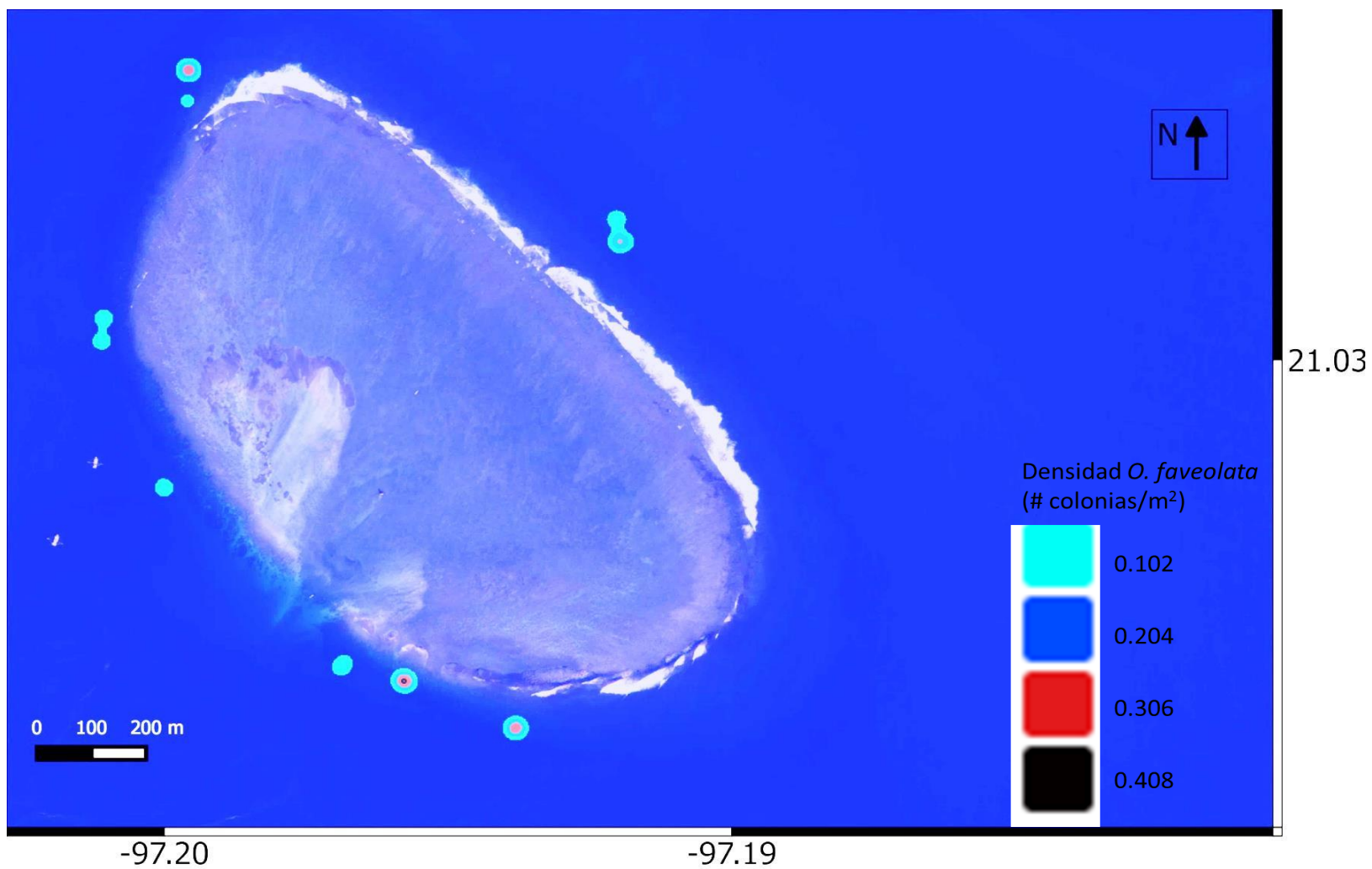


Figura SIG-8. Densidad relativa del coral *Orbicella faveolata* en las estaciones de muestreo del arrecife Tuxpan.

CAPÍTULO 7. RECOPIACIÓN DE LITERATURA CIENTÍFICA

La primera publicación en la que se hizo referencia a los arrecifes coralinos mexicanos en el Golfo de México fue hecha por Alexander von Humboldt, después de visitar los arrecifes de Veracruz (Humboldt 1811). Posteriormente, Angelo Heilprin hizo la primera publicación detallada sobre los arrecifes de Veracruz en 1890 y no fue sino hasta 1954 Walton F.G. Smith publicó la primera lista de corales y mapas de algunos arrecifes del Golfo de México. A finales de la década de 1950 y durante la década de 1960, se realizaron un alto número de estudios sistemáticos en los arrecifes del Golfo de México con el objeto de entender el crecimiento arrecifal en áreas con altas tasas de sedimentación, lo que contravenía el paradigma dominante de que los arrecifes coralinos solamente podían desarrollarse en aguas permanentemente transparentes y dio lugar a los que se consideró el “reef problem”. Estos estudios fueron realizados principalmente por científicos extranjeros (Moore 1958, Emery 1963, Chamberlain 1966, Rigby & MacIntyre 1966, Morelock & Koenig 1967) y en menor grado por investigadores mexicanos (Huerta 1961, Bonet 1967, Chávez *et al.* 1970, Chávez 1973). Desde entonces, muchas más instituciones de investigación mexicanas, como el Instituto Politécnico Nacional y la Universidad Nacional Autónoma de México, y extranjeras, han publicado sobre los arrecifes del Golfo de México, principalmente en temas biológicos, ecológicos y oceanográficos (Villalobos 1971; Jordán-Dahlgren & Rodríguez-Martínez 2003).

Actualmente uno de los temas científicos de mayor interés es determinar las consecuencias, a mediano y largo plazo, del cambio climático en los arrecifes coralinos por el incremento en la temperatura del océano, y con ello de la ciclogénesis, en la acidificación, en la radiación UV-B y, a mediano plazo, el incremento en el nivel del mar y en la modificación en los patrones de las corrientes marinas. Esto, aunado a la sobrepesca, la eutroficación, la contaminación, la modificación del litoral y otros impactos de orden local y/o regional, contribuye a degradar las condiciones ambientales necesarias para el buen desarrollo y la salud de la fauna coralina. La acción sinérgica de todos estos factores crea un estrés ambiental que tiende a debilitar a los corales y a favorecer a otras especies, lo que resulta en enfermedades emergentes, en blanqueamiento y en una menor resistencia a sus competidores y depredadores (Harvell *et al.* 2007). Todo lo anterior produce cambios en la abundancia y distribución de las especies de coral, siendo particularmente preocupante la disminución en la abundancia de especies clave porque resulta en una reducción en la complejidad estructural del relieve arrecifal (Alvarez-Filip *et al.* 2009), lo que a su vez tiene severas consecuencias ecológicas y pérdida de servicios (Lugo-Fernández *et al.* 1998).

La pregunta fundamental en este contexto de cambio ambiental es a que grado los arrecifes de coral mexicanos en el Golfo de México están siendo afectados por el cambio climático y cuál es el riesgo potencial. La segunda pregunta es ¿cuánto sabemos al respecto? y por ello el objetivo del presente capítulo fue integrar un acervo bibliográfico sobre la literatura científica publicada, en revistas indexadas y en libros,

que pudiera ser relevante para entender el impacto del cambio climático sobre los arrecifes mexicanos del Golfo de México.

7.1 Métodos

Se realizó una búsqueda de artículos científicos arbitrados en las principales bases de datos (Web of Science, Scopus, Google Académico, Biological Abstracts, Scirus,) y en libros. Siempre que fue posible se obtuvieron los documentos en formato digital (PDF). En el caso de los artículos antiguos (anteriores a 1970) estos raramente se encontraron en formato PDF, sin embargo, la mayoría de ellos forman parte del acervo bibliográfico del Laboratorio de Sistemas Arrecifales en el Instituto del Mar y Limnología de la UNAM, por lo que pudieron ser escaneados. En doce casos, sin embargo, no se pudieron conseguir los artículos y solo se agregaron las referencias bibliográficas a la base de datos.

Con la información obtenida se elaboró una base de datos, en el programa "Access", que contiene: (1) información primaria que incluye la referencia bibliográfica (Autor(es), año de publicación, título del artículo, nombre de la revista, volumen y número de páginas), (2) información secundaria que incluye los campos: (a) Sistema arrecifal, (b) Arrecife(s) estudiado(s), (c) Grupo(s) estudiado(s), (d) Disciplina y (e) un campo indicando si se cuenta o no con el PDF del documento.

7.2 Resultados

La base de datos sobre literatura científica que pudiera ser relevante para entender el impacto del cambio climático sobre los arrecifes mexicanos del Golfo de México consta de 135 registros, 123 de los cuales se digitalizaron (Anexo 4).

Las palabras clave bajo las cuales se pueden realizar las búsquedas en los campos de información secundaria son las siguientes:

- a. **Sistema arrecifal:** Sistema Arrecifal Veracruzano, Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, Banco de Campeche, Arrecifes de los Tuxtlas.
- b. **Arrecife estudiado:** Alacranes, Anegada de Adentro, Anegada de Afuera, Bajo de Diez, Blake, Blanquilla, Cabezo, Cayo Arenas, Cayo Arcas, Chopas, Enmedio Gallega, Galleguilla, Hornos, Ingeniero, , Isla Verde, , La Perla, Lobos, Medio, Palo Seco, Pájaros, Punta Brava, Punta Gorda, Punta Mocambo, Madagascar, Rizo, Sacrificios, Sisal, Serpientes, Tanhuio, Triángulos Este, Triángulos Oeste, Tripie, Tuxpan, Zapotitlán.
- c. **Grupo(s) estudiado(s):** Algas, anélidos poliquetos, anémonas, arrecifes, cambio climático, clima, comunidad coralina, contaminación, crustáceos, equinodermos, escleractinios, esponjas ictiofauna, macroalgas, macrobentos, Milleporina, ,

oceanografía, octocorales, pastos marinos, plancton, peces, pesquerías, simbioses, varios, zona costera.

- d. **Disciplina:** Abundancia, acidificación del océano, bioerosión, biogeología, biogeografía, blanqueamiento, cambio climático, comunidades, condición, conectividad, contaminación, conservación, crecimiento, descripción, distribución, diversidad, ecología, enfermedades, especies invasora, eutroficación, fisiología, geología, geomorfología, hidrografía, manejo, impacto económico, métodos, monitoreo, oceanografía, percepción remota, perturbaciones antropogénicas, perturbaciones naturales, productividad, reclutamiento, recolonización, riqueza específica, simbiosis, topografía, restauración, sedimentos, taxonomía, uso, zonación.

Del total de la literatura compilada en la base de datos, se observó que el mayor número de artículos tratan sobre los arrecifes incluidos en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), para los cuales existen 84 publicaciones consideradas relevantes para entender el impacto del cambio climático, seguidos por los arrecifes incluidos en el Banco de Campeche (28 publicaciones) y el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (20 publicaciones) (Fig. L-1). Para los arrecifes de los Tuxtlas solamente se encontraron dos publicaciones (Fig. L-1). Además, se obtuvieron 23 publicaciones sobre temas generales del Golfo de México, principalmente relacionadas con oceanografía y clima.

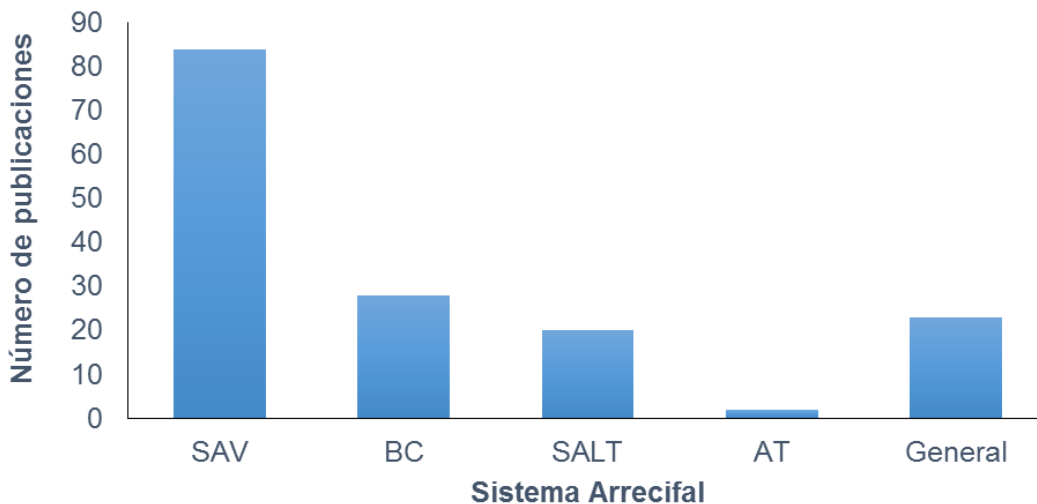


Figura L-1. Número de publicaciones científicas relevantes para cuatro sistemas arrecifales del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, AT: Arrecifes de los Tuxtlas, BC: Banco de Campeche, General: Publicaciones sobre el Golfo de México en general.

La revisión de los artículos estudiados mostró que la mayoría (46%) de los estudios que se han publicado sobre los arrecifes mexicanos del Golfo de México tratan sobre temas de ecología, de los cuales el 66% fue realizado en el Sistema Arrecifal Veracruzano (Fig. L-2). Los temas de estudio que tuvieron entre 10 y 20 publicaciones fueron aquellos relacionados con temas de perturbaciones antropogénicas, oceanografía, conservación y manejo, biología y taxonomía (Fig. L-2). Para el resto de los temas de estudio, incluyendo los relacionados con el cambio climático, las enfermedades y el fenómeno de blanqueamiento, se encontraron muy pocas publicaciones (seis o menos; Fig. L2).

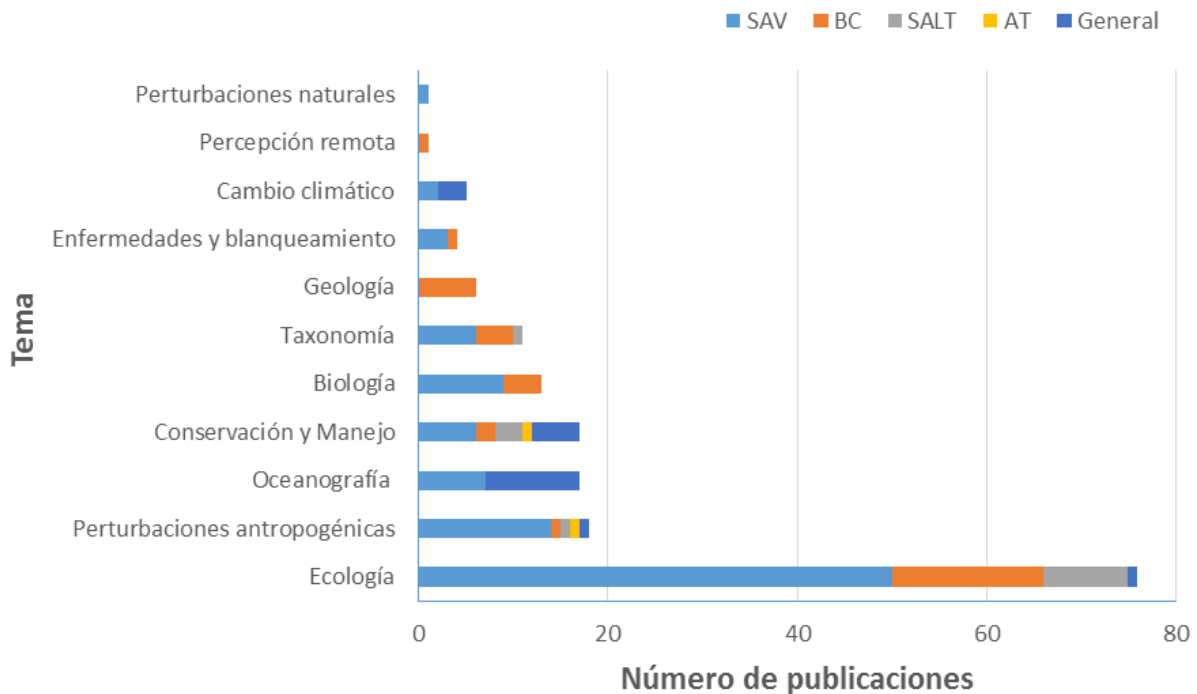


Figura L-2. Número de publicaciones por tema de estudio para cinco sistemas arrecifales del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, ASV: Arrecifes al sur de Veracruz, AT: Arrecifes de los Tuxtles, BC: Banco de Campeche, General: Publicaciones sobre el Golfo de México en general.

Con base en la literatura estudiada, se hicieron listados de la riqueza específica de los grupos bénticos más importantes que han sido reportados para los arrecifes mexicanos del Golfo de México (Tabla L-1) y de las especies bénticas importantes (Tablas L-2 a L-5). El análisis exploratorio muestra que para los arrecifes del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan y del Sistema Arrecifal Veracruzano existe información sobre varios grupos bénticos importantes (corales, gorgonáceos, algas y esponjas), mientras que para los arrecifes del Banco de Campeche solo existe información sobre los primeros dos grupos y para los arrecifes de los Tuxtles solo existe una publicación para las especies de corales escleractinios (Tabla L-1).

Tabla L-1. Número de especies reportadas en la literatura para los grupos bénticos más importantes en el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT), en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV), en los Arrecifes de los Tuxtlas (AT) y en los Arrecifes del Banco de Campeche (ABC). NA: no hay información. Los corales duros incluyen escleractinios e hidrocorales.

<i>Grupo béntico</i>	<i>Sistema Arrecifal</i>			
	<i>SALT</i>	<i>SAV</i>	<i>AT</i>	<i>BC</i>
<i>Corales duros</i>	34	42	20	49
<i>Gorgonáceos</i>	11	15	NA	30
<i>Eponjas</i>	18	14	NA	NA
<i>Macroalgas</i>	40	91	NA	NA

El mayor número de especies de coral duro (escleractinios e hidrocorales pétreos) se registraron en arrecifes del Banco de Campeche (49 especies), seguidos por el Sistema Arrecifal Veracruzano (42 especies) y el Sistema arrecifal Lobos-Tuxpan (34), mientras que en los Arrecifes de los Tuxtlas se han registrado pocas especies de este grupo (20) (Tabla L-2). Para los gorgonáceos se encontraron registros de especies para todos los sistemas arrecifales, menos para el de los Tuxtlas. Al igual que lo observado en el caso de los corales duros, este grupo parece ser más abundante en los arrecifes del Banco de Campeche (30 especies), que en los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano (15) y del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (11) (Tabla L-3).

Respecto a las esponjas, solamente existen registros para los arrecifes del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan y del Sistema Arrecifal Veracruzano, los cuales parecen indicar que este grupo béntico es más abundante en el primer sistema que en el segundo (Tabla L-4). Finalmente para el grupo de las macroalgas solo se encontraron publicaciones para los arrecifes del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan y para los del Sistema Arrecifal Veracruzano, siendo para éste último para el que se ha registrado un mayor número de especies (90) (Tabla L-5).

Tabla L-2. Corales escleractinios e hidrocorales pétreos reportados para los arrecifes mexicanos del Golfo de México en diferentes publicaciones. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, AT: Arrecifes de los Tuxtlas (AT), ASC: Arrecifes del Banco de Campeche.

<i>Especie</i>	<i>Sistema Arrecifal</i>				<i>Especie</i>	<i>Sistema Arrecifal</i>			
	SALT	SAV	AT	BC		SALT	SAV	AT	BC
<i>Acropora cervicornis</i>	A,C	A, E	G	F, G	<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	A,C, D	A,E		F, G
<i>Acropora palmata</i>	A,C	A, B, E	G	F, G	<i>Orbicella annularis</i>	A,C, D	A,E		G
<i>Acropora prolifera</i>	C			F	<i>Orbicella faveolata</i>	A,C	A		G
<i>Agaricia agaricites</i>	A,C, D	A, E	G	F, G	<i>Orbicella franksi</i>	A,C	A		G
<i>Agaricia fragilis</i>	A,C, D	A	G	F, G	<i>Oculina diffusa</i>	A,C	A, B,E	G	G
<i>Agaricia humilis</i>		A	G	G	<i>Oculina robusta</i>		A	G	G
<i>Agaricia lamarcki</i>		A,E		G	<i>Oculina tenella</i>			G	G
<i>Cladocora arbuscula</i>			G	G	<i>Oculina valenciennesi</i>		A		G
<i>Colpophyllia breviserialis</i>		E			<i>Oculina varicosa</i>	A	A	G	G
<i>Colpophyllia natans</i>	A,C	A,B,E	G	F, G	<i>Porites astreoides</i>	A,C, D	A,B,E	G	F, G
<i>Dichocoenia stokesi</i>	C	A,B		F, G	<i>Porites branneri</i>	C	A		G
<i>Diploria clivosa</i>	A,C, D	A,B,E	G	F, G	<i>Porites colonensis</i>	A,D	A		G
<i>Diploria labyrinthiformis</i>		E		F, G	<i>Porites divaricata</i>	A,C	A		G
<i>Diploria strigosa</i>	A,C, D	A,B,E	G	F, G	<i>Porites furcata</i>	A,C	A		G
<i>Eusmilia fastigiata</i>				G	<i>Porites porites</i>	A,C,D	A,E		F, G
<i>Favia fragum</i>		A		F, G	<i>Scolymia cubensis</i>	A,C, D	A		H
<i>Leptoseris cucullata</i>	C	A,B	G	G	<i>Scolymia lacera</i>	C	A,E		H
<i>Madracis decactis</i>	A,C,D	A, B,E	G	F, G	<i>Scolymia spp</i>				F
<i>Madracis aurentenra</i>		A,B,E		G	<i>Siderastrea radians</i>	A,C,D	A,B,E	G	F, G
<i>Manicina areolata</i>	A	A,E		F, G	<i>Siderastrea siderea</i>	A,C,D	A,B,E	G	F, G
<i>Meandrina meandrites</i>		B,E		F, G	<i>Solenastrea bournoni</i>		B		F
<i>Montastraea cavernosa</i>	A,C,D	A, B,E	G	F, G	<i>Stephanochoenia intersepta</i>	A,C,D	A,B,E	G	F, G
<i>Mussa angulosa</i>	A,C	A,E		G					
<i>Mycetophyllia aliciae</i>				F, G	<i>Millepora alcornis</i>	C, D			F
<i>Mycetophyllia danaana</i>	A,C	A		G	<i>Millepora complanata</i>				F
<i>Mycetophyllia ferox</i>	A,C, D	A		F, G					

A: Horta-Puga *et al.* 2007 y 2015; B: Jones *et al.* 2008; C: Programa de Manejo APFF Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan; D: Escobar-Vázquez & Chávez 2012; E: Lara *et al.* 1992; F: Jordán-Dahlgren y Rodríguez-Martínez 2004; G- Ortiz-Lozano *et al.* 2013; H: Pérez-España *et al.* 2008.

Tabla L-3. Gorgonáceos reportados para los arrecifes mexicanos del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano, BC: Arrecifes del Banco de Campeche.

Especie	Sistema Arrecifal		
	SALT	SAV	BC
<i>Briareum asbestinum</i>			A
<i>Erythropodium caribaeorum</i>	A	A	A
<i>Iciligorgia schrammi</i>			A
<i>Elisella barbadensis</i>			A
<i>Eunicea asperula</i>		A	A
<i>Eunicea calyculata</i>		A	A
<i>Eunicea fusca</i>			A
<i>Eunicea laciniata</i>	A	A	A
<i>Eunicea laxispica</i>		A	A
<i>Eunicea mammosa</i>			A
<i>Eunicea succinea</i>			A
<i>Eunicea tourneforti</i>	A	A	A
<i>Lophogorgia sanguinoleanta</i>			A
<i>Muricea atlántica</i>	A	A	A
<i>Muricea elongata</i>			A
<i>Muricea muricata</i>	A	A	A
<i>Muriceopsis flavida</i>			A
<i>Plexaura flexuosa</i>	A	A	A
<i>Plexaura homomalla</i>	A	A	A
<i>Plexaurella dichotoma</i>	A	A	A
<i>Plexaurella flagellosa</i>			A
<i>Plexaurella nutans</i>		A	
<i>Plexaurella porosa</i>	A	A	A
<i>Gorgonia flabellum</i>			A
<i>Gorgona ventalina</i>			A
<i>Pseudopterogorgia acerosa</i>	A	A	A
<i>Pseudopterogorgia americana</i>	A	A	A
<i>Pseudopterogorgia kallos</i>			A
<i>Pseudopterogorgia rigida</i>			A
<i>Pterogorgia citrina</i>			A
<i>Pterogorgia guadalupensis</i>			A
Total	11	15	30

A – Jordán-Dahlgren 1989

Tabla L-4 – Esponjas reportadas para los arrecifes mexicanos del Golfo de México. SALT: Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan, SAV: Sistema Arrecifal Veracruzano.

Clase	Orden	Familia	Especie	Sistema Arrecifal	
				SALT	SAV
<i>Demospongiae</i>	Hadromerida	Clionidae	<i>Cliona caribbaea</i>	A	
			<i>Cliona delitrix</i>	A	A
	Chondrosida	Chondrillidae	<i>Chondrilla</i> sp.	A	
	Poecilosclerida	Coelosphaeridae	<i>Lissodendoryx</i>	A	A
			<i>isodictyalis</i>		
		Desmacididae	<i>Desmapsamma</i> <i>anchorata</i>	A	A
		Iotrochotidae	<i>Iotrochota birotulata</i>	A	A
		Crambeidae	<i>Monanchora</i> <i>arbuscula</i>	A	A
		Raspailiidae	<i>Ectyoplasia ferox</i>	A	A
	Haplosclerida	Callyspongiidae	<i>Callyspongia</i> <i>vaginalis</i>	A	A
			<i>Callyspongia</i> <i>armigera</i>	A	A
		Niphatidae	<i>Amphimedon</i> <i>compressa</i>	A	A
			<i>Amphimedon viridis</i>	A	A
			Petrosidae	<i>Neopetrosia</i> <i>subtriangularis</i>	A
	Dictyoceratida	Spongiidae	<i>Hyrtios proteus</i>	A	
		Irciniidae	<i>Ircinia felix</i>	A	A
			<i>Ircinia strobilina</i>	A	A
Verongida	Aplysinidae	<i>Aplysina fistularis</i>	A	A	
		<i>Aplysina cauliformis</i>	A		

A - González-Gándara et al. (2009).

Tabla L-5 – Macroalgas registradas en el Sistema Arrecifal Veracruzano (SAV) y en el Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan (SALT). Algunas especies se re-clasificaron en familias de acuerdo con las claves utilizadas en algaeBASE (www.algaebase.org)

Clase	Familia	Especie	Sistema Arrecifal	
			SALT	SAV
CYANOPHYCEA	<i>Chamaesiphonaceae</i>	<i>Entophysalis conferta</i>		A
	<i>Chroococcaceae</i>	<i>Anacystis aeruginosa</i>		A
	<i>Oscillatoriaceae</i>	<i>Blennothrix lyngbyacea</i>		A
	<i>Rivulariaceae</i>	<i>Calothrix crustacea</i>		A
	<i>Schizothrichaceae</i>	<i>Schizothrix arenaria</i>		A
COSCINODISCOPHYCEAE	<i>Melosiraceae</i>	<i>Melosira borreri</i>		A
		<i>Melosira moniliformis</i>		A
FRAGILARIOPHYCEAE	<i>Grammatophoraceae</i>	<i>Grammatophora marina</i>		A
	<i>Licmophoraceae</i>	<i>Licmophora abbreviata</i>		A
		<i>Licmophora flabellata</i>		A
BACILLARIOPHYCEAE	<i>Achnantheaceae</i>	<i>Achnanthes longipes</i>		A
	<i>Cocconeidaceae</i>	<i>Cocconeis placentula</i>		A
ULVOPHYCEAE	<i>Anadyomenaceae</i>	<i>Anadyomene stellata</i>		A
		<i>Microdictyon marinum</i>	B	
	<i>Boodleaceae</i>	<i>Boodlea composita</i>		A
		<i>Cladophoropsis macromeres</i>	B	A
		<i>Cladophoropsis membranacea</i>		A,C
		<i>Struvea anastomosans</i>		A
	<i>Bryopsidaceae</i>	<i>Bryopsis hypnoides</i>		A
		<i>Bryopsis pennata</i>		A
	<i>Caulerpaceae</i>	<i>Caulerpa cupressoides</i>	B	A
		<i>Caulerpa racemosa</i>	B	A,C
		<i>Caulerpa sertularioides</i>	B	A,C
		<i>Caulerpella ambigua</i>	B	
	<i>Cladophoraceae</i>	<i>Cladophora sp.</i>	B	
		<i>Cladophora coelothrix</i>		A
		<i>Cladophora montagneana</i>		A
		<i>Cladophora socialis</i>		A
	<i>Codiaceae</i>	<i>Codium taylorii</i>		A,C
		<i>Codium isthmocladum</i>		C
	<i>Dasycladaceae</i>	<i>Cymopolia barbata</i>		A
		<i>Neomeris annulata</i>	B	A,C
	<i>Derbesiaceae</i>	<i>Derbesia sp.</i>	B	
	<i>Halimedaceae</i>	<i>Halimeda opuntia</i>		A,C
		<i>Halimeda scabra</i>		C
		<i>Halimeda tuna</i>		A
	<i>Polyphysaceae</i>	<i>Acetabularia schenckii</i>		A

		<i>Parvocaulis polyphysoides</i>		C
		<i>Polyphysa polyphysoides</i>		A
	<i>Siphonocladaceae</i>	<i>Dictyosphaeria cavernosa</i>	B	A,C
		<i>Dictyosphaeria ocellata</i>	B	
		<i>Dictyosphaeria verluysii</i>	B	
		<i>Ernodesmis verticillata</i>		A,C
	<i>Udoteaceae</i>	<i>Penicillus lamourouxii</i>	B	
		<i>Rhipocephalus phoenix</i>	B	A,C
	<i>Ulvaceae</i>	<i>Enteromorpha compressa</i>		A,C
		<i>Ulva</i> sp.	B	
PHAEOPHYCEAE	<i>Chordariaceae</i>	<i>Cladosiphon occidentalis</i>		C
		<i>Cladosiphon zosterae</i>		A
	<i>Dictyotaceae</i>	<i>Canistrocarpus cervicornis</i>		A,C
		<i>Dictyterpa jamaicensis</i>		C
		<i>Dictyota bartayresiana</i>	B	A,C
		<i>Dictyota menstrualis</i>	B	C
		<i>Dictyota pulchella</i>	B	C
		<i>Padina boergesenii</i>		A
		<i>Padina pavonica</i>		C
		<i>Padina sanctae-crucis</i>	B	
	<i>Ectocarpaceae</i>	<i>Ectocarpus rallsiae</i>		C
	<i>Sargassaceae</i>	<i>Sargassum</i> sp.	B	
		<i>Sargassum furcatum</i>		C
	<i>Scytosiphonaceae</i>	<i>Colpomenia sinuosa</i>	B	C
		<i>Hydroclathrus clathratus</i>	B	
	<i>Sphacelariaceae</i>	<i>Rosenvingea intricata</i>		C
		<i>Sphacelaria rigidula</i>		C
		<i>Sphacelaria tribuloides</i>		A
RHODOPHYTA	<i>Acrochaetiaceae</i>	<i>Audouinella microscopica</i>		A
	<i>Ceramiaceae</i>	<i>Ceramium</i> sp.	B	
		<i>Wrangelia argus</i>	B	
		<i>Centroceras clavulatum</i>		A
		<i>Ceramium flaccidum</i>		A
		<i>Ceramium luetzelburgii</i>		A
		<i>Ceramium nitens</i>		A
		<i>Spyridia filamentosa</i>		A
	<i>Champiaceae</i>	<i>Champia parvula</i>		A
	<i>Corallinaceae</i>	<i>Jania adhaerens</i>	B	A
		<i>Amphiroa fragilissima</i>	B	A
		<i>Amphiroa rigida</i>	B	A
		<i>Hydrolithon farinosum</i>		A
		<i>Hydrolithon improcerum</i>		A
		<i>Lithophyllum bermudense</i>		A
		<i>Lithophyllum congestum</i>		A

	<i>Lithophyllum daedaleum</i>		A
	<i>Lithophyllum daedaleum</i>		A
	<i>Lithophyllum intermedium</i>		A
	<i>Neogoniolithon mamillare</i>		A
	<i>Neogoniolithon spectabile</i>		A
	<i>Paragoniolithon solubile</i>		A
	<i>Pneophyllum fragile</i>		A
<i>Erythropeltidaceae</i>	<i>Erythrocladia irregularis</i>		A
<i>Galaxauraceae</i>	<i>Galaxaura rugosa</i>	B	A
	<i>Tricleocarpa fragilis</i>	B	
	<i>Tricleocarpa cylindrica</i>	B	
<i>Gelidiaceae</i>	<i>Pterocladia caerulescens</i>		A
<i>Gelidiellaceae</i>	<i>Gelidiella acerosa</i>		A
<i>Gracilariaceae</i>	<i>Gelidiopsis variabilis</i>		A
<i>Goniotrichaceae</i>	<i>Stylonema alsidii</i>		A
<i>Hypneaceae</i>	<i>Hypnea spinella</i>	B	A
	<i>Hypnea musciformis</i>	B	
<i>Liagoraceae</i>	<i>Liagora ceranoides</i>	B	A
<i>Nemaliaceae</i>	<i>Trichogloea herveyi</i>		A
<i>Peyssoneliaceae</i>	<i>Peyssonnelia sp</i>	B	
<i>Rhodomelaceae</i>	<i>Acanthophora spicifera</i>	B	
	<i>Chondria littoralis</i>	B	
	<i>Chondrophyucus poiteaui</i>	B	
	<i>Laurencia intricata</i>	B	
	<i>Wrightiella blodgettii</i>	B	
<i>Rhodomelaceae</i>	<i>Acanthophora spicifera</i>		A
	<i>Chondria curvilineata</i>		A
	<i>Digenea simplex</i>		A
	<i>Laurencia obtusa</i>		A
	<i>Laurencia papillosa</i>		A
	<i>Laurencia poiteaui</i>		A
	<i>Polysiphonia sphaerocarpa</i>		A
<i>Rhodymeniaceae</i>	<i>Coelothrix irregularis</i>	B	

A – Mateo-Cid *et al.* 1996; B - González-Gándara *et al.* 2007; C – Robinson *et al.* 2012.

7.3 El conocimiento de los arrecifes mexicanos en el Golfo de México

A la fecha de este reporte, los arrecifes mexicanos del Golfo de México han sido estudiados sistemáticamente desde hace más de 60 años. La mayoría de los estudios se realizaron en los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano, habiendo relativamente pocos trabajos sobre los arrecifes del Banco de Campeche y del Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan y solamente dos estudios sobre el Sistema Arrecifal los Tuxtlas. En general, los estudios se han enfocado mayormente en temas ecológicos, sobre todo para conocer la riqueza de especies bénticas, especialmente de corales duros, y su estructura comunitaria. Más recientemente otros temas de investigación han incluido el efecto de perturbaciones antropogénicas, principalmente aquellas relacionadas con el desarrollo costero colindante, oceanografía y conservación y manejo. Los estudios enfocados a evaluar la condición de estos arrecifes y el impacto que el cambio climático podría llegar a tener sobre ellos, a mediano y largo plazo, son muy pocos. Es necesario desarrollar proyectos de investigación que permitan un mayor conocimiento sobre los arrecifes mexicanos del Golfo de México que han sido poco estudiados y, de manera general, proyectos enfocados a entender el impacto del cambio climático en estos arrecifes, a fin de poder aplicar medidas de conservación y manejo adecuadas.

CONSIDERACIONES FINALES

El propósito primario de este estudio fue evaluar la condición de las colonias de coral de las especies clave en cuatro arrecifes mexicanos del Golfo de México mediante un muestreo rápido que permitiera hacer comparaciones estadísticamente válidas. La condición se refiere al momento del muestreo ya que los signos de enfermedad y las interacciones de competencia pueden variar en el tiempo y el espacio en función de cambios climáticos y de otros factores naturales y antropogénicos.

Con esta información se hicieron una serie de simulaciones para las cuatro especies de coral clave, en las que se representaron casos extremos de prevalencia y porcentaje de sobrecrecimiento por tapetes algales, a fin de obtener una idea del posible estado de condición de las colonias de coral a corto plazo (10 años). Esto asumiendo que las condiciones que causaron la condición registrada en las colonias de coral durante el muestreo se mantienen durante el tiempo de la simulación.

- La conclusión global es que los niveles de afectación a las colonias de coral de especies clave son altos, exceptuando a *A. palmata*, por lo que las predicciones a 10 años muestran un declive fuerte en sus poblaciones en los dos sistemas arrecifales.

El propósito secundario fue tratar de identificar, a través del análisis de los patrones condición de las colonias de coral de especies clave, señales evidentes del efecto del Cambio Climático Global a escala de arrecife o de sistema arrecifal (Sistema Arrecifal Veracruzano o Sistema Arrecifal Isla Lobos-Tuxpan), considerando que no se pretendió obtener muestras representativas de los sistemas, sino comparar dos arrecifes con características similares en cada sistema arrecifal.

- La conclusión global es que hay causas locales que afectan la prevalencia de enfermedades y de otras afecciones, esto dado que las diferencias entre arrecifes individuales fueron mayores que las diferencias observadas entre arrecifes de un mismo sistema arrecifal. Esta conclusión no demerita los efectos deletéreos del Cambio Climático Global que acarrea un incremento en la temperatura del océano - y con ello cambios en la ciclogénesis y un aumento en la incidencia de blanqueamiento y de epizootias-, en acidificación, en radiación UV-B y a mediano plazo, el incremento en el nivel del mar y en la modificación en los patrones de las corrientes marinas.

Por lo tanto, la conclusión general es que es necesario moderar los múltiples efectos locales con la mayor eficiencia posible, ya que en principio poco se puede hacer con los efectos globales en términos de manejo directo.

Si bien esto ayudaría a reducir el conjunto de estresores que afectan a los corales, no es garantía de que las condiciones ambientales no sigan deteriorándose, por lo que

este es un argumento más para fortalecer la demanda a los niveles gubernamentales más altos de mantener una seria postura internacional tendiente a reducir significativamente la emisión de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, es fundamental aumentar el nivel de conocimiento sobre los arrecifes mexicanos del Golfo de México. Este estudio en un sentido parcial se puede considerar como una línea base, pero es indispensable generar información que permita hacer modelos de predicción ecológica cada vez más realistas. Esto requiere de estimar la magnitud y el sentido de los procesos ecológicos primarios como son las tasas de reclutamiento, las tasas de mortalidad parcial y total, etc. Así como entender mejor la dinámica de las afecciones estimando tasas de incidencia, las tasas de morbilidad, etc. En este mismo contexto monitorear el estado de condición de esas comunidades coralinas como se ha hecho aquí permitirá evaluar objetivamente el desempeño de los modelos predictivos utilizados.

REFERENCIAS CITADAS

- Aerts, L. A. M., & Van Soest, R. W. M. (1997). Quantification of sponge/coral interactions in a physically stressed reef community, NE Colombia. *Marine Ecology Progress Series. Oldendorf*, 148(1), 125-134.
- AIDA (2015) *La Protección de los Arrecifes de Coral en México. Rescatando la biodiversidad marina y sus beneficios para la humanidad*. 40p.
- Aguirre-Macedo, M. L., Vidal-Martínez, V. M., Herrera-Silveira, J. A., Valdés-Lozano, D. S., Herrera-Rodríguez, M., & Olvera-Novoa, M. A. (2008). Ballast water as a vector of coral pathogens in the Gulf of Mexico: The case of the Cayo Arcas coral reef. *Marine Pollution Bulletin*, 56(9), 1570-1577.
- Alvarez-Filip, L., Dulvy, N. K., Gill, J. A., Côté, I. M., & Watkinson, A. R. (2009). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, rspb20090339.
- Andréfouët, S. (2008). Coral reef habitat mapping using remote sensing: a user vs producer perspective. Implications for research, management and capacity building. *Journal of Spatial Science*, 53(1), 113-129.
- Arcos Espinosa, G., S.B. Jiménez Hernández, y R. Padilla-Hernández, 2010. Escurrimiento medio anual y disponibilidad de agua en la vertiente del Golfo de México, p. 61-72. En: *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobos-Zapata (eds.). Universidad Autónoma de Campeche Cety-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
- Aronson, R. B., & Precht, W. F. (1997). Stasis, biological disturbance, and community structure of a Holocene coral reef. *Paleobiology*, 23(3), 326-346.
- Aronson, R. B., & Precht, W. F. (2001). White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. En: *The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases* (pp. 25-38). Springer Netherlands.
- Babcock, R., & Davies, P. (1991). Effects of sedimentation on settlement of *Acropora millepora*. *Coral Reefs*, 9(4), 205-208.
- Bak, R. P. M., Sybesma, J., & Van Duyl, F. C. (1981). The Ecology of the Tropical Compound Ascidian *Trididemnum solidum*. 11. Abundance, Growth and Survival. *Mar Ecol. Prog. Ser*, 6, 43-52.
- Baker, D. M., Jordán-Dahlgren, E., Maldonado, M. A., & Harvell, C. D. (2010). Sea fan corals provide a stable isotope baseline for assessing sewage pollution in the Mexican Caribbean. *Limnology and Oceanography*, 55(5), 2139-2149.
- Bates, B., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. (2008). *Climate change and Water: technical Paper VI*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C., & Nyström, M. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994), 827-833.
- Beltrán-Torres, A. U. Carricart-Ganivet. 1999. Lista revisitada y clave para los corales petreos zooxantelados (Hydrozoa: Milleporina; Anthozoa: Scleractinia) del Atlántico Mexicano. *Rev. Biol. Trop*, 47, 813-829.

- Blanchon, P., Iglesias-Prieto, R., Dahlgren, E. J., & Richards, S. (2010). Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo. *En memoria*, 229.
- Bonet, F. (1967). Biogeología subsuperficial del Arrecife Alacranes, Yucatán. *Boletín del Instituto de Geología, UNAM No. 80*, 1-191.
- Boyett, H. V., Bourne, D. G., & Willis, B. L. (2007). Elevated temperature and light enhance progression and spread of black band disease on staghorn corals of the Great Barrier Reef. *Marine Biology*, 151(5), 1711-1720.
- Bradshaw, W. E., & Holzapfel, C. M. (2001). Genetic shift in photoperiodic response correlated with global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(25), 14509-14511.
- Brown, B. E. (1997). Coral bleaching: causes and consequences. *Coral reefs*, 16(1), S129-S138.
- Bruckner, A. W., & Bruckner, R. J. (1997). Outbreak of coral disease in Puerto Rico. *Coral Reefs*, 16(4), 260-260.
- Bruckner, A. W., & Hill, R. L. (2009). Ten years of change to coral communities off Mona and Desecheo Islands, Puerto Rico, from disease and bleaching. *Diseases of Aquatic Organisms*, 87(1), 19.
- Budd, A. F., Fukami, H., Smith, N. D., & Knowlton, N. (2012). Taxonomic classification of the reef coral family Mussidae (Cnidaria: Anthozoa: Scleractinia). *Zoological Journal of the Linnean Society*, 166(3), 465-529.
- Clarke, K. R. (1993). Non-parametric multivariate analyses of changes in community structure. *Australian journal of ecology*, 18, 117-117.
- Carricart-Ganivet, J. P. (2004). Sea surface temperature and the growth of the West Atlantic reef-building coral *Montastraea annularis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 302(2), 249-260.
- Carricart-Ganivet, J. P., Beltrán-Torres, A. U., & Horta-Puga, G. (2011). Distribution and prevalence of coral diseases in the Veracruz Reef System, Southern Gulf of Mexico. *Dis Aquat Org*, 95, 181-187.
- Carricart-Ganivet, J. P., & Merino, M. (2001). Growth responses of the reef-building coral *Montastraea annularis* along a gradient of continental influence in the southern Gulf of Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 68(1), 133-146.
- Carrillo, L., Horta-Puga, G. & Carricart-Ganivet, J. P. (2007). Climate and oceanography. *Coral reefs of the southern Gulf of Mexico. Texas A&M University Press. Corpus Christi, USA*, 34-40.
- Cervino, J., Goreau, T. J., Nagelkerken, I., Smith, G. W., & Hayes, R. (2001). Yellow band and dark spot syndromes in Caribbean corals: distribution, rate of spread, cytology, and effects on abundance and division rate of zooxanthellae. In *The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases* (pp. 53-63). Springer Netherlands.
- Cervino, J. M., Hayes, R., Goreau, T. J., & Smith, G. W. (2004). Zooxanthellae regulation in yellow blotch/band and other coral diseases contrasted with temperature related bleaching: In situ destruction vs expulsion. *SYMBIOSIS-REHOVOT-*, 37(1/3), 63-86.

- Chadwick, N. E., & Morrow, K. M. (2011). Competition among sessile organisms on coral reefs. In *Coral Reefs: an ecosystem in transition* (pp. 347-371). Springer Netherlands.
- Chamberlain, C. (1966). Some octocorallia of Isla Lobos, Veracruz, Mexico. *Brigham Young University Geological Studies*, 13, 47-54.
- Chávez, E.A. (1973). Observaciones generales sobre las comunidades del arrecife de Lobos, Veracruz. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas (México)*, 20, 13-21.
- Chávez, E.A., Hidalgo, E. & Sevilla, M.L. (1970). Datos acerca de las comunidades bentónicas del arrecife de Lobos, Veracruz. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 31, 211-280.
- Chávez, E., Tunnel, J. W., & Withers, K. (2007). Reef zonation and ecology: Veracruz shelf and Campeche bank. *Coral Reefs of the Southern Gulf of Mexico*. W. Tunnel, EA Chávez and K. Withers (eds.). Texas University Press, Huston, 41-67.
- Chiu, J. M., Li, S., Li, A., Po, B., Zhang, R., Shin, P. K., & Qiu, J. W. (2012). Bacteria associated with skeletal tissue growth anomalies in the coral *Platygyra carnosus*. *FEMS microbiology ecology*, 79(2), 380-391.
- Cróquer, A., Bastidas, C., & Lipscomb, D. (2006). Folliculinid ciliates: a new threat to Caribbean corals? *Diseases of aquatic organisms*, 69(1), 75-78.
- CRTR 2010. Directory of remote sensing applications for coral reef management. Melbourne Australia. 31p.
- Dao-ru, W., Yuan-chao, L., & Jian-xin, L. (2013). Spatial differentiation of coral species related to wave energy along the Changqi coast, Hainan Island, southern China. *Continental Shelf Research*, 57, 117-122.
- Daszak, P., Cunningham, A. A., & Hyatt, A. D. (2001). Anthropogenic environmental change and the emergence of infectious diseases in wildlife. *Acta tropica*, 78(2), 103-116.
- DeAngelis, D. L., & Gross, L. J. (1992). *Individual-based models and approaches in ecology: populations, communities and ecosystems*. Chapman & Hall.
- DeAngelis, D. L., & Mooij, W. M. (2005). Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 147-168.
- Denner, E. B., Smith, G. W., Busse, H. J., Schumann, P., Narzt, T., Polson, S. W., ... & Richardson, L. L. (2003). *Aurantimonas corallicida* gen. nov., sp. nov., the causative agent of white plague type II on Caribbean scleractinian corals. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53(4), 1115-1122.
- Diario oficial de la federación 2012. Decreto que modifica al diverso por el que se declara Area Natural Protegida, con el carácter de Parque Marino Nacional, la zona conocida como Sistema Arrecifal Veracruzano, ubicada frente a las costas de los municipios de Veracruz, Boca del Río y Alvarado del Estado de Veracruz Llave, con una superficie de 52,238-91-50 hectáreas, publicado los días 24 y 25 de agosto de 1992. 11p.
- Dona, A. R., Cervino, J. M., Karachun, V., Lorence, E. A., Bartels, E., Hughen, K., ... & Goreau, T. J. (2008). Coral yellow band disease; current status in the Caribbean, and links to new Indo-Pacific outbreaks. In *Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale Florida* (pp. 7-11).
- Douglas, A. E. (2003). Coral bleaching—how and why? *Marine pollution bulletin*, 46(4), 385-392.
- Eckrich, C. E., & Engel, M. S. (2013). Coral overgrowth by an encrusting red alga (*Ramicrusta* sp.): a threat to Caribbean reefs? *Coral reefs*, 32(1), 81-84.

- Edmunds, P. J., & Elahi, R. (2007). The demographics of a 15-year decline in cover of the Caribbean reef coral *Montastraea annularis*. *Ecological Monographs*, 77(1), 3-18.
- Emery, K.O. (1963). Arrecifes coralinos en Veracruz, México. *Geofísica Internacional*, 3, 11-17.
- Escobar-Vásquez, C., & Chávez, E.A. (2012). Coral community structure al Isla Lobos reef, Gulf of Mexico. En: *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium, Cairns, Australia*.
- 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(5635), 958-960.
- Gattuso, J. P., Frankignoulle, M., Bourge, I., Romaine, S., & Buddemeier, R. W. (1998). Effect of calcium carbonate saturation of seawater on coral calcification. *Global and Planetary Change*, 18(1), 37-46.
- Gignoux-Wolfsohn, S. A., Marks, C. J., & Vollmer, S. V. (2012). White Band Disease transmission in the threatened coral, *Acropora cervicornis*. *Scientific reports*, 2.
- Gil-Agudelo, D. L., Smith, G. W., & Weil, E. (2006). The white band disease type II pathogen in Puerto Rico. *Rev Biol Trop*, 54(supl 3), 59-67.
- Gladfelter, W. B. (1982). White-band disease in *Acropora palmata*: implications for the structure and growth of shallow reefs. *Bulletin of Marine Science*, 32(2), 639-643.
- Glynn, P. W. (1996). Coral reef bleaching: facts, hypotheses and implications. *Global Change Biology*, 2(6), 495-509.
- González-Gándara, C., Cruz-Arellano, M., Domínguez-Barradas, C., Serrano-Solís, A. & Basañez-Muñoz A.J. 2007. Macroalgas asociadas a cuatro hábitats del arrecife Tuxpan, Veracruz, México. *Revista UDO Agrícola*, 7 (1), 252-257.
- González-Gándara, C. & de la Cruz-Francisco, V. (2014). Unusual record of the Indo-Pacific pomacentrid *Neopomacentrus cyanomos* (Bleeker, 1856) on coral reefs of the Gulf of Mexico. *BiolInvasions Records*, 3(1), 49-52.
- González-Gándara, C., Patiño-García, A, Asís-Anastasio, U., Serrano, A. & Gómez, P. (2009). Lista de esponjas marinas asociadas al arrecife Tuxpan, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80 1-5.
- Goreau, T. F. (1959). The ecology of Jamaican coral reefs I. Species composition and zonation. *Ecology*, 67-90.
- Graham, N. A., Cinner, J. E., Norström, A. V., & Nyström, M. (2014). Coral reefs as novel ecosystems: embracing new futures. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, 9-14.
- Graus, R. R., & Macintyre, I. G. (1989). The zonation patterns of Caribbean coral reefs as controlled by wave and light energy input, bathymetric setting and reef morphology: computer simulation experiments. *Coral Reefs*, 8(1), 9-18.
- Green, R. H. (1979). *Sampling design and statistical methods for environmental biologists*. John Wiley & Sons.
- Green, E. P., & Bruckner, A. W. (2000). The significance of coral disease epizootiology for coral reef conservation. *Biological Conservation*, 96(3), 347-361.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., ... & DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological modelling*, 198(1), 115-126.

- Gutiérrez, D., García-Saez, C., Lara, M., & Padilla, C. (1993). Comparación de arrecifes coralinos: Veracruz y Quintana Roo. *Biodiversidad marina y costera de México*, 785-806.
- Harmelin-Vivien, M. L. (1994). The effects of storms and cyclones on coral reefs: a review. *Journal of Coastal Research*, 211-231.
- Harvell, D., Jordán-Dahlgren, E., Merkel, S., Rosenberg, E., Raymundo, L., Smith, G., ... & Willis, B. (2007). Coral disease, environmental drivers, and the balance between coral and microbial associates. *Oceanography*, 20, 172-195.
- Harvell, D., Kim, K., Quirolo, C., Weir, J., & Smith, G. (2001). Coral bleaching and disease: contributors to 1998 mass mortality in *Briareum asbestinum* (Octocorallia, Gorgonacea). In *The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases* (pp. 97-104). Springer Netherlands.
- Heilprin, A. (1890). The corals and coral-reefs of the western waters of the Gulf of Mexico. In *Proceedings of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia*. E.J. Nolan, (ed.). Philadelphia, pp. 303-392.
- Hoegh-Guldberg, O. (1999). Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. *Marine and freshwater research*, 50(8), 839-866.
- Hoegh-Guldberg, O., & Bruno, J. F. (2010). The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328(5985), 1523-1528.
- Hoegh-Guldberg, O., Mumby, P. J., Hooten, A. J., Steneck, R. S., Greenfield, P., Gomez, E., ... & Hatzitolos, M. E. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *SCIENCE*, 318(5857), 1737-1742.
- Holland, G., & Bruyère, C. L. (2014). Recent intense hurricane response to global climate change. *Climate Dynamics*, 42(3-4), 617-627.
- Horta-Puga, G. (2003). Condition of selected reef sites in the Veracruz Reef System (stony corals and algae). *Atoll Research Bulletin*, 496, 360-369.
- Horta-Puga, G., J.L. Tello-Musi, A. Beltrán-Torres, J.P. Carricart-Ganivet, J.D. Carriquiry, J. Villaescusa-Celaya. (2015). Veracruz Reef System: a hermatypic coral community thriving in a sedimentary terrigenous environment, p. 171-198. En: A. Granados-Barba, L. Ortiz-Lozano, D. Salas-Monreal y C. González-Gándara (eds.). *Aportes al conocimiento del Sistema Arrecifal Veracruzano: hacia el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México*. Universidad Veracruzana. 346 p.
- Horta-Puga, G., J.M. Vargas-Hernández & J.P. Carricart-Ganivet. (2007). Reef corals. Pp. 95-101. En: J.W. Tunnell, E.A. Chávez & K. Withers (Eds.) *Coral Reefs of the Southern Gulf of Mexico*. Texas A&M University Press.
- Hothorn T., F. Frank Bretz, P. Westfall, R.M. Heiberger, A. Schuetzenmeister, S. Scheibe. (2015). Simultaneous Inference in General Parametric Models. Package 'multcomp'. (<https://cran.r-project.org/web/packages/multcomp/multcomp.pdf>)
- Huerta, L. M. (1961). Flora marina de los alrededores de la Isla Pérez, arrecife Alacranes, Sonda de Campeche, México. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, México*, 10, 11-22.
- Hughes, T. P. (1994). Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science-AAAS-Weekly Paper Edition*, 265(5178), 1547-1551.

- Hughes, T. P., Baird, A. H., Bellwood, D. R., Card, M., Connolly, S. R., Folke, C., ... & Roughgarden, J. (2003). Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs. *SCIENCE*, 301(5635), 929-933.
- Humboldt, A. von. (1811). *Atlas géographique et physique du royaume de la Nouvelle-Espagne. Fondé sur des observations astronomiques, des mesures trigonométriques et des nivellements barométriques*. Chez F. Schoell, Paris.
- IPCC Technical Paper VI. (2008). Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu and J.P. Palutikof, (Eds). IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
- Jompa, J., & McCook, L. J. (2003). Coral-algal competition: macroalgae with different properties have different effects on corals. *Marine Ecology Progress Series*, 258, 87-95.
- Jones, J., Withes, K. & Tunnell, J.W. Jr. (2008). Comparison of benthic communities on six coral reefs in the Veracruz Reef System (Mexico). En: *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium*: 757-760.
- Jordán-Dahlgren, E. J. (1989). Gorgonian community structure and reef zonation patterns on Yucatan coral reefs. *Bulletin of Marine Science*, 45(3), 678-696.
- Jordán-Dahlgren, E. (1992). Recolonization patterns of *Acropora palmata* in a marginal environment. *Bulletin of Marine Science*, 51(1), 104-117.
- Jordán-Dahlgren, E. (1993). Atlas de los arrecifes coralinos del Caribe Mexicano. *Parte I. El Sistema Continental*. Editado por CIQRO e ICML, UNAM. CIQRO, 114 pp.
- Jordán-Dahlgren, E. (2004). Arrecifes coralinos del Golfo de México, Caracterización y Diagnóstico. In: Caso, Pisanty y Ezcurra (eds.) Diagnóstico Ambiental del Golfo de México. INE-SEMARNAT, México. ISBN: 968-817-705-9.
- Jordán-Dahlgren, E. & Rodríguez-Martínez, R. E. (2003). The Atlantic coral reefs of Mexico. Pp. 131-158. In: Cortés, J. (Ed.). *Latin American Coral Reefs*. Elsevier Science B.V., Amsterdam, 497 p.
- Jordán-Dahlgren, E. & Rodríguez-Martínez, R.E. (2004). Coral diseases in Gulf of México reefs. Pp 105-118. En: Rosenberg, E. & Y. Loya (Eds.). *Coral Health and Disease*, Springer-Verlag. Germany.
- Jordán-Garza, A. G., & Jordán-Dahlgren, E. (2011). Caribbean yellow-band syndrome on *Montastraea faveolata* is not transmitted mechanically under field conditions. *Diseases of aquatic organisms*, 96(1), 83-87.
- Kaczmarek, L. T., Draud, M. & Williams, E. H. (2005). Is there a relationship between proximity to sewage effluent and the prevalence of coral disease? *Caribb J Sci*, 41(1), 124-137.
- Kaczmarek, L., & Richardson, L. L. (2007). Transmission of growth anomalies between Indo-Pacific Porites corals. *Journal of Invertebrate Pathology*, 94(3), 218-221.
- Karlson, R. H. (1980). Alternative competitive strategies in a periodically disturbed habitat. *Bulletin of Marine Science*, 30(4), 894-900.
- King, B. J., & Monis, P. T. (2007). Critical processes affecting *Cryptosporidium* oocyst survival in the environment. *Parasitology*, 134(03), 309-323.
- Kühlmann, D. H. H. (1975). Charakterisierung der Korallenriffe vor Veracruz/Mexiko. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie*, 60, 495-521.

- Kuta, K., & Richardson, L. (2002). Ecological aspects of black band disease of corals: relationships between disease incidence and environmental factors. *Coral Reefs*, 21(4), 393-398.
- Kutser, T., Kotta, J., Vahtmäe, E., Pärnoja, M., Möller, T., & Lennuk, L. (2011). Using high spatial resolution remote sensing, spatial modelling and web map services for spatial planning in shallow coastal water environments. En: *Proceedings of the 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment*.
- Lafferty, K. D. (2009). Calling for an ecological approach to studying climate change and infectious diseases. *Ecology*, 90(4), 932-933.
- Lara, M., Padilla, C., García, C., & Espejel, J. J. (1992). Coral reef of Veracruz Mexico I. Zonation and community. En: *Proceedings of the 7th International Coral Reef Symposium* (Vol. 1, pp. 535-544).
- Larson, E. A., Gilliam, D. S., Padiema, M. L., & Walker, B. K. (2014). Possible recovery of *Acropora palmata* (Scleractinia: Acroporidae) within the Veracruz Reef System, Gulf of Mexico: a survey of 24 reefs to assess the benthic communities. *International Journal of Tropical Biology and Conservation*, 62, 75-84.
- Lirman, D. (2003). A simulation model of the population dynamics of the branching coral *Acropora palmata* Effects of storm intensity and frequency. *Ecological Modelling*, 161(3), 169-182.
- López-Victoria, M., Zea, S., & Weil, E. (2006). Competition for space between encrusting excavating Caribbean sponges and other coral reef organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 312, 113-121.
- Lugo-Fernandez A., Roberts H. H., Suhayda J. N. (1998) Wave transformations across a Caribbean fringing-barrier coral reef. *Cont. Shelf Res.* 18, 1099–1124.
- Maina, J., Venus, V., McClanahan, T. R., & Ateweberhan, M. (2008). Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecological modelling*, 212(3), 180-199.
- Martínez Arroyo, A., Manzanilla Naim, S., & Zavala Hidalgo, J. (2011). Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmosfera*, 24(1), 103-123.
- Martínez-Caballero, R. (2007). Geomorfología y caracterización biótica del Arrecife Sacrificios parque nacional Sistema Arrecifal Veracruzano, México. Tesis, Instituto Tecnológico de Boca del Río. Veracruz, 102 p.
- Mateo-Cid, L.E., Mendoza-González, A.C. & Galicia-García. C. (1996). Algas marinas de Isla verde, Veracruz, México. *Acta Botánica Mexicana*, 36, 59-75.
- McCarthy, M. A. (2007). *Bayesian methods for ecology*. Cambridge University Press.
- McClanahan, T. R., Graham, N. A., Calnan, J. M., & MacNeil, M. A. (2007). Toward pristine biomass: reef fish recovery in coral reef marine protected areas in Kenya. *Ecological Applications*, 17(4), 1055-1067.
- McEwan, G. F., Groner, M. L., Fast, M. D., Gettinby, G., & Revie, C. W. (2015). Using Agent-Based Modelling to Predict the Role of Wild Refugia in the Evolution of Resistance of Sea Lice to Chemotherapeutants. *PLoS one*, 10(10), e0139128.
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological economics*, 29(2), 215-233.

- Moore, D.R. (1958). Notes on Blanquilla Reef. *Institute of Marine Sciences Publications University of Texas No. 5*, 151-155.
- Morelock J. & Koenig, J. (1967). Terrigenous sedimentation in a shallow water coral reef environment. *Journal of Sedimentation and Petrology*, 37, 1001-1005.
- Muller, E. M., Rogers, C. S., Spitzack, A. S., & Van Woosik, R. (2008). Bleaching increases likelihood of disease on *Acropora palmata* (Lamarck) in Hawksnest Bay, St John, US Virgin Islands. *Coral Reefs*, 27(1), 191-195.
- Muller, E. M., & van Woosik, R. (2009). Shading reduces coral-disease progression. *Coral Reefs*, 28(3), 757-760.
- Mumby, P. J., Dahlgren, C. P., Harborne, A. R., Kappel, C. V., Micheli, F., Brumbaugh, D. R., ... & Gill, A. B. (2006). Fishing, trophic cascades, and the process of grazing on coral reefs. *SCIENCE*, 311(5757), 98-101.
- Mumby, P. J., Harborne, A. R., Williams, J., Kappel, C. V., Brumbaugh, D. R., Micheli, F., ... & Blackwell, P. G. (2007). Trophic cascade facilitates coral recruitment in a marine reserve. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(20), 8362-8367.
- Nakagawa, S., & Cuthill, I. C. (2007). Effect size, confidence interval and statistical significance: a practical guide for biologists. *Biological Reviews*, 82(4), 591-605.
- Ntzoufras, I. (2009). Markov Chain Monte Carlo Algorithms in Bayesian Inference. *Bayesian Modeling Using WinBUGS*, 31-82.
- Nugues, M. M., & Bak, R. P. (2006) Differential competitive abilities between Caribbean coral species and a brown alga: a year of experiments and a long-term perspective. *Marine Ecology Progress Series*, 315, 75-86.
- Nugues, M. M., Smith, G. W., Hoodonk, R. J., Seabra, M. I., & Bak, R. P. (2004). Algal contact as a trigger for coral disease. *Ecology letters*, 7(10), 919-923.
- Ortiz-Lozano, L., Pérez-España, H., Granados-Barba, A., González-Gándara, C., Gutiérrez-Velázquez, A. & Martos, J. (2013). The Reef Corridor of the Southwest Gulf of Mexico: Challenges for its management and conservation. *Ocean & Coastal Management*, 86, 22-32.
- Ospina Noreña, J.E., G. Sánchez Torres Esqueda & C. Conde Álvarez. (2010). Impactos del cambio climático en las regiones hidrológicas del Golfo de México, p. 73-88. En: E. Rivera-Arriaga, I. AzuzAdeath, L. Alpuche Gual y G.J. Villalobos-Zapata (eds.). Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche Cety-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
- Pantos, O., Cooney, R. P., Le Tissier, M. D., Barer, M. R., O'Donnell, A. G., & Bythell, J. C. (2003). The bacterial ecology of a plague-like disease affecting the Caribbean coral *Montastrea annularis*. *Environmental Microbiology*, 5(5), 370-382.
- Patterson, K. L., Porter, J. W., Ritchie, K. B., Polson, S. W., Mueller, E., Peters, E. C., ... & Smith, G. W. (2002). The etiology of white pox, a lethal disease of the Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(13), 8725-8730.
- Peck, S. L. (2004). Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends in Ecology & Evolution*, 19(10), 530-534.
- Pendleton, L. H. (1995). Valuing coral reef protection. *Ocean & Coastal Management*, 26(2), 119-131.

- Pérez-España, H. & Vargas-Hernández, J.M.(2008). Caracterización ecológica y monitoreo del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano: Primera Etapa. *Universidad Veracruzana. Centro de Ecología y Pesquerías. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM002.* México D.F.
- Ponce-Vélez, G., & Botello, A. V. (2005). Niveles de hidrocarburos en el Golfo de México. *Botello, AV, J. Rendón-von O., G. Gold-Bouchot y, C. Agraz-Hernández (eds.). Contaminación e Impacto ambiental: Diagnóstico y tendencias. 2a. ed. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto Nacional de Ecología, 261-268.*
- Porto-Hannes, I., Zubillaga, A. L., Shearer, T. L., Bastidas, C., Salazar, C., Coffroth, M. A., & Szmant, A. M. (2015). Population structure of the corals *Orbicella faveolata* and *Acropora palmata* in the Mesoamerican Barrier Reef System with comparisons over Caribbean basin-wide spatial scale. *Marine Biology, 162*(1), 81-98.
- Precht, W., Bruckner, A., Aronson, R., & Bruckner, R. (2002). Endangered acroporid corals of the Caribbean. *Coral Reefs, 21*(1), 41-42.
- Quintana y Molina, J. (1991). Resultados del programa de investigaciones en arrecifes veracruzanos del laboratorio de sistemas bentónicos litorales *Hidrobiológica, 1, 1.*
- Randall, C.J., Jordán-Garza, A. G., Muller, E. M., & Van Woesik, R. (2014). Relationships between the history of thermal stress and the relative risk of diseases of Caribbean corals. *Ecology, 95*(7), 1981-1994.
- Randall, C. J., Jordán-Garza, A. G., & van Woesik, R. (2015). Ciliates associated with signs of disease on two Caribbean corals. *Coral Reefs, 34*(1), 243-247.
- Raymundo, L. J., Couch, C. S., Harvell, C. D., Raymundo, J., Bruckner, A. W., Work, T. M., ... & Aeby, G. S. (2008). Coral Disease Handbook Guidelines for Assessment, Monitoring & Management.
- Reed, K. C., Muller, E. M., & Van Woesik, R. (2010). Coral immunology and resistance to disease. *Diseases of aquatic organisms, 90*(2), 85-92.
- Richardson, L. L., & Aronson, R. B. (2002). Infectious diseases of reef corals. In *Proceedings of the Ninth International Coral Reef Symposium, Bali, 23-27 October 2000*, (Vol. 2, pp. 1225-1230).
- Richardson, L. L., Goldberg, W. M., Kuta, K. G., Aronson, R. B., Smith, G. W., Ritchie, K. B., ... & Miller, S. L. (1998). Florida's mystery coral-killer identified. *Nature, 392*(6676), 557-558.
- Rigby, J.K. & MacIntyre, W.G. (1966). The Isla de Lobos and associated reefs, Veracruz, México. *Brigham Young University Geological Studies, 13, 3-46.*
- Ritchie, K. B., & Smith, G. W. (1998). Type II white-band disease. *Rev Biol Trop, 46*(suppl 5), 199-203.
- Robinson, N.M., Galicia-García, C., & Okolodkov, Y.B. (2012). New records of green (Chlorophyta) and brown algae (Phaeophyceae) for Cabezo Reef, National Park Sistema Arrecifal Veracruzano, Gulf of Mexico. *Acta Botánica Mexicana, 101, 11-48.*
- Roelfsema, C. M., Phinn, S. R., Lyons, M. B., Kovacs, E., Saunders, M. I., & Leon, J. X. (2013). Monitoring Corals and Submerged Aquatic Vegetation in Western Pacific Using Satellite Remote Sensing Integrated with Field Data. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 0442).

- Rodríguez, S., Cróquer, A., Guzmán, H. M., & Bastidas, C. (2009). A mechanism of transmission and factors affecting coral susceptibility to *Halofolliculina* sp. infection. *Coral reefs*, 28(1), 67-77.
- Rodríguez-Martínez, R. E., Jordán-Garza, A. G., Baker, D. M., & Jordán-Dahlgren, E. (2012). Competitive interactions between corals and *Trididemnum solidum* on Mexican Caribbean reefs. *Coral reefs*, 31(2), 571-577.
- Roy, R. E. (2004). Akumal's reefs: Stony coral communities along the developing Mexican Caribbean coastline. *Revista de biología tropical*, 52(4), 869.
- Rützler, K. (2002). Impact of crustose clonid sponges on Caribbean reef corals. *Acta Geologica Hispanica*, 37(1), 61-72.
- Rützler, K., & Santavy, D. L. (1983). The black band disease of Atlantic reef corals. *Marine Ecology*, 4(4), 301-319.
- Salas-Monreal, D., Salas-de-León, D. A., Monreal-Gómez, M. A., & Riverón-Enzástiga, M. L. (2009). Current rectification in a tropical coral reef system. *Coral Reefs*, 28(4), 871-879.
- Salas-Pérez, J. J., Salas-Monreal, D., Arenas-Fuentes, V. E., Salas-de-León, D. A., & Riverón-Enzástiga, M. L. (2008). Tidal characteristics in a coral reef system from the western Gulf of Mexico Características de la marea en un sistema arrecifal coralino del Golfo de México occidental. *Ciencias Marinas*, 34(4), 467-478.
- Santavy, D. L., Peters, E. C., Quirolo, C., Porter, J. W., & Bianchi, C. N. (1999). Yellow-blotch disease outbreak on reefs of the San Blas Islands, Panama. *Coral reefs*, 18(1), 97-97.
- Scholthof, K. B. G. (2007). The disease triangle: pathogens, the environment and society. *Nature Reviews Microbiology*, 5(2), 152-156.
- SEMARNAT (2006). Programa de conservación y manejo del Parque Nacional Alacranes. México. 169 p.
- SEMARNAT (2014) Programa de manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Sistema Arrecifal Lobos-Tuxpan. México. 177 p.
- Smith, W.F.G. (1954). Gulf of Mexico Madreporaria. Pp. 291-295. *En: Galtsoff, P. S. (Ed.). Gulf of Mexico, its Origin, Waters and Marine Life*. Fishery Bulletin 89, Fishery Bulletin of the U.S. Fish and Wildlife Service, Volume 55.
- Smith, W.G.F. (1972). Atlantic reef corals. Univ. of Miami press. Coral Gables, Florida. 164 p.
- Sokolow, S. (2009). Effects of a changing climate on the dynamics of coral infectious disease: a review of the evidence. *Diseases of Aquatic Organisms*, 87(1-2), 5-18.
- Soffer, N., Brandt, M. E., Correa, A. M., Smith, T. B., & Thurber, R. V. (2014). Potential role of viruses in white plague coral disease. *The ISME journal*, 8(2), 271-283.
- Spalding, M. D., & Grenfell, A. M. (1997). New estimates of global and regional coral reef areas. *Coral Reefs*, 16(4), 225-230.
- Spurgeon, J. P. (1992). The economic valuation of coral reefs. *Marine Pollution Bulletin*, 24(11), 529-536.
- Stedman, T. L. (1976). *Stedman's medical dictionary, illustrated*. Williams & Wilkins.
- Suchanek, T. H., & Green, D. J. (1981). Interspecific competition between *Palythoa caribaeorum* and other sessile invertebrates on St. Croix reefs, US Virgin Islands. In *Proc 4th Int Coral Reef Symp* (Vol. 2, pp. 679-684).

- Sunagawa, S., DeSantis, T. Z., Piceno, Y. M., Brodie, E. L., DeSalvo, M. K., Voolstra, C. R., ... & Medina, M. (2009). Bacterial diversity and White Plague Disease-associated community changes in the Caribbean coral *Montastraea faveolata*. *The ISME journal*, 3(5), 512-521.
- Sutherland, K. P., Porter, J. W., Turner, J. W., Thomas, B. J., Looney, E. E., Luna, T. P., ... & Lipp, E. K. (2010). Human sewage identified as likely source of white pox disease of the threatened Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. *Environmental microbiology*, 12(5), 1122-1131.
- Sutherland, K. P., & Ritchie, K. B. (2004). White pox disease of the Caribbean elkhorn coral, *Acropora palmata*. In *Coral Health and Disease* (pp. 289-300). Springer Berlin Heidelberg.
- Sweet, M. J., & Séré, M. G. (2015). Ciliate communities consistently associated with coral diseases. *Journal of Sea Research*.
- Tanner, J. E. (1995). Competition between scleractinian corals and macroalgae: an experimental investigation of coral growth, survival and reproduction. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 190(2), 151-168.
- Upton, S. J., & Peters, E. C. (1986). A new and unusual species of coccidium (Apicomplexa: Agamococcidiorida) from Caribbean scleractinian corals. *Journal of Invertebrate pathology*, 47(2), 184-193.
- Vargas-Hernández, J. M., Hernández-Gutiérrez, A., & Carrera-Parra, L. F. (1993). Sistema arrecifal veracruzano. *Biodiversidad Marina y Costera de México, SI Salazar-Vallejo and NE González (eds.). Comisión Nacional de Biodiversidad, Mexico DF*, 559-575.
- Vermeij, M. J., Van Moorselaar, I., Engelhard, S., Hörnlein, C., Vonk, S. M., & Visser, P. M. (2010). The effects of nutrient enrichment and herbivore abundance on the ability of turf algae to overgrow coral in the Caribbean. *PLoS One*, 5(12), e14312.
- Veron, J. (2013). Overview of the taxonomy of zooxanthellate Scleractinia. *Zoological journal of the Linnean Society*, 169(3), 485-508.
- Villalobos-Figueroa, A. (1971). Estudios ecológicos en un arrecife coralino en Veracruz, México. *Coloquio sobre investigaciones y recursos del mar Caribe y Regiones Adyacentes. UNESCO*, 531-545.
- Vollmer, S. V., & Kline, D. I. (2008). Natural disease resistance in threatened staghorn corals. *PLoS One*, 3(11), e3718-e3718.
- Voss, J. D., & Richardson, L. L. (2006). Coral diseases near Lee Stocking Island, Bahamas: patterns and potential drivers. *Diseases of aquatic organisms*, 69(1), 33.
- Williams, E. H., & Bunkley-Williams, L. (1990). The world-wide coral reef bleaching cycle and related sources of coral mortality. *Atoll Res Bull*, 335(1), 67.
- Zamudio-Alemán, R. E., del Refugio Castañeda-Chavez, M., Lango-Reynoso, F., Galaviz-Villa, I., Amaro-Espejo, I. A., & Romero-González, L. (2014). Metales pesados en sedimento marino del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1 (4), 159-168.

Anexo 1. Especies registradas y códigos utilizados en el documento. Clasificación siguiendo a Budd et al. 2012 y Veron 2013.

Familia	Especie	Código
Acroporidae	<i>Acropora palmata</i>	Apal
	<i>Acropora cervicornis</i>	Acer
	<i>Acropora prolifera</i>	Apro
Agariciidae	<i>Agaricia agaricites</i>	Aaga
	<i>Agaricia lamarcki</i>	Alam
	<i>Leptoseris cucullata</i>	Lcuc
Astrocoeniidae	<i>Stephanochoenia intersepta</i>	Sint
	<i>Madracis decactis</i>	Mdec
Meandrinidae	<i>Meandrina meandrites</i>	Mmea
Montastraeidae	<i>Montastraea cavernosa</i>	Mcav
Mussidae	<i>Colpophyllia natans</i>	Cnat
	<i>Manicina areolata</i>	Mare
	<i>Mycetophyllia danaana</i>	Mdan
	<i>Mycetophyllia lamarckiana</i>	Mlam
	<i>Orbicella annularis</i>	Oann
	<i>Orbicella faveolata</i>	Ofav
	<i>Orbicella franksi</i>	Ofra
	<i>Pseudodiploria clivosa</i>	Pcli
	<i>Pseudodiploria strigosa</i>	Pstr
	<i>Scolymia spp</i>	Scol
Oculinidae	<i>Oculina diffusa</i>	Odif
Poritidae	<i>Porites astreoides</i>	Past
	<i>Porites furcata</i>	Pfur
	<i>Porites porites</i>	Ppor
Siderastreidae	<i>Siderastrea siderea</i>	Srad
	<i>Siderastrea radians</i>	Ssid
Milleporidae	<i>Millepora alcicornis</i>	Malc

Anexo 2

Signos indicadores de la condición de las colonias de coral.

En los cuatro arrecifes muestreados se encontraron 18 signos de enfermedades de coral, de blanqueamiento e interacciones con algas y animales. A continuación se enlistan los distintos signos encontrados y su descripción.

Signos de enfermedad

1. **Signos blancos** (SB, Fig. 1): Signos blancos cuya descripción coincide con la enfermedad de la plaga blanca (Tipo 1, 2 o 3; ver Tabla M-2). Pueden afectar a varias especies, en los arrecifes muestreados principalmente fueron observados en *Colpophyllia natans*, *Montastraea cavernosa*, *Pseudodiploria strigosa*, *P. clivosa*, *Orbicella* spp. y *Stephanocoenia intersepta*.

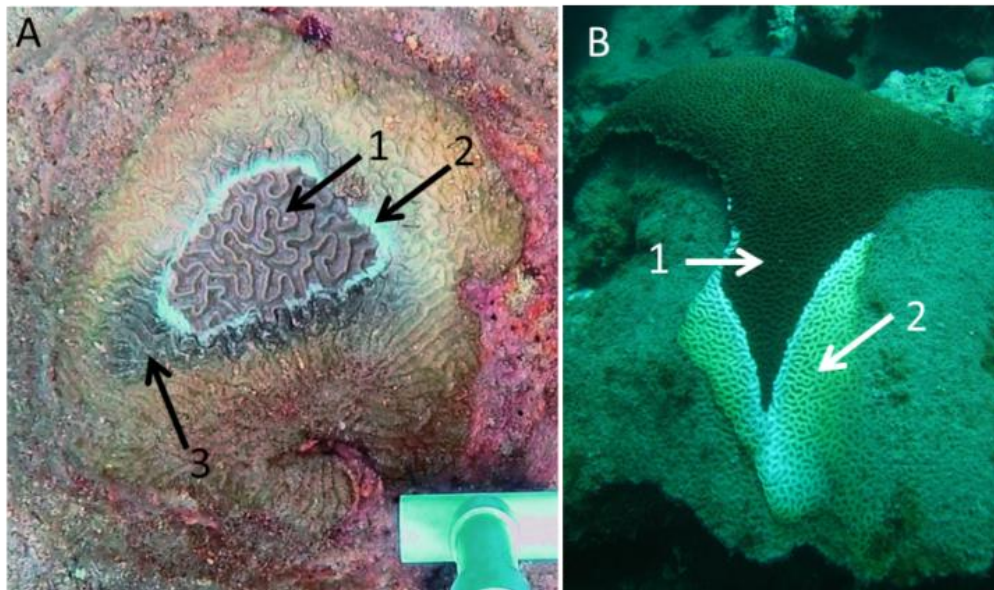


Figura 1. A: Tejido en apariencia sano (1) rodeado por un signo blanco en forma de banda (2) en una colonia de *Pseudodiploria strigosa*. La parte oscura sobre el esqueleto expuesto (3) corresponde a la presencia de ciliados (ver más adelante) B: Tejido en apariencia sano (1) con una zona recientemente muerta correspondiente a un signo blanco (2) afectando una colonia de *Colpophyllia natans*.

2. **Signos blancos en *Acropora* spp.** (Fig. 2): Signos indistinguibles de los signos blancos pero presentes en corales del género *Acropora*. Son signos que pueden corresponder a la enfermedad de la banda blanca o de la viruela blanca (ver Tabla M-2).



Figura 2. La flecha señala una banda blanca en una colonia de *Acropora palmata*.

3. **Signos amarillos** (SA, Fig. 3): Se caracterizan por una decoloración del tejido que toma un tono amarillo, pueden estar adyacente a un margen con esqueleto coralino generalmente cubierto por algas y sedimento. Es posible que este signo esté relacionado al síndrome de la banda amarilla (ver Tabla M-2) y ambos se registraron como signos amarillos. Sin embargo, la prevalencia del síndrome de la banda amarilla fue baja en los cuatro arrecifes muestreados. El síndrome de la banda amarilla se caracteriza también por una decoloración del tejido que toma un tono amarillo en forma de parches o bandas, además, en ocasiones se observa con zonas de color blanco brillante adyacentes al tejido amarillo. El tejido afectado en la banda amarilla se encuentra frecuentemente adyacente o formando un margen con esqueleto coralino generalmente cubierto por algas y sedimento (Santavy et al. 1999).

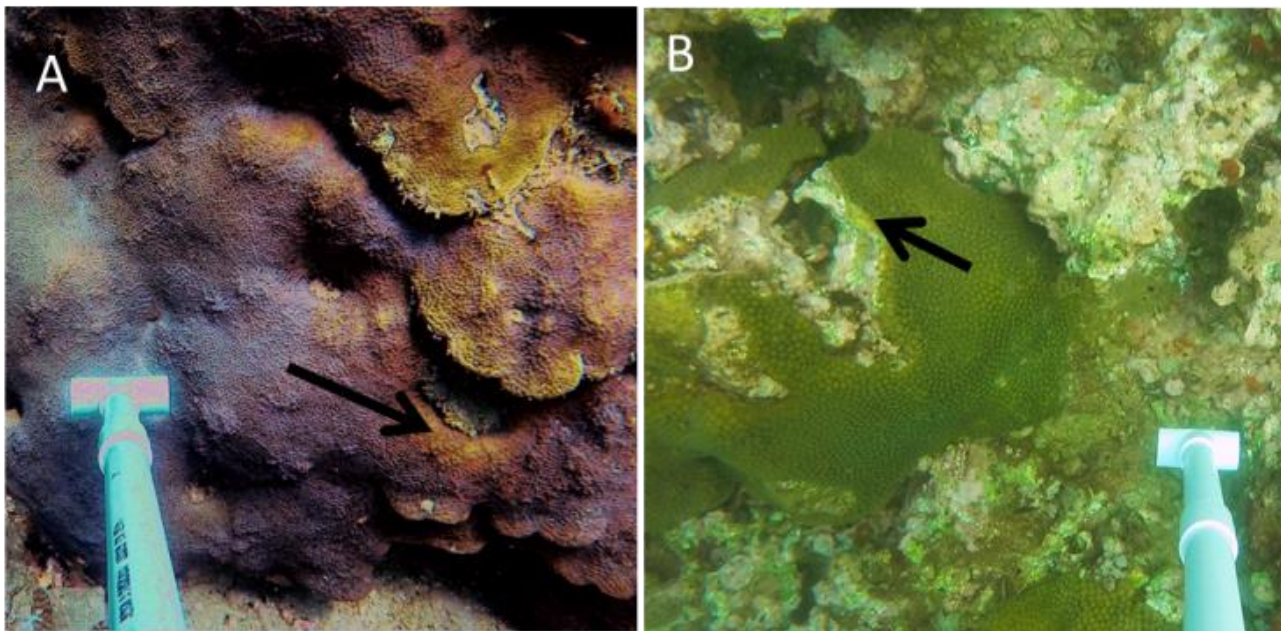


Figura 3. Signos amarillos en *Orbicella faveolata*. A. El signo puede ser una mancha que forma una banda relativamente gruesa generalmente en un borde u orilla del coral. B. El signo puede observarse como una banda o línea delgada generalmente en el borde u orilla del coral.

Signos oscuros (MO, Fig. 4): Estos signos se caracterizan por una coloración oscura del tejido, pueden estar adyacente a un margen con esqueleto coralino generalmente cubierto por algas y sedimento. Cuando están presentes en el coral *Siderastrea siderea* corresponden a la enfermedad de los lunares oscuros, cuya tasa de avance ha sido medida (ver Tabla M-2). Cuando ocurren en otras especies desconocemos cuál es su tasa de avance o si corresponden al mismo tipo de afección que en *S. siderea*.

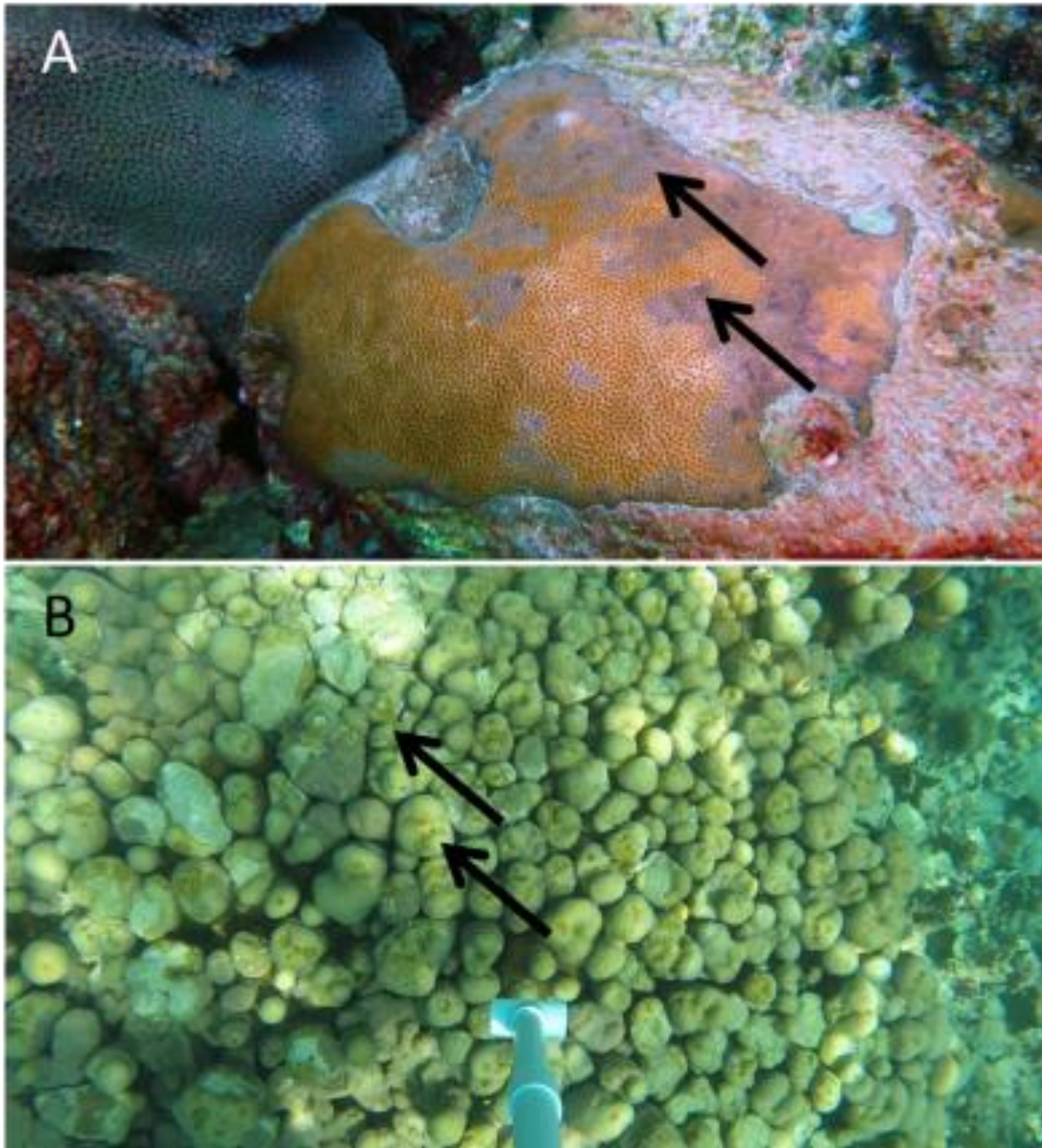


Figura 4. A. Signos oscuros en *Siderastrea siderea* (las flechas señalan unas manchas oscuras en el tejido). B. Signos oscuros en *Orbicella annularis* que pueden observarse como manchas o bandas en el tejido (ver flechas).

4. **Banda Negra** (BN, Fig. 5): Este signo es uno de los más sencillos de reconocer por tratarse de una banda de color oscuro o rojizo que de un lado tiene tejido en apariencia sano y del otro esqueleto del coral recientemente expuesto (ver Tabla M-2).



Figura 5. Banda negra en el coral *Orbicella faveolata*. La flecha señala la banda de color oscuro que separa tejido en apariencia sano y esqueleto recientemente expuesto.

5. **Manchas decoloradas** (MB, Fig. 6): Las manchas decoloradas corresponden a una decoloración del tejido del coral sin que éste se muera. A diferencia del blanqueamiento térmico, las manchas son generalmente pequeñas y de forma definida. Este signo puede indicar el comienzo de alguna afección conocida (ver Tabla M-2) o ser causadas por un agente desconocido. No sabemos si causan mortalidad del tejido o si el coral se recupera por completo.



Figura 6. Manchas decoloradas en *Pseudodiploria strigosa*.

- 6. Puntos blancos múltiples en *Colpophyllia natans*** (MPB, Fig. 7): Signo que tiene características similares a las de banda blanca y viruela blanca (ver Tabla M-2) pero se observó afectando exclusivamente a corales de la especie *C. natans* (Fig. 7). Se caracteriza por presentarse como parches de esqueleto, recientemente expuesto, entre tejido que presenta decoloración. En ocasiones se observa una banda blanca claramente delimitada que separa el tejido enfermo del esqueleto expuesto. Se desconoce la etiología de esta enfermedad. Su tasa de avance probablemente es alta porque se observa esqueleto recientemente expuesto.

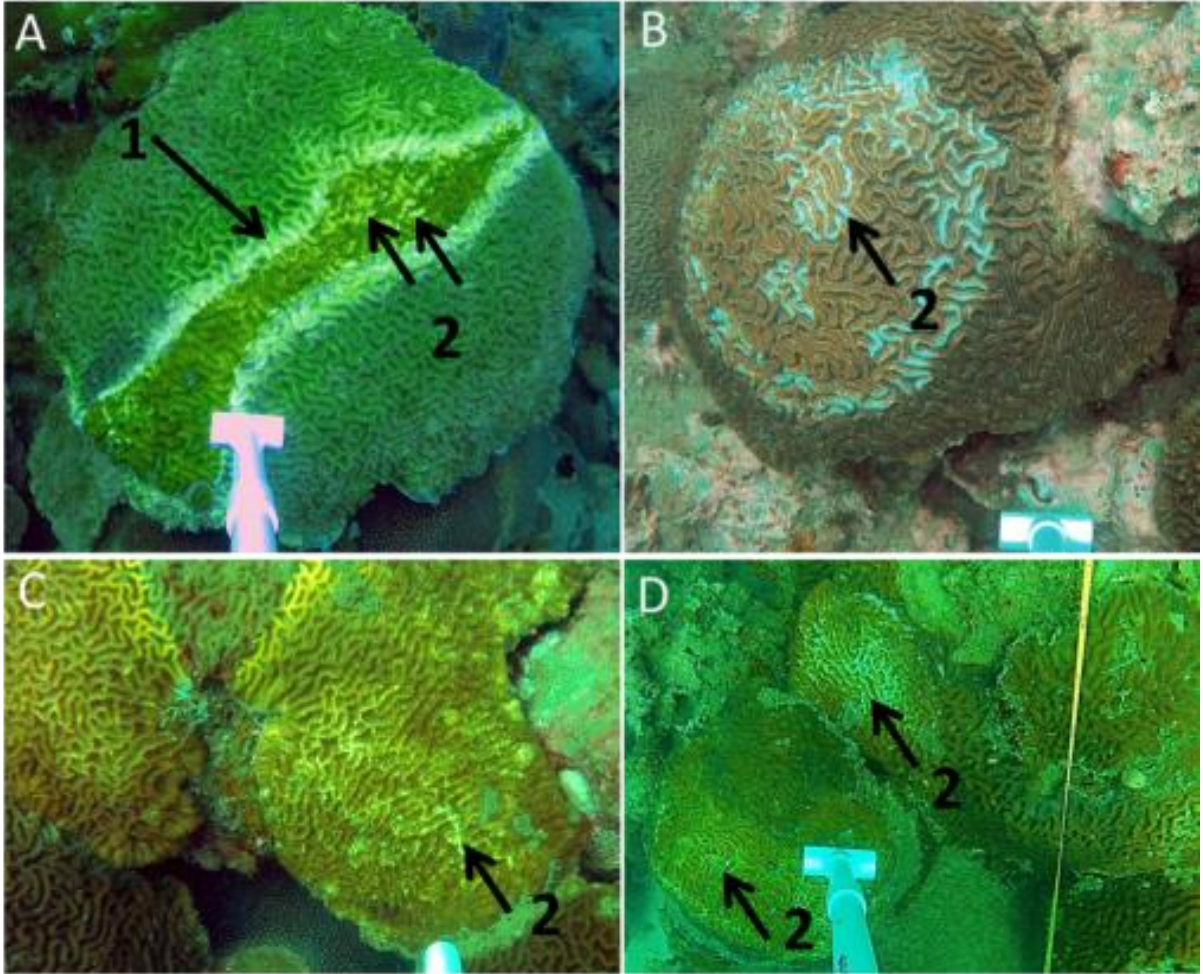


Figura 7. Puntos blancos múltiples en *Colpophyllia natans*. A. Se observan bandas blancas (1) que corresponden a esqueleto recientemente expuesto rodeando a una zona de tejido que muestra decoloración y áreas muertas (2). B - D. Muestran otros ejemplos que carecen de las bandas blancas pero muestran el tejido decolorado y áreas recientemente muertas (2).

- 7. Esqueleto expuesto con erosión** (LNC, Fig. 8): Este signo se observó en ocho especies de coral, se trata del esqueleto expuesto con poco o nulo cubrimiento secundario. No es un signo blanco pues el esqueleto no se observa recientemente expuesto dado que los corallitos se observan desgastados.

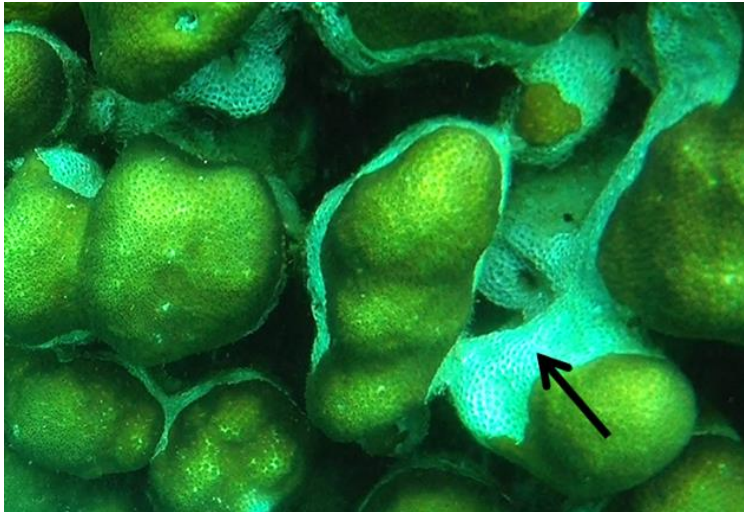


Figura 8. Lesión no colonizada en *Orbicella annularis*. La flecha señala el esqueleto de color blanco con coralitos desgastados pero sin sobrecrecimiento de algas u otros organismos, sin señal evidente de indicios de depredación.

- 8. Colonia pálida (PAL, Fig. 9):** Corresponde a una pérdida parcial de la intensidad del color de la colonia. Es posible que corresponda a una etapa inicial de blanqueamiento por estrés térmico (ver Tabla M-2).

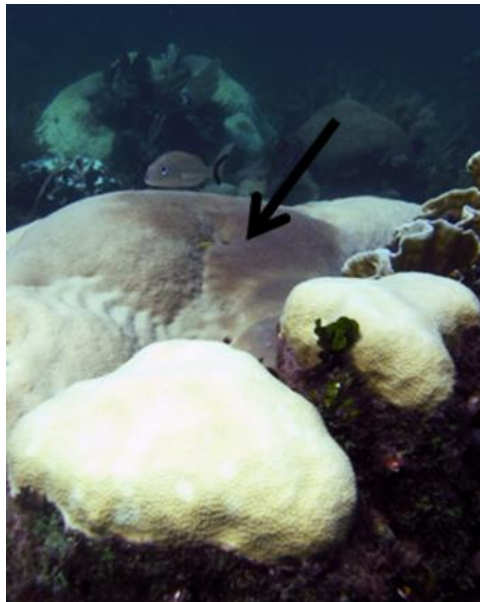


Figura 9. Colonia de *Orbicella annularis* mostrando nódulos que han perdido su coloración casi por completo y un nódulo central (flecha) que muestra distintos grados de palidez.

9. **Tapetes de algas** (TA, Fig. 10): Cuando un coral sufre mortalidad parcial, el esqueleto expuesto es colonizado por distintos organismos, por ejemplo algas filamentosas que pueden acumular sedimento y en ocasiones pueden invadir el tejido de coral adyacente causando mortalidad (ver Tabla M-3).

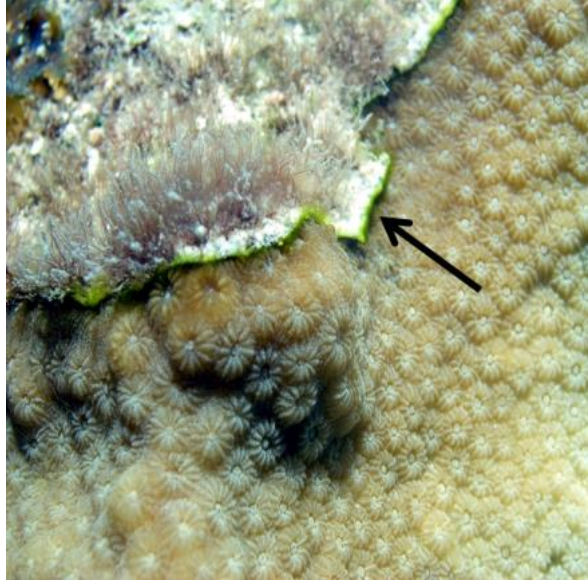


Figura 10. Tapetes de algas junto al tejido de *O. faveolata*. La flecha señala una proyección del tapete algal sobre el tejido del coral.

10. **Algas coralináceas encostrantes** (CCA, Fig. 11): Las algas coralináceas encostrantes son capaces de cubrir el esqueleto muerto del coral y en ocasiones invadir el tejido coralino adyacente.

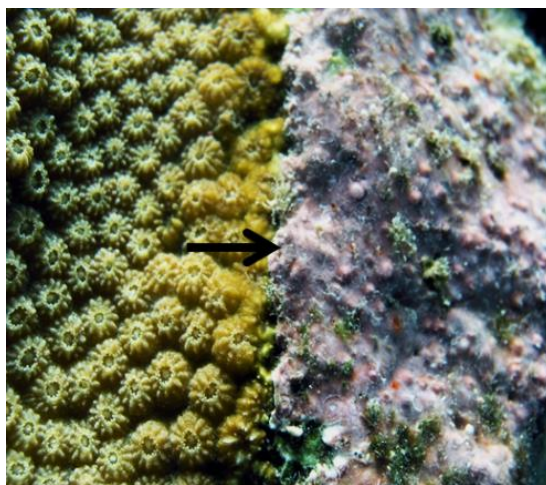


Figura 11. Macrofotografía que muestra la interface entre el tejido de una colonia de *Orbicella* y un alga coralinácea encostrante. La flecha muestra una zona en donde se aprecia que el alga crece invadiendo el tejido coralino.

11. Macroalgas (Malg, Fig. 12): Distintas especies de macroalgas creciendo sobre partes de la colonia que han sufrido mortalidad parcial o en el sustrato adyacente y pueden crecer de modo que cubren y causan mortalidad del tejido de corales circundantes.

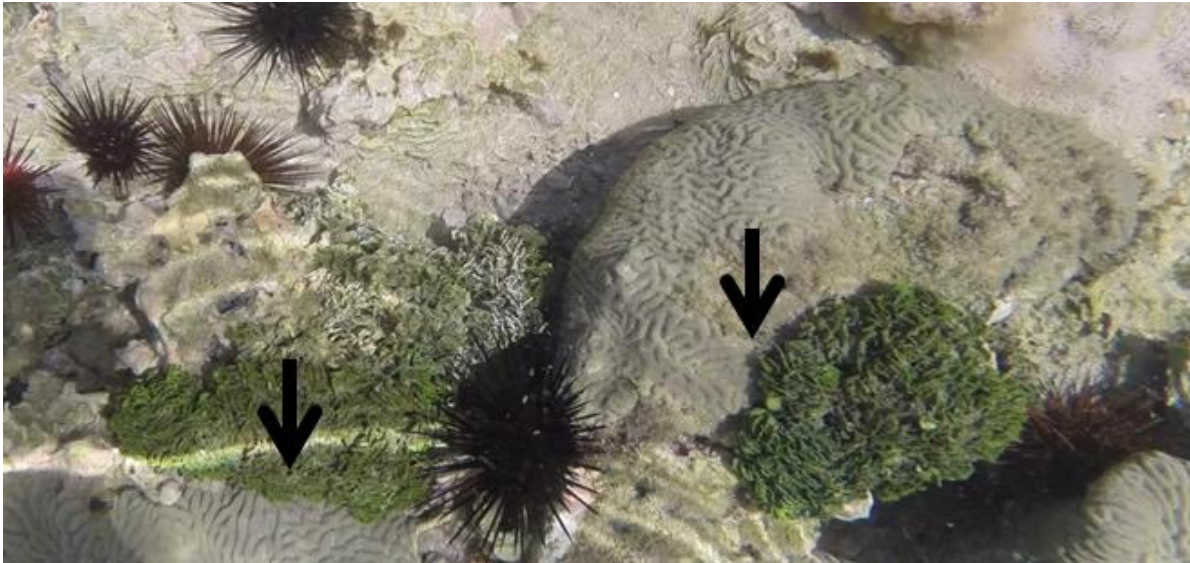


Figura 12. Macroalgas del género *Halimeda* creciendo al lado del coral *Pseudodiploria clivosa*. Las flechas muestran zonas en donde el alga crece sobre el tejido del coral.

12. Algas filamentosas (Fil; Fig. 13): Distintas especies de algas filamentosas creciendo sobre partes de la colonia que han sufrido mortalidad parcial o en el sustrato adyacente pueden crecer de modo que cubren y causan mortalidad del tejido de corales circundantes.



Figura 13. La fotografía muestra un crecimiento de algas filamentosas adyacente a una colonia del coral *Meandrina meandrites*.

13. *Erythropodium caribaeorum* (Fig. 14): El gorgonáceo reptante *Erythropodium caribaeorum* es una de las pocas especies de gorgonáceos en la zona de estudio. Por su forma de crecimiento, formando un tapete sobre el sustrato, es en ocasiones capaz de crecer sobre el tejido de un coral adyacente.



Figura 14. Fotografía que muestra una colonia de *Erythropodium caribaeorum* creciendo sobre tejido del coral *Orbicella faveolata*.

14. Esponjas (Esp; Fig. 15): Distintas especies de esponjas, con diversas formas de crecimiento, son capaces de crecer sobre el tejido de corales escleractinios.

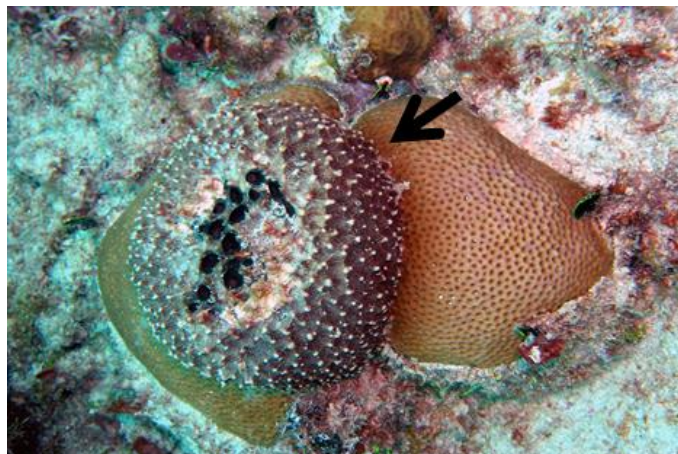


Figura 15. Ejemplo de una esponja del género *Ircinia* creciendo sobre una colonia de *Siderastrea siderea*.

15. Erizos (Fig. 16): Los erizos buscan las colonias de coral como refugio y también para alimentarse. Son capaces de causar erosión del esqueleto coralino y también de consumir de manera indirecta el tejido del coral.



Figura 16. Se muestran varios erizos *Diadema antillarum* escondidos entre nódulos del coral *Orbicella annularis*.

16. Mordidas de peces (Fig. 17): Distintas especies de peces son capaces de alimentarse de manera directa o indirecta del tejido de colonias de corales escleractinios. Las mordidas crean signos distintivos que en ocasiones muestran las marcas de los dientes y tienen formas regulares.

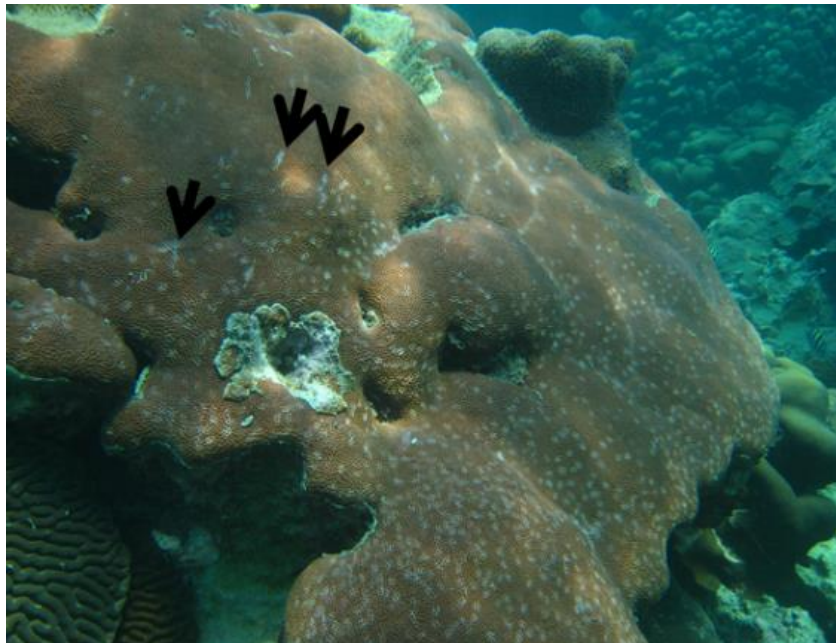


Figura 17. Mordidas de peces en una colonia de *Siderastrea siderea*. Las flechas muestran lesiones alargadas que corresponden a la forma de los dientes.

17. Ciliados (Fig. 18): Este signo se observó principalmente en los arrecifes de Veracruz pero dada la dificultad para distinguirlo en fotografías derivadas de los videos, en el presente estudio solamente señalamos su presencia. El signo se observa como una mancha de color oscuro cuya intensidad depende de la densidad del ciliado *Halofoliculina* sp (ver Tabla M-2).



Figura 18. Colonia del coral *Pseudodiploria strigosa* afectada por un signo blanco. Al lado del signo blanco (flecha) se observa una mancha de color oscuro formada por ciliados del género *Halofoliculina* sp.

Anexo 3 – Disco DVD con todas las capas del sistema de información geográfica

Anexo 4 – Disco DVD con base de datos y artículos, en formato pdf, de literatura relevante sobre los arrecifes mexicanos del Golfo de México.