Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C.

Posgrado en Ciencias del Agua

"Comunidades de macroalgas en arrecifes coralinos de Quintana Roo: composición taxonómica y patrones de colonización"

Tesis que presenta

Benjamín Delgado Pech

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS DEL AGUA

Cancún, Quintana Roo, México

2016

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS DEL AGUA

CICY

RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Benjamín Delgado Pech** titulado **"Comunidades de macroalgas en arrecifes coralinos de Quintana Roo: composición taxonómica y patrones de colonización"** fue realizado en la Unidad de Ciencias del Agua, Línea de Ecología y Dinámica de Ecosistemas Acuáticos, Laboratorio de Ecología Costera del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Antonio Almazán Becerril, perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias del Agua del Centro.

Atentamente.

Dr. Manuel Martínez Estévez
Director de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 7 de junio de 2016

Cancún, Quintana Roo, México; 07 de Junio de 2016

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se regirán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____

Nombre: Benjamín Delgado Pech

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el Dr. Antonio Almazán Becerril por brindarme la oportunidad de experimentar, aprender y sobre todo por su tolerancia, paciencia y conocimientos brindados en la elaboración de mi tesis de maestría. Gracias por enseñarme que el conocimiento es lo más valiosos que tenemos.

Agradezco al Centro de Investigación Científica de Yucatán A. C. y a la Unidad de Ciencias del Agua por facilitar la infraestructura y darme la oportunidad de estudiar el posgrado en sus instalaciones. También al CONACYT por otorgarme el apoyo económico para continuar con mis estudios de posgrado.

Al Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) y al Parque Nacional de Isla Contoy (PNIC) por su accesibilidad para la realización del muestreo de este trabajo.

Le agradezco a la Dra. Ligia Collado Vides y a la Dra. Ileana Ortegón-Aznar por su paciencia, disponibilidad y generosidad para compartir sus experiencias y amplios conocimientos sobre taxonomía de macroalgas. Sus colaboraciones fueron de gran ayuda durante mi estancia en su laboratorio. Les agradezco también por sus atentas y rápidas respuestas a las diferentes inquietudes surgidas durante la identificación de las especies de macroalgas.

Le agradezco a mí Comité Tutorial: Dra. Ligia Collado Vides, Dra. Laura M. Hernández Terrones, Dr. Lorenzo Álvarez Filip y al Dr. Adán Caballero por las contribuciones que hicieron a la tesis y por el tiempo que dedicaron para revisarla.

Al Dr. Aramis Olivos Ortiz por su ayuda en el análisis de las muestras de nutrientes realizados en el Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas de la Universidad de Colima.

Mi más sincero agradecimiento a la Dra. Laura Hernández Terrones por su apoyo para obtener mi certificación de buceo y también por sus consejos brindados en este trabajo de tesis. Al Dr. Mario Rebolledo Vieyra por otorgarme una beca para mi estancia en la Universidad Internacional de Florida

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis colegas y amigos al M. en C. Sergio Escobar Morales y al Biol. Augusto Cervantes Ontiveros por el todo el apoyo brindado en campo durante estos 2 años.

.A mis compañeras y amigas de laboratorio la Ing. Elda Damaris Irola Sansores, la Ing. Dalia Azuzena Uitzil Castañeda y la Biol. Stephany Manzo Melchor les agradezco por todo su apoyo en campo, laboratorio y por su colaboración en diversos aspectos durante la ejecución de este trabajo de tesis.

Quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han ayudado a la ejecución de este trabajo a Pancho, Samuel, Jared, Adam y Paloma, les agradezco por todo el apoyo brindado.

Agradezco de manera especial a Elda Damaris, por todos los buenos y malos momentos que compartiste conmigo durante la realización de este trabajo de tesis y por haberme brindado tu inagotable cariño durante todos estos años a mi lado.

A mis amigos, mi segunda familia, Daniela, Sergio Quiroz, Cinthya, Viridiana, Gabriela, Sergio E. y Augusto por sus valiosos consejos, compañía y amistad, hicieron que todo este proceso fuera más ameno.

DEDICATORIA

Elda Damaris

Por siempre estar a mi lado en las buenas y en las malas; por tu comprensión, paciencia y amor, dándome ánimos de fuerza y valor para seguir a delante. T. A.

ÍNDICE

RESUMEN 7
ABSTRACT 8
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL 9
1.1. Introducción 9
1.2. Antecedentes generales 12
1.3. Preguntas de investigación e hipótesis 14
1.3.1. Preguntas de investigación. 14
1.3.2. Hipótesis 14
1.4. Objetivos 15
1.4.1. Objetivo general 15
1.4.2. Objetivos específicos 15
1.6. Bibliografía 18
CAPITULO II RIQUEZA DE LAS COMUNIDADES DE MACROALGASEN ARRECIFES DEL NORTE QUINTANA ROO. 22
2.1. Introducción 22
2.2. Materiales y métodos 23
2.2.1. Trabajo de campo 23
2.2.2. Trabajo de laboratorio 23
2.2.3. Descripción de algunos géneros de macroalgas importantes para su identificación. 25
Las descripciones se construyeron con base en observaciones propias y los trabajos de Taylor (1960), Littler y Littler (1989), Littler y Littler (2000). 25
2.2.4. División Chlorophyta 25
2.2.4.1. *Bryopsis* Lamouroux 1809 25
2.2.4.2. *Caulerpa* Lamouroux 1809 26
2.2.4.3. *Halimeda* Lamouroux 1809 26
2.2.5. División Phaeophyta 26
2.2.5.1. *Dictyota* Lamouroux 1809 26
2.2.5.2. *Sargassum* C. Agard 1820 26
2.2.6. División Rhodophyta 26
2.2.6.1. *Ceramium* Roth 1797 26

2.2.6.2. *Bryothamnion* Kutzing 1843 27
2.2.6.3. *Laurencia* Lamouroux 1813 27
2.2.6.4. *Jania* Lamouroux 1812 27
2.2.6.5. *Amphiroa* J.V. Lamouroux (1812) 28
2.2.6.6. *Hypnea* Lamouroux 1813 28
2.3. Curva de acomulasion de especies 28
2.4. Resultados 29
2.4.1. Riqueza total de especies de macroalgas 29
2.4.2. Riqueza de especies en los tres sitios de Puerto Morelos 33
2.4.3. Riqueza de especies en Ixlaché, Isla Contoy. 34
2.4.4. Descripción de algunas de las especies presentes en la zona 35
2.4.5. Familia Udoteaceae 35
2.4.5.1. Udotea abbottiorum 35
2.4.5.2. Udotea conglutinata 35
2.4.6. Familia Anadyomenaceae 35
2.4.6.1. Anadyomene cf stellata 35
2.4.7. Familia Solieriaceae 36
2.4.7.1. Eucheuma isiforme 36
2.4.8. Familia Ceramioideae 36
2.4.8.1. Ceramium cruciatum 36
2.4.9. Grupo funcionales 42
2.4.10. Curva de acumulación de especies 43
2.2. Discusión 50
CAPITULO III. DINÁMICA DE LAS COMUNIDADES DE MACROALGAS CON RELACIÓN A LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA Y NUTRIENTES EN LOS ARRECIFES CORALINOS DE QUINTANA ROO. 58
3.1. Introducción 58
3.2. Materiales y métodos 60
3.2.1. Estimación de coberturas de macroalgas 60
3.2.2. Consideraciones sobre la tomas de los datos de coberturas 60
3.2.3. Nutrientes 61
3.2.4. Temperatura 61

3.2.5. Análisis Estadísticos 62
3.3. RESULTADOS 62
3.3.1. Parámetros físicos 65
3.3.2. Relación entre nutrientes y temperatura 65
3.3.3. Coberturas de las macroalgas 65
3.3.4. Relaciones entre coberturas de macroalgas T °C y nutrientes 72
3.3.5. Relaciones entre coberturas de macroalgas 73
3.4. Discusión 75
CAPÍTULO IV. PATRONES DE COLONIZACIÓN Y SUCESIÓN 89
4.1. Introducción 89
4.2. Materiales y métodos 91
4.3. Análisis de similitud 92
4.4. Resultados 93
4.5. Análisis de similitud 98
4.6. Discusión 100
4.7. Bibliografía 105
5. Discusión general 108
6. Conclusiones generales 110
7. Bibliografía 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de cambio de fase entre grupos funcionales de macroalgas tomado de Littler y Littler (1984). 11
Figura 2. Zona de estudio del arrecife de Puerto Morelos e Isla Contoy, Quintana Roo. Sitio Ixlaché.. 17
Figura 3. Tipos de ramificaciones que se pueden encontrar en las macroalgas. Imágenes modificadas y tomadas de Littler y Littler (1989).. 25
Figura 4. Porcentajes de especies de cada División registradas en el Parque Nacional de arrecifes de Puerto Morelos, agrupadas en familias, géneros y especies. 34
Figura 5. Porcentajes de especies de cada División encontradas en los arrecifes del Parque Nacional de Isla Contoy, agrupadas en familias, géneros y especies. 35
Figura 6. *Udotea abbottiorum*. 37
Figura 7. Udotea conglutinata.. 38
Figura 8. *Anadyomene cf. stellata.* 39
Figura 9. *Eucheuma isiforme* 40
Figura 10. *Ceramium cruciatum* 41
Figura 11. Clasificación de las macroalgas por grupo funcional tomado y modificado de Littler y Littler (1980) y Short *et al.,* (2006). 43
Figura 12. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Limones. Muestreo Mayo - Diciembre del 2015. 45
Figura 13. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Bonanza. Muestreo Mayo - Diciembre del 2015. 46
Figura 14. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Jardines. Muestreo Abril - Diciembre del 2015. 47
Figura 15. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Ixlaché. Muestreo Abril - Diciembre del 2015. 48
Figura 16. Modelo de regresion lineal entre losvalores de riqueza observados en campo y valores valculado y ajuistados al modelo de Clench. 49

Figura 17. Ejemplo de estimación del porcentaje de coberturas de macroalgas en campo. El diagrama de la izquierda asigna porcentajes de sub-áreas dentro del cuadrante. 61
Figura 18. Variaciones de la temperatura en los sitios de muestreos de los arrecifes de Puerto Morelos e Isla Contoy.. 64
Figura 19. Relación entre la concentración de Nitrógeno Inorgánico Disuelto y los Fosfatos en los cuatro sitios estudiados. 65
Figura 20. Gráficos de las coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Isla Contoy. 67
Figura 21. Gráficos de coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Limones.. 68
Figura 22. Gráficos de coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota*..... 69
Figura 23. Coberturas de especies de macroalgas presentes en el sitio Bonanza..... 70
Figura 24. Gráficos de coberturas de las algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Jardines 71
Figura 25. Correlaciones de algunas especies de macroalgas con los cambios de la temperatura. A) Ixlaché (Temp-Coralinas), B) Bonanza (Temp-*Sargassum*) 72
Figura 26. Correlaciones entre especies.. 73
Figura 27. Correlaciones entre *Turbinaria* con *Acanthophora* (a) y *Palisada* (b) especies presentes en Bonanza. 74
Figura 28. Gráfico de las correlaciones positivas entre la Cobertura Total, *Dictyota* s. 75
Figura 29. Sobrecrecimiento del género *Dictyota* sobre macroalgas coralinas..... 79
Figura 30. Diseño de las placas. 91
Figura 31. Riqueza promedio total de especie de macroalgas encontradas en cada sitio de muestreo 96
Figura 32. Porcentaje de ocupación de las especies de macroalgas en las 4 zonas arrecifales de Caribe Mexicano. 97
Figura 33. Análisis de conglomerados 98
Figura 34. Análisis de conglomerados de las especies registradas en las placas de jardines e Ixlaché..... 99
Figura 35. Láminas de las especies de peces e invertebrados, alimentándose de las placas de sucesión.. 102
Figura 36. Láminas de comportamiento de las especies de peces presentes en las placas de sucesión.. 103
Figura 37. Placas con algas completamente formadas en 2 sitios de Puerto Morelos.. . 104

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Ubicación de las localidades de muestreo en las zonas arrecifales del norte del Caribe Mexicano. 15
Cuadro 2. Numero de taxones de macroalgas registradas en el Caribe Mexicano. 22
Cuadro 3. Descripción de las formas de los talos de diferentes grupos funcionales 24
Cuadro 4. Listado sistemático de las especies de macroalgas encontradas en los arrecifes de Puerto Morelos e isla Contoy. 29
Cuadro 5. Número total de familias, géneros y especies de macroalgas registradas en los sitios de muestreos de los arrecifes de Puerto Morelos e Isla Contoy. 32
Cuadro 6. Clasificación de algunos géneros de macroalgas 42
Cuadro 7. Número de especies de macroalgas distribuidos según su división taxonómica encontradas en todo el Caribe Mexicano. 50
Cuadro 8. Comparación de las especies encontradas con otros estudios relazados en Puerto Morelos.. 53
Cuadro 9. Concentración de los nutrientes en los arrecifes de la zona norte del Caribe Mexicano. 63
Cuadro 10. Concentración de nutrientes en los arrecifes de Puerto Morelos reportados por otros autores. Las concentraciones se presentan en μM. 77
Cuadro 11. Especies de macroalgas identificadas sobre la superficie de las placas colocadas en los sitios arrecifales de Puerto Morelos e Isla Contoy. 93

RESUMEN

En las últimas décadas los arrecifes coralinos han sufrido cambios importantes debido a diferentes factores tanto naturales como antropogénicos que los han impactado negativamente. En el Caribe Mexicano se ha observado un aumento de la cobertura de macroalgas y una disminución de la cobertura de coral. El objetivo general de este trabajo fue evaluar la magnitud de la cobertura de macroalgas e identificar si la temperatura, la herbivoría y los nutrientes determinan la estructura de la comunidad de las macroalgas en dos sitios arrecifales del norte de Quintana Roo: Isla Contoy (IC) y Puerto Morelos (PM). Se obtuvo un registro de 104 especies de macroalgas de la cuales cinco son nuevos registros para PM. Las coberturas de las macroalgas en los arrecifes oscilaron entre 60% y 90% con dominancia del género *Dictyota* en PM y *Dictyota* y *Halimeda* en IC. Se identificaron eventos climáticos que influyeron en la dinámica de las coberturas de las macroalgas. Se encontraron concentraciones altas de nitrógeno inorgánico (8 – 11 µM) y fosfatos (2 – 2.5 µM), pero no se encontró una correlación entre los nutrientes y las coberturas de las macroalgas. Sin embargo, se determinaron correlaciones con la temperaturas con las algas coralinas en IC ($r = -0.81$ $p = 0.003$) y con *Sargassum* ($r = -0.86$ $p = 0.009$) en PM. En los experimentos sobre los patrones de colonización se registraron 56 especies de macroalgas principalmente de la División Rhodophyta, sin embargo no se encontraron patrones sucesión de los grupos funcionales ni se observó el establecimiento de una comunidad madura en las placas durante el transcurso de la etapa experimental. En todas las placas se observó que la herbivoría fue un factor clave en la dinámica de colonización de las macroalgas.

ABSTRACT

In the last decades coral reefs have undergone major structural changes that have negatively impacted them due to the combined effects of both natural and anthropogenic factors. In the Mexican Caribbean the increase of macroalgae cover and the concomitant decrement of coral cover have been observed. The objective of this work was to assess the macroalgae cover and identify whether temperature, herbivory and nutrients determine the structure of the community of macroalgae on two reef sites in northern Quintana Roo Isla Contoy (IC) and Puerto Morelos (PM). It was obtained a record of 104 species of macroalgae and five are new records. Macroalgae cover on coral reefs ranged between 60% and 90% with dominance of genus *Dictyota* in PM and genera *Dictyota* and *Halimeda* in IC. Weather events influenced the variability of macroalgae cover. High concentration of phosphates (2 - 2.5 µM) and inorganic nitrogen (8-11 µM) were found, however no correlation between nutrients and macroalgae cover were detected. Significant correlations between temperature with coralline algae at IC ($r = -0.81$ $p = 0.003$), and with *Sargassum* in PM ($r = -0.86$ $p = 0.009$) were observed. In settlement experiments, 56 species of macroalgae were recorded, mainly from Division Rhodophyta, although neither patterns of succession were found, nor settlement of a well-developed macroalgae community was observed. In all plates it was found that herbivory was a key factor in the dynamics of colonization of macroalgae.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Introducción

Las macroalgas marinas son un conjunto de organismos fotosintéticos muy variables en forma y complejos en su estructura (Lee, 1989). Se caracterizan por ser plantas no vasculares, es decir, carecen de tejidos de conducción (xilema y floema) por los cuales transportan sus nutrientes (Scagel *et al*., 1991).Cumplen además, un rol ecológico fundamental como productores primarios constituyendo la base de las cadenas tróficas a través de la herbivoría (Littler y Arnold, 1982). También proveen hábitat y refugio para peces e invertebrados en todos los ecosistemas acuáticos. Las macroalgas en los arrecifes coralinos son consideradas un componente esencial en el equilibrio y mantenimiento de estos ecosistemas (McCook, 1996). Desde una perspectiva ecológica, se ha clasificado a las macroalgas dentro de cinco grupos funcionales: filamentosas, carnosas arraigadas, carnosas no arraigadas, calcáreas arraigadas y coralinas (Short, *et al*., 2006). Éstas últimas contribuyen significativamente a la construcción de arrecifes mediante la calcificación e inducen el asentamiento larval y transformación de muchos organismos, incluidos los corales (Chisholm, 2003; Petersen, *et al*., 2005; Kitamura, *et al*., 2007). Asimismo, otras especies de algas carnosas constituyen un reservorio de alimento para una gran cantidad de peces e invertebrados de gran importancia a nivel ecológico (Polunin et. al., 1992). En condiciones ambientales óptimas la cantidad de nutrientes limita la acumulación de biomasa de macroalgas. Además, su abundancia está controlada por peces y otros invertebrados herbívoros. Sin embargo, el drástico icremento de nutrientes y sedimento como resultado de factores de origen antropogénico relacionados con actividades extractivas de pesca excesiva o de urbanización turística, agricultura y residencial de la zona costera, ha modificado rápidamente las condiciones ambientales en varios arrecifes del mundo, propiciando el rápido incremento de las macroalgas (Szmant, 2002). Ademas el deterioro de la cobertura coralina como resultado del calentamineto global y enfermedades coralinas favorece algunas especies de macroalgas utilicen el especio disponible, lo que a su vez disminuyendo los espacios para el asentamiento de las larvas de coralinas. (Aronson y Precht 2001; Hughes *et al.,* 2003; Nugues y Roberts, 2003; Gardner *et al.,* 2003; Wynne y Côté, 2007; Graham *et al.,* 2007; Bruno y Selig, 2007). De lo anterior se desprende que las mismas causas que determinan la disminución

en la diversidad y cobertura coralina están involucradas en el cambio en la estructura de las comunidades de las macroalgas (Hughes *et al*., 1989; Szmant, 2001) beneficiando el aumento de especies de algas oportunista capaces de crecer masivamente (McClanahan *et al.,* 2001) modificando con ello la estructura de esta comunidad (Díaz-Pulido *et al*., 2007). El papel de las macroalgas puede ser activo, no sólo porque éstas pueden cubrir totalmente la superficie de los corales y crecer masivamente privándolos de nutrientes, luz y espacio, sino porque liberan compuestos químicos que inhiben la herbivoría (Hay y Fenical, 1988). Al mismo tiempo, algunas especies perjudican o inhiben las primeras etapas de reclutamiento de coral y reducen también la supervivencia y el tejido de algas coralinas (Hughes *et al*., 2003).

Tanto a nivel mundial como en la cuenca del Caribe los arrecifes coralinos se enfrentan a niveles de perturbación sin precedentes y el cambio de fase hacia ecosistemas dominados por algas es un proceso muy extendido (Done, 1992; Knowlton, 1992; Hughes 1994; McManus y Polsenberg, 2004). Existe preocupación de que la dominancia de las comunidades de macroalgas puedan convertirse en el estado permanente de los sistemas arrecifales, ya que muchas de estas especies no son consumidas por los herbívoros locales y constituyen en sí un sumidero de energía que en mediano plazo puede colapsar las redes tróficas y por tanto, a la degradación del ecosistema (Kramer, 2003). En general, los cambios de fase se atribuyen a unas cuantas especies dominantes con características de crecimiento masivo (Williams *et al*., 2001). Una forma de entender el cambio de fase de corales a macroalgas, se basa en los cambios en la herbivoría y el régimen de nutrientes. Desde esta perspectiva los arrecifes coralinos se encontrarían en un estado estable si se mantiene el *top-down* ejercida por los peces herbívoros, y el control *bottom-up* propiciado por bajas concentraciones de nutrientes (Littler y Littler, 1984). En el extremo opuesto, en un arrecife perturbado con condiciones altas de concentración de nutrientes y baja herbivoría las macroalgas carnosas dominarían sobre las algas coralinas y los corales llevando así a un cambio de fase (Figura.1).

El esquema de la figura 1 pronostica que el cambio de fase se atribuye al incremento de macroalgas carnosas a costa de la cobertura coralina. No obstante, este enfoque de tratar la sucesión de la comunidad de macroalgas como grupos funcionales (conjunto de especies que poseen atributos, morfológicos, fisiológicos, conductuales que son semejantes y que desempeñan papeles ecológicos equivalentes) puede enmascarar

información útil para comprender las relaciones interespecíficas entre macroalgas y corales. El hecho de que en un mismo grupo se aglutinen algas con diferentes requerimientos fisiológicos e historias evolutivas (por ejemplo, algas rojas como *Laurencia* y algas pardas como *Lobophora*) implica no sólo perder de vista los efectos locales que permiten la dominancia de una especie en particular, sino también el posible efecto especie-específico de las macroalgas sobre las especies de corales (Littler y Littler ,1984).

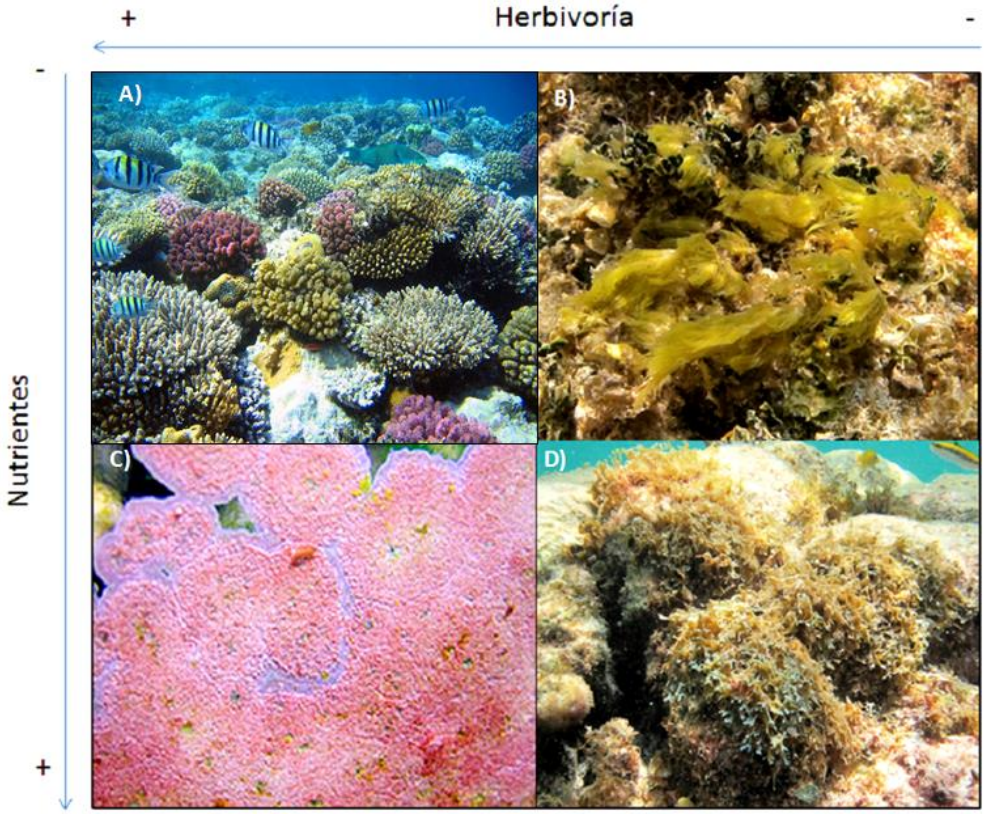


Figura 1. Modelo de cambio de fase entre grupos funcionales de macroalgas tomado de Littler y Littler (1984). A) Con baja concentración de nutrientes y alta presión de herbívoros las condiciones del medio son adecuadas para la dominancia de los corales y algas coralinas. B) La disminución de peces herbívoros y condiciones bajas de nutrientes propician el incremento de las algas filamentosas. C) En condiciones de alta concentración de nutrientes y alta herbivoría, la dominancia cambia hacia las algas costrosas coralinas. D) La dominancia de macroalgas carnosas prevalece en condiciones de altos nutrientes y una baja presión de herbivoría.

Por ello, el objetivo de esta investigación es determinar, en primer lugar, la estructura de la comunidad de macroalgas en cada sitio de estudio y describir las posibles diferencias

en cuanto a la magnitud de su cobertura. También se determinará si existe un efecto de las variaciones naturales de temperatura, herbivoría y nutrientes en la estructura de la comunidad de las macroalgas. Finalmente, se describirán los posibles patrones de colonización en dos zonas arrecifales en la costa norte de Quintana Roo, que aun cuando comparten muchas características físicas, también están sometidas a condiciones ambientales distintas. La información generada en este proyecto puede ser útil para comprender la dinámica de las poblaciones de macroalgas y poder proponer esquemas de mitigación y/o restauración de zonas arrecifales perturbadas.

1.2. ANTECEDENTES GENERALES

Entre los estudios más importantes sobre el porcentaje de cobertura de corales y macroalgas en sistemas coralinos del Caribe destaca el de Gardner *et al.* (2003) quienes analizaron los resultados de 65 estudios realizados entre 1977 y 2001. Sus resultados concluyeron que en 2 décadas la cobertura coralina disminuyó en 50% sugiriendo que cierto grado de deterioro sería atribuible a causas locales. En el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM) García-Salgado *et al.* (2008) realizaron un programa de monitoreo en arrecifes coralinos de México, Belice, Guatemala y Honduras. En lo concerniente a la parte mexicana encontraron que las coberturas de coral en Cozumel disminuyeron del 28% a 17% entre 2004 y 2007, mientras que la de las algas se incrementó del 25 al 30% en ese mismo periodo. En Banco Chinchorro la cobertura de macroalgas se incrementó de 24% al 50% entre 2004 y 2007; en Akumal las coberturas de coral apenas eran del 10% mientras las de las algas fue superior al 75% por lo que se consideró que este sitio se encontraba en estado "crítico". Los autores señalaron que los factores que determinaban los cambios de las coberturas coralinas en la región fueron atribuidos a los efectos producidos por los huracanes Emily y Wilma en 2005, y el huracán Dean en 2007, con la pérdida directa de la cobertura de coral vivo y variaciones en las densidades de peces.

Contreras *et al*. (2011) realizaron estudios sobre las coberturas de macroalgas en tres zonas arrecifales de Mahahual (norte, sur y centro) detectando que la composición de corales y macroalgas presentaron variaciones entre sitios. Los grupos de macroalgas que ocurrieron con mayor frecuencia y dominancia fueron el *turf* (24-50%), las cianofitas (24%) y varias especies del género *Dictyota*. En la zona sur el *turf* alcanzó hasta 34%, seguido

de *Dictyota* con 24%. En la zona centro la cobertura combinada de cianofitas-*turf* fue del 33% y *Dictyota* con el 22%. Para la zona norte las cianofitas ocuparon el 50% seguido por el *turf* con un 30%. El estudio concluyó que estos aumentos estaban ligados a la presencia de nutrientes, alta tasa de sedimentación y ausencia de herbívoros por la proximidad del drenaje de Mahahual ubicado en la zona Norte. Durante los Programas de Monitoreo Biológico auspiciados por la CONANP en Puerto Morelos, Quintana Roo ejecutados entre 20013 y 2015 (Datos no publicados), se detectaron porcentajes de coberturas de macroalgas sobre las crestas arrecifales superiores al 70%, siendo *Dictyota* el género dominante para todos los sitios. En evaluaciones realizadas en los arrecifes de Ixlaché del Parque Nacional Isla Contoy se detectaron coberturas de macroalgas superiores 50% siendo las especies de macroalgas dominates pertenecientes a los géneros *Halimeda* y *Dictyota* (datos no publicados). Sin embargo Ladd y Collado-Vides (2013) realizaron un monitoreo en los arrecifes de Puerto Morelos para la mejora de la gestión y la resilencia de los arrecifes, encontraron que el sitio Limones presentó las más altas coberturas coralinas, mientras Jardines y Bonanza la más baja.

Históricamente, se ha planteado que las algas son competitivamente superiores a los corales cuando estas son expuestas a concentraciones elevadas de nutrientes (Lewis, 1986). Box y Mumby (2007) investigaron los efectos de la competencia de dos especies de macroalgas (*Dictyota pulchella* y *Lobophora variegata*) sobre el crecimiento y la supervivencia de los corales juveniles del género *Agaricia* sp en el Caribe. Sus resultados determinaron que *L. variegata* causó una pérdida general de tejido de coral de 50% en seis meses, mientras que en el mismo periodo *D. pulchella* ocasionó una mortalidad de 99%. Por su parte, Díaz-Pulido, *et al.* (2010) analizaron el efecto de 11 especies de macroalgas en el asentamiento de las larvas de los corales *Platygyra daedalea*, observando que los tapetes algales y las macroalgas calcáreas incrustantes tuvieron menores efectos sobre los asentamientos de coral en comparación con las macroalgas calcáreas erectas y carnosas que inhibieron el asentamiento de éstas. Estos estudios demuestran que algunas especies de macroalgas pueden inhibir el crecimiento de los corales juveniles o el asentamiento de sus larvas contribuyendo al deterioro de los arrecifes del Gran Caribe. Sin embargo, la herbivoría puede contrarrestar los efectos de las macroalgas controlando su abundancia y la composición de la comunidad. En este sentido, Ferrari *et al.* (2012) relacionaron la intensidad de la herviboría y los cambios de

temperatura en tres especies de macroalgas del Caribe, *Lobophora variegata*, *Dictyota pulchella, Halimeda opuntia* y tapetes algales (TA). Estos autores observaron que sólo la abundancia de *D. pulchella* aumentó significativamente con la temperatura disminuyendo durante el invierno, mientras que *H. opuntia* se correlacionó positivamente con las temperaturas bajas. Todas las demás especies de macroalgas disminuyeron su abundancia al aumentar la temperatura. En cuanto al efecto de la herbivoría, se observó que ésta no fue un factor clave para controlar la abundancia de *D. pulchella*, aunque sí lo fue para *las otras especies.*

1.3. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN E HIPÓTESIS

1.3.1. Preguntas de investigación.

Esta investigación se plantea responder las siguientes preguntas:

- ¿Cuál es la riqueza taxonómica de la comunidad de algas de la zona de Puerto Morelos e Isla Contoy?
- ¿Qué géneros de macroalgas son dominantes en las zonas de Puerto Morelos e Isla Contoy?
- ¿Cuáles de las especies dominantes se correlacionan positivamente con el incremento de temperatura y la concentración de nutrientes?
- ¿El patrón de colonización de las macroalgas en la zona de estudio está determinado por la estructura taxonómica de la comunidad de macroalgas aledaña?

1.3.2. Hipótesis

Las posibles diferencias en la composición taxonómica y porcentaje de cobertura de las especies que conforman las comunidades de macroalgas entre sitios arrecifales estará determinado por las diferencias en temperatura, concentración de nutrientes e intensidad de herbivoría, lo cual afecta los patrones de asentamiento, sucesión y dominancia.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Evaluar la magnitud de la cobertura de macroalgas e identificar el grado en que la temperatura, la herbivoría y los nutrientes determinan la estructura de la comunidad de las macroalgas, así como describir sus posibles patrones de asentamiento en dos zonas arrecifales de la costa norte de Quintana Roo.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar la riqueza de especies de macroalgas dominantes en los sitios de estudio.
- Estimar los cambios de cobertura de macroalgas en los cuatro sitios de estudio.
- Determinar la posible correlación entre la temperatura y concentración de nutrientes con la abundancia de las especies de macroalgas.
- Determinar el patrón de sucesión en las comunidades de macroalgas de la zona de estudio.

1.5. DESCRIPCIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO

El Caribe Mexicano se extiende desde Cabo Catoche (Zona norte de Quintana Roo) hasta el extremo sur de la Bahía de Chetumal, abarcando aproximadamente 600 km de costa (Batllori *et al*., 2006). Sus costas están en constante interacción con la Corriente de Yucatán que fluye en dirección sur-norte, y en su posición más norteña, con la surgencia de Cabo Catoche (Chávez-Hidalgo, 2009).

Este estudio se llevó a cabo en los sitios arrecifales de la zona norte del estado de Quintana Roo, dentro de los polígonos del Parque Nacional de Puerto Morelos y el Parque Nacional de Isla Contoy. Estos sitios forman parte de la barrera arrecifal denominada “Gran Cinturón de Arrecifes del Atlántico Occidental”, considerada como la segunda barrera arrecifal más grande del mundo. En el cuadro 1 se indican los sitios de muestreo con coordenadas geográficas, la profundidad y la fecha de colecta.

Cuadro 1. Ubicación de las localidades de muestreo en las zonas arrecifales del norte del Caribe Mexicano.

Localidad / Sitio	Coordenadas	Profundidad	Fechas de muestreo
(PNAPM) Limones	21° 59' 5.991" N 86° 47' 59.10" W	1.50 a 2.30 metros	Mayo a Diciembre 2015
(PNAPM) Bonanza	20° 57' 55.58" N 86° 48' 52.23" W	0.50 a 1.50 metros	Mayo a Diciembre 2015
(PNAPM) Jardines	20° 49' 53.68" N 86° 52' 48.54" W	0.85 a 4.50 metros	Abril a Diciembre 2015
(PANIC) Ixlaché	21° 27' 40.01" N86° 47' 50.05" W	0.60 a 1.20 metros	Abril a Diciembre 2015

1.5.1. Puerto Morelos: Limones, Bonanza y Jardines

Es una población costera que se localiza frente al Mar Caribe en México. El poblado se localiza geográficamente en la costa nororiental del estado de Quintana Roo, a 35 km al sur de Cancún y 34 km al norte de Playa del Carmen sobre la costa. El Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (PNAPM) se localiza en la costa norte del estado de Quintana Roo al noreste de la Península de Yucatán. Su ubicación geográfica le otorga la característica de ser una zona de transición entre dos cuencas marinas, la del Caribe y la del Golfo de México. En paralelo a la costa, y fuera de la Barrera de Arrecife fluye hacia el norte la Corriente de Yucatán (Badán *et al*., 2005) que entra al Golfo de México por el Estrecho de Yucatán generando contracorrientes costeras de retorno al sur. La barrera arrecifal de Puerto Morelos abarca 20 km de longitud en su línea costera (Dreckmann *et al*., 1996). En los arrecifes de Puerto Morelos se seleccionaron 3 sitios de estudio: Limones, Bonanza y Jardines.

El arrecifes de Limones se encuentra ubicado al norte de Puerto Morelos este sitio presenta colonias extensas de *Acropora palmata* lo cual se considera elemento fundamental en la construcción y expansión de la estructura arrecifal (Álvarez-Filip *et al.,* 2013). Bonanza es uno de los sitios más someros de los arrecifes de Puerto Morelos presenta coberturas de macroalgas superiores al 75% y alta presencia de corales dañados.

Jardines es uno de los sitios más sureños de Puerto Morelos, este sitio es más representativo de la zona ya que presenta mayor diversidad de especies de corales, entre las especies presentes más importantes están las colonias de *Acropora palmata*, *Orbicella* entre otras.

1.5.2. Isla Contoy: Arrecife de Ixlaché.

También conocida como Isla Pájaros, se encuentra en el extremo poniente del canal de Yucatán, en el límite donde se mezclan las aguas cálidas del mar Caribe y las del Golfo de México, constituye el elemento más norteño del sistema insular del Caribe. Es una isla pequeña decretada como Parque Nacional orientada de norte a sur; se localizada a 12.8 km de la costa, a 30 km al Norte de Isla Mujeres y a 32.3 km al Este de Cabo Catoche. El arrecife coralino Ixlaché se ubica 1 km al sur del Parque Nacional y tiene gran influencia de corrientes litorales, oleaje, mareas y vientos dominantes del sureste (Salazar-Vallejo *et al*., 1993). El sitio presenta grandes incidencias de coberturas de macroalgas y bajas coberturas de coral (Figura. 2).

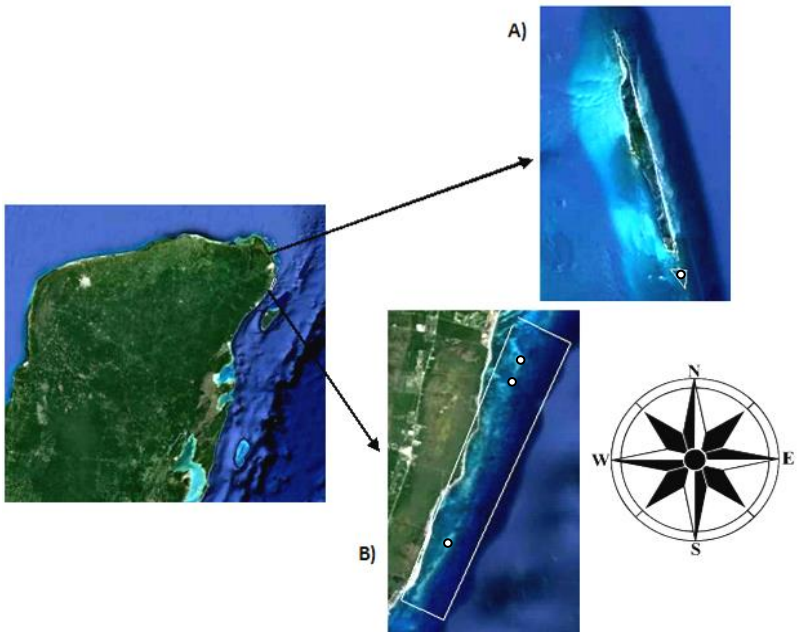


Figura 2. Zona de estudio del arrecife de Puerto Morelos e Isla Contoy, Quintana Roo. Sitio Ixlaché. A) sitio de muestreo de los arrecifes de Isla Contoy (Ixlaché). B) Sitios de Muestreo del Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos (Limones, Bonanza y Jardines).

1.6. BIBLIOGRAFÍA

Aronson, R. B., y W. F. Precht (2001) White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. In: (James W. Porter) The Ecology and Etiology of Newly Emerging Marine Diseases. Springer, Netherlands, 25-38

Badan, A., C. J. J. Sheinbaum y J. Ochoa (2005) Uer-layer circulation in the aroaches to Yucatán Channel. Circulation in the Gulf of Mexico: Observations and Models, 57-69.

Batllori-Sampedro, E., J. González-Piedra, J. I. Díaz-Sosa, y J. L. Febles-Patrón (2006) Caracterización hidrológica de la región costera noroccidental del estado de Yucatán, México. Investigaciones geográficas, (59), 74-92.

Box, S. J., y P. J. Mumby (2007) Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals. Marine Ecology Progress Series, 342, 139-149.

Bruno, J. F., y E. R. Selig (2007) Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: timing, extent, and subregional comparisons. PLoS One, 2(8); e711

Chávez-Hidalgo, A. (2009) Conectividad de los arrecifes coralinos del Golfo de México y Caribe Mexicano. Tesis de Maestría en Ciencias (Manejo de Recursos Marinos), Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas, IPN, México. 23-47

Chisholm, J. R. (2003) Primary productivity of reef-building crustose coralline algae. Limnology and Oceanography, 48(4); 1376-1387.

Contreras, A. C. y I. Ortegón-Aznar (2011) Cambio de Fase Coral-algas en el Arrecife de Coral de Mahahual, en el Caribe Mexicano. Proceedings of the 64th Gulf and Caribbean Fisheries Institute, 1- 4.

Diaz-Pulido, G., L. J. McCook., A. W., Larkum., H. K. Lotze., J. A. Raven., B. Schaffelke y R. S. Steneck (2007). Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change. The Great Barrier Reef Marine Park Authority, 154-183

Diaz-Pulido, G., S., Harii., L. J. McCook y O. Hoegh-Guldberg (2010) The impact of benthic algae on the settlement of a reef-building coral. Coral Reefs, 29(1); 203-208.

Done T. J. (1992) Phase shifts in coral reef communities and their ecological significance. Hydrobiologia 247,121- 132.

Ferrari, R., M J. C. Ortiz y P. J. Mumby (2012) Interaction of herbivory and seasonality on the dynamics of Caribbean macroalgae. Coral Reefs, 31(3); 683-692.

García-Salgado, M. A., G. G. Nava-Martínez., M., Vásquez., N. D. Jacobs., I. Majil., A. B. Molina-Ramírez., A. Yañez-Rivera., J.J. Dominguez-Calderon., W. Hadaad., M.A. Maldonado., O. Torres (2008) Declining trend on the Mesoamerican Reef System marine protected areas. In Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 888-894.

Gardner T. A., I. M. Côté., J. A. Gill., A. Grant y A. R. Watkinson (2003) Longterm region-wide declines in Caribbean corals. Science 301; 958– 960

Graham, N. A., S. K. Wilson., S. Jennings., N. V. Polunin., J. A. N. Robinson., J. P. Bijoux y T. M. Daw, (2007). Lag effects in the impacts of mass coral bleaching on coral reef fish, fisheries, and ecosystems. Conservation biology, 21 (5); 1291-1300.

Hay, M. E., J. E. Duffy y Fenical, William (1988) Seaweed chemical defenses: among-compound and among-herbivore variance In Proceedings 6 th International coral Reef Symposium., (Vol. 3, 43-48).

Hughes, T. P. (1989). Community structure and diversity of coral reefs: the role of history. Ecology, 275-279.

Hughes, T. P. (1994). Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. Science 265, 1547-1551.

Hughes, T. P., A. H. Baird., D. R. Bellwood., M. Card., S. R. Connolly., C. Folke., R. K. Grosberg., O. Hoegh- Guldberg., J. B. C. Jackson., J. Kleypas., J. M. Lough., P. A. Marshall., M. Nystrom., S. R. Palumbi., J. M. Pandolfi., B. R. Rosen y J. Roughgarden (2003) Climate change, human impacts, and the resilence of coral reefs. Science, 301, 929-933.

Kitamura, M., T. Koyama., Y. Nakano y D. Uemura (2007) Characterization of a natural inducer of coral larval metamorphosis. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 340(1); 96-102.

Knowlton, N. (1992) Thresholds and multiple stable states in coral reef community dynamics. American Zoologist, 32; 674-682.

Kramer, P. A. (2003) Synthesis of coral reef health indicators for the western Atlantic: Results of the AGRRA program (1997-2000). Atoll Research Bulletin, 496, 1-57.

Lee R. E. (1989) Phycology. Cambridge University Press. New York, 1-654.

Lewis, S. M. (1986) The role of herbivorous fishes in the organization of a Caribbean reef community. Ecological Monographs, 56(3); 183-200.

Lighty, R. G., I. G. Macintyrey y R. Stuckenrath (1982) *Acropora palmata* Reef Framework: A reliable indicator of sea level in the western Atlantic for the past 10,000 years. Coral Reefs, (1); 125-130.

Littler, M. M. y K. E. Arnold (1982) Primary productivity of marine macroalgal functional-form groups from southwestern North America. Journal of Phycology 18; 307-311

Littler, M. M y D. S. Littler (1984) Relationships between macroalgal functional form groups and substrata stability in a subtropical rocky-intertidal system. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 74(1); 13-34.

McClanahan, T., N., Muthigay y S., Mangi (2001) Coral and algal changes after the 1998 coral bleaching: interaction with reef management and herbivores on Kenyan reefs. Coral reefs, 19 (4); 380-391.

McCook, L. L. (1996) Effects of herbivores and water quality on *Sargassum* distribution on the central Great Barrier Reef: cross-shelf transplants. Marine Ecology Progress Series-pages. 139; 179-192.

McCook, L.J. (2001) Competition between corals and algal turfs along a gradient of terrestrial influence in the nearshore central Great Barrier Reef. Coral Reefs (19); 419–425.

McManus, J. W y J. F. Polsenberg (2004) Coral–algal phase shifts on coral reefs: ecological and environmental aspects. Progress in Oceanography, 60(2); 263-279.

Nugues, M. M., y C. M. Roberts (2003) Coral mortality and interaction with algae in relation to sedimentation. Coral Reefs, 22(4); 507-516.

Petersen, D., M., Laterveer, y H. Schuhmacher (2005) Innovative substrate tiles to spatially control larval settlement in coral culture. Marine Biology, 146(5); 937-942.

Salazar-Vallejo S.I., J.C. Zurita., N.E. González., F. Pérez-Castillo y H.C. Gamboa (1993) Áreas costeras protegidas de Quintana Roo. 687-708. In: Salazar-Vallejo S.I. y N.E. González (eds.). Biodiversidad Marina y Costera de México. CONABIO y CIQRO, México, 865 .

Scagel, R. F., R. J. Bandoni., J. R. Maze., G. E. Rouse., W. B. Schofield y J. R. Stein (1991) Plantas no vasculares. Ed. Omega, S. A., Barcelona, 548.

Short, F. T., L. J. McKenzie., R.G. Coles., K.P. Vidler y J.L. Gaeckle (2006) SeagrassNet Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat, Worldwide edition. University of New Hampshire Publication, 75.

Szmant, A. M. (2001) Introduction to the special issue of Coral Reefs on “Coral Reef Algal Community Dynamics”. Why are coral reefs world-wide becoming overgrown by algae? “Algae, algae everywhere, and nowhere a bite to eat!”. Coral Reefs, 19 (4); 299-302.

Szmant, A.M (2002) Nutrient enrichment on coral reefs: Is it the major cause of coral reef decline? Estuaries, 25(4b); 743-766.

Thacker, R., D. Ginsburg y V. Paul, (2001) Effects of herbivore exclusion and nutrient enrichment on coral reef macroalgae and cyanobacteria. Coral Reefs, 19(4); 318-329.

Williams, I. D., N. V. Polunin y V. J. Hendrick (2001) Limits to grazing by herbivorous fishes and the impact of low coral cover on macroalgal abundance on a coral reef in Belize. Marine Ecology Progress Series, 222; 187-196.

Wynne, S. P., y I. M. Côté (2007) Effects of habitat quality and fishing on Caribbean spotted spiny lobster populations. Journal of Alied Ecology, 44(3); 488-494.

CAPITULO II RIQUEZA DE LAS COMUNIDADES DE MACROALGAS EN ARRECIFES DEL NORTE QUINTANA ROO.

2.1. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos fundamentales para comprender la dinámica de las comunidades, es el conocimiento del número de especies que la integran. Este conocimiento implica poseer la suficiente capacidad técnica para identificar un gran número de especies de grupos filogenéticos distintos. En el caso de las macroalgas arrecifales del Caribe Mexicano ya se ha realizado una gran parte del esfuerzo de identificación de los organismos según consta en los estudios ficológicos realizados en diferentes ecosistemas marinos de la zona, incluyendo arrecifes, lagunas arrecifales, ecosistemas de pastos entre otros. (Dreckman *et al*., 1996; Collado-Vides *et al*., 1998; Mendoza-González *et al*. 2000; Ortega *et al*. 2001; Mateo-Cid *et al*., 2006 y Mateo-Cid *et al.,* 2001). Los listados florísticos resultado de estos trabajos reflejan la alta diversidad de ciertos grupos de macroalgas en la zona (Cuadro 2).

Cuadro 2. Numero de taxones de macroalgas registradas en el Caribe Mexicano.

Lugar	Tipo/muestra	No. de Taxa	Chlorophyta	Phaeophyta	Rhodophyta	Autores
Puerto Morelos	Macroalgas bentónicas	213	72	32	109	Dreckman *et al*., 1996
Puerto Morelos	Macroalgas bentónicas	106	50	16	40	Collado-Vides *et al*., 1998
Puerto Morelos	Macroalgas bentónicas	223	78	27	118	Rosas *et al*.,1998
Isla mujeres	Macroalgas bentónicas	166	61	29	76	Quan-Yoon *et al*., 2004
Isla mujeres	Macroalgas epifitas	93	16	19	58	Quan-Yoon *et al*., 2006
Cozumel	Macroalgas bentónicas	385	121	48	216	Mateo-Cid *et al*., 2006
Caribe	Macroalgas bentónicas	546	171	68	307	Cetz-Navarro *et al*., 2008

Los registros mostrados en el cuadro 2 coinciden en la División Rhodophyta es la más diversa para la zona del Caribe Mexicano. Por ejemplo, las familias Ceramiaceae, Dasyaceae, Rhodomelacea y Corallinaceae son las que contienen la mayoría de las especies de esta División distribuidas en los géneros *Ceramium*, *Chondria*, *Laurencia* y *Polysiphonia*. En segunda instancia la División Chlorophyta con las familias Caulerpaceae, Halimedaceae y Udoteacea contienen a los géneros *Caulerpa*, *Halimeda* y *Udotea* respectivamente que son los más representativos en cuanto al número de especies. Finalmente, la División Phaeophyta presenta dos familias: Dictyotaceae y Sargassaceae, con géneros altamente representados como *Dictyota* y *Sargassum,* que destacan en cuanto al número de especies. Aun cuando los trabajos citados son relevantes es necesario realizar una actualización de estos listados ya que debido los cambios que experimenta el arrecife, algunas especies podrían estar prosperando y otras más podrían estar ausentes en estas nuevas condiciones ambientales. Por esto, el objetivo de este capítulo es determinar la riqueza de las especies presentes que hay en las zonas de estudio arrecifes de la zona norte de Quintana Roo.

2.2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1. Trabajo de campo

La recolección del material ficológico se realizó directamente sobre la cresta arrecifal. Sin embargo se consideró colectar el mayor número de especies posible ya que uno de los objetivos era tomar muestras representativas que consideren la diversidad de las especies presentes en el arrecife. Las macroalgas se colectaron a mano y con ayuda de spatulas y navajas de campo y se depositadas en bolsas de cierre hermético. Las muestras se trasladaron al laboratorio y se colocaron en frascos de 100 ml, fueron etiquetadas y fijadas en una solución preparada con 6 partes agua de mar, 3 partes alcohol (90%) 1 parte formaldehido (40%) para su análisis posterior almacenándose en un lugar oscuro para evitar la decoloración de las muestras. Para la curva de acumulación se utilizó los datos de las especies presentes dentro de una unidad muestral de 50 x 50 cm la descripción de este método se encuentra disponible en el capítulo 3.

2.2.2. Trabajo de laboratorio

Para la observación de las macroalgas se utilizó un microscopio Stemi DV4 y Primo Star de luz transmitida en el cual se realizaron cortes de los talos con navajas de doble filo

para observar aspectos anatómicos de las estructuras reproductivas y vegetativas. Para la descalcificación de los representantes de la familia Corallinaceae se utilizó HNO_3 0.6 M. La determinación del material ficológico se llevó a cabo utilizando las claves y descripciones referidas en los trabajos de Taylor (1960), Littler y Littler (1989), Littler y Littler (2000).

Para la determinación de los géneros y especies se utilizaron claves de identificación que permitieron reconocer los caracteres necesarios para cada uno de los tipos morfológicos más comunes (Cuadro 3). Por ejemplo, las ramas en torno a los ejes del talo, o modo de ramificación, confiere a las macroalgas una silueta característica.

La ramificación puede ser de tipo irregular, opuesto, alterno y dicotómico tal como se ilustra esquemáticamente en la figura. 3. Existen otras particularidades morfológicas de los talos de las macroalgas que fueron de gran importancia durante la identificación de una especie. (Cuadro 3).

Cuadro 3. Descripción de las formas de los talos de diferentes grupos funcionales de macroalgas.

Tipo de talo	Descripción	Ejemplo
Articulados	Se presentan divididos en segmentos regulares producidos por tabiques transversales.	*Hypnea spinella* *Ceramium cruciartum*
Huecos	Cilíndricos, comprimidos o globosos. Su estructura se pone de manifiesto mediante un corte transversal	*Eucheuma isiforme*, *Agardhiella subulata*
Calcificados	Aspecto pétreo, carbonato incrustado en la membrana celular	*Galaxaura rugosa* *Amphiroa rigida* *Porolithon* sp
Nervios y venas	Talo laminar o cintiforme. Su disposición (central, radial, en retículo, etc.) es un carácter que facilita la determinación de una especie.	*Dictyopteris jamaicensis* *Anadyomene stellata*
Vesículas aeríferas	Son flotadores debido a la posesión de globos de aire (vesículas)	*Sargassum hystrix*

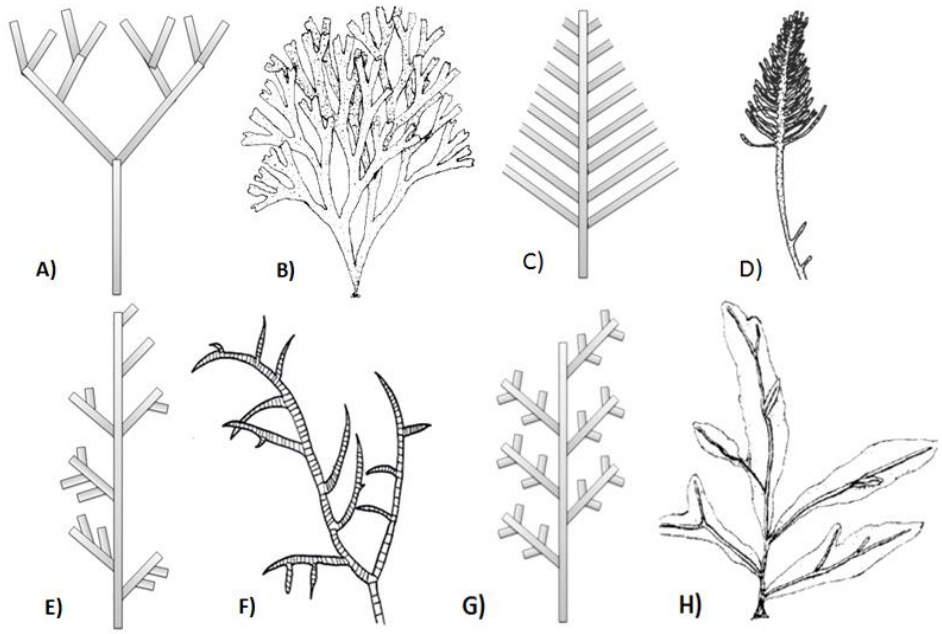


Figura 3. Tipos de ramificaciones que se pueden encontrar en las macroalgas. Imágenes modificadas y tomadas de Littler y Littler (1989). A)-B) Dicotómica (*Dictyota*) C)-D) Pinnada (*Bryopsis*), E) - F) Irregular (*Ceramium*) y G)- F) Alterna (*Dictyopteris*). Tomado y modificado de Littler y Littler (1989).

2.2.3. Descripción de algunos géneros de macroalgas importantes para su identificación.

Las descripciones se construyeron con base en observaciones propias y los trabajos de Taylor (1960), Littler y Littler (1989), Littler y Littler (2000).

2.2.4. División Chlorophyta

2.2.4.1. *Bryopsis* Lamouroux 1809

Talos en formas de racimos con formas de ejes recurrentes con uno a más tipos de ramificación; eje con ramillas pinnadas, radiales o unilaterales, pínnulas cortadas por paredes transversales basales, funcionando como gametangios o como propágulos vegetativos.

2.2.4.2. *Caulerpa* Lamouroux 1809

Ramas erectas altamente diferenciadas, presencia de rizoides (pseudo-raíces) que se fijan al sustrato como bases, cauloides (pseudo-tallos) y filoides (hojas). Presentan una estructura sifonal

2.2.4.3. *Halimeda* Lamouroux 1809

Plantas calcificadas erectas a partir de un pie basal, ramificadas, con uniones flexibles alternando con segmentos; segmentos moniliformes, cilíndricos o discoides, simples o lobulados; estructura filamentosa, los filamentos cenocíticos estrechamente paralelos y endurecidos en las uniones ramificados en la médula de los segmentos filamentos, a veces cerrados por engrosamientos de paredes reproducción por gametos apiñados producidos en gametangios.

2.2.5. División Phaeophyta

2.2.5.1. *Dictyota* Lamouroux 1809

Plantas ramificadas dicotómicamente, crecimiento a partir de racimos de células meristemáticas localizadas los ápices de las ramas, los cuales destacan bordes centrales en ramas con forma de banda; sobre las superficies de la lámina se observan grupos de cilios incoloros.

2.2.5.2. *Sargassum* C. Agard 1820

Algas erectas, ejes principales cilíndricos, con ramas determinadas e indeterminadas láminas con orillas central, anchas a filiformes, simples, enteras a serradas; vesículas; fijas por un sólido pie basal o por crecimientos externos rizoidales de los ejes principales, o de flotación libre; ramas receptaculares desarrollándose en las axilas de las hojas o paniculadas, generalmente cilíndricas.

2.2.6. División Rhodophyta

2.2.6.1. *Ceramium* Roth 1797

Plantas erectas; ramificación dicotómica o más raramente alternada; ramas segmentadas; los ejes uniseriados, de células relativamente grandes, corticadas en los nodos por una zona de células más pequeñas, en algunas especies esta zona se dispersa tanto que

cubre los internodos axiales totalmente; esporangios esféricos, generalmente tetraédricos y sésiles, nacidos en los nodos o en las especies totalmente corticadas, entre ellos inmersos, proyectándose; espermatangios formados de pequeñas células incoloras en una capa sobre las partes corticadas, una o dos ramas carpogénicas de cuatro células nacidas sobre las células nodales laterales.

2.2.6.2. *Bryothamnion* Kutzing 1843

Talos erectos, raramente cartilaginosas, las ramas principales cilíndricas, comprimidas o angulares en sección, alternadamente divididas, las ramas produciendo ramillas determinadas cortas; ejes con varias células pericentrales extensamente corticadas; estiquidios auxiliares rugosos o con ramillas cortas, los tetrasporangios colocados espiralmente, solos en cada segmento; pericarpios de talo corto sobre ramillas transformadas, pared gruesa.

2.2.6.3. *Laurencia* Lamouroux 1813

Talos erectos de una consistencia más o menos carnosa y ocasionalmente subcartilaginosa, con una base fibrosa escudada, los ejes cilíndricos o comprimidos, radialmente o bilateralmente ramificados; crecimiento desde una célula apical, la cual se localiza en un hueco terminal y se rodea de tricoblastos rudimentarios; segmentación al principio en un sifón axial rodeado de células pericentrales; ápice localmente hundido cerca del hoyo terminal; tetrasporangios usualmente en una zona difusa bajo las puntas de las ramillas, justo bajo las células de superficie; ovoides o en forma de barril, en el hoyo apical expandido de las ramillas fértiles.

2.2.6.4. *Jania* Lamouroux 1812

Talo generalmente erecto a partir de un disco basal pequeño, repetidamente dicotómicamente ramificado, las ramas segmentadas, con articulaciones flexibles entre los segmentos calcificados compuestos de una zona de células largas de pared gruesa; conceptáculos de todos los tipos, solitarios, formados en segmentos terminales inflados, descargándose por un poro apical, pero comúnmente en forma de picos, y esas proyecciones iniciando nuevas ramas las cuales continúan el crecimiento hacia arriba.

2.2.6.5. *Amphiroa* J.V. Lamouroux (1812)

Talos altamente calificados y ramificados que parten de una porción basal costrosa, están formadas por una sucesión de geniculas e intergeniculas, existe una gran variedad morfológica en los talos y estos miden desde 1 a 2 mm hasta 30 centímetros de alto. La intergenícula puede ser de cilíndrica a comprimida y consta de una médula en la que alternan filamentos de células largas y cortas que derivan de un tejido meristemático y una corteza con número variable de capas.

2.2.6.6. *Hypnea* Lamouroux 1813

Plantas foliáceas o ramificadas, suaves, con una médula longitudinalmente filamentosa y una corteza compacta de filamentos radialmente fasciculados; esporangios tetrapartidos; espermatangios desarrollados sobre las células externas de la corteza; ramas carpogénicas de tres células desarrolladas lateralmente sobre los filamentos corticales; células auxiliares dispersas, intercalares, desarrolladas en segmentos interiores de filamentos corticantes.

2.3. Curva de acomulasion de especies

Se realizaron una serie de muestreos de abril a diciembre del 2015 utilizando transectos de 10 metros colocando unidades muestrales de 50 x 50 cm (Cuadrantes) en todos los sitios arrecifales. Con los datos obtenidos en cada sitio se realizó una curva de acumulación de especies que fue ajustada al modelo de Clench. Ecuación 1

$$\boldsymbol{Sn = \frac{ax}{1+bx}}$$ **Ecuación 1.**

Dónde:

a = tasa de incremento de nuevas especies al comienzo del inventario

b = parámetro relacionado con la forma de la curva.

x = unidades de muestreo.

Esta expresión (Ecuación 1) relaciona el número de especies con el número de unidades muestrales mediante el ajuste a un modelo asintótico, y de esta forma, estimar la riqueza de especies en el sitio. Teóricamente la riqueza estimada no debería ser mucho mayor al máximo número de especies registradas. Si hay mucha diferencia entre ambos valores es posible que el esfuerzo de muestreo no haya sido suficiente para capturar la riqueza del

sitio. El valor estimado o asintótico se calcula mediante la relación de los parámetros **a/b**. (Soberón y Llorente, 1993).

2.4. RESULTADOS

2.4.1. Riqueza total de especies de macroalgas

Se registraron 104 especies pertenecientes a 25 familias distribuidas en los 4 sitios arrecifales del norte de Quintana Roo de las cuales 10 familias pertenecen a la División Chlorophyta, 13 a la División Rhodophyta y 2 a la División Phaeophyta (Cuadro 4).

Cuadro 4. Listado sistemático de las especies de macroalgas encontradas en los arrecifes de Puerto Morelos e isla Contoy. Las especies se describieron según la clasificación de Algabase.net. LM = Limones, BN = Bonanza, JR = Jardines y IX= Ixlaché.** Nuevos registros Para la zona de PNAPM

CLASIFICACIÓN	LM	BN	JR	IX
Rhodophyta				
Corallinales				
Corallinaceae				
Amphiroa rigida J. V. Lamouroux 1816	*	*	*	*
A. brasiliana Decaisne 1842	*		*	
A. fragilissima Linnaeus J. V. Lamouroux 1816	*	*		
A. hancockii W.R.Taylor 1942**			*	*
A. tribulus (J.Ellis y Solander) J. V. Lamouroux 1816	*	*	*	*
A. sp 1		*		*
A. sp 2		*		
Hydrolithon sp	*		*	
Jania pumila J.V. Lamouroux 1816	*			*
J. adhaerens J.V. Lamouroux 1816	*	*		*
J. rubens (Linnaeus) J.V. Lamouroux 1816	*			*
J. sp 1			*	
Nemaliales				
Liagoraceae				
Liagora norrisiae I. A. Abbott 1984**	*			
L. ceranoides f. pulverulenta (C.Agardh) Yamada 1938	*			
L. sp	*			
Galaxauraceae				
Galaxaura rugosa (J. Ellis y Solander) J. V. Lamouroux 1816	*	*	*	
Dichotomaria marginata (J. Ellis y Solander) Lamarck 1816		*	*	
D. obtusata (J. Ellis y Solander) Lamarck 1816	*		*	*
Gigartinales				
Cystocloniaceae				
Hypnea spinella (C. Agardh) Kützing 1847	*	*		*

H. valentiae (Turner) Montagne 1841		*		*
H. mussiformis (Wulfen) J. V. Lamouroux 1813		*		
H. sp		*		
Gelidiales				
Gelidiaceae				
Gelidiella acerosa (Forsskål) Feldmann y Hamel 1934	*	*	*	*
G. sp1		*		*
Halimeniales				
Halymeniaceae				
Cryptonemia sp			*	*
Halymenia sp		*		
Rhodymeniales				
Lomentariaceae				
Ceratodictyon scoparium (Montagne y Millardet) Renorris 1987**		*		
G. sp1		*	*	
Ceramiales				
Ceramiaceae				
Antithamnion sp			*	
Ceramium nitens (C. Agardh) J. Agardh 1851	*	*	*	
C. corniculatum Montagne 1861		*	*	
C. flaccidum (Harvey ex Kützing) Ardissone 1871		*		
Polysiphonia sp		*	*	
Wrangeliaceae				
Wrangelia sp	*	*		*
Rhodomelaceae				
Acanthophora muscoides (Linnaeus) Bory 1828		*		
A. spicifera (M.Vahl) Børgesen 1910		*		
Bryothamnion triquetrum (S. G. Gmelin) M.Howe 1915		*	*	
Laurencia filiformis (C. Agardh) Montagne 1845			*	
L. intricata J. V. Lamouroux 1813	*	*	*	
L. obtusa (Hudson) J. V. Lamouroux 1813.			*	
L. poiteaui (J.V. Lamouroux) M. Howe 1918	*		*	*
L. sp 1		*	*	
L. sp 2			*	
Bonnemaisoniales				
Bonnemaisoniaceae				
Asparagopsis taxiformis Montagne 1841		*		*
Gigartinales				
Solieriaceae				
Eucheuma isiforme (C.Agardh) J. Agardh 1847		*		
Gracilariales				
Gracilariaceae				
Hrydopuntia sp	*	*	*	*
Phaeophyta				
Dictyotales				
Dictyotaceae				
Dictyopteris sp	*			*
Dictyota caribaea Hörnig y Schnetter en Hörnig *et al.* 1992 1992		*	*	*
D. cervicornis Kützing 1859	*	*		

D. ciliolata Sonder ex Kützing 1859		*		*
D. crispate J. V. Lamouroux 1809		*	*	*
D. crenulata J. Agardh 1847	*	*		*
D. pulchella Hörnig y Schnetter 1988	*	*	*	*
D. pinnatifida Kützing 1859	*	*	*	*
D. dicotoma (Hudson) J. V. Lamouroux 1809	*	*	*	
D. sp 1	*	*		
D. sp 2		*		
D. sp 3	*	*		
Lobophora variegata (J. V. Lamouroux) E.C.Oliveira 1977		*	*	*
Padina sp		*	*	
Stypopodium zonale (J. V. Lamouroux) Papenfuss 1940	*	*	*	*
Fucales				
Sargassaceae				
Turbinaria turbinata Linnaeus) Kuntze 1898		*		
Sargassum hystrix J. Agardh 1847	*	*		*
S. polyceratium Montagne 1837		*		
Chlorophyta				
Bryopsidales				
Udoteaceae				
Udotea fibrosa D. S. Littler y Littler, 1990	*		*	*
U. conglutinata (J. Ellis y Solander) J.V.Lamouroux 1816	*			
U. cyathiformis Decaisne 1842	*	*	*	*
U. dixonii D.S. Littler y Littler 1990	*			
U. abbottiorum D. S. Littler y Littler 1990		*	*	*
U. flabellum (J. Ellis y Solander) M.Howe 1904	*	*	*	*
U. dotyi D. S. Littler y Littler 1990		*	*	
U. wilsoni A. Ge, E.S.Ge y M. Howe 1911	*			
Penicillus capitatus Lamarck 1813	*	*	*	*
P. dumetosus (J. V. Lamouroux) Blainville 1830	*	*	*	*
P. pyriformis A.Ge y E.S.Ge 1905		*	*	*
Rhipocephalus phoenix (J. Ellis y Solander) Kützing 1843	*	*	*	*
R. oblongus (Decaisne) Kützing 1849		*	*	
Bryopsidales				
Caulerpaceae				
Caulerpa pusilla (Kützing) J. Agardh 1873	*		*	
C. cupressoides (Vahl) C. Agardh 1817		*	*	
C. racemosa (Forsskål) J. Agardh 1873	*	*	*	*
C. prolifera (Forsskål) J. V. Lamouroux 1809		*		
C. cupressoides var. turneri weber-van bosse, 1898	*	*		
Bryopsidales				
Dichotomosiphonaceae				
Avrainvillea asarifolia Børgesen 1909	*		*	
A. elliotii A.Ge y E.S.Ge 1911		*		
A. longicaulis (Kützing) G.Murray y Boodle 1889		*	*	

A. silvana D.S.Littler y Littler 1992**	*	*		*
Cladophorales				
Siphonocladaceae				
Dictyosphaeria ocellata (M.Howe) Olsen-Stojkovich 1985	*		*	
D. cavernosa (Forsskål) Børgesen 1932	*	*	*	
Valoniaceae				
Ventricaria ventricosa (J.Agardh) J.L.Olsen y J.A.West 1988		*		*
Valonia macrophysa Kützing 1843		*		
Ulvales				
Ulvaceae				
Ulva sp	*	*	*	*
Bryopsidales				
Bryopsidaceae				
Bryopsis pennata J.V.Lamouroux 1809	*		*	
B. plumosa (Hudson) C.Agardh 1823	*	*		
B. ramulosa Montagne 1842			*	*
Codiaceae				
Codium repens P.Crouan y H.Crouan in Vickers 1905	*	*	*	*
C. taylorii P.C.Silva 1960		*		*
Halimedaceae				
Halimeda cupiosa Goreau y E.A.Graham 1967	*		*	*
H. cryptyca var. acerifolia D.L.Ballantine 1982	*		*	
H. incrassata (J.Ellis) J.V.Lamouroux 1816	*	*	*	
H. opuntia (Linnaeus) J.V.Lamouroux 1816	*	*	*	*
H. scabra M.Howe 1905	*			*
H. tuna (J.Ellis y Solander) J.V.Lamouroux 1816		*	*	
H. simulans M.Howe 1907	*			
H. gracilis Harvey ex J.Agardh 1887				*
Dasycladales				
Polyphysaceae				
Acetabularia crenulata J.V.Lamouroux 1816**		*	*	
Totales	**56**	**73**	**58**	**45**

En los sitios de Puerto Morelos (PNAPM) se observó que el mayor número de especie pertenece al grupo de las Rhodophyta (macroalgas rojas) con 45 especies distribuidas en 13 familias. De la División Chlorophyta se registraron 41 especies distribuidas en 10 familias. Finalmente, las Phaeophyta (algas pardas) estuvieron representadas por 18 especies pertenecientes a 2 familias (Cuadro 5).

Cuadro 5. Número total de familias, géneros y especies de macroalgas registradas en los sitios de muestreos de los arrecifes de Puerto Morelos e Isla Contoy.

Sitios	**Puerto Morelos**									**Isla Contoy**		
	Familias			**Géneros**			**Especies**			**Familias**	**Géneros**	**Especies**
División	**LM**	**BN**	**JR**	**LM**	**BN**	**JR**	**LM**	**BN**	**JR**	**IX**	**IX**	**IX**

Chlorophyta	6	9	8	9	13	11	22	27	24	7	5	18
Rhodophyta	10	13	8	10	15	10	20	17	8	9	10	17
Phaeophyta	2	2	1	3	6	4	13	30	22	2	11	10

2.4.2. Riqueza de especies en los tres sitios de Puerto Morelos

En el sitio denominado Limones presentó la mayor diversidad de la división de Chlrophytas (algas verdes) con 22 especies distribuidas en 6 familias. Las familias Ulvaceae, Bryopsidaceae, Polyphysaceae y Codiaceae no se detectaron en la zona. *Udotea wilsoni, U. dixonii, U. conglutinata, U. abbottiorum y Halimeda simulans* sólo se encontraron en este sitio. De la División Rhodophyta se registraron 20 especies distribuidas en 10 familias. Las familias Lomentariaceae, Bonnemaisoniaceae, Solieriaceae no se encontraron en el sitio. *Liagora norrisiae, Liagora ceranoides y Liagora sp* sólo estuvieron presentes en Limones. Para el grupo de las algas cafés (Phaeophyta) se determinaron 13 especies de las 2 familias encontradas en la zona.

En el sitio Bonanza, el sitio más somero de los estudiados, la mayor abundancia de especies le perteneció a la División Rhodophyta con 30 especies distribuidas en 13 familias, de las cuales sólo Liagoraceae no se encontró en el sitio. No obstante, *Amphiroa sp, Hypnea mussiformis, Hypnea sp, Halymenia sp, Ceratodictyon scoparium, Ceramium flaccidum, Acanthophora muscoides, Acanthophora spicifera, Euchema isiformis* y *Cryptonemia sp* sólo se encontraron aquí, lo que hace de Bonanza el más diverso de los cuatro sitios estudiados. Dentro de la División Chlorophyta se determinaron 27 especies de 9 familias siendo la familia Polyphysaceae la única que no se encontró en este sitio. Las especies *Caulerpa prolifera y Avrainvillea longicaulis* solo estuvieron presentes en este sitio. En el caso de la División Phaeophyta se identificaron 17 especies de las únicas 2 familias registradas. *Turbinaria turbinata*, *Sargassum polyceratium* solo se encontraron en Bonanza.

En el sitio denominado Jardines la División Chlorophyta fue la que presentó la mayor abundancia con 24 especies de 8 familias con excepción de Ulvaceae y Codiaceae que no se encontraron. En la División Rhodophyta se encontraron 22 especies de 8 familias, sin la presencia de las familias Liagoraceae, Cystocloniaceae, Wrangeliaceae, Bonnemaisoniaceae y Solieriaceae. En cuanto a especies, *Laurencia* sp*, Laurencia optusa, Laurencia filiformis*, *Anthamnion* sp y *Jania* sp sólo se encontraron presentes en

este sitio; y para la División Phaeophyta se identificaron 8 especies de la familia Dictyotaceae. Los porcentajes totales de las especies encontradas en Puerto Morelos se describen en la (Figura. 4).

2.4.3. Riqueza de especies en Ixlaché, Isla Contoy.

En el arrecife de Ixlaché se registraron 45 espacies distribuidas en 18 familias, de la cuales la División Chlorophyta fue el más dominante con 18 especies distribuidas en 7 familias, seguido de las Rhodophyta con 17 especies en 9 familias y Phaeophyta con 10 especies de 2 familias. Es necesario resaltar que todas las especies identificadas en Isla Contoy se encontraron presentes en los arrecifes de Puerto Morelos. El porcentaje de familias, géneros y especies de cada División se describe en la figura 5.

Las especies compartidas en los cuatro sitios fueron *Udotea cyathiformis, Udotea flabellum, Penicillus capitatus, P. dumetosus, Rhipocephalus phoenix, Caulerpa racemosa* y *Halimeda opuntia* de la División Chlorophyta; *Amphiroa tribulus, Amphiroa rigida, Gelidilla acerosa y Hydropuntia* sp de la División Rhodophyta, y *Dictyota pulchella, Dictyota pinnafitida y Stypopodium zonale* de la División Phaeophyta.

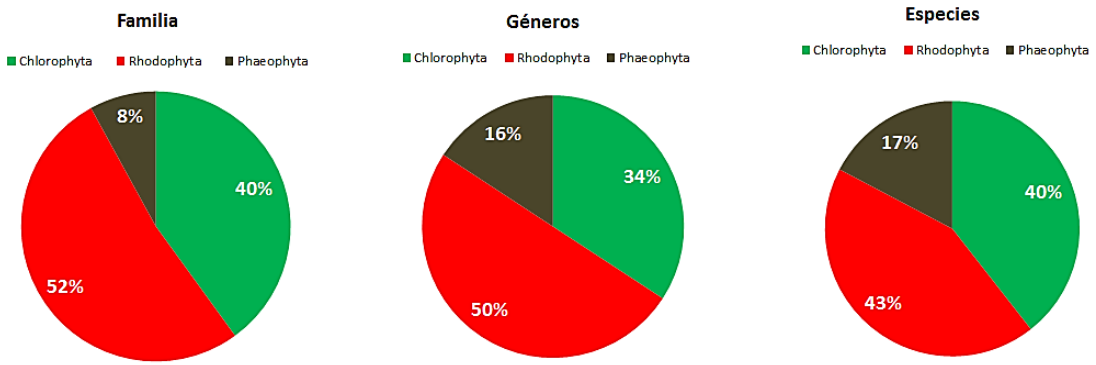


Figura 4. Porcentajes de especies de cada División registradas en el Parque Nacional de Arrecifes de Puerto Morelos, agrupadas en familias, géneros y especies.

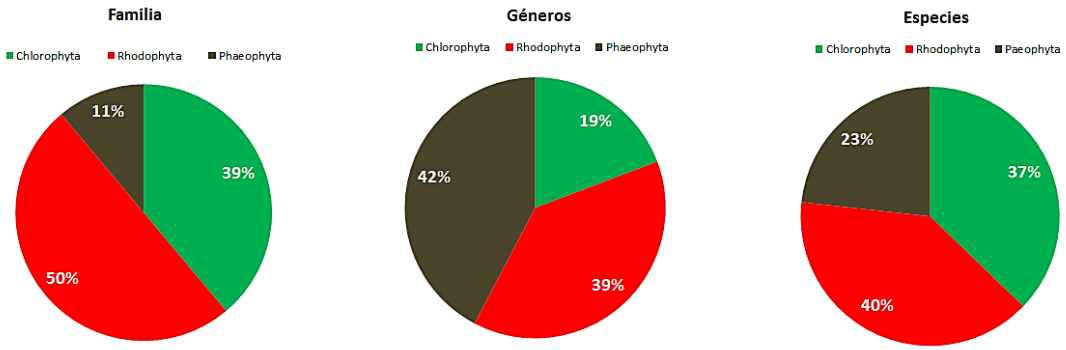


Figura 5. Porcentajes de especies de cada División encontradas en los arrecifes del Parque Nacional de Isla Contoy, agrupadas en familias, géneros y especies.

En Puerto Morelos, en el sitio de Bonanza fue el que presento la mayor riqueza con 74 especies, seguido del sitio Limones con 57 y Jardines con 53 especies. En los arrecifes de Ixlaché (PNIC) se registraron un total de 45 especies. Debido a la dificultad de identificación algunas especies de macroalgas solo se pudieron determinar a nivel género.

2.4.4. Descripción de algunas de las especies presentes en la zona

2.4.5. Familia Udoteaceae

2.4.5.1. Udotea abbottiorum

Macroalga verde – amarillenta en los bordes superiores, aproximadamente de 9 a 12 cm de alto, talo aplanado aproximadamente de 1.5 mm de espesor, moderadamente calcificado, a menudo desgarrado con sifones visibles entrerramados, estípite cilíndrico de 1 a 2 cm de largo y 2 mm de diámetro. Sifones subparalelos laminares y apéndices terminales aproximadamente de 80 a 100 μm diámetro (Figura. 6).

2.4.5.2. Udotea conglutinata

Macroalga verde en forma de abanico calcificado según la literatura su altura varía de 13 a 15 cm siendo más largo que ancho, sin embargo las muestras analizadas presentaron característica de igual ancho que de largo, su grosor va de 1 a 2 mm presentado crecimiento dicotómicos, su estípite cilíndrico va de 1 a 1.5 cm de alto sifones carentes de apéndices laterales, terminaciones dicotómicas, ápices superficiales repetidamente divididos y retorcidos. (Figura 7).

2.4.6. Familia Anadyomenaceae

2.4.6.1. Anadyomene cf stellata

Macroalga de talos laminares empalmados de 2 a 3 cm según el material analizado. Presenta estrías muy bien marcadas redondeadas y carnosas que con ayuda de una lupa se pueden apreciar sus enramados similares a nervaduras primarias y secundarias que poseen las plantas vasculares. Presenta células en forma de bacilos completamente paralela, semidesordenadas. Las células ubicadas a la mitad de la hoja miden de 0.6 a

3.0 mm de largo y de 0.25 a 0.38 mm de ancho. Los rizoides se encuentran vagamente enredados entrelazados para formar varios estípites (Figura 8).

2.4.7. Familia Solieriaceae

2.4.7.1. Eucheuma isiforme

Macroalga con talo robusto con ramificaciones generalmente escasas e irregulares, carnoso y firme, de 16 a 70 cm de alto, presenta un color amarillo pálido a rojo marrón. Ramas cilíndricas de 2 a 8 mm de diámetro con estructura dispersa o verticilada. Células medulares ovaladas de 12 a 60 µm de diámetro con pared delgada, incoloras. Células corticales ovaladas con 5 a 7 µm de diámetro y pigmentación oscura. Cutícula con 20 µm de espesor, incolora. Disco adhesivo delgado y carnoso. Presencia de ramas y/o espinas. Centro del talo hueco, con crecimiento en formas de pico hueco (Figura. 9).

2.4.8. Familia Ceramioideae

2.4.8.1. Ceramium cruciatum

Talo filamentoso cilíndrico como pequeños penachos densos, de 1,5 cm de alto de color rojizo tornado a rosa con presencia de la luz a veces trasparente; ramificación (desigualmente dicotómica); terminaciones curvas en pinza. Tetrasporangios localizados en los laterales de los talos. Esta especie fue encontrada como epifita de otras macroalgas (Figura. 10).

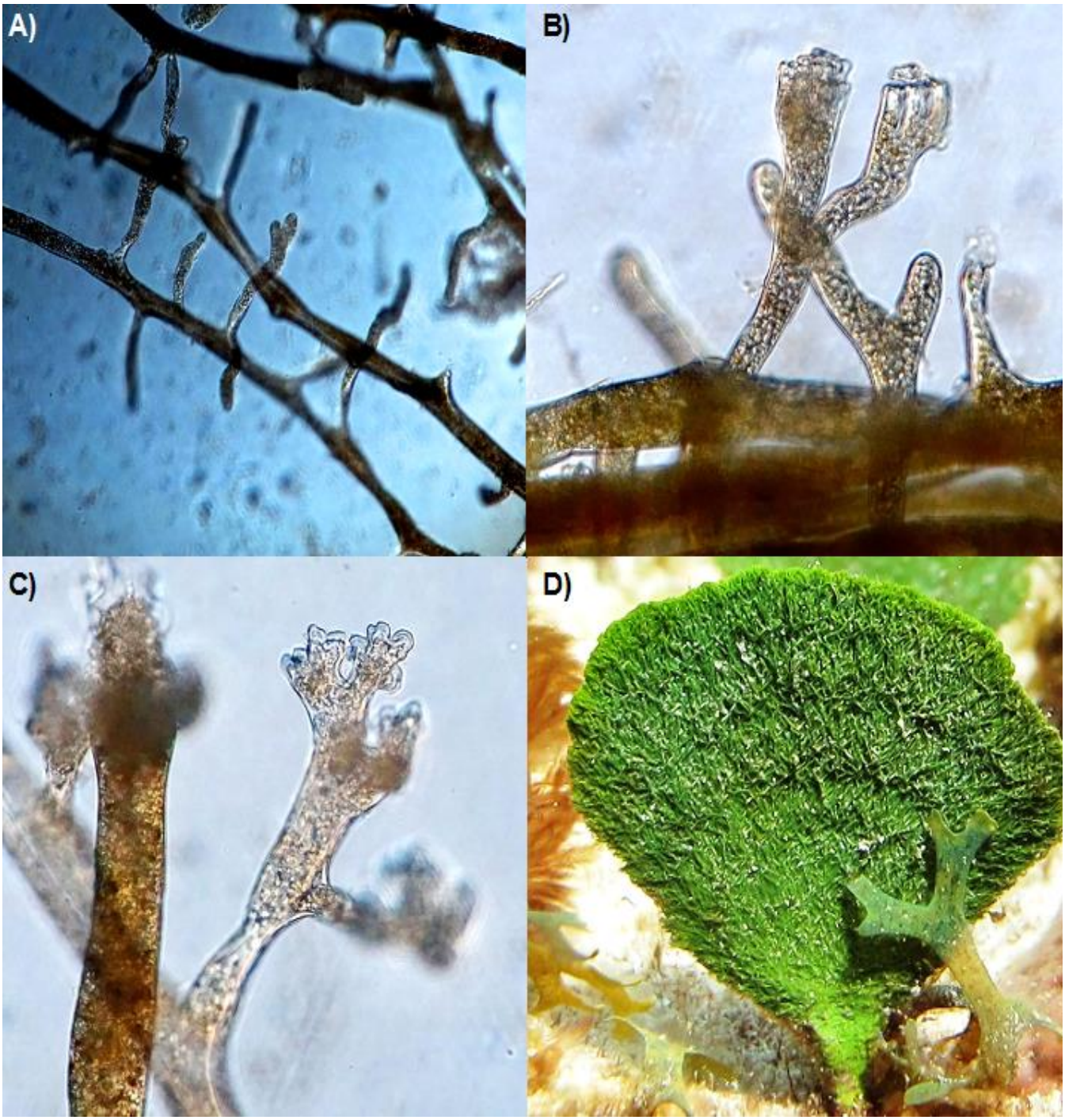


Figura 6. *Udotea abbottiorum* especie colectada en los arrecifes de Puerto Morelos. A) Sifón con apéndices laterales, B) Sifones entrelazados C) Forma de sifón, D) espécimen fotografiado en campo.

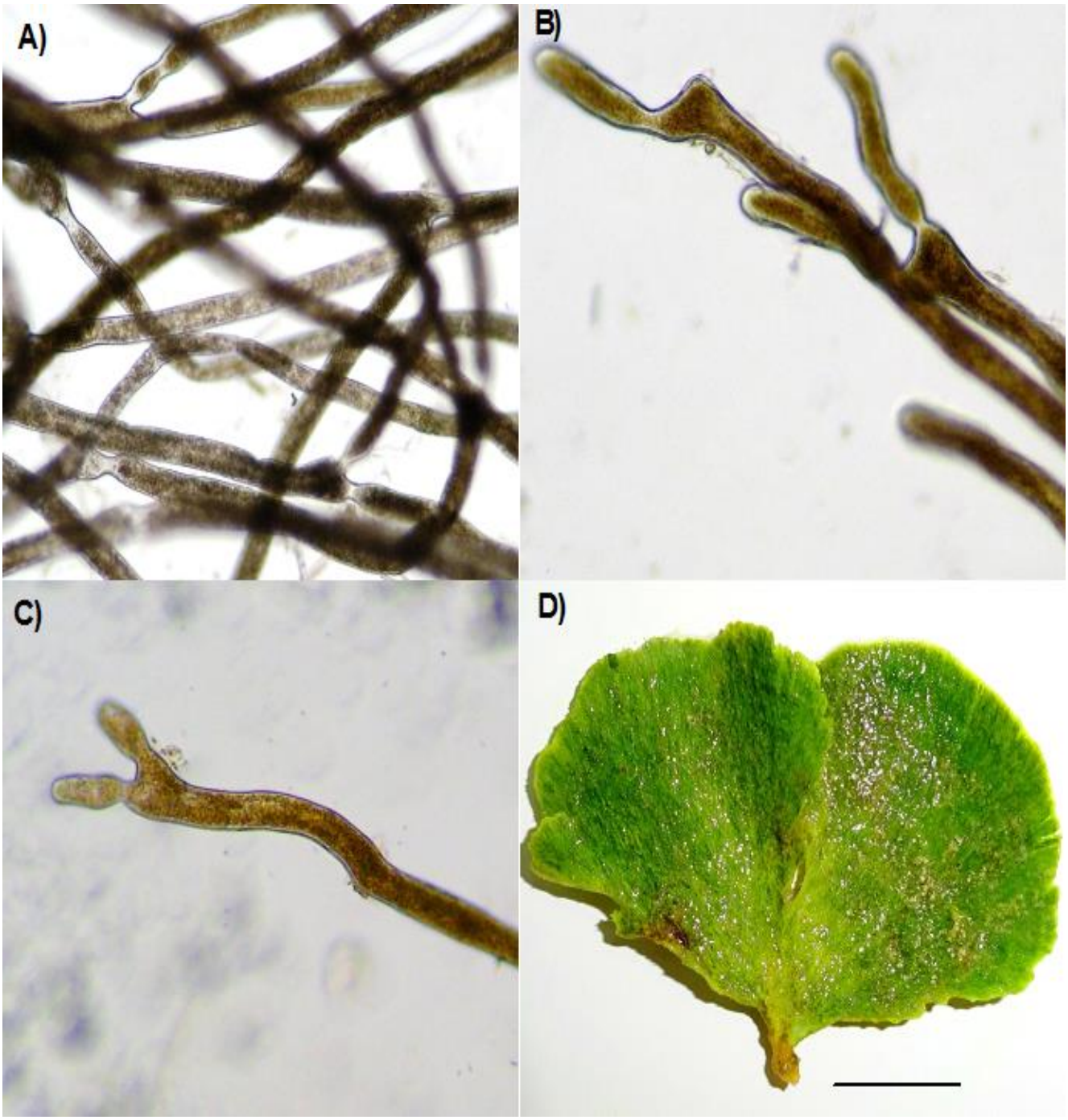


Figura 7. Udotea conglutinata. A) Sifones entrelazados, B) forma de los sifones (Crecimiento dicotómico ligeramente separados) y D) Espécimen colectado en estadio de crecimiento, talo dividido. Barra= 1cm.

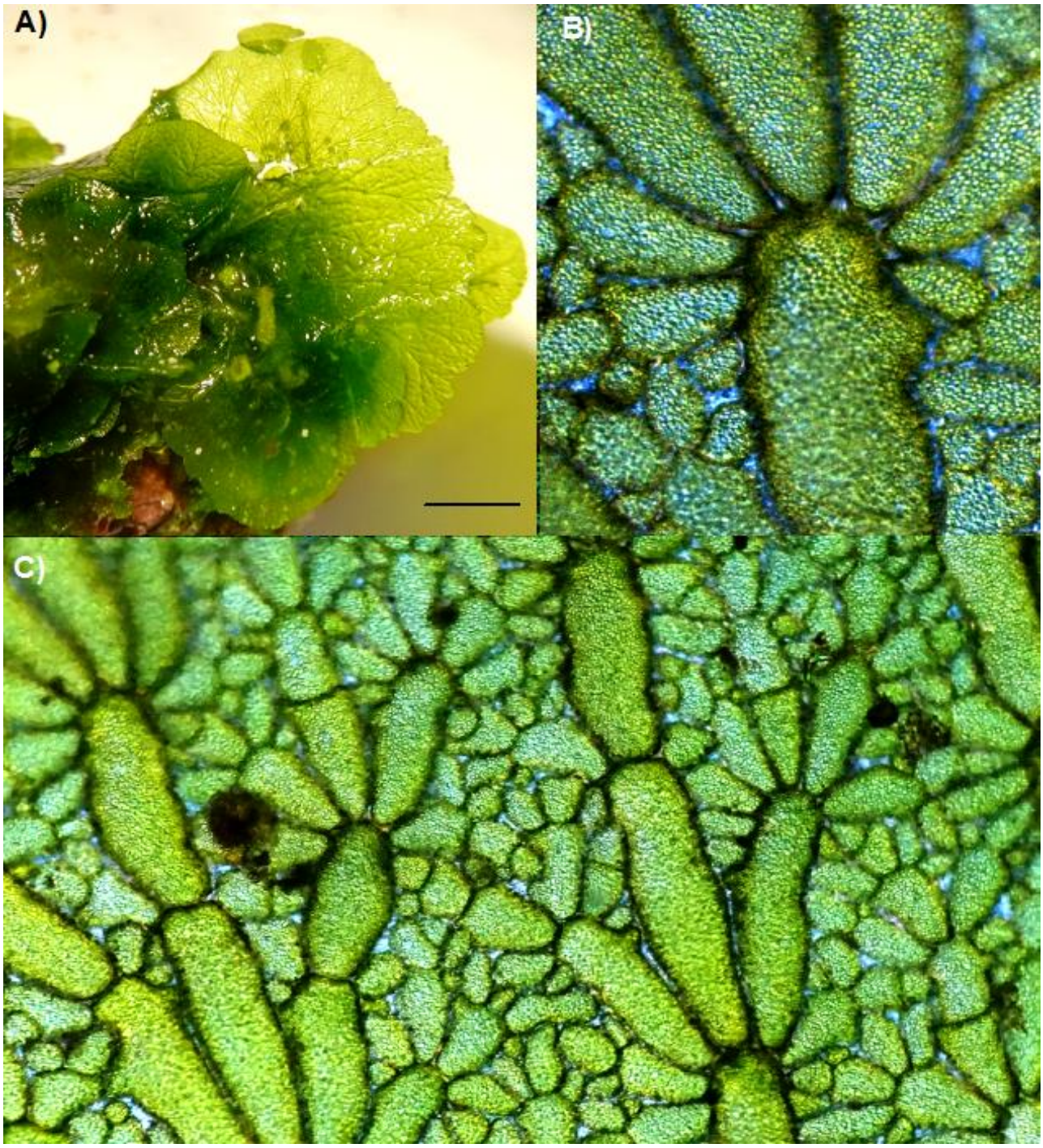


Figura 8. *Anadyomene cf. stellata.* A) Ilustración de la muestra bajo una lupa donde se ve una forma de redes, B y C) células en forma de bacilos con diferentes tamaños paralelas. Barra 1cm.

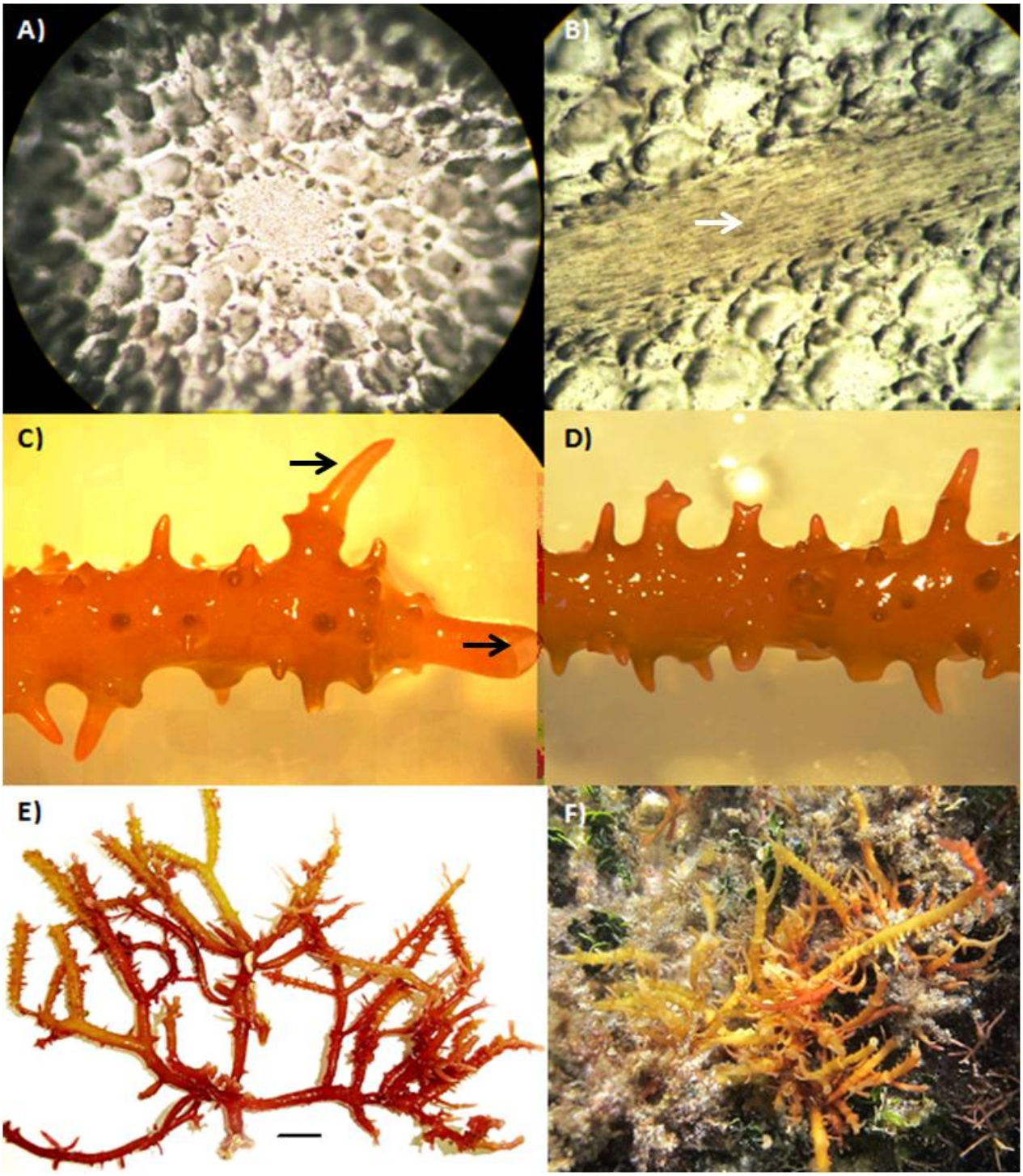


Figura 9. *Eucheuma isiforme* A) corte transversal donde se notan grandes células medulares de paredes delgadas. B) Corte longitudinal sección hueca del talo C) crecimiento en forma de pico con la punta redondea y hueca, D) crecimiento de espinas y/o ramas, E) formas de la muestra y F) foto campo. Barra= 3 cm

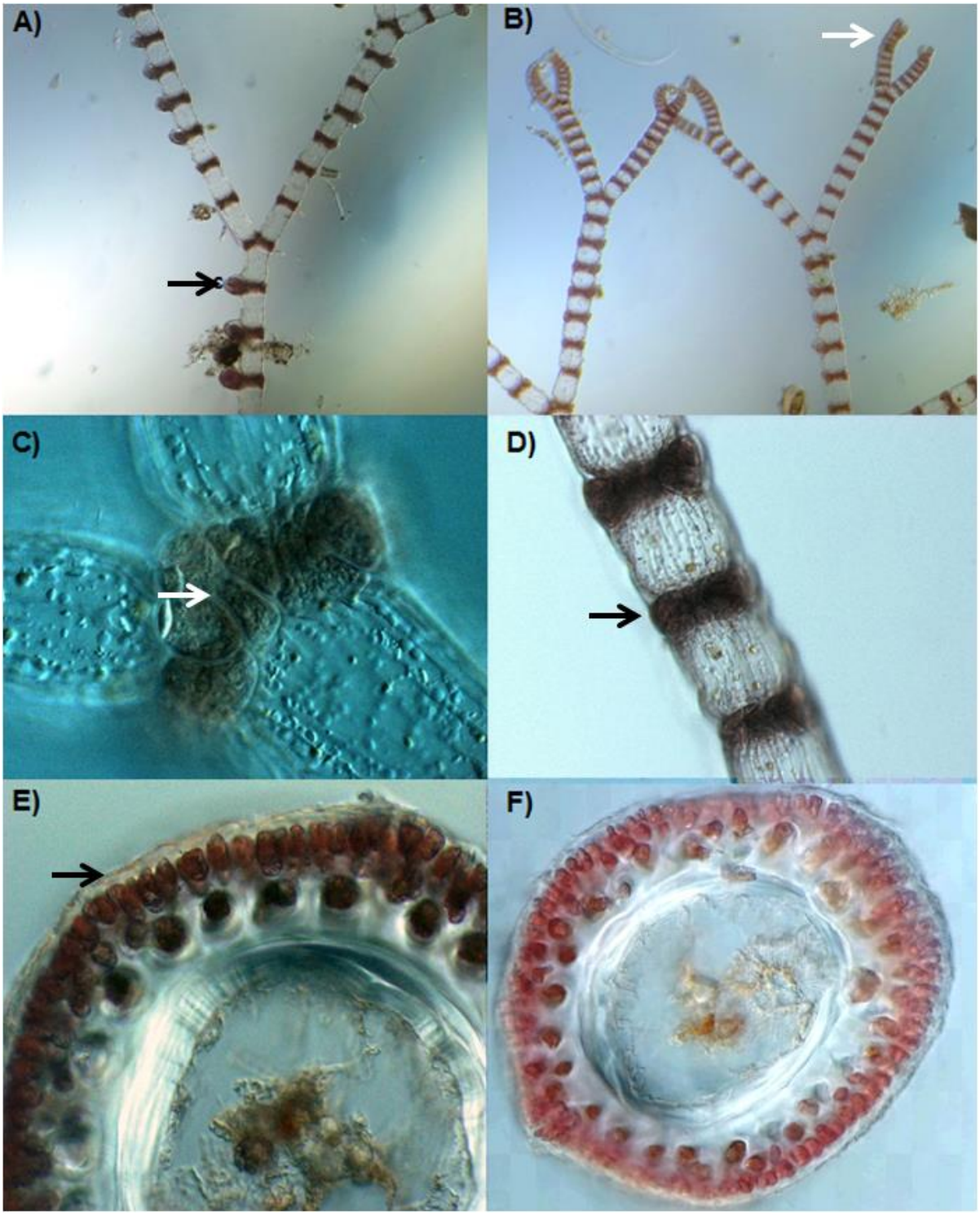


Figura 10. Ceramium cruciatum A y B) Rama del talo crecimiento dicotómicos y crecimientos apicales arqueados en forma de ganchos. C y D) Uniones de los vértices E y F) corte transversal del talo, hueco.

2.4.9. Grupo funcionales

En el cuadro 6 se clasifican los géneros más representativos en cuatro grupos funcionales siguiendo los criterios de Littler y Littler (1980) y Short *et al.* (2006). Los grupos de esta clasificación fueron carnosas, carnosas no arraigadas, calcáreas y coralinas.

Cuadro 6. Clasificación de algunos géneros de macroalgas utilizados para los grupos funcionales.

División	Calcáreas	Coralinas	Carnosas no arraigadas	Carnosas arraigadas
Rhodophyta		*Amphiroa* *Jania* *Galaxaura* *Titanoderma* *Dichotomaria*	*Ceramium* *Laurencia* *Hypnea* *Wrangelia* *Acanthophora* *Liagora* *Eucheuma* *Bryothamnion*	*Asparagopsis* *Polysiphonia*
Chlorophyta	*Halimeda* *Udotea* *Penicillus* *Rhipocephalus*		*Dictyosphaeria* *Ventricaria* *Codium* *Bryopsis* *Ulva*	*Avrainvillea* *Caulerpa* *Acetabularia*
Phaeophyta			*Dictyota* *Lobophora* *Stypopodium* *Dictyopteris*	

Limones y Jardines presentaron el mayor número de especies de algas calcáreas con 15 principalmente *Amphiroa rgida*, *A. brasiliana*, *Amphiroa tribulus*, *Hrydrolython* s entre otras, seguido de Bonanza e Ixlaché con 12 especies *A. tribulus*, *A. fragilissima*. *A. hancockii, Hydrolithon*.

En cuando a las carnosas arraigadas, el sitio que presentó mayor número de especies fue Bonanza con 12 de las cuales Cualerpa prolifera, C. racemosa, *Avrainviellea* sp etc, seguido de Jardines con 10, Limones 8 y finalmente Ixlaché con 6 especies, *Asparagopsis*, *Avrainvillea* etc. La macroalgas carnosas no arraigadas fueron el grupo funcional más diverso en los 4 sitios arrecifales. Bonanza presentó el mayor número con 40 especies de las cuales *Acanthopora spicifera*, *Turbinaria turbinata*, *Saragssum* sp, *Dictyota* s, *Palisadasp*, *Laurencia* entre otras fueron representativas de este sitio, seguidos de Jardines con 22 *Laurencia* sp, *Dictyota* sp *Stypopodium zonolae*, Limones 20 especies e Ixlaché con 20 especies Figura 11.

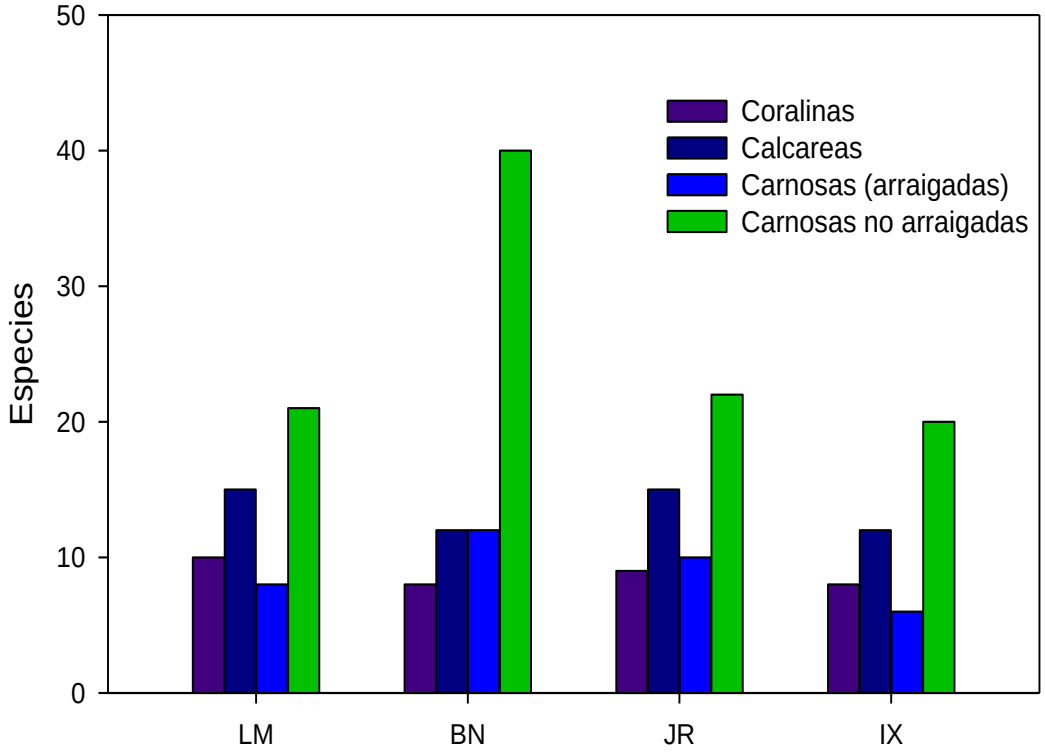


Figura 11. Clasificación de las macroalgas por grupo funcional tomado y modificado de Littler y Littler (1980) y Short *et al.,* (2006). LM: limones, BN: Bonanza, JR: Jardines y IX: Ixlaché

Los tres sitios que sobresalen por la diversidad de algas coralinas limones, Jardines y carnosas Bonanza respectivamente.

2.4.10. Curva de acumulación de especies

En los gráficos de las curvas de acumulación de especies se observa una tendencia de estabilidad en la parte alta de la curva que sugiere que en la mayoría de los muestreos el número de cuadrantes fue adecuado para alcanzar la diversidad del sitio. Esto se puede

ver también en los valores asintóticos (estimados) que reflejan una alta semejanza entre el número máximo estimado de especies con el número máximo de especies registradas en cada sitio. Cabe aclarar que las especies registradas en los transectos/cuadrantes fueron utilizadas para la elaboración de la curva de acumulación (véase el método en el capítulo 3) y las especies descritas en la cuadro 4 se tomaron tanto dentro como fuera del transecto con el fin de capturar la diversidad del sitio.

En Limones el promedio del número máximo de especies de los 9 muestreos (realizados Mayo –Diciembre) fue de 22±1.3. Las máximas diferencias entre riqueza observada y riqueza calculada se observaron el 18 de septiembre (Riqueza Observada 27: Riqueza calculada 35) y el 7 de diciembre (19:27) seguido de 7 de mayo (20:25), 6 de agosto (19:24), mientras que la mínima diferencia se detectó en 11 de noviembre (22:23, Figura. 12). En Bonanza, el valor promedio del número máximo de especies observadas fue de 34±1.1. Este sitio presentó un número elevado de especies de las tres Divisiones. Los muestreos realizados el 18 de Junio, 06 de Agosto, 2 se septiembre y 18 de septiembre presentaron relaciones 38:49, 33:40, 31:40 y 37:46, respectivamente, y fueron las diferencias máximas entre los valores observados y los calculados, mientras que los valores más bajos se encontraron en 7 de Mayo (32:35), 28 de mayo (35:39) y 7 Diciembre (39:43, Figura. 13). En Jardines se realizaron 10 muestreos (de Abril – Diciembre) y el promedio del número máximo de especies fue de 23±1.2. Las mayores diferencias en la relación entre el número máximo observado y el calculado de especies se detectó durante el 28 de Mayo (28:34), 08 de julio (31:36), 18 de Septiembre (28:34) y 11 de Noviembre (22:27). En estos últimos meses hubo una contribución importante de especies de los géneros *Laurencia*, *Ceramium, Bryopsis, Anadyomene* y *Gelidium*. La mínima diferencia se detectó el 7 de Diciembre (20:21) figura 14. En Ixlaché también se realizaron 10 muestreos (Abril –Diciembre) el número de especies acumuladas promedio fue de 23±1.3. De los 10 muestreos realizados, las máximas diferencias entre valores observados y calculados se encontraron el 10 de Agosto (23:29) y 17 de septiembre (27:34). Por otra parte, el 16 de abril (21:23), 8 de Mayo (17:19) y 9 de Julio (21:23) presentaron los valores más bajos de los meses muestreados (Figura.15).

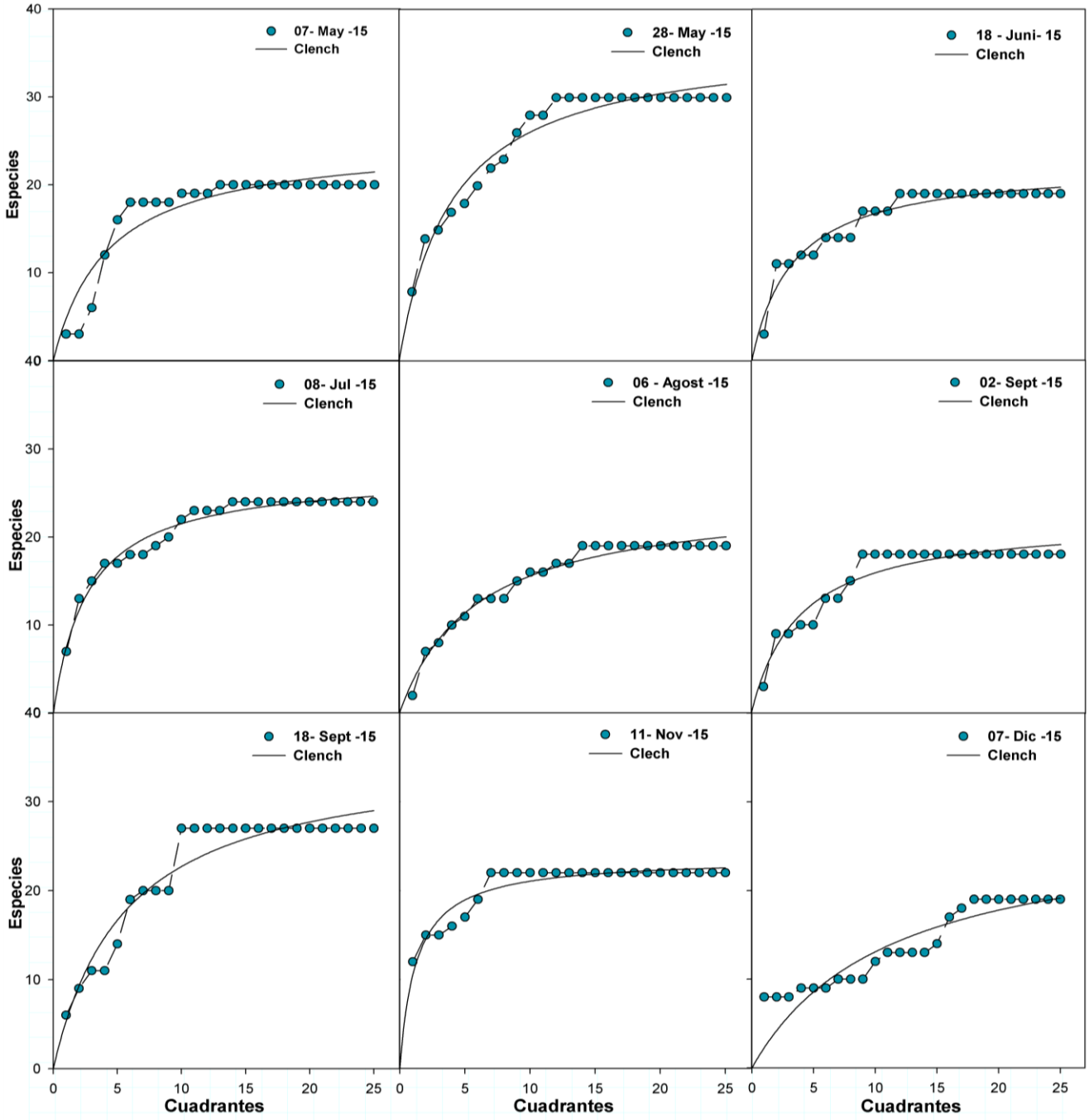


Figura 12. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Limones. Muestreo Mayo - Diciembre del 2015.

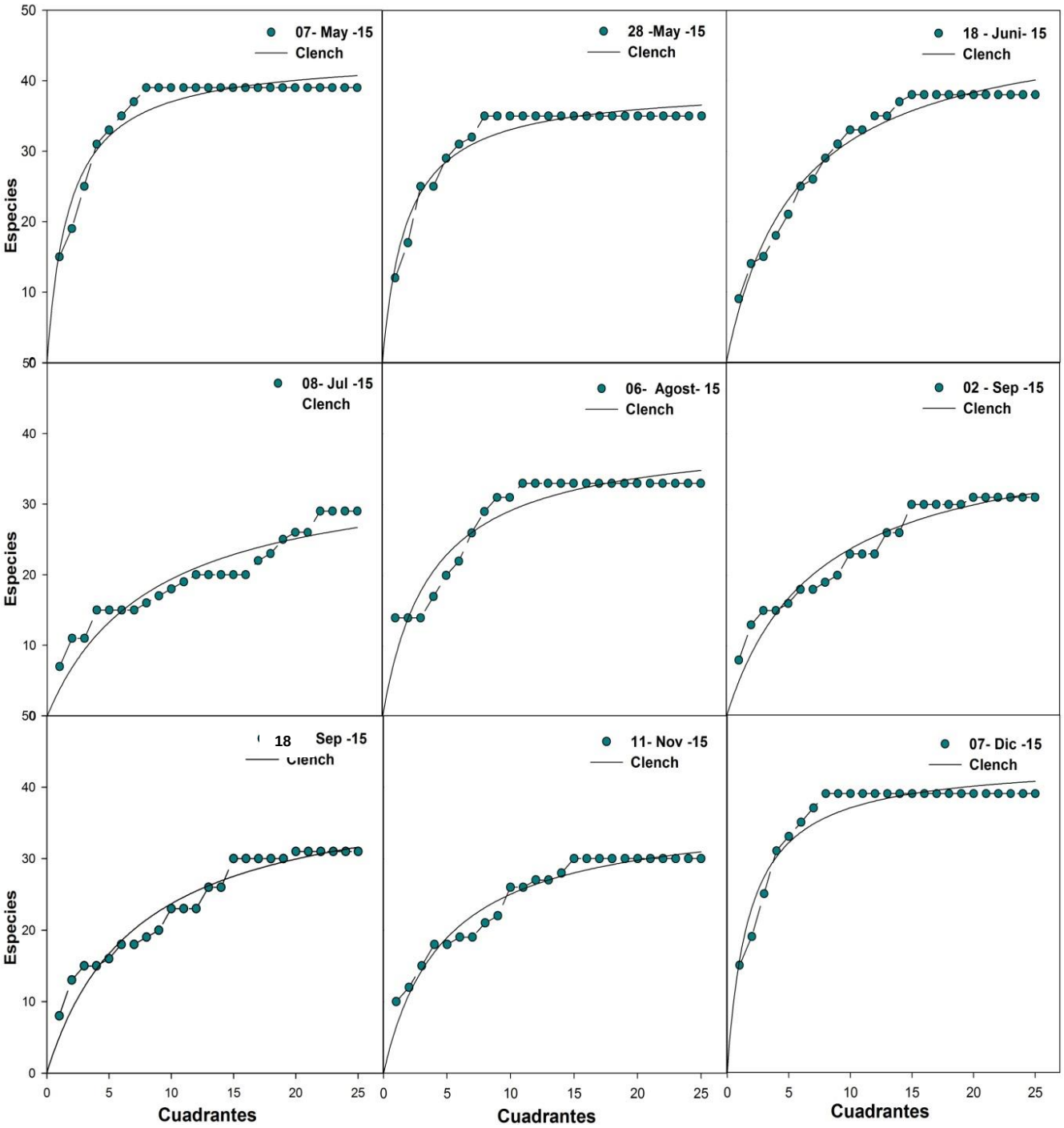


Figura 13. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Bonanza. Muestreo Mayo - Diciembre del 2015.

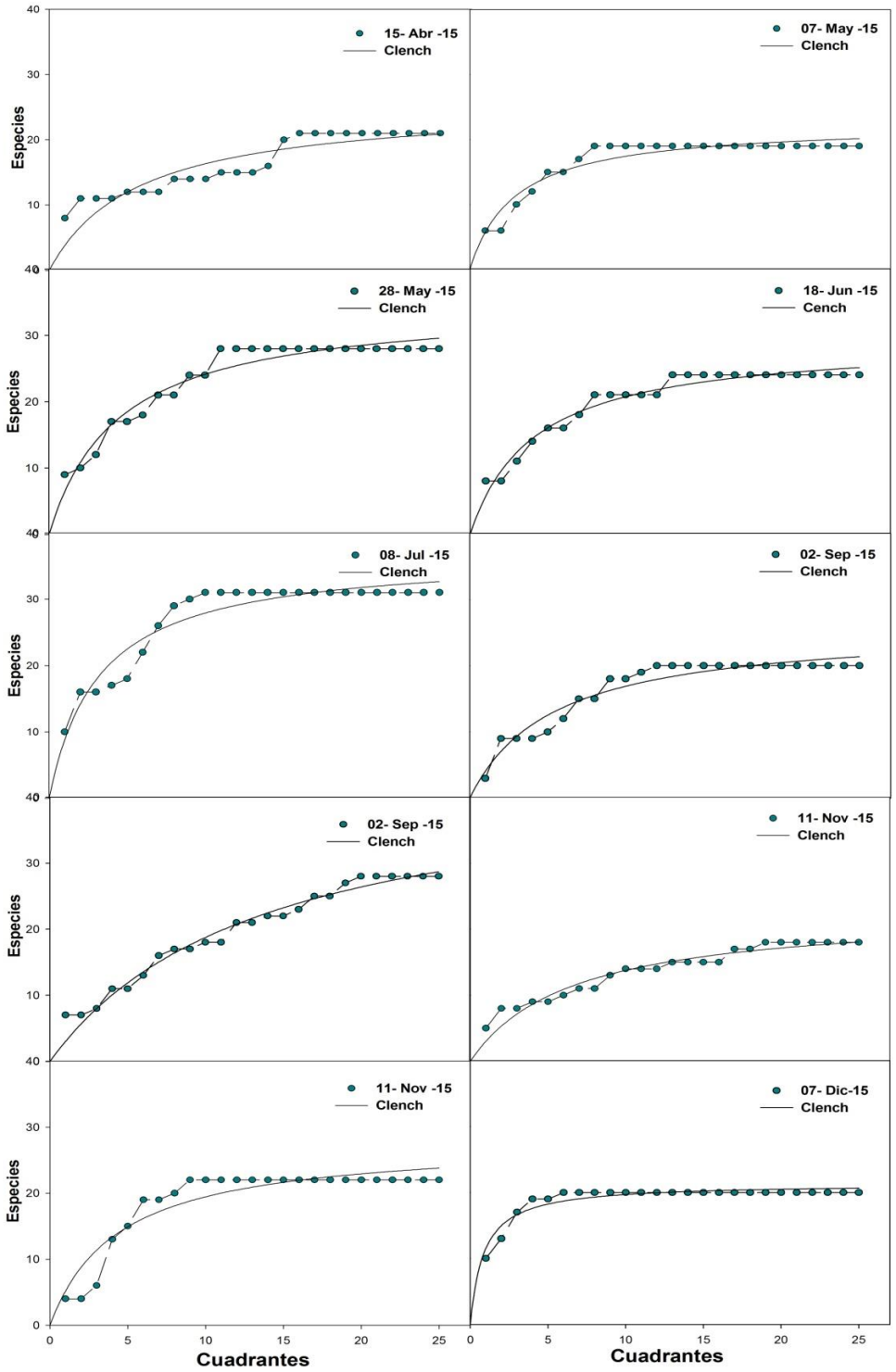


Figura 14. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Jardines. Muestreo Abril - Diciembre del 2015.

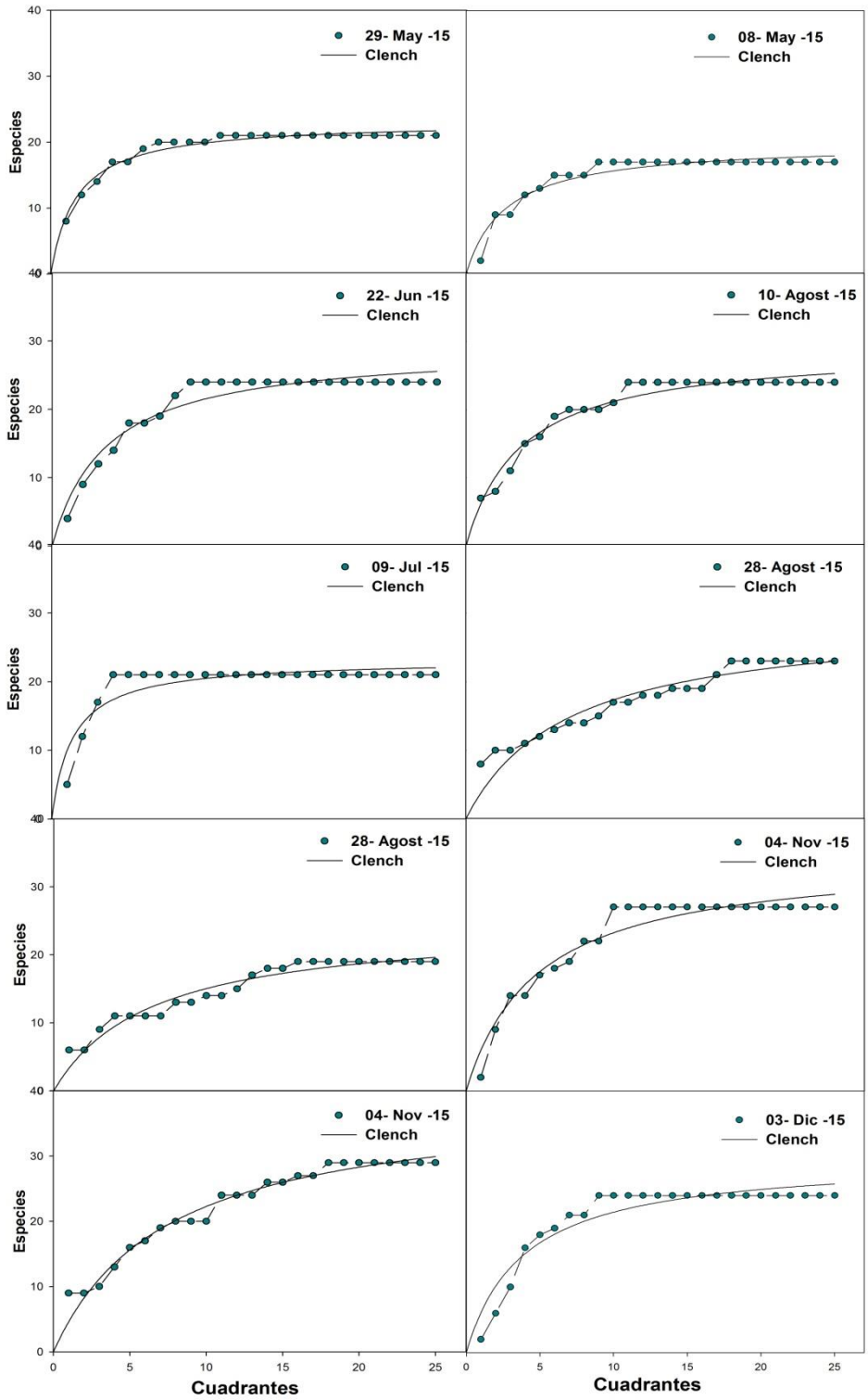


Figura 15. Curva de acumulación de especies. Línea contínua proyección ajustada al modelo de Clench. Linea especies observadas en campo en el sitio Ixlaché. Muestreo Abril - Diciembre del 2015.

Para analizar las diferencias entre los valores observados del número máximo de especies respecto a los valores estimados, se utilizó el modelo de regresión lineal. Este modelo se ajustó en 3 de los 4 sitios. El coeficiente de determinación (r^2) fue de 0.81 p=0.0014 para Limones, 0.93 $p < 0.001$ para Jardines, y 0.89 p= 0.0015 para Ixlaché. Por otro lado, el valor de en Bonanza fue bajo (0.36, p = 0.08) para 5 transectos n= 25 cuadrantes. Figura 16.

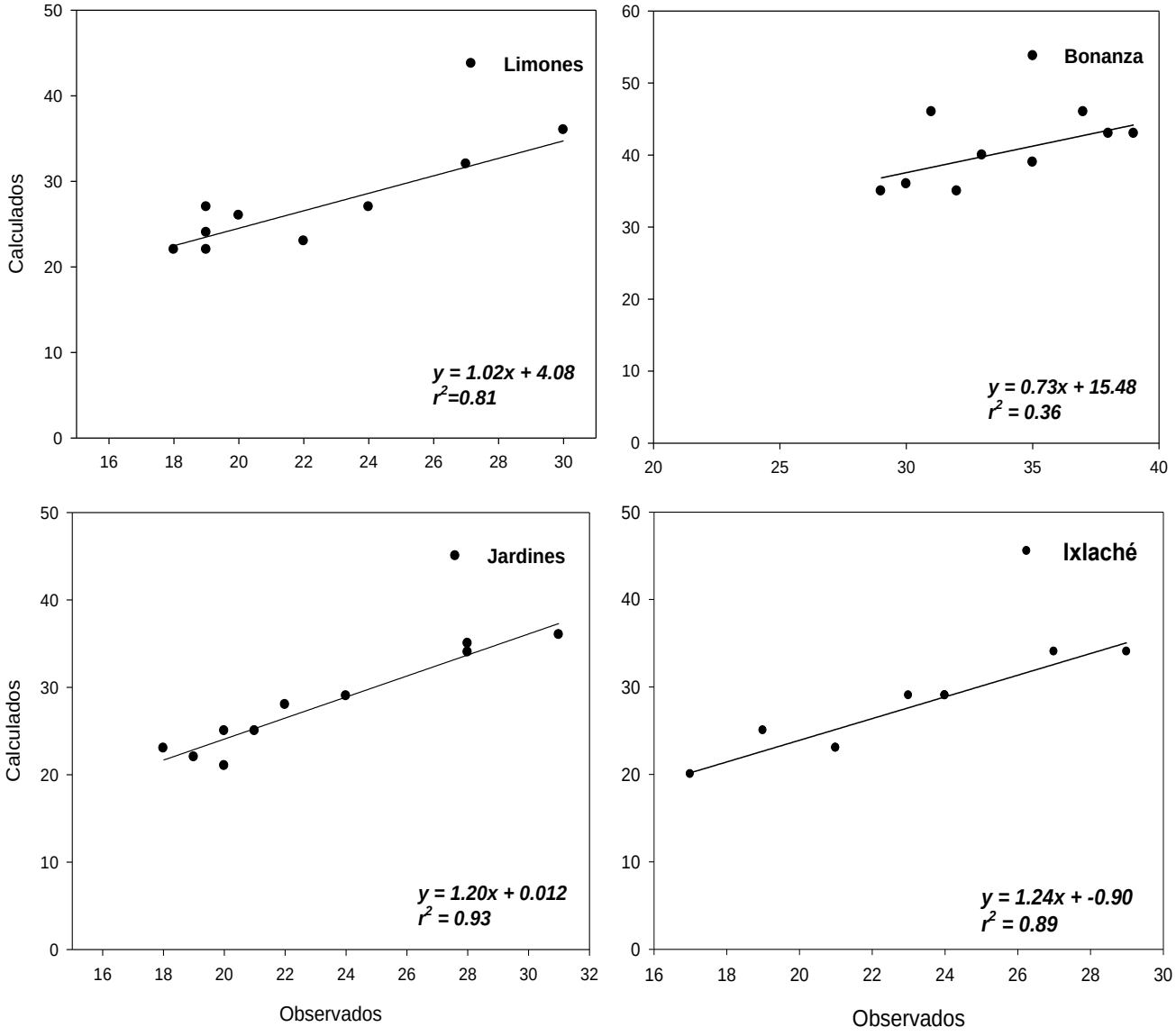


Figura 16. Modelo de regresion lineal entre losvalores de riqueza observados en campo y valores valculado y ajuistados al modelo de Clench.

2.2. DISCUSIÓN

En Puerto Morelos e Isla Contoy el número total de especies fue de 104 (Cuadro 5), de las cuales la División más diversa para Puerto Morelos (PNAPM) fue Rhodophyta mientras que en Isla Contoy (PANIC) el número de especies de la División Chlorophyta sólo difirió en una con las Rhodophyta. Con excepción de cinco especies, el resto ya había sido reportado anteriormente para la zona de estudio. Los nuevos registros fueron: *Amphiroa hancockii*, *Liagora norrisiae, Ceratodictyon scoparium, Avrainvillea silvana* y *Acetabularia crenulata.* Las observaciones de este trabajo sobre la mayor riqueza de las algas rojas en la parte norte del Caribe Mexicano son consistentes con las documentadas anteriormente por varios autores (Cuadro 7) cabe destacar que se consideraron los estudios cercanos a la zona de muestreo.

Cuadro 7. Número de especies de macroalgas distribuidos según su división taxonómica encontradas en todo el Caribe Mexicano.

Sitio	Sustrato	Tipo/muestra	No de Taxa	Chlorophyta	Phaeophyta	Rhodophyta	Autores
Puerto Morelos	Laguna y Arrecife	Macroalgas bentónicas	213	72	32	109	Dreckman *et al*., 1996
Puerto Morelos	Laguna y Arrecife	Macroalgas bentónicas	106	50	16	40	Collado-Vides *et al*., 1998
Al sur de Puerto Morelos	Sistemas rocosos, Arrecife	Macroalgas bentónicas	223	78	27	118	Rosas *et al*.,1998
Isla mujeres	Arrecife	Macroalgas bentónicas	166	61	29	76	Quan-Yoon *et al*., 2004.
Isla mujeres	Arrecife	Macroalgas epifitas	93	16	19	58	Quan-Yoon *et al*., 2006
Cozumel	Arrecife	Macroalgas bentónicas	385	121	48	216	Mateo-Cid *et al*., 2006
Caribe	Arrecife	Macroalgas bentónicas	546	171	68	307	Cetz-Navarro *et al*., 2008

Se debe señalar que el alto número de especies epífitas presentes contribuyó a incrementar la riqueza de todos los sitios muestreados. Las macroalgas epifitas se

encontraron principalmente asociadas a los géneros *Dictyota* Lamouroux 1809, *Halimeda* J.V. Lamouroux 1812, *Udotea* J.V. Lamouroux 1812, *Amphiroa* Lamouroux 1812, *Jania* Lamouroux 1812 y *Sargassum* C. Agard 1820. Los géneros epífitos fueron *Ceramium*, *Polysiphonia*, *Bryopsis* y *Gelidium*. Al parecer, el presente trabajo es el primer estudio realizado sobre las macroalgas Isla Contoy. Por lo tanto, las especies que se presentan en este trabajo constituyen nuevos registros para esta zona.

Grupos funcionales

Las algas costrosas coralinas son consideradas un grupo clave en los ecosistemas de arrecifes coralinos debido a que juegan un papel fundamental en los arrecifes coralinos (Fabricius y De'Ath, 2001, Harrinton *et al*. (2004), Björk *et al*., 1995; Keats *et al*., 1997) de la cual contribuyen a la calcificación y cementación del arrecife (Barnes y Chalker, 1990) principalmente al asentamiento y metamorfosis de algunos organismos sésiles (Lasker y Kim, 1996; Heyward y Negri, 1999). Sin embargo en este estudio las la presencia de estas especies fue muy poco frecuente.

Las algas articuladas calcáreas es otro de los grupos históricamente dominantes en los arrecifes en condiciones normales (Littler y Littler, 1984). En Puerto Morelos Dreckman *et al.,* (1996) encontraron 15 especies de algas coralinas (Cuadro 7) dentro de las cuales hay 6 de las 15 reportadas en este estudio (*Amphiroa rigida, A. fragilissima, A. tribulus, Jania pumila, J. adhaerens, Hydrolithon* y *Galaxaura rugosa*). En este mismo sentido, Collado–Vides *et. al.,* (1998) reportaron 11 especies de este mismo grupo funcional, de las cuales 9 especies se registraron en este estudio (*Amphiroa rigida, A. fragilissima, A. tribulus, Jania pumila, J. adhaerens, Hydrolithon, Galaxaura rugosa, Dichotomaria marginata y D. obtusata)* aunque no reportaron la presencia de *Amphiroa brasiliana*, *Amphiroa hancockii* ni *Jania rubens,* que si fueron detectadas en este trabajo (Cuadro 8). El número de especies coralinas fue de 15 para Puerto Morelos y 8 para Isla Contoy, hay que resaltar que dos especies de *Amphiroa* y una de *Jania* no fueron identificadas hasta nivel de especies por lo que no se colocaron en el cuadro 8.

Limones y Jardines presentaron el mayor número de especies de algas calcáreas de las cuales *Halimeda cryptyca var. acerifolia* y *Udotea fibrosa* no se reportaron en los estudios descritos en el cuadro 8. Se ha planteado que cuando las condiciones son buenas para el desarrollo óptimo de los arrecifes coralinos este grupo domina sobre las demás algas (Littler y Littler, 1984; Birkeland, 1987; Steneck y Dethier, 1994; Lapointe, 1997, Hughes y Tanner, 2000). Dentro de los géneros *Udotea*, *Rhipocephalus*, *Penicillus* y *Halimeda* se

encuentran todas las especies de este grupo, que está bien representado en los arrecifes del Caribe McClanahan y Muthiga, 1998; Szmant, 2002). Para el caso de Puerto Morelos se identificaron 20 especies y 12 para Isla Contoy.

La macroalgas carnosas no arraigadas fueron el grupo funcional más diverso en los 4 sitios arrecifales. Bonanza presentó el mayor número de especies dominante entre las más representativas la División Rodophyta. Por el contrario, Dreckmann *et al*. (1996); Collado–Vides *et. al.* (1998) y Rosas *et al*. (1998) han registrado estas especies en Puerto Morelos con excepción de las especies *Dictyota crispate*, D. *crenulata* y D. *pulchella* que no se reportaron en estos estudios. Las macroalgas carnosas fueron el grupo más abundante ya que estas especies compiten exitosamente en condiciones de altas concentraciones de nutrientes (Valdivia y Guardia, 2004). Las macroalgas carnosas estuvieron presentes todos los muestreos de forma ubicua aunque las condiciones climáticas disminuían su abundancia. Dentro de este grupo se encuentran los géneros más representativos *Dictyota*, *Sargassum*, *Turbinaria*, *Lobophora* entre otras.

Hay que mencionar que en el sitio Bonanza el género *Ulva* estuvo presente todos los muestreos, cabe destacar que las especies de este género aparecen con relativa frecuencia en ambientes con altos contenido de nutrientes (Rast y Holland, 1988). Por ello, resulta obvio que este sitio esté altamente colonizado por variedades de especies carnosas (ver capítulo 3). Ejemplos de especies e este grupo son *Dictyota*, *Lobophora Caulerpa*, *Stypopodium*, *Bryopsis* etc.

Limones presentó mayor diversidad de macroalgas calcificantes *Halimeda, Amphiroa, Jania, Udotea* y *Galaxaura* que previamente se han identificado como sustratos (Morse *et al.,* 1988, Raimondi y Morse 2000).

Cuadro 8. Comparación de las especies encontradas con otros estudios relazados en Puerto Morelos. Para Isla Contoy se tomaron los estudios cercanos a la zona en este caso Isla Mujeres. El listado de macroalgas en este cuadro se consideraron las más importantes para las zonas de estudio. La "X" presenta las especies encontradas en el estudio

Macroalgas PNAPM y PANIC	**Puerto Morelos**				**Isla Mujeres**
	Dreckman *et al.*, 1996.	**Collado-Vides *et al.*, 1998.**	**Rosas *et al.*, 1998.**	**Piñon, 1998**	**Quan-Yoon *et al.*, 2004**
Rhodophyta					
Amphiroa rigida J.V.Lamouroux 1816	x	x	x	x	x
A. brasiliana Decaisne 1842	-	-	x	-	-
A. fragilissima Linnaeus J. V. Lamouroux 1816	x	x	x	x	x
A. hancockii W.R.Taylor 1942**	-	-	-	-	-
A. tribulus (J.Ellis y Solander) J.V.Lamouroux 1816	x	x	x	x	-
Jania pumila J.V.Lamouroux 1816	x	x	x	x	-
J. adhaerens J.V.Lamouroux 1816	x	x	x	x	x
J. rubens (Linnaeus) J.V.Lamouroux 1816	-	-	-	-	x
Hydrolithon sp	x	x	x	x	x
Galaxaura rugosa (J.Ellis y Solander) J. V. Lamouroux 1816	x	x	x	x	x
Dichotomaria marginata (J.Ellis y Solander) Lamarck 1816	-	x		x	-
D. obtusata (J.Ellis y Solander) Lamarck 1816	-	x	x	x	-
Acanthophora muscoides (Linnaeus) Bory 1828	-	-	-	-	-
A. spicifera (M.Vahl) Børgesen 1910	x	x	x	x	x
Bryothamnion triquetrum (S.G.Gmelin) M.Howe 1915	x	x	x	x	-
Laurencia filiformis (C.Agardh) Montagne 1845	x	x	-	-	-
L. intricata J.V.Lamouroux 1813	x	x	x	-	x
L. obtusa (Hudson) J.V. Lamouroux 1813.	x	x	x	x	x
L. poiteaui (J.V.Lamouroux) M.Howe 1918	x	x	x	x	-
Phaeophyta					
Dictyota cervicornis Kützing 1859	x	x	-	x	x
D. ciliolata Sonder ex Kützing 1859	x	x	x	x	x
D. crispate J.V.Lamouroux 1809	-	-	-	-	-
D. crenulata J.Agardh 1847	-	-	-	-	-
D. pulchella Hörnig y Schnetter 1988	-	-	-	-	-

D. pinnatifida Kützing 1859	-	x	-	-	x
D. dicotoma (Hudson) J.V. Lamouroux 1809	x	x	x	x	-
*Lobophora variegata (*J.V. Lamouroux) E.C.Oliveira 1977	x	x	x	x	x
Padina sp	x	-	-	x	x
Stypopodium zonale (J.V. Lamouroux) Papenfuss 1940	x	x	x	x	x
Turbinaria turbinata Linnaeus) Kuntze 1898	x	x	-	-	-
Sargassum hystrix J.Agardh 1847	X	x	x	x	x
Chlorophyta					
Ulva sp	x	x	x	x	
Halimeda cupiosa Goreau y E.A.Graham 1967	-	x	x	x	-
H. cryptyca var. acerifolia D.L.Ballantine 1982	-	-	-	-	-
H. incrassata (J.Ellis) J.V. Lamouroux 1816	x	x	x	x	x
H. opuntia (Linnaeus) J.V. Lamouroux 1816	x	x	x	x	-
H. scabra M.Howe 1905	x	x	x	x	x
H. tuna (J.Ellis y Solander) J.V.Lamouroux 1816	x	x	x	x	x
H. simulans M.Howe 1907	x	x	-	x	x
H. gracilis Harvey ex J.Agardh 1887	-	x	x	x	-
Udotea fibrosa D.S Littler y Littler, 1990	-	-	-	-	-
U. conglutinata (J.Ellis y Solander) J.V.Lamouroux 1816	x	-	x	x	x
U. cyathiformis Decaisne 1842	-	-	-	x	x
U. dixonii D.S. Littler y Littler 1990	x	x	x	x	-
U. abbottiorum D.S.Littler y Littler 1990	-	x	-	-	-
U. flabellum (J.Ellis y Solander) M.Howe 1904	x	x	x	x	x
U. dotyi D. S. Littler y Littler 1990	-	-	x	x	-
U. wilsoni A. Ge, E. S. Ge y M.Howe 1911	x	x	x	x	x
Penicillus capitatus Lamarck 1813	x	x	x	x	x
P. dumetosus (J.V.Lamouroux) Blainville 1830	x	x	x	x	x
P. pyriformis A.Ge y E.S.Ge 1905	x	x	x	x	x
Rhipocephalus phoenix (J.Ellis y Solander) Kützing 1843	x	x	x	x	x
R. oblongus (Decaisne) Kützing 1849	x	x	x	x	x

2.3. BIBLIOGRAFÍA

Aronson R. B. y W. F., Precht (2001) White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. Hydrobiologia 460; 25-38

Belousov, I. M. Y. A. Ivanov, S. A. Pasternak., T. S. Rass y V. V. Rossov (1966) Oceanographic Research by the Soviet-Cuban Marine Expedition. Okeanology 6; 312-320.

Bjork, M., S.M. Mohammed, M. Bjorklund and A. Semesi (1995). Coralline algae, important coral reef builders threatened by pollution. *Ambio*, 24: 502-505.

Björklund, M., A. Semesi., S. M., Mohammed y M. Björk (1995) Coralline algae, important coral-reef builders threatened by pollution. (Vol. 24); 502 – 505.

Cetz-Navarro, N. P., J. Espinoza-Avalos., A. Sentíes-Granados y L. I. Quan-Young (2008) Nuevos registros de macroalgas para el Atlántico Mexicano y riqueza florística del Caribe Mexicano. Hidrobiológica, 18(1); 11-19.

Collado-Vides, L., I. Ortegón-Aznar, A. Sentíes-Granados., L. Comba-Barrera y J. González-González, (1998). Macroalgae of Puerto Morelos Reef System, Mexican Caribbean. Hidrobiológica, 8(2); 133-143.

Dreckmann, K. M., I. Stout y A. Sentíes-Granados (1996) Lista actualizada de las algas marinas bentónicas de Puerto Morelos, Quintana Roo, Caribe Mexicano. Polibotánica, 3; 1-17.

Fabricius, K., y G. De'Ath (2001) Environmental factors associated with the spatial distribution of crustose coralline algae on the Great Barrier Reef. Coral Reefs, 19(4); 303-309.

Harrington L., K. Fabricius., G. De'Ath y A. Negri, (2004). Recognition and selection of settlement substrata determine post-settlement survival in corals. Ecology, 85(12); 3428-3437.

Heyward A.J y A.P. Negri (1999) Natural inducers for coral larval metamorphosis. *Coral Reefs*, 18; 273-279.

Hughes, T. P. y J. E. Tanner (2000) Recruitment failure, life histories and long-term decline of Caribbean corals. Ecology, 81; 2250-2263.

Keats, D. W. (1997) *Lithophyllum insipidum* Adey, Townsend et Boykins and L. flavescens sp. nov.: two flat lithophylloid coralline algae (Corallinales, Rhodophyta) abundant in shallow reef environments in Fiji. *Phycologia*, *36*(5); 351-365.

Keats, D. W., M. A. Knight y C. M. Pueschel, (1997). Antifouling effects of epithallial shedding in three crustose coralline algae (Rhodophyta, Coralinales) on a coral reef. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 213(2); 281-293.

Ladd, M. C., y L. Collado-Vides (2013) Practical alications of monitoring results to improve managing for coral reef resilience: a case study in the Mexican Caribbean. Biodiversity and conservation, 22(8); 1591-1608.

Lasker, H.R. y K. Kim (1996) Larval development and settlement behaviour of gorgonian coral *Plexaura kuna* (Lasker, Kim and Coffroth). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 207; 161-175.

Littler, D. S. y M. M. Little (2000) Caribbean Reef Plants. An Identification Guide to the Reef Plants of the Caribbean, Bahamas, Florida and Gulf of Mexico. Offshore Graphics, Inc., Washington, DC, 542.

Littler, M. M. y K. E. Arnold (1982) Primary productivity of marine macroalgal functional-form groups from southwestern north america. In Journal of Phycology 18, 307-311.

Mateo-Cid, L. E., A. C. Mendoza - González y R. B. Searles (2006) A checklist and seasonal account of the deepwater Rhodophyta around Cozumel Island on the Caribbean coast of Mexico. Caribbean Journal of Science, 42(1); 39.

Mateo–Cid, L. E., A. C. Mendoza–González y R. B. Searles, (2001). New Mexican records of marine algae including Crouania mayae sp. nov. (Ceramiaceae, Rhodophyta). Caribbean Journal of Science 38; 205–221.

Mendoza-González, A. C. y L.E. Mateo-Cid, (1992). Algas marinas bentónicas de Isla Mujeres, Quintana Roo, México. Acta Botánica México. 19:37-62.

Mendoza-González, L. E. Mateo-Cid y R. B. Searles, (2000). ‘‘New records of benthic marine algae from Isla Cozumel, México: Phaeophyta and Chlorophyta’’. Bull. Mar. Sci., 66; 119-130.

Morse, D. E., N. Hooker., A. N. C. Morse y R. A. Jensen, (1988). Control of larval metamorphosis and recruitment in sympatric agariciid corals. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 116; 193–217.

Ortega, M. M., J. L. Godínez y G. Garduño- Solórzano, (2001). ‘‘Catálogo de algas bénticas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe’’. UNAM 34; 1-595.

Piñon, G. A. (1998). Estudio de las comunidades algales del sistema Arrecifal de Puerto Morelos. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, 24 – 27.

Polunin, N. V. C. y D. W. Klum (1992) Algal food suly and grazer demand in a very productive coral-reef zone. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, *164*(1); 1-15.

Quan-Young, L. I., M. A. Díaz-Martín y J. Espinoza-Avalos (2004) Floristics, cover, and phenology of marine macroalgae from Bajo Pepito, Isla Mujeres, Mexican Caribbean. Bulletin of Marine Science, 75(1); 11-25.

Quan-Young, L. I., M. A. Díaz-Martín y J. Espinoza-Avalos, (2006). Algas epífitas de Bajo Pepito, Isla Mujeres, Quintana Roo, México. Revista de biología tropical, 54(2); 317-328.

Rosas, M. A. A., M. A. L. Rosas y R. A. Rosas (1998) Algas marinas de la región central de Quintana Roo, México. Polibotánica, 7; 15-32.

Short, F. T., L. J. McKenzie., R. G. Coles., K. P. Vidler y J.L. Gaeckle (2006) SeagrassNet Manual for Scientific Monitoring of Seagrass Habitat, Worldwide edition. University of New Hampshire Publication, 75

Soberón J. y J. Llorente (1993) The use of species accumulation functions for the prediction of species richness. Conservation Biology 7; 480-488.

Taylor (1960) Marine Algae of the Eastern Tropical and Subtropical Coasts of the Americas. The University. Michigan Press, Ann Arbor. 870

Valdivia, A., E. de la Guardia., M. Armenteros., P. González., A. M. Suárez., C. Aguilar y G. González-Sansón (2004) Inventario de los componentes más comunes de la flora y la fauna de algunos arrecifes coralinos de la Península de Guanahacabibes, Pinar del Río, Cuba. Revista de Investigación Marina, 25 (2); 113-121.

Wynne, M. J. (1998) A checklist of benthic marine algae of the tropical and subtropical western Atlantic: first revision. Nova Hedwigia Beiheft 116; 1–155

CAPITULO III. DINÁMICA DE LAS COMUNIDADES DE MACROALGAS CON RELACIÓN A LOS CAMBIOS DE TEMPERATURA Y NUTRIENTES EN LOS ARRECIFES CORALINOS DE QUINTANA ROO.

3.1. INTRODUCCIÓN

La estructura y composición taxonómica de las comunidades de macroalgas en los arrecifes coralinos está controlada en gran medida por factores ambientales como la temperatura (Beach y Smith, 1997; Bischoff-Baesmann *et al.,* 1997) y la concentración de nutrientes inorgánicos (Littler *et al*., 2006, Lapointe, 1987), pero también por las interacciones bióticas como competencia (Hughes, 1989; Tanner, 1995; McCook 1999) y la herbivoría (Dollar y Grigg 2004; Ledlie, *et al.,* 2007; Tanner 1995). Teóricamente, el crecimiento y la reproducción de las macroalgas están limitados en aguas oligotróficas (Larned y Stimson, 1996; Schaffelke y Klum, 1998; Lapointe *et al.,* 2004), donde la baja concentración de nutrientes impide el crecimiento de muchas especies, en particular de las algas carnosas. Esta situación favorece el predominio de algas coralinas (McConnaughey *et al.,* 2000). La disponibilidad limitada de nitrógeno inorgánico (N), fósforo (P) y la temperatura (Schneider y Searles 1978) se ha identificado como factores muy importantes en la determinación de la distribución, la productividad y la acumulación de biomasa de macroalgas (Hatcher y Larkum 1983; Lapointe 1987; Schaffelke *et al.,* 2005). Sin embargo, la alta concentración de la actividad humana, el desarrollo en la franja costera ha hecho que los nutrientes que llegan al ecosistema costero se incrementen en la columna de agua promoviendo con ello la degradación de los ecosistemas arrecifales (Schaffelke, 1999; Bennet *et al.,* 2015). En principio, los nutrientes estimulan el crecimiento de especies oportunistas de macroalgas mientras que en otras especies no se producen cambios (Thacker *et al.,* 2001; Smith *et al.,* 2001, Szmant, 2001), por ejemplo, el grupo de algas coralinas. Estos cambios involucran un cambio de la estructura de las comunidades (McCook, 1999) que con el tiempo, pueden dar lugar a un estado alternativo dominado por macroalgas no calcificadas que redunda en la pérdida de funciones metabólicas en el ecosistema (Birkeland, 1987; Lapointe, 1997; Bellwood *et al.,* 2004). En todos los sitios donde existen comunidades coralinas, incluido el Caribe se ha documentado una pérdida importante de la cobertura de coral (Hoegh-Guldberg 1999; Wilkinson 2000) y un aumento concomitante en las comunidades de macroalgas lo que ha llevado al potencial colapso este ecosistema.

La temperatura es el factor más importante que determina la distribución geográfica de las macroalgas (Breeman, 1988;) debido a su papel en los procesos de fotosíntesis, crecimiento y reproducción en las macroalgas (Yarish *et al.,* 1986, Eggert, 2012). En el caso de las macroalgas tropicales asociadas a los arrecifes coralinos, las especies parecen tener menor tolerancia a las bajas temperaturas (Pakker *et al.,* 1995).

Por otra parte, la pérdida de peces herbívoros por sobrepesca también facilita este proceso al eliminar uno de los mecanismos naturales de control de las macroalgas (McCook, 1999). Se ha comprobado que el aumento de macroalgas en los arrecifes coralinos puede tener efectos mecánicos fuertemente negativos (*i. e.* sombreado y abrasión) sobre los corales (McCook *et al*., 2001, Titlyanov *et al*., 2007), aumentando la susceptibilidad a los microorganismos patógenos que genera enfermedades a los corales (Nugues *et al*., 2004, Smith *et al.,* 2006) o a través de excreciones químicas alelopáticos que provocan la decoloración, y a veces la muerte de pequeños fragmentos de coral (Rasher y Hay , 2010; Rasher *et al.,* 2011, Andras *et al.,* 2012). También se ha estudiado que el aumento de macroalgas compiten con los corales por espacio a través de múltiples mecanismos directos e indirectos (Kuffner *et al.,* 2006, Birrell *et al.,* 2008, Barott *et al.,* 2011). Varios estudios experimentales han investigado como el enriquecimiento de nutrientes incrementa la abundancia de macroalgas carnosas, coralinas costrosas y cianobacterias (Littler *et al.*, 2010; Sotka y Hay, 2009) siendo este efecto magnificado por la ausencia de herbívoros (Burkepile y Hay, 2006) lo que implica un efecto sinérgico entre estos dos factores.

En el Caribe Mexicano el deterioro coralino es cada vez más evidente ya que la mortalidad de colonias de coral genera espacios para que las especies oportunistas como las macroalgas los ocupen llevando a un aumento excesivo de su cobertura, principalmente algas carnosas (*Dictyota*, *Lobophora* etc.). Cabe destacar que los estudios de monitoreo de la cobertura de las macroalgas en las zona arrecifales de Puerto Morelos e Isla Contoy tienen la restricción de que no se han llevado a cabo clasificándolas a nivel de entidades taxonómicas sino de grupos funcionales. Por ello, este capítulo tiene como objetivo determinar la variación de las coberturas de las macroalgas y sus posibles correlaciones con la temperatura y la concentración de nutrientes para determinar el efecto específico de estos factores sobre la estructura de las comunidades de macroalgas en la zona.

3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1. Estimación de coberturas de macroalgas

En cada zona se colocaron 5 transectos de 10 metros sobre el arrecife de coral. En cada transecto se seleccionaron 5 cuadrantes de 0.25 m^2 donde se estiman coberturas de todas las especies de macroalgas presentes. También se realizó un registro fotografico para referencia y análisis de gabinete. Esto se realizó con el fin de minimizar posibles errores de cuantificación e identificación durante el muestreo. La estimación del porcentaje de cobertura de macroalgas se determinó de manera visual. Los periodos del muestreo se realizaron cada 20 días. Se utilizó un método combinado de transecto y foto-cuadrantes que consistió en colocar un transecto de 10 m sobre los macizos arrecifales representativos del sitio. Para delimitar el área del cuadrante se usó un marco de PVC que se colocó cada 2 metros obteniendo un total de 5 cuadrantes por transecto. Cada cuadrante se colocó con vista hacia la costa. La estimación de las coberturas consistió en tomar los porcentajes de cada macroalga presente en el cuadrante (Figura 17). Las fotografías se tomaron en un ángulo de 90 grados respecto al fondo verificando que todo el lente de la cámara cubriera la superficie del cuadrante.

3.2.2. Consideraciones sobre la tomas de los datos de coberturas

La determinación del porcentaje de cobertura de las macroalgas no es una tarea sencilla porque se deben tomar en cuenta algunos factores como la estructura del arrecife, los consorcios de especies de algas y la profundidad de sitio. En ambientes donde existe la presencia frecuente de consorcios (asociaciones temporales de diferentes especies) de macroalgas, se tomaron en cuenta las macroalgas visibles en el cuadrante. Bonanza, Jardines e Ixlaché presentaron estas condiciones. En los ambientes que presentaron una estructura tridimensional compleja del arrecife como en los casos de Bonanza y Jardines, las medidas de cobertura solo consideraron a las macroalgas visibles desde una vista perpendicular al fondo y no a todas aquellas algas creciendo por debajo o a los lados.

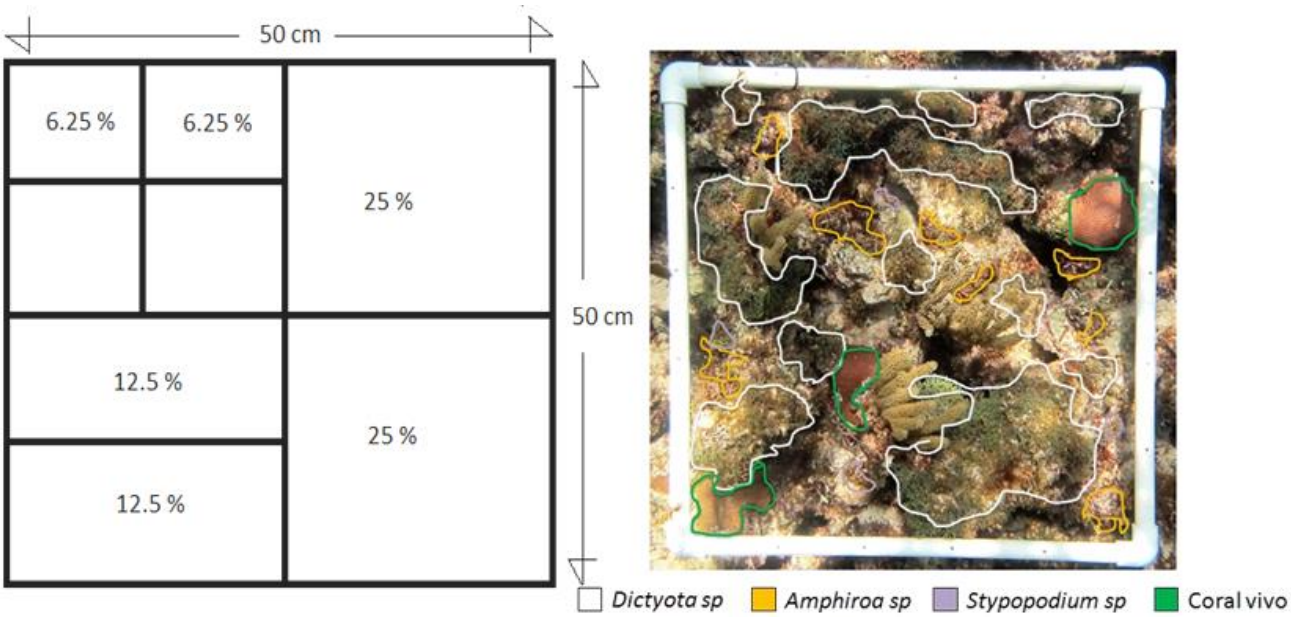


Figura 17. Ejemplo de estimación del porcentaje de coberturas de macroalgas en campo. El diagrama de la izquierda asigna porcentajes de sub-áreas dentro del cuadrante. En la Imagen de la derecha se delimita el perímetro donde está presente la macroalga. La estrategia es consiste en asignar valores de porcentaje de las formas irregulares de los perímetros de las algas: En la imagen, la suma de los perímetros de *Dictyota* representa el 50%, *Amphiroa sp* 7%, *Stypopodium zonale*3%, y habría poco más del 5% de coral vivo en un área de 0.25 m^2.

3.2.3. Nutrientes

Para la determinación de los nutrientes se tomaron 4 muestras de 50 ml con jeringas de 50 ml se filtraron con filtros de tamaño de poro de 0.25 μm, esto se realizó con el fin de retirarle todo las partículas orgánicas que puedan interferir su análisis en el laboratorio. La cuantificación de nitrato, nitrito, amonio y fosfato se realizó por medio de un autoanalizador de nutrientes de flujo segmentado marca Skalar siguiendo las técnicas descritas por Strickland y Parsons (1977).

3.2.4. Temperatura

Se colocaron sensores de temperatura marca HOBO Pro-v2 en los sitos arrecifales de puerto Morelos e Isla Contoy anclada con un muerto a 30 cm de la superficie cerca de las comunidades macroalgales, registró la temperatura cada 30 minutos durante 9 el periodo de estudio.

3.2.5. Análisis Estadísticos

Correlación de Spearman**.** Cuando las variables bajo del estudio no tienen distribución normal se procederá con los rangos de mediciones para cada variable. La técnica de correlación se encarga a determinar este grado de asociación o correlación (Badii *et al.,* 2009). El coeficiente de correlación fluctúa de -1 indicando una correlación negativa perfecta, hasta +1 que a su vez indica una correlación en este caso positiva. Cabe indicar que en el caso de correlación negativa, un aumento en una variable se asocia con un decremento en otra variable, y en el caso a la correlación positiva ocurre contrario a lo mencionado anteriormente. La ecuación se describe a continuación:

$$r_s = 1 - [6 \sum d_i^{\,2} / (n^{\,3} - n)] \qquad \textbf{Ecuación 2.}$$

Donde,

$\mathbf{d_i}$ = diferencia entre rangos de X y Y, y **n** es el número de muestras.

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Parámetros físicos

Temperatura. Las series de temperatura en los tres sitios mostraron una consistencia en su comportamiento con algunas variaciones particulares. En la figura 18 se presentan estas series para cada uno de los sitios de estudio. Se usó la misma serie en Limones y Bonanza por la cercanía entre ambos sitios. La temperatura promedio en Ixlaché, Limones y Jardines fue de 28.3 ºC, 28.8 ºC y 29.2 ºC respectivamente. El 15 de abril, cuando los sensores comenzaron el registro de datos, correspondió a un periodo caracterizado por tres eventos consecutivos de disminución de temperatura. En Ixlaché estos eventos parecen uno mismo por lo cercano que está uno del otro, pero en Limones y Jardines sólo se alcanzan a notar dos eventos independientes, e incluso, en Jardines el efecto del primero es menos importante. Como consecuencia, en Ixlaché se observa una disminución de hasta 24 ºC, que es la temperatura más baja registrada para el periodo reportado en todos los sitios. En Limones y Jardines la temperatura de esta serie de eventos fue de 26.5 ºC a 26.7 ºC, que también fueron los valores más bajos registrados durante el periodo en estos sitios. La presencia de un “norte” en la zona en la primera

mitad de junio con intensidad de viento promedio de 42.94 km·h^{-1} volvió a hacer descender la temperatura entre 26 ºC y 27.1 ºC. A partir de la segunda semana de junio se observó un incremento de la temperatura hasta septiembre que fue donde se registraron los valores más altos, alcanzando los 31 ºC en Limones. El descenso de temperatura comenzó nuevamente en la segunda mitad de septiembre debido al inicio de la temporada de nortes.

Nutrientes. Los nutrientes tuvieron altas concentraciones respecto a lo que podría esperarse para un sistema oligotrófico como lo es el Caribe Mexicano. Las concentraciones de nitrógeno inorgánico (DIN = NO_3^-+NO_2^-+NH_4^+) se encuentran entre 8 y 10 μM. Esta variable considera la contribución de nitratos, nitritos y amonio. Este último ion fue particularmente alto (1.2 a 1.8 μM). Por su parte, el fosfato también tuvo valores altos, en el intervalo de 1.8 a 3 μM (Cuadro 8). En la figura 19 se presenta la relación entre el nitrógeno inorgánico y el fosfato en los cuatro sitios de estudio. La variación del DIN respecto al PO_4 fue lineal en Limones, Jardines y Bonanza, mientras que en Ixlaché no fue tan evidente este comportamiento. Las correlaciones entre DIN y PO_4 fueron altas y positivas en Jardines, Bonanza y Limones (R= 0.90, 091 y 0.93; p<0.01) pero no en Ixlaché. No se observaron diferencias significativas entre la concentración de DIN entre sitios (Prueba de Kruskal-Wallis, p=0.4) pero si en la de PO_4^{3-} (p=0.12), y por consiguiente para la razón DIN/PO_4^{3-} (p=0.27). Estas diferencias se debieron a la menor concentración del PO_4^{3-} en Ixlaché (Cuadro 8).

Cuadro 9. Concentración de los nutrientes en los arrecifes de la zona norte del Caribe Mexicano. Las concentraciones se presentan en μM.

	DIN = [NO_3^- + NO_2^- + NH_4^+]				**[PO_4^{3-}]**				**DIN/PO_4^{3-}**			
Fecha	**LM**	**BN**	**JR**	**IX**	**LM**	**BN**	**JR**	**IX**	**LM**	**BN**	**JR**	**IX**
Abril 15	9.5	8.7	9.5	9.2	2.7	2.4	2.7	2.4	3.5	3.6	3.5	3.8
Mayo 7	9.4	8.4	9.4	7.8	2.5	2.4	2.5	2.2	3.8	3.5	3.8	3.5
Mayo 28	9.0	8.1	8.7	8.9	2.5	2.2	2.3	2.1	3.6	3.7	3.8	4.2
Junio 18	9.0	9.8	9.7	9.5	2.7	2.6	2.8	2.2	3.3	3.8	3.5	4.3
Julio 8	10.0	9.1	9.3	9.7	2.2	2.4	2.5	2.4	4.5	3.8	3.7	4.0
Agosto 6	8.3	9.4	9.6	9.4	2.1	2.5	2.5	2.1	4.0	3.8	3.8	4.5
Sept 2	9.0	9.4	9.9	9.0	2.3	2.4	2.8	2.2	3.9	3.9	3.5	4.1
Sept 18	9.4	9.8	10.2	9.8	2.5	2.6	2.8	2.5	3.8	3.8	3.6	3.9

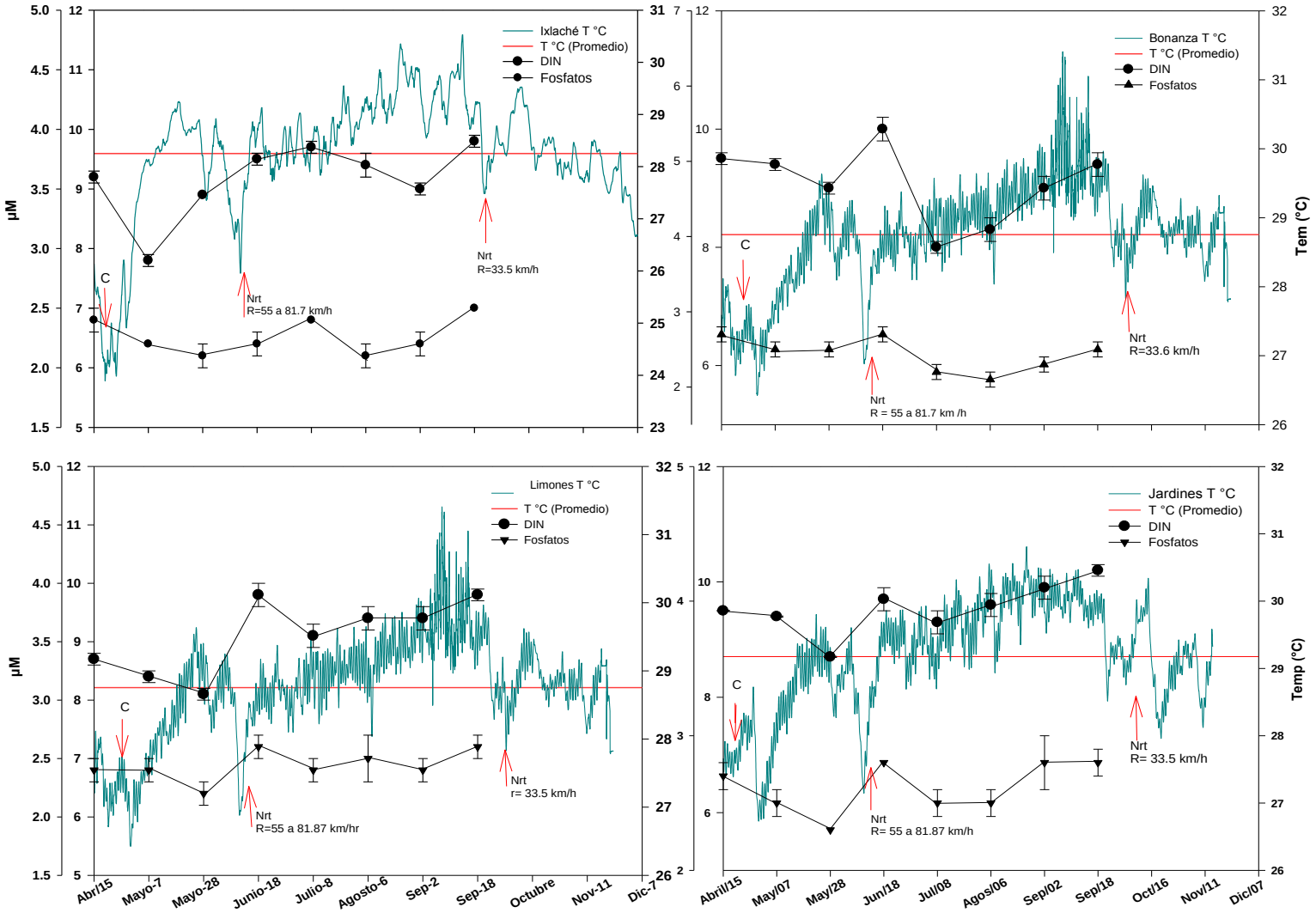


Figura 18. Variaciones de la temperatura en los sitios de muestreos de los arrecifes de Puerto Morelos e Isla Contoy. C.O. Corrientes oceánicas, Nrt= Nortes y R= rachas de viento.

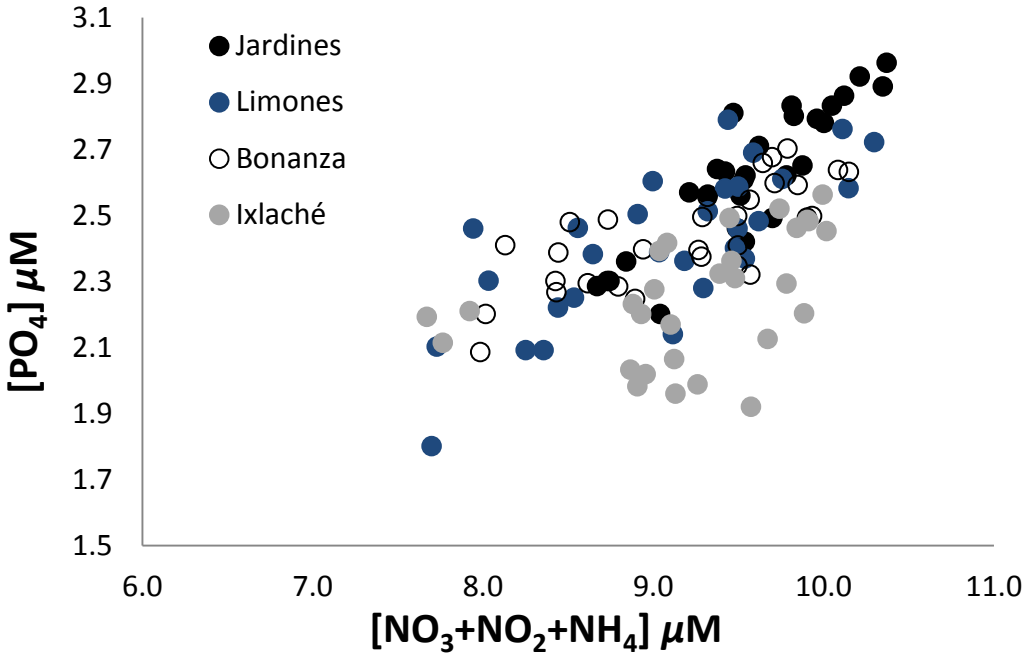


Figura 19. Relación entre la concentración de Nitrógeno Inorgánico Disuelto y los Fosfatos en los cuatro sitios estudiados. Todas las datos están graficadas paro observar la tendencia global. Nótese que para enfatizar el comportamiento de los datos los ejes no comienzan en cero.

3.3.2. Relación entre nutrientes y temperatura

No se observaron correlaciones significativas entre la temperatura con DIN ni con PO_4^{3-} en ningún sitio. En las gráficas de la figura 18 parece que la tendencia es variable entre sitios. Por ejemplo, en Limones, Bonanza y Jardines, el comportamiento de los nutrientes es similar: una tendencia de disminución gradual entre Abril y Mayo entre 7.5 µM seguido de un pico posterior al evento de *norte* de la primera quincena de junio (10 µM), tras lo cual se observa un nuevo incremento que sube paulatinamente hasta septiembre, justo en el periodo más cálido registrado. Por el contrario, en Ixlaché los valores máximos de nutrientes se detectaron en Julio (9.5 µM), y no pareció haber un efecto del *norte* en el incremento de nutrientes a comparación de los sitos de Puerto Morelos (Figura 18).

3.3.3. Coberturas de las macroalgas

Se realizaron 190 transectos con 950 cuadrantes de 0.25 m^2 en 4 zonas arrecifales de la zona norte del estado de Quintana Roo. En Puerto Morelos se tomaron 700 cuadrantes de 140 transectos y en el arrecife Ixlaché de Isla Contoy se tomaron 250 cuadrantes de 50 transectos. En los arrecifes de Ixlaché la cobertura promedio del porcentaje de cobertura de macroalgas considerando todo el periodo de muestreo fue de 67.2±1.29, del cual el

género *Dictyota* fue el más abundante en esta zona contribuyendo con 28.18±3.86, seguido del género *Halimeda* (*H. opuntia* y *H. tuna*) con 28.04±3.01, y finalmente, las coralinas que comprenden a las incrustantes y a las articuladas de los géneros *Amphiroa*, *Jania* y *Galaxaura,* cuya cobertura promedio fue de 3.94±0.69. (Figura 20). La cobertura total más alta se registró en Mayo (82.8±2.18) y la menor en Junio 18 (56.4±3.54) todos los valores restantes presentaron valores cercanos al 60%. Las especies del género *Dictyota*, tuvieron la cobertura más alta en Diciembre (42.88±5.35) y la más baja en Junio (5.44±0.66). Los porcentajes de cobertura variaron con respecto a las fechas de muestreo; de abril a junio presentaron valores de entre 9% y 25% y subieron su porcentaje entre Julio a Diciembre de 30% a 40% en promedio. Las especies calcáreas del género *Halimeda* presentaron las coberturas más altas ente Abril y Junio alcanzando el máximo en Mayo 28 con 41.2±3.93%. En Junio 18 se observó un decremento hasta menos del 20%. En Diciembre se presentó la cobertura mínima con 14.4±3.52. En Limones la cobertura total promedio para todo el periodo de estudio fue la menor de los cuatro sitios con 46.99±1.56. Aquí, las coberturas promedio de *Dictyota*, *Halimeda* y de las algas coralinas fueron de 26.28±2.9, 6.93±0.77 y 5.73±0.86 respectivamente. La variación de la CT fue cíclica. Teniendo máximos en Mayo y Agosto llegando hasta 60%, con un mínimo en Junio 18 de 40% y otro en septiembre donde se registró el menor porcentaje (30%). Entre Noviembre y Diciembre la CT se mantuvo entre 50% y 60%. Las variaciones en *Dictyota* siguieron el mismo patrón descrito para la CT, aunque los mínimos alcanzaron valores menores al 10%. El género *Halimeda* y las algas coralinas presentaron coberturas menores al 10% en todas las épocas de muestreo. Las coralinas tuvieron un máximo en Junio y las coralinas en Septiembre lo cual coincidió con la disminución de *Dictyota*. (Figura 21). En Bonanza el promedio de CT para todo el periodo de estudio fue de 82.40±1.0 que fue el mayor de todos los sitios estudiados. Las algas coralinas y las algas calcáreas presentaron valores inferiores al 10% en todo el periodo de estudio excepto para las coralinas que alcanzaron 13.08±1.15 en Julio. *Dictyota* presentó coberturas altas en Mayo 7 y Agosto con 32.28±2.54 y 32.20±2.17, por el contrario, el menor porcentaje de cobertura se registró en Septiembre 2 con 7.8±1.44. (Fig. 22). En este sitio la presencia de otras especies como *Turbinaria turbinata, Acanthophora spicifera, Sargassum* sp presentaron aportaciones importantes a la CT ya que presentaron picos episódicos de abundancia. Por ejemplo, *Acanthophora* y *Palisada*

alcanzaron una cobertura máxima de hasta 45% en Mayo 18 y Junio 18 respectivamente, mientras que *Sargassum* y *Turbinaria* aumentaron en Diciembre. (Figura 23)

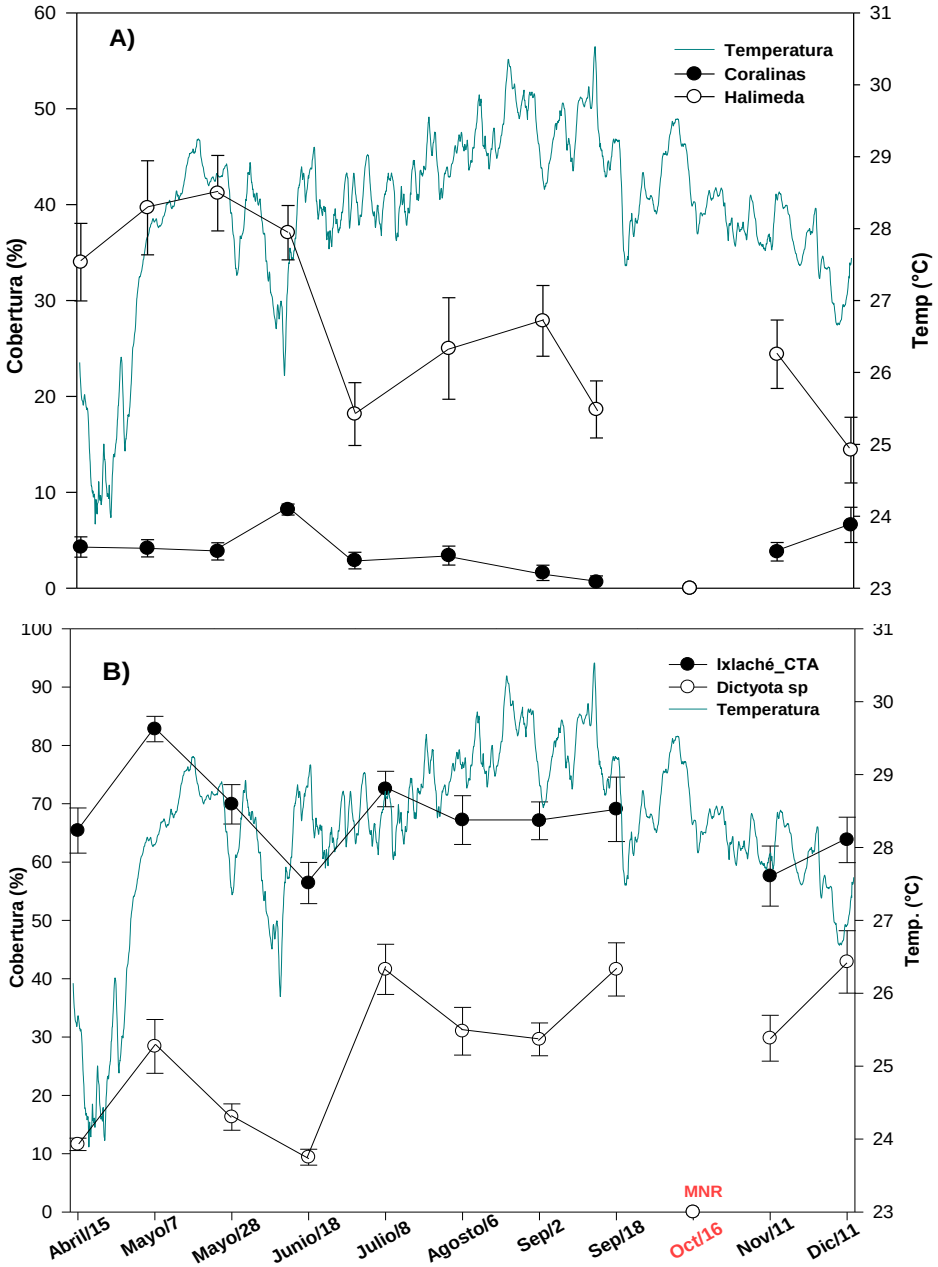


Figura 20. Gráficos de las coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Isla Contoy. Ixlaché. A) Cobertura promedio mensual del genero *Halimeda* y coralinas. B) cobertura promedio mensual del género *Dictyota* y cobertura total promedio de todas las especies registradas en Ixlaché. MNR = Muestreo de Octubre no realizado.

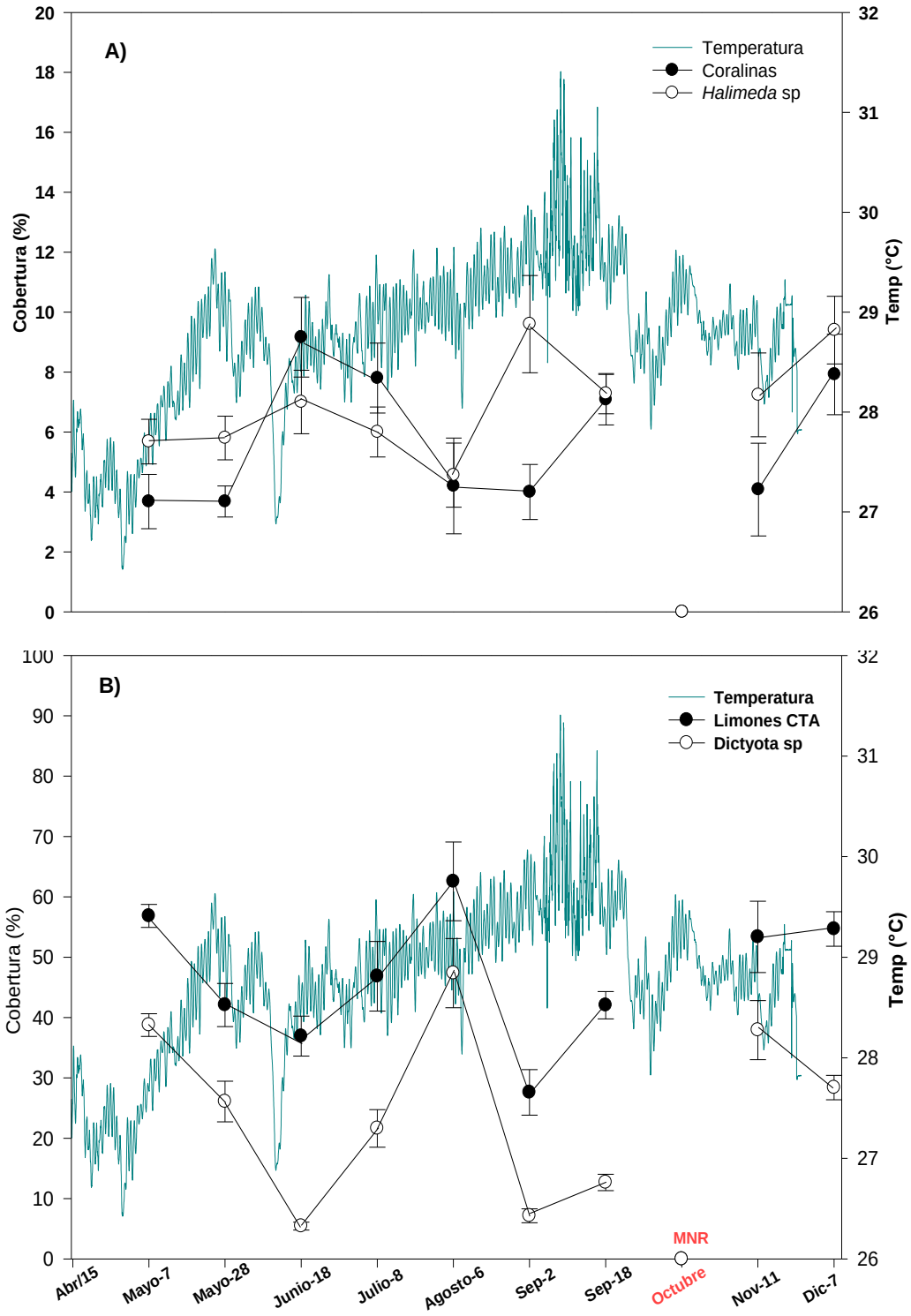


Figura 21. Gráficos de las coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Limones. A) Cobertura promedio mensual del genero *Halimeda* y coralinas. B) cobertura promedio mensual del género *Dictyota* y cobertura total promedio de todas las especies registradas. MNR = Muestreo de Octubre no realizado.

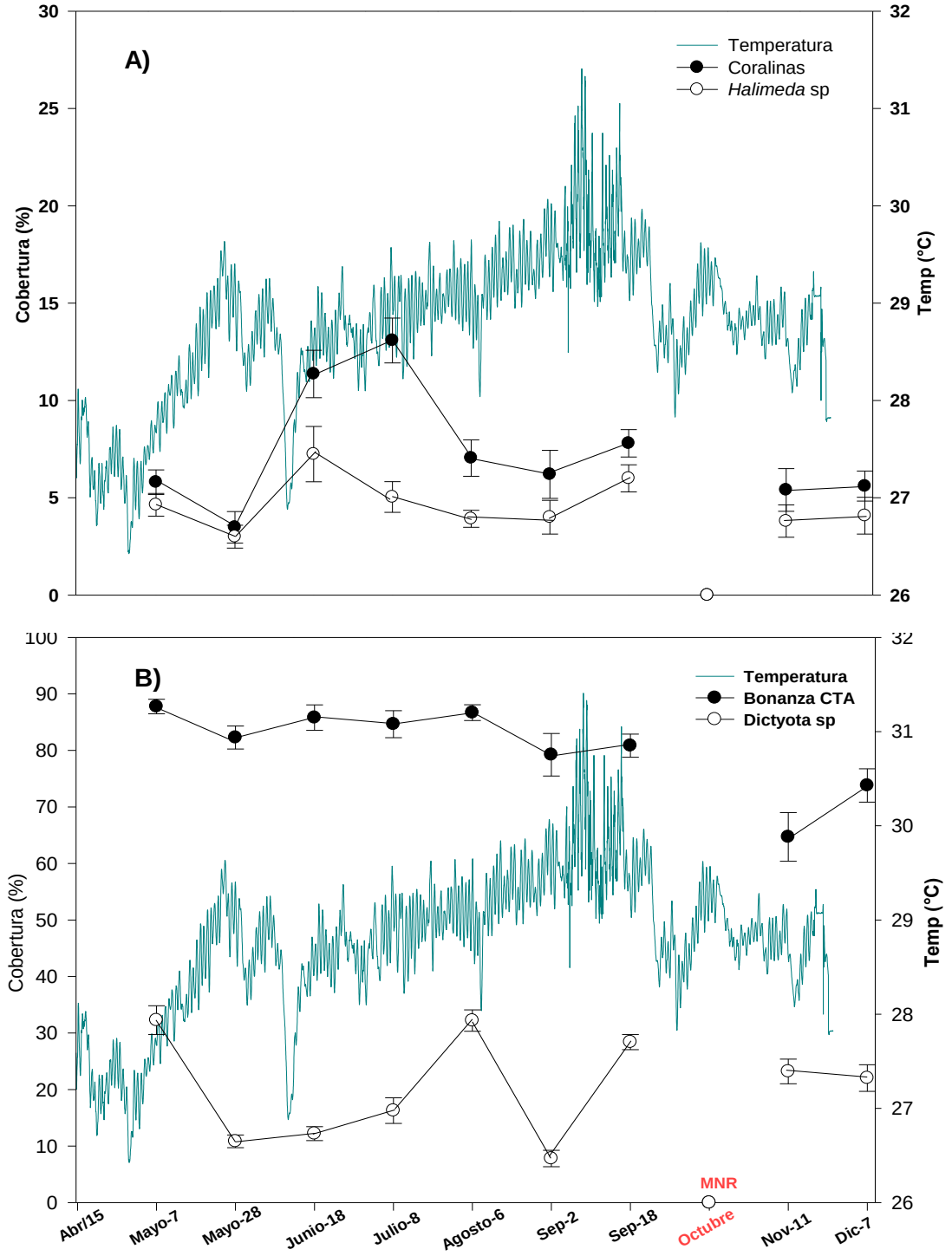


Figura 22. Gráficos de las coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Bonanza A) Cobertura promedio mensual del genero *Halimeda* y coralinas. B) cobertura promedio mensual del género *Dictyota* y cobertura total promedio de todas las especies registradas. MNR = Muestreo de Octubre no realizado.

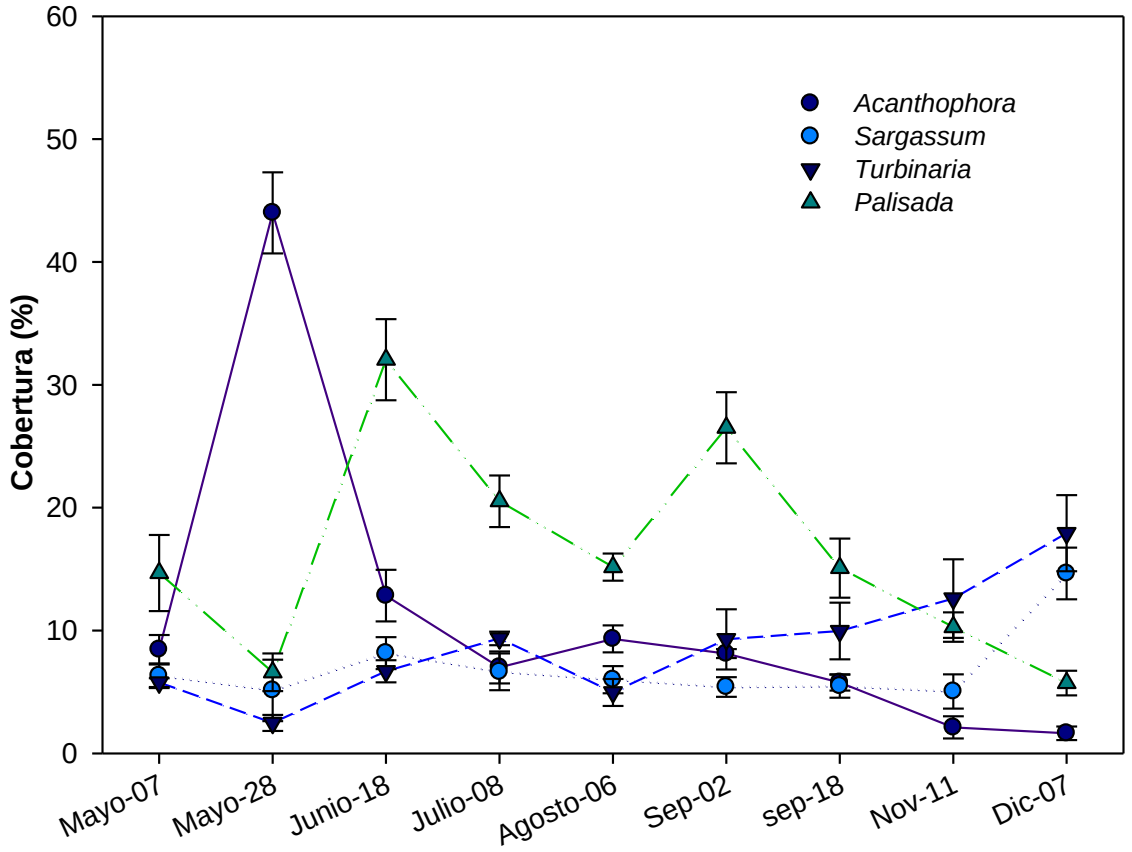


Figura 23. Coberturas de especies de macroalgas presentes en Puerto Morelos. Sitio Bonanza.

Jardines presentó CT promedio de 63.14±1.32 y un patrón de oscilaciones cíclicas con máximos en Mayo 28, Agosto 6 y Septiembre 8 con valores entre 60 y 80%, en tanto que los valores mínimos se presentaron en Junio y Septiembre 2 disminuyendo a menos del 50%. *Dictyota* siguió el mismo patrón cíclico de la CT. Por su parte, las algas coralinas en este sitio estuvieron mejor representadas alcanzando coberturas máximas de 18.04±1.65 en Junio y mínimas en Mayo 7 con 3%. Por otra parte, la cobertura de *Halimeda* no alcanzo nunca valores mayores de 10% siendo su contribución máxima de 8.37±0.70 en Abril (figura 24).

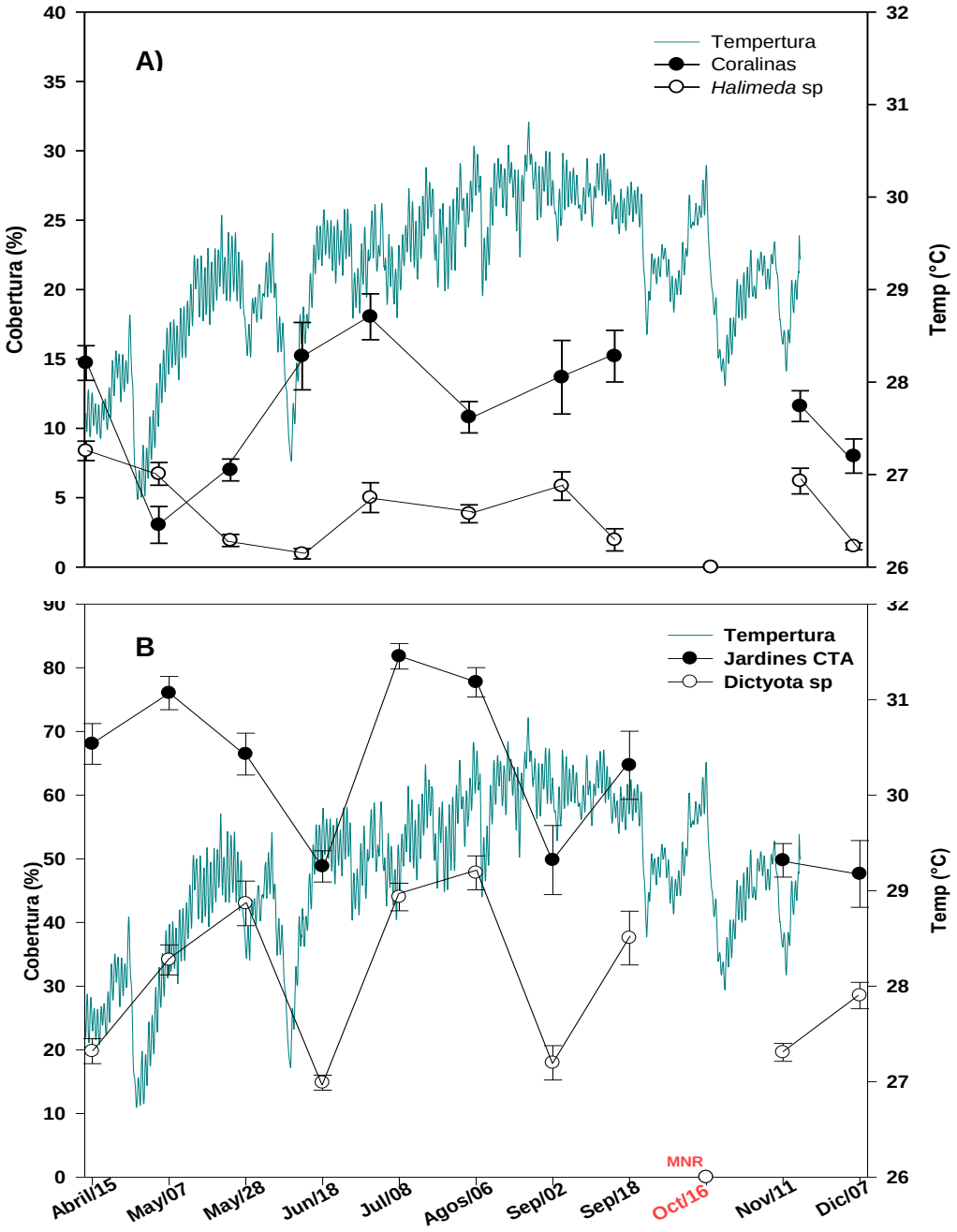


Figura 24. Gráficos de las coberturas de algas coralinas, calcáreas y *Dictyota* de Jardines A) Cobertura promedio mensual del genero *Halimeda* y coralinas. B) cobertura promedio mensual del género *Dictyota* y cobertura total promedio de todas las especies registradas. MNR = Muestreo de Octubre no realizado.

3.3.4. Relaciones entre coberturas de macroalgas T °C y nutrientes

En ningún caso se observó alguna relación entre los nutrientes y la cobertura de alguna macroalga en ninguno de los sitios estudiados. En el caso de la temperatura, se detectaron correlaciones negativas con la cobertura de algas coralinas en Ixlaché (R=-0.81, p<0.01) y con *Sargassum* en Bonanza (r=-0.81, p=0.013). (Figura 25)

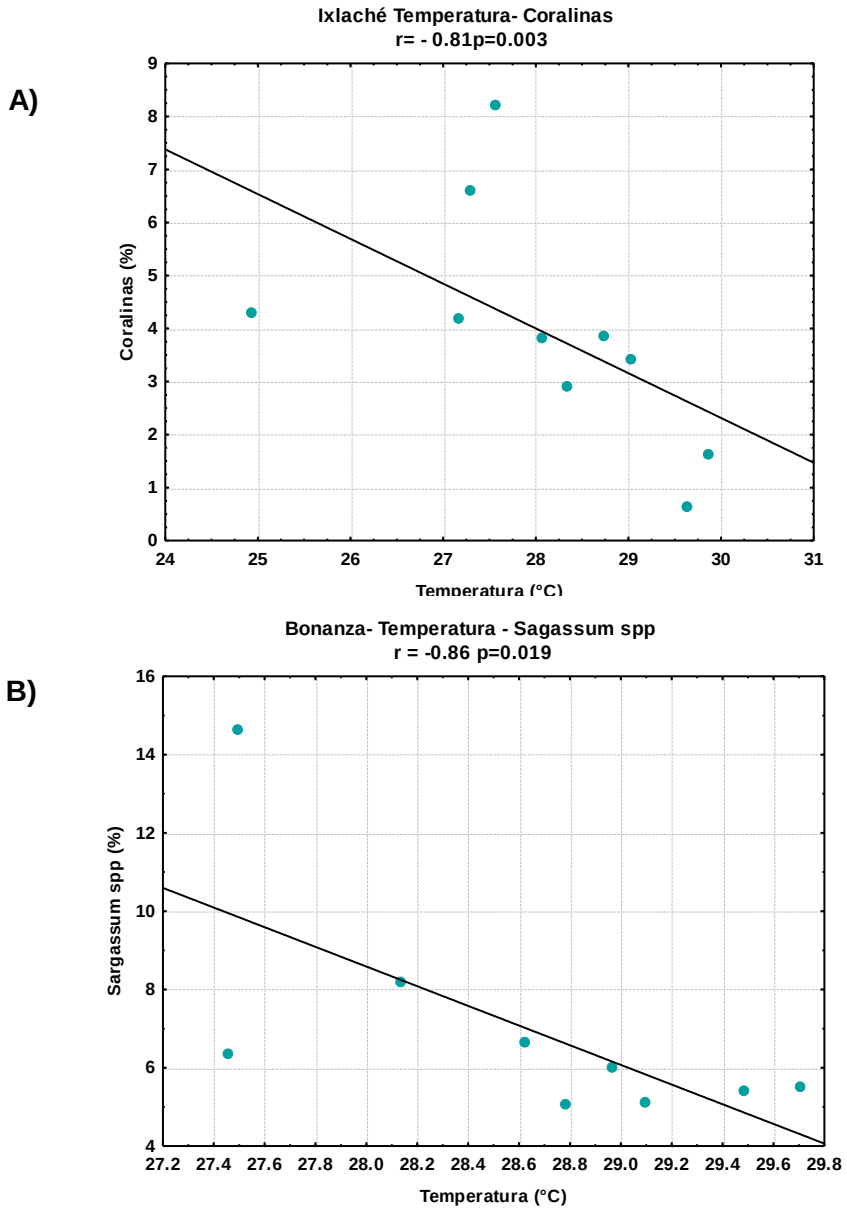


Figura 25. Correlaciones de algunas especies de macroalgas con los cambios de la temperatura. A) Ixlaché (Temp-Coralinas), B) Bonanza (Temp-*Sargassum*).

3.3.5. Relaciones entre coberturas de macroalgas

Se observaron correlaciones tanto positivas como negativas entre las coberturas de macroalgas en los sitios de estudio. *Halimeda* y *Dictyota* presentaron correlaciones negativas en Ixlaché y Limones (r= -0,86 y r=-0.82; $p<0.05$, (Figura 26). *Dictyota* también presentó correlaciones negativas con las algas coralinas en Ixlaché (r=-0.78, $p=0.03$) y con *Palisada* en Bonanza (r=-0.86, $p=0.013$).

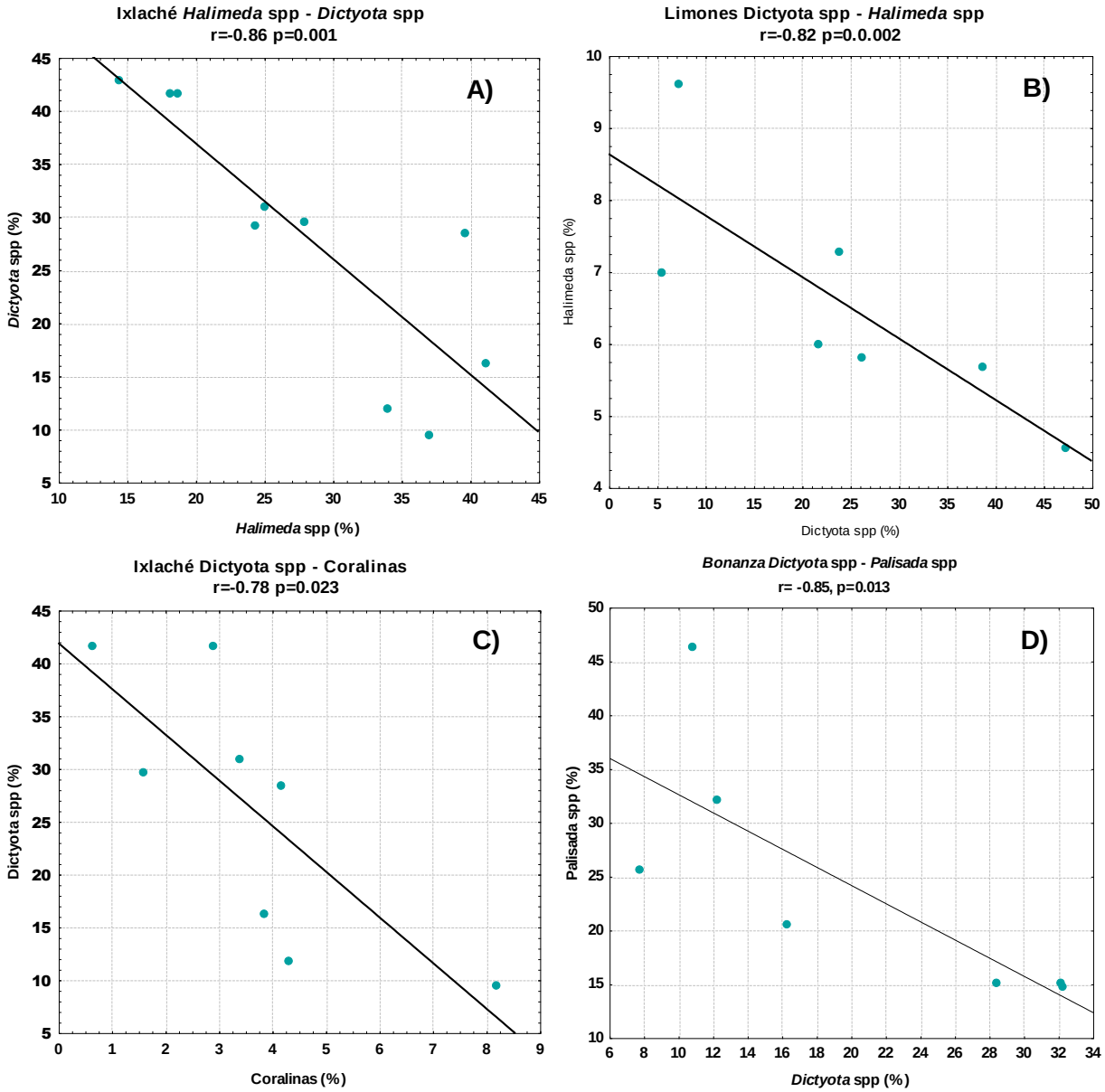


Figura 26. Correlaciones entre especies. A) Ixlaché (*Halimeda* – *Dictyota*). B) Limones (*Dictyota*–*Halimeda*). C) Ixlaché (*Dictyota*-Coralinas) y C) Bonanza *Dictyota*-*Palisada*.

En este último sitio *Turbinaria* también presentó correlaciones negativas con *Acanthophora* (r=-0.89, *p*=0.016) y con *Palisada* (r=-0.68, *p*=0.042). Figura 27

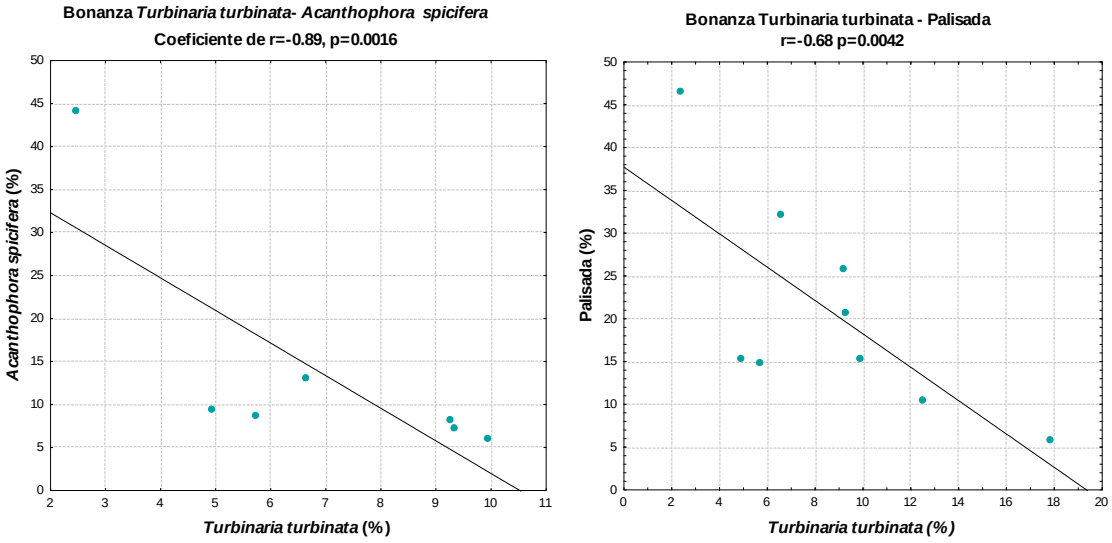
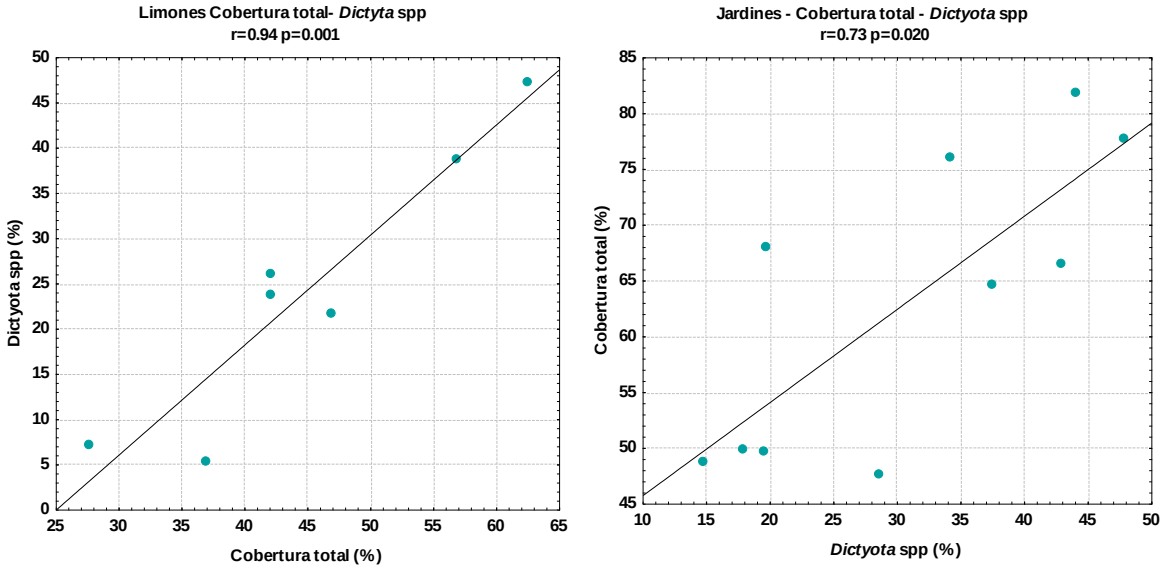


Figura 27. Correlaciones entre *Turbinaria* con *Acanthophora* (a) y *Palisada* (b) especies presentes en Bonanza.

Por el contrario, se detectó una correlación positiva entre las algas coralinas y *Halimeda* en Bonanza (r=0.80*, p*=0.009) y entre *Dictyota* y la cobertura total en Jardines (r=0.73, p=0.015) y Limones (r=0.94, p=0.023) Figura 28.



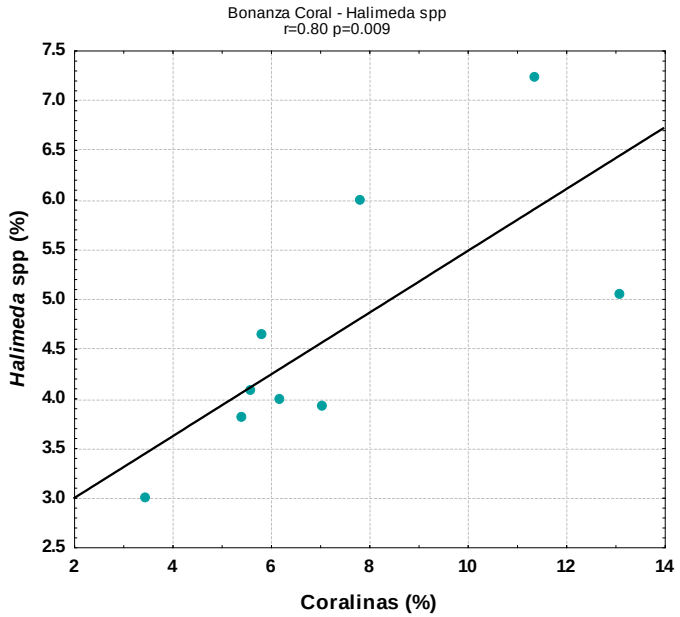


Figura 28. Gráfico de las correlaciones positivas entre la Cobertura Total, *Dictyota* s en Limones (A) y Jardines (B); y entre las algas Coralinas y *Halimeda* s en Bonanza (C).

3.4. DISCUSIÓN

Temperatura

La temperatura del agua no sólo refleja los cambios estacionales de energía que llega del sol a la superficie de la tierra, sino muchos otros eventos de diferente escala asociados a fenómenos e diferente origen. Por ejemplo, en la zona son comunes los frentes fríos de aire polar que vienen desde el norte y disminuyen la temperatura del agua por convección; también, el agua proveniente del continente que llega a la costa de forma subterránea tiene menor temperatura que el agua de la costa. La lluvia, y las corrientes marinas oceánicas también permiten el descenso de la temperatura. Todos estos procesos pueden verse reflejados en las series de temperatura. En los gráficos de la figura 18, se observan varios fenómenos que tiene impacto en la temperatura del mar en los sitios de estudio. En primer lugar está el descenso observado entre Abril y Mayo que pudiera ser el efecto de contracorrientes costeras provenientes de la zona de afloramiento de Cabo Catoche. Esta suposición se basa en que el efecto más importante se registra en Contoy y se va debilitando hacia el sur como lo muestran las series de temperatura para esas mismas fechas en Limones y Jardines. Este afloramiento es más notorio entre abril y noviembre cuando se intensifica la Corriente de Yucatán (Coronado *et al.,* 2007). Ya se ha demostrado que filamentos de esta Corriente se desplazan por la costa del norte de

Yucatán promoviendo florecimientos algales en la zona debido a las características de esta gua rica en nutrientes (Enriquez *et al*., 2010). Por lo mismo, es lógico suponer que exista una contracorriente costera en dirección al sur como sucede en todos los sistemas de surgencia. Esta corriente fría y rica en nutrientes, o al menos con relaciones estequiométricas diferentes, podría afectar las comunidades biológicas de la zona, aunque su impacto más fuerte sería en el Arrecife Ixlaché, de Contoy por ser el más cercano al afloramiento. Otro evento importante son los eventos de nortes que se registran en la zona entre noviembre y abril, aunque en los últimos años la temporalidad ha sido diferente. En las series de temperatura se observan claramente dos eventos intensos en Junio y Septiembre. El primero, hizo descender la temperatura entre 1.5 y 2 °C de la zona. Fue justo después de este evento que se observó el pico de nutrientes.

Nutrientes

Los arrecifes de coral se desarrollan en aguas someras y pobres en nutrientes (Stoddart 1969; Lapointe, 1997; Fabricius, 2005). Las concentraciones de nutrientes detectadas durante este trabajo fueron hasta 10 veces superiores a los valores límite a partir de los cuales estos nutrientes dejan de ser limitantes para el crecimiento de las macroalgas: 0.1-0.2 μM para PO_4^+ y 1.0 μM para DIN, según observaciones realizadas en Barbados y la Gran Barrera Australiana (Bell, 1992), y el Caribe (Lapointe *et al.,* 1993). Aunque sólo se presentan datos de abril a noviembre, las diferencias entre los valores máximos y mínimos entre fechas fueron de 1.5 en Jardines a 2 en Ixlaché para DIN, y de 0.4 en Ixlaché a 0.6 en Limones para el PO_4^{3-}. La razón entre ambos nutrientes DIN/PO_4^{3-} varió de 3.5 a 4.5, lo que sugiere limitación por nitrógeno. Otros reportes sobre la concentración de ambos nutrientes en la zona ofrecen valores semejantes del cociente, aunque con valores absolutos menores (Hernández-Terrones *et al*., 2011; Null *et al*., 2013). Cuadro 9. Por otra parte, Almazán-Becerril *et al.* (2014), reportaron concentraciones promedio de 5.1 μM de DIN y 0.45 de PO_4^{3-} μM en ocho sitios de la zona arrecifal de Puerto Morelos elevando el cociente hasta 11.33, lo que implica una limitación por nitrógeno menor que la reportada en este trabajo. La limitación por nitrógeno no es lo esperado en la zona ya que los sedimentos carbonatados actúan como trampas de fósforo, que se pierde del sistema al quedar inaccesible para los productores primarios. No obstante, a pesar de la

concentración extraordinariamente alta de DIN, es más relevante la igualmente alta concentración de fosfatos, la cual no disminuyó nunca de 1.5 μM.

Cuadro 10. Concentración de nutrientes en los arrecifes de Puerto Morelos reportados por otros autores. Las concentraciones se presentan en μM.

Sitio	DIN	PO_4^{3-}	DIN/PO_4^{3-}	Referencia
Puerto Morelos	2.4	0.6	4.00	Null *et al.* 2012
Puerto Morelos	0.3	0.08	3.75	Hernández-Terrones *et al*. 2011
Puerto Morelos	5.4	0.45	11.33	Almazán-Becerril *et al.* 2014
Isla Contoy	2.96	ND	_	Hernández-Terrones *et al*. 2013

Las altas concentraciones de nutrientes medidos en este trabajo se pueden deber a un evento extraordinario en la zona, que fue el arribo masivo de *Sargassum* a la costa de Quintana Roo (Dreckmann y Sentíes, 2013). Probablemente, la descomposición del sargazo a lo largo de los primeros metros de la línea de costa pudo haber liberado altas cantidades de nutrientes incrementando su concentración de forma episódica. Otra posibilidad es que la concentración de nutrientes en el agua continental que desemboca en la costa haya alcanzado ya estos niveles, aunque no existen estudios suficientes para confirmarlo.

Coberturas de macroalgas

Las coberturas de macroalgas encontradas en los arrecifes coralinos del norte de Quintana Roo oscilaron entre los 50 y 90%, con predominancia del género *Dictyota* en Puerto Morelos y de este género junto con *Halimeda* en Ixlaché. En contraste, *Stypopodium zonale* estuvo presente en los cuatro sitios pero con coberturas menores al 5% además de decenas de especies con presencias marginales. Dos resultados muy importantes en los arrecifes del norte del Caribe Mexicano son 1) la correlación negativa que mantienen las algas coralinas y calcáreas con *Dictyota* y 2) la correlación positiva entre la CT y la cobertura de *Dictyota*. Las algas coralinas costrosas son el grupo funcional de mayor importancia por su papel en la construcción de arrecife mediado por calcificación y junto con las algas calcáreas (Fabricius y De´ath, 2001, Harrinton *et al*., 2004). En Puerto Morelos las algas coralinas presentaron coberturas promedio de 8.56±1.76% y de 3.94±0.69% en Isla Contoy, aunque entre Junio y Julio alcanzaron

valores máximos promedio de entre 10 a 18% en los sitios de Puerto Morelos y de 6.6% en Ixlaché; por su parte, *Halimeda* alcanzó coberturas mayores al 40% en Ixlaché entre Mayo y Junio. Estos incrementos en cobertura, sin embargo, no fueron resultado del crecimiento de las especies de este grupo, sino de la pérdida de cobertura de *Dictyota* y otras algas carnosas.

Por otra parte, la CT se correlacionó positivamente con *Dictyota* en tres de los cuatro sitios, aunque sólo en Jardines y Limones la correlación fue significativa ya que en Bonanza no fue la única alga carnosa dominante. Lo anterior implica que la dinámica de la CT es básicamente la de las algas carnosas siendo *Dictyota* la más importante. Otro punto interesante es la correlación negativa entre las algas calcáreas, representadas principalmente por *Halimeda*, con *Dictyota*. Bonanza es un sitio donde prácticamente se ha perdido la cobertura de coral y en su mayoría está cubierto permanentemente por algas. Aquí la cobertura de *Dictyota* alcanzó niveles del 20% en promedio pero no fue la única especie de alga carnosa. Al parecer, *Dictyota* tiene características que le permiten dominar la comunidad, pero en cuanto pierde cobertura por cualquier causa, inmediatamente hay otras especies cuyo incremento se desarrolla en plazos cortos. En la figura 22, se observa que entre Mayo 7 y mayo 28 su cobertura promedio bajó de 35% a 10%, y en esa misma fecha la cobertura de *Acanthophora* subió a más del 40%. Posteriormente, en Septiembre 2 *Dictyota* disminuyó nuevamente y *Palisada* es la especie que incrementa su cobertura promedio de 25.6%, la mayor en el periodo de estudio para esta especie. Lo anterior podría interpretarse como una forma en que los propágulos de algunas especies esperan alguna oportunidad de espacio para establecerse, lo que implicaría *Palisada* y *Acanthophora*, en este, caso estuvieran generando propágulos permanentemente. Hay varios resultados interesantes concernientes a *Dictyota*: 1) en términos de cobertura es el género dominante; 2) en algunos sitios mantiene correlaciones negativas con *Halimeda* y con las algas coralinas, 3) su cobertura no está correlacionada con los nutrientes, lo que implica que no está limitada por los mismos; y 4) tras eventos en los que disminuye su cobertura drásticamente, recupera la cobertura perdida en menos de un mes. Al parecer, en *Dictyota* se conjuntan varias características biológicas que le permiten tener éxito en los ambientes actuales. Por un lado está su capacidad de producir defensas químicas contra le herbivoría ya que produce hasta 230 metabolitos (Paul *et al.,* 2001), algunos de los cuales disuaden a los herbívoros de

alimentarse de estas especies. Esto sugiere que las pérdidas de abundancia por herbivoría pueden estar entre las más bajas para las algas. Además de ello, pueden crecer de forma epífita sobre algas del género *Halimeda* llegando a cubrir hasta el 50% de su talo (Beach *et al.,* 2003). Esta forma epífita de crecimiento impacta negativamente a *Halimeda* porque atenúa la luz disponible para realizar fotosíntesis, y por lo tanto todos los procesos metabólicos dependientes de ésta (Beach *et al.,* 2003). En Ixlaché este fenómeno de epifitismo sobre *Halimeda* fue notorio. Por otra parte, se ha demostrado su alta capacidad para reproducirse de forma asexual a partir de fragmentos y la rapidez en la que estos fragmentos se adhieren al sustrato (Herren *et al.,* 2006) incrementando sustantivamente su capacidad de colonización. Probablemente, debido a esta capacidad, es que el género es abundante en zonas expuestas al oleaje (Renken *et al.,* 2010), ya que al ser removida continuamente la cobertura de las algas, los propágulos de *Dictyota* serían los que ocuparían más rápidamente ese espacio, recuperando en pocos días la cobertura perdida (Figura 29).

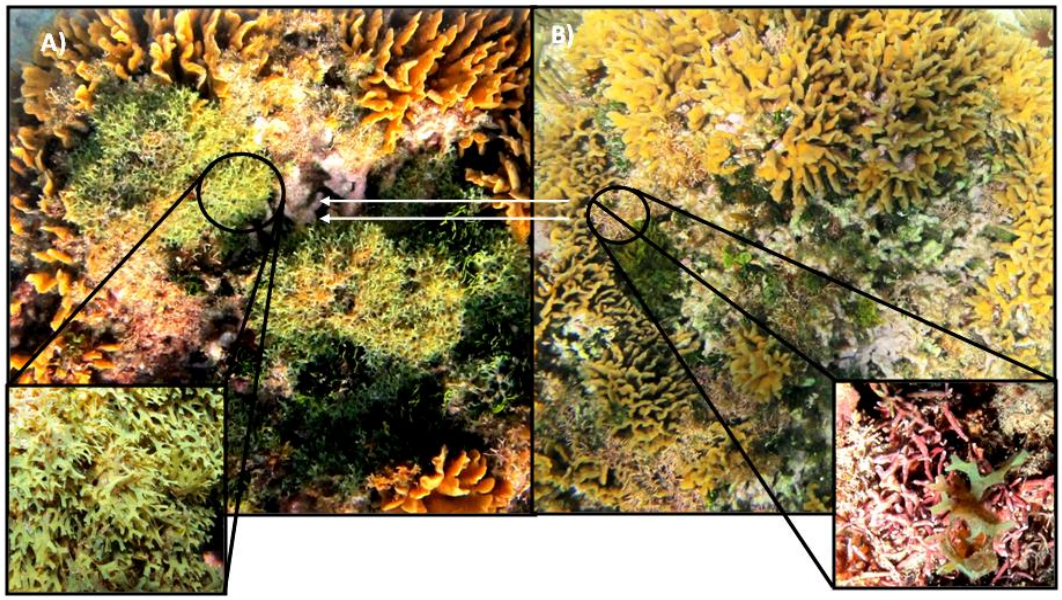


Figura 29. Sobrecrecimiento del género *Dictyota* sobre macroalgas coralinas. Un caso común en estos sitios es la asociación entre el alga coralina *Amphiroa tribulus* y el coral *Agaricia sp*. En la imagen se observa la misma colonia de *Agaricia sp* en Jardines durante Mayo 28 (A) y posteriormente en Junio 18 (B). En el primer caso se observa una amplia cobertura de *Dictyota* creciendo sobre el talo de *Amphiroa*. En la primera semana de Junio se registró uno de los nortes

más fuertes en la zona que eliminó preferentemente a *Dictyota* dejando descubiertos los talos de *Amphiroa*, especie que resiste más la fuerza del oleaje.

Nutrientes y macroalgas

El modelo de Littler y Littler (1984) de la dominancia relativa se consolidó como el paradigma que explicaba el éxito de las algas carnosas en el contexto de las perturbaciones a los ecosistemas coralinos reflejadas en el incremento antropogénico de nutrientes, y la pérdida de herbivoría. En este modelo hay dos escenarios encontrados, por un lado está aquel en el que la tasa alta de herbivoría y la baja concentración de nutrientes limita el crecimiento de las macroalgas, principalmente de las macroalgas carnosas que son sumideros de nutrientes y tienen tasas de crecimiento mayores a las de otros grupos de macroalgas incluyendo calcáreas y coralinas. En contraparte, el escenario opuesto es el colapso de la herbivoría a niveles mínimos conjugada con el incremento considerable de nutrientes que permitiría la colonización masiva del arrecife por parte de las algas carnosas. La bondad del modelo es su simpleza y su capacidad explicativa en base a dos variables relativamente fáciles de medir. Esta hipótesis ha sido revisada críticamente con base en la evidencia empírica disponible por McCook (1999). El autor opina que la alta concentración de nutrientes por sí mismo no promueve un cambio de fase ni considera que exista un límite de nutrientes a partir del cual se pueda hablar de eutrofización. En los resultados obtenidos en este estudio, no se observó ninguna correlación entre los nutrientes y la cobertura de macroalgas, aunque es probable que la cobertura no sea una medida adecuada para observar correlaciones como podría serlo, por ejemplo, la biomasa. No obstante, y en contracorriente de las observaciones de McCook (1999), si se supone que hay un valor umbral de concentración de nutrientes bajo el cual, el crecimiento de las macroalgas este limitado, y suponiendo también que este valor sea de 0.1-0.2 μM para PO_4^{-3} y 1.0 μM para DIN como lo señalan algunos autores (Bell, 1992; Lapointe *et al*., 1993), entonces, el estado de los arrecifes estudiados sería extremadamente vulnerable si las concentraciones de nutrientes reportadas en este trabajo corresponden a valores promedio de la zona, ya que son al menos ocho veces mayores al valor mínimo de DIN y entre 10 y 20 veces mayores para PO_4^{-3}. Lo anterior implicaría que el aumento posterior de la concentración de nutrientes no tendría ningún efecto en los cambios de cobertura o biomasa de las comunidades de macroalgas.

3.5. BIBLIOGRAFÍA

Andras T. D., T. S. Alexander, A. Gahlena., R. M. Parry y F. M. Fernandez (2012) Seaweed allelopathy against coral: surface distribution of seaweed secondary metabolites by imaging mass spectrometry. Journal of Chemical Ecology 38: 1203–1214.

Aronson R. B. y W. F. Precht (2001) White-band disease and the changing face of Caribbean coral reefs. Hydrobiologia 460, 25-38

Baddi, M. H., J. Castillo, J. Landeros y K. Cortez (2009) Papel de la estadística en la investigación científica. M.H. Badii & J.Castillo (eds). Desarrollo Sustentable: Métodos, Aplicaciones y Perspectivas. UANL. Monterrey. . 1-43.

Barott K. L., B. Rodriguez-Mueller., M. K. L. Youle - Marhaver y M. J. A. Vermeij (2011) Microbial to reef scale interactions between the reef-building coral Montastrea annularis and benthic algae. Proceedings of the Royal Socienty London B: Biological Sciences 279; 1655–1664.

Beach, K. S., y C. M. Smith (1997) Ecophysiology of a tropical Rhodophyta III: Recovery from emersion stresses in Ahnfeltiopsis concinna (J. Ag.) Silva et DeCew. Journal of experimental marine biology and ecology, 211 (2); 151-167.

Beach, K., L. Walters., H. Borgeas., C. Smith., J. Coyer y P. Vroom (2003) The impact of Dictyota s. on Halimeda populations of conch reef, Florida Keys. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 297 (2); 141-159.

Bell, P. R. F. (1992). Eutrophication and coral reefs—some examples in the Great Barrier Reef lagoon. *Water Research*, *26*(5); 553-568.

Bellwood, D. R., T. P. Hughes., C. Folke y M. Nyström (2004). Confronting the coral reef crisis. Nature, *429*(6994), 827-833.

Bennett, S., T. Wernberg., E. S. Harvey., J. Santana-Garcon y B. J. Saunders (2015). Tropical herbivores provide resilience to a climate-mediated phase shift on temperate reefs. Ecology Letters, *18*(7); 714-723.

Birkeland, C. (1987). Nutrient availability as a major determination of differences among coastal hard-substratum communities in different regions of the tropics (ed.), Comparison between Atlantic and Pacific Tropical Coastal Systems., United Nations Educational, Scientific and Cultural Organizations Reports in Marine Science 46; 1-26.

Birrell C. L., L. J. McCook., B. L. Willis y G. A. Diaz-Pulido (2008) Effects of benthic algae on the replenishment of corals and the implications for the resilience of corals. Oceanography and Marine Biology: an Annual Review 46; 25–64.

Bischoff-Bäsmann, B. (1997) Temperature requirements and biogeography of marine macroalgae-adaptation of marine macroalgae to low temperatures. Rep Polar Res, *245*; 134.

Björklund, M., A. Semesi., S. M. Mohammed y M. Björk (1995) Coralline algae, important coral-reef builders threatened by pollution. 1-10

Box, S. J., y P. J. Mumby (2007) Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals. Marine Ecology Progress Series, 342, 139-149.

Breeman, A. M. (1988). Relative importance of temperature and other factors in determining geographic boundaries of seaweeds: experimental and phenological evidence. *Helgoländer Meeresuntersuchungen*, *42*(2), 199-241.

Coronado, C., J. Candela., R. Iglesias-Prieto., J. Sheinbaum., M. Lopez y F. J. Ocampo-Torres (2007) On the circulation in the Puerto Morelos fringing reef lagoon. Coral Reefs, 26(1); 149-163.

Costa Jr, O. S., Z. M. A. N. Leao., M. Nimmo y M. J. Attrill (2000) Nutrification impacts on coral reefs from northern Bahia, Brazil. In Island, Ocean and Deep-Sea Biology. 307-315.

Diaz-Pulido, G. y L. J. McCook (2005) Effects of nutrient enhancement on the fecundity of a coral reef macroalga. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 317(1); 13-24.

Dollar, S. J. y R. W. Grigg (2004) Anthropogenic and natural stresses on selected coral reefs in Hawaii: a multidecade synthesis of impact and recovery. Pacific Science 58 (2); 281-304

Dreckmann, K. M. y A. Senties (2013) Las arribazones de algas marinas en el caribe Mexicano: Evento biológico natura o basura en las playas. CONABIO. Biodiversitas, 107; 7 – 11

Eggert, A. (2012). Seaweed responses to temperature. In Seaweed biology Springer Berlin Heidelberg. . 47- 66

Enriquez, C., I. J., Mariño-Tapia y J. A. Herrera-Silveira (2010) Dispersion in the Yucatan coastal zone: Implications for red tide events. Continental Shelf Research, 30(2); 127-137.

Ezer, T., D. V. Thattai., B. Kjerfve y W. D. Heyman (2005) On the variability of the flow along the Meso-American Barrier Reef system: a numerical model study of the influence of the Caribbean current and eddies. Ocean Dynamics, 55 (5-6); 458-475.

Fabricius, K. y G. De'Ath (2001) Environmental factors associated with the spatial distribution of crustose coralline algae on the Great Barrier Reef. Coral Reefs, 19(4); 303-309.

Fabricius, K. E. (2005) Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. Marine Pollution Bulletin, v. 50, n. 2; 119-235

Fonseca, A. C., E. Salas y J. Cortés (2006). Monitoreo del arrecife coralino Meager Shoal, Parque Nacional Cahuita, Costa Rica (sitio CARICOMP).Revista de biología tropical, 54 (3); 755-763.

Guzmán, H. M. y C. A. Guevara (2001) Arrecifes coralinos de Bocas del Toro, Panamá: IV. Distribución, estructura y estado de conservación de los arrecifes continentales de Península Valiente. Revista de Biología Tropical, 49 (1); 53-66.

Hatcher, B. G., & Larkum, A. W. D. (1983) An experimental analysis of factors controlling the standing crop of the epilithic algal community on a coral reef. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 69 (1); 61-84.

Hatcher, B. G. (1990) Coral reef primary productivity: A hierarchy of pattern and process. Trends. Ecology. Evolution. 5; 149-155.

Hernández-Terrones, L., M. Rebolledo-Vieyra., M. Merino-Ibarra., M., Soto, A. Le-Cossec, y E. Monroy-Ríos (2011) Groundwater pollution in a karstic region (NE Yucatan): Baseline nutrient content and flux to coastal ecosystems.Water, Air, & Soil Pollution, 218(1- 4); 517-528.

Herren, L. W., L. J. Walters y K. S. Beach (2006) Fragment generation, survival, and attachment of Dictyota s. at Conch Reef in the Florida Keys, USA. Coral Reefs, 25(2); 287-295.

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.

Hughes, T. P. (1989) Community structure and diversity of coral reefs: the role of history. Ecology, *70*(1); 275-279.

Hughes, T. P. (1994) Catastrophes, phase shifts, and large – scale degradation of a Caribbean Coral Reef. Science, 265; 1547 – 1551.

Kaehler, S. y G. A. Williams (1998) Early development of algal assemblages under different regimes of physical and biotic factors on a seasonal tropical rocky shore. Marine. Ecology. Program. Series. 172; 61 – 71.

Knowlton, N. (1992) Umbrales y múltiples estados estables en la dinámica de la comunidad de arrecifes de coral. Americana Zoólogo 32; 674 - 682.

Kuffner I. B, L. J. Walters., M. A. Becerro., V. J. Paul y R. Ritson - Williams (2006) Inhibition of coral recruitment by macroalgae and cyanobacteria. Marine Ecology Progress Series 323; 107–117

Lapointe, B. E. (1997) Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms and coral reefs. Limnology. Oceanographic, 44; 1586-1592.

Lapointe, B. E., P. J. Barile y W. R. Matzie (2004). Anthropogenic nutrient enrichment of seagrass and coral reef communities in the Lower Florida Keys: discrimination of local versus regional nitrogen sources. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 308(1); 23-58.

Lapointe, B. E., P. J. Barile., C. S. Entsch, M. M., Littler., D. S. Littler y B. Karuk (2004) The relative importance of nutrient enrichment and herbivory on macroalgal communities near Norman's Pond Cay, Exumas Cays, Bahamas: a “natural” enrichment experiment. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 298(2); 275-301.

Lapointe, B. E., M. M., Littler y D. S. Littler (1987) A comparison of nutrient-limited productivity in macroalgae from a Caribbean barrier reef and from a mangrove ecosystem. Aquatic Botany, *28*(3-4); 243-255.

Larned, S. T. (1998) Nitrogen-versus phosphorus-limited growth and sources of nutrients for coral reef macroalgae. *Marine Biology*, *132*(3), 409-421.

Larned, S. T., y J. Stimson (1996) Nitrogen-limited growth in the coral reef Chlorophyta Dictyosphaeria cavernosa, and the effect of exposure to sediment-derived nitrogen on growth. Marine Ecology Progress Series, *145*(1); 95-108.

Ledlie, M. H., N. A. J. Graham, , J. C. Bythell S. K. Wilson., S. Jennings., N. V. C., Polunin y J. Hardcastle (2007) Phase shifts and the role of herbivory in the resilience of coral reefs. Coral Reefs, *26*(3); 641-653.

Lirman, D. (2001) Competition between macroalgae and corals: effects of hervibore exclusion and increased algal biomass on coral survivorship and growth. Coral Reefs 19; 392-399

Littler M. M., D. S. Littler y B. L. Brooks (2010) the effects of nitrogen and phosphorus enrichment on algal community development: artificial mini reefs on the Belize Barrier Reef sedimentary lagoon. Harmful Algae 9; 255–263

Littler, M. M., D. S. Littler y B. L. Brooks (2006) Harmful algae on tropical coral reefs: bottom-up eutrophication and top-down herbivory. *Harmful algae*,*5*(5), 565-585.

Littler, M. M., D. S. E. A. Littler y Titlyanov (1991) Comparisons of N-and P-limited productivity between high granitic islands versus low carbonate atolls in the Seychelles Archipelago: a test of the relative-dominance paradigm. Coral Reefs, *10*(4); 199-209.

Littler, M. M. y D. S. Littler (1984) Relationships between macroalgal functional form groups and substrata stability in a subtropical rocky-intertidal system. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 74; 13-34.

McClanahan, T., N. Polunin y T. Done (2002) Ecological states and the resilience of coral reef. Conservation ecology 6(2); 18

McConnaughey T. A., W. H. Adey y A. M. Small (2000) Community and environmental influences on reef coral calcification. Limnology. Oceanographic. 45(7); 667- 671.

McCook L. J. (1999) Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef. Coral Reefs 18: 357–367.

McCook L. J., J. Jompa y G. Diaz-Pulido (2001) Competition between corals and algae on coral reefs: a review of evidence and mechanisms. Coral Reefs 19; 400 – 417.

McCook, L. J. (1999). Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef. Coral reefs, 18(4); 357-367.

McCook, L., J. Jompa y G. Díaz-Pulido. 2001. Competition between corals and algae on coral reefs: A review of evidence and mechanisms. Coral Reefs, 19: 400-417.

Nugues M. M., G. W. Smith., R. J. Hooidonk., M. I. Seabra y R. P. M. Bak (2004) Algal contacts as a trigger for coral disease. Ecology Letters 7; 919–923.

Null, K. A., K. L Knee., E. D. Crook., N. R. de Sieyes, M. Rebolledo-Vieyra., L. Hernández-Terrones y A. Paytan (2014) Composition and fluxes of submarine groundwater along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula. Continental Shelf Research, 77; 38-50.

Ormond, R. F y J. A. Banaimoum (1994) Ecology of intertidal macroalgal assemblages on the Hadramout coast of Southern Yemen an area of seasonal upwelling. Marine. Ecology. Program. Series., 105; 105 - 120.

Pakker, H., Breeman, A. M., Prud'homme van., W. F. Reine y C. Hock, (1995) A comparative study of temperature responses of Caribbean seaweeds from different biogeographic groups1.*Journal of Phycology*, *31*(4); 499-507.

Paul, V.J., E. Cruz-Rivera, y R.W. Thacker (2001) Chemical mediation of macroalgal-herbivore interactions: ecological and evolutionary perspectives. In: McClintock, J., Baker, W. (Eds.), Marine Chemical Ecology. CRC Press, Boca Raton. . 227–265

Rasher D. B. y M. E. Hay (2010) Chemically rich macroalgae poison coral when not controlled by herbivores. Proceedings of the National Academy of Sciences 107: 9683–9688.

Rasher DB, Stout EP, Engel S, Kubanek J, Hay ME (2011) Macroalgal terpenes function as allelopathic agents against coral reefs. Proceedings of the National Academy of Sciences 108: 17726–17731.

Renken H., P.J. Mumby., I. Matsikis y H. J. Edwards (2010) Effects of physical environmental conditions on the patch dynamics of Dictyota pulchella and Lobophora variegata on Caribbean coral reefs. Marine ecology. Progress series, 403, 63-74.

Schaffelke, B. (1999). Short-term nutrient pulses as tools to assess responses of coral reef macroalgae to enhanced nutrient availability. Marine ecology. Progress series, 182, 305-310.

Schaffelke, B. B y D. D Klum (1998) Nutrient-limited growth of the coral reef macroalga Sargassum baccularia and experimental growth enhancement by nutrient addition in continuous flow culture. Marine Ecology Progress Series-pages: 164; 199-211.

Schaffelke, B., J. Mellors y N. C. Duke (2005) Water quality in the Great Barrier Reef region: responses of mangrove, seagrass and macroalgal communities. *Marine Pollution Bulletin*, *51*(1); 279-296.

Schneider, C. W. y R. B. Searles (1998) Notes on the marine algae of the Bermudas. 3. Avrainvillea sylvearleae, Discosporangium mesarthrocarpum, and Peyssonnelia valentinii. Journal of phycology, 34 (1); 180-188.

Smith J. E., M. Shaw., R. A. Edwards., D. Obura y O. Pantos (2006) Indirect effects of algae on coral: algae-mediated, microbe-induced coral mortality. Ecology Letters 9; 835–845.

Smith, J., C. Smith, y C. Hunter (2001) An experimental analysis of the effects of herbivory and nutrient enrichment on benthic community dynamics on a Hawaiian reef. Coral Reefs, 19 (4); 332-342.

Sotka E. E. y M. E. Hay (2009) Effects of herbivores, nutrient enrichment, and their interactions on macroalgal proliferation and coral growth. Coral Reefs 28:555–568

Steller, D. L., J. M. Hernández-Ayón., R. Riosmena-Rodríguez., y A. Cabello-Pasini (2007) Efecto de la temperatura sobre las tasas de fotosíntesis, crecimiento y calcificación del alga coralina de vida libre *Lithophyllum margaritae*. *Ciencias marinas*, *33*(4); 441-456.

Stimson, J., S. Larned y K. McDermid (1996) Seasonal growth of the coral reef macroalga Dictyosphaeria cavernosa (Forskål) Børgesen and the effects of nutrient availability, temperature and herbivory on growth rate. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 196(1); 53-77.

Stoddart, D. R. (1969) Ecology and morphology of recent coral reefs. Biological Reviews, 44(4); 433-498.

Szmant, A. M. (2001) Why are coral reefs world-wide becoming overgrown by algae? Algae, algae everywhere, and nowhere a bite to eat. Coral Reefs, 19; 299-302.

Szmant, A. M (2002) Nutrient enrichment on coral reefs: Is it ea major cause of coral reef decline? *Estuaries*, 25(4b); 743-766.

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; 151 –168.

Thacker, R., D. Ginsburg y V. Paul (2001) Effects of herbivore exclusion and nutrient enrichment on coral reef macroalgae and cyanobacteria. Coral reefs, *19*(4); 318-329.

Titlyanov E. A., I. I. Yakovleva y T. V. Titlyanova (2007) Interaction between benthic algae (Lyngbya bouilonii, Dictyota dichtoma) and scleractinian coral Porites lutea in direct contact. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 342; 282–291.

Vega-Sequeda, J., A. Rodríguez-Ramírez., M. C. Reyes-Nivia., y R. Navas-Camacho (2008) Formaciones coralinas del área de Santa Marta: estado y patrones de distribución espacial de la comunidad bentónica. Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-INVEMAR, 37(2); 87-105.

Vermeij M. J. A., I. van Moorselaar., S. Engelhard., C. Heornlein., S. M. Vonk y P. M. Visser (2010) The effects of nutrient enrichment and herbivore abundance on the ability of turf algae to overgrow coral in the Caribbean. PLoS One 5; 14312.

Vermeij, M. J. A., M. L. Dailer, y C. M. Smith (2009) Nutrient enrichment promotes survival and dispersal of drifting fragments in an invasive tropical macroalga. Coral reefs, 28(2); 429-435.

Wilkinson, C. (2000) Status of coral reefs of the world: 2000. Australian Institute of Marine Science, Cape Ferguson and Dampier. P 363

Williams, S. L. y R. C. Carpenter (1997) Grazing effects on nitrogen fixation in coral reef algal turfs. Marine. Biology., 120; 223-231.

Yarish, C., A. M. Breeman y C. Van den Hoek (1986) Survival strategies and temperature responses of seaweeds belonging to different biogeographic distribution groups. Botanica marina, 29 (3); 215-230.

CAPÍTULO IV. PATRONES DE COLONIZACIÓN Y SUCESIÓN DE LAS COMUNIDADES DE MACROALGAS EN LOS ARRECIFES DE LA COSTA NORTE DE QUINTANA ROO.

4.1. INTRODUCCIÓN

El termino sucesión representa uno de los conceptos fundamentales en ecología que hace referencia a los cambios que se producen en la composición y estructura de las comunidades después de una perturbación en un medio determinado (Fisher, 1990). Existen dos tipos de sucesión: la que se observa en un sitio en el que nunca antes había habido ninguna comunidad establecida, también llamada sucesión primaria; y la sucesión secundaria que tiene lugar después de que se ha removido por cualquier evento o perturbación, a las comunidades previamente establecidas. En la visión de la escuela de la ecología del equilibrio, sustentada en los conceptos del superorganismo de Clements (1916) y del ecosistema maduro de Odum (1969), la sucesión se concibe como secuencia de asociaciones de especies. Esta sucesión no sería aleatoria, sino que las asociaciones de especies de estadios tempranos tendrían la capacidad de modificar el ambiente de tal forma que permitieran el establecimiento de las asociaciones posteriores (MacArthur y Connell, 1966). Según esta visión, la sucesión es direccional y concluye con la combinación de especies mejor adaptada al conjunto de características climáticas de una región determinada y se le conoce como comunidad clímax (Clements, 1916). En contraposición a esta visión la escuela del no equilibrio (Gleason, 1926, Drury y Nisbet, 1973) postula que no existe ninguna secuencia direccional en la sucesión hacia una asociación mejor adaptada de especies, sino que las asociaciones sólo se conforman por especies no necesariamente relacionadas, cada cual tratando de sobrevivir en un ambiente cambiante e imprevisible. Así, el resultado final de la composición taxonómica depende de las adaptaciones particulares de cada especie creciendo de forma diferencial en diferentes puntos a lo largo de gradientes ambientales (Gleason, 1927). Actualmente se acepta que los disturbios ambientales presentes en diferentes escalas temporales afectan de forma diferencial a las comunidades biológicas modificando la abundancia y composición de especies (Ives y Carpenter, 2007). Por lo mismo, los estudios actuales sobre sucesión se enfocado en la determinación de los efectos que controlan y dan estructura a las comunidades biológicas.

Las comunidades de macroalgas en los arrecifes coralinos tienen un papel funcional fundamental como productoras primarias y calcificadoras en estos ecosistemas. Sin embargo, a partir del deterioro de los sistemas arrecifales, otros grupos de algas han prosperado y se han vuelto proporcionalmente más abundantes cambiando la estructura de la comunidad y probablemente modificando su función en el arrecife. El alto porcentaje de cobertura que presentan estas nuevas especies dominantes implica que los factores que las controlaban dejaron de existir o se alteraron. Por ello, el estudio de la sucesión en la comunidad de macroalgas de los arrecifes coralinos se ha enfocado en los efectos de la herbivoría (Hixon y Brostoff, 1996; McClanahan, 1997; Burkepile y Hay, 2010; Ceccarelli *et al.,* 2011), los sedimentos alóctonos (McClanahan, 1997) y nutrientes inorgánicos (Thacker *et al.,* 2001, Lapointe *et al.,* 2005; McClanahan *et al.,* 2007). Teóricamente la trayectoria de sucesión de macroalgas en los arrecifes de coral comienza con una película de microalgas, principalmente cianobacterias; posteriormente aparecen los tapetes de macroalgas filamentosas y coralinas incrustantes, seguidos por las algas corticales, macroalgas carnosas y calcáreas (McClanahan *et al.,* 2001; Díaz-Pulido y McCook, 2002; Díaz-Pulido *et al.,* 2007). No obstante, la composición taxonómica de las comunidades de macroalgas en estadios tardíos de sucesión depende de la intensidad, y frecuencia de los factores mencionados anteriormente. En los arrecifes objeto de este trabajo, las comunidades de algas tienen algunas coincidencias en cuanto a la presencia de especies comunes, aunque no se pueden considerar semejantes. Por ejemplo, en Ixlaché la abundancia de Halimeda opuntia es la mayor de cualquier otro sitio, mientras que Bonanza es el arrecife más diverso donde se observaron picos poblacionales de *Acanthophora* y *Palisada* que no estuvieron en algún otro sitio, además de detectarse presencia importante de especies no compartidas como *Euchema isiformis* y *Turbinaria turbinata*. Por su parte, Jardines fue, con mucho, el sitio con mayor presencia de coralinas incrustantes. Si todos los sitios de estudio están influenciados por los mismos fenómenos regionales, entonces, la estructura de la comunidad en cada sitio se deberá a procesos de origen local, lo cual, será posible determinar a partir del registro de los eventos de sucesión primaria. La hipótesis de trabajo es que si se expone un sustrato descubierto, adyacente a las camas de macroalgas de las crestas arrecifales, éste reflejará al cabo de un tiempo corto, 3-5 meses, la misma estructura de la comunidad de macroalgas circundante.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para entender el proceso de los patrones de colonización de las macroalgas se realizaron experimentos *in-situ*. Es decir se colocaron sustratos artificiales en forma rectangular de 0.25 m^2. Para el diseño de esta plataforma utilizaron tubos de PVC de 1/2 pulgada de 50 cm de largo que se unieron con codos de un ángulo de 90 grados para formar un cuadrante de 0.25 m^2. Este cuadrante se cubrió con una malla de plástico de alta-densidad de polietileno polipropileno (5 cm de tamaño de malla) para evitar la contaminación por metales que podrían influir en el crecimiento y colonización de las macroalgas (Ferrari *et al.,* 2012). Finalmente, se le colocó una capa de carbonato de calcio cristalizado en forma de aragonito ($CaCO_3$) para simular la estructura calcárea de un coral. Para fijar los cuadrantes en la zona de muestreo se diseñó un método de anclaje que permitió que las placas se queden fijas en el lugar. A cada cuadrante se le colocaron armellas cerrada para sujetar los cuadrantes/placas (Figura 30).

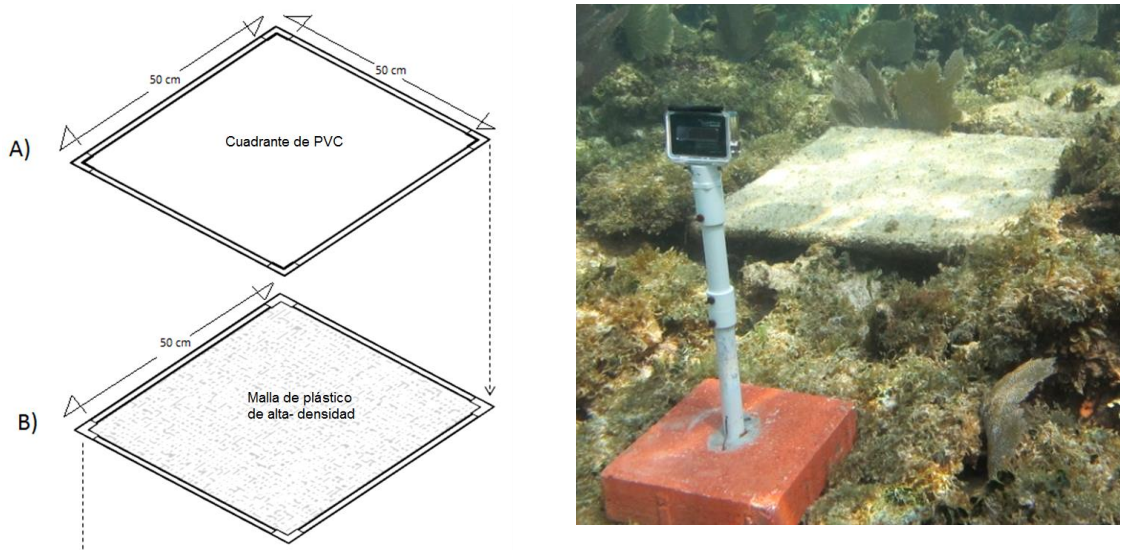


Figura 30. Diseño de los placas colocadas en los arrecifes de Puerto Morelos e Isla Contoy. A) diseño del cuadrante, B) recubrimiento de cuadrante con una malla plásticas, recubierto con carbonato de calcio.

En los sitios de Puerto Morelos (Limones, Bonanza y Jardines) e Isla Contoy (Ixlaché) se colocaron 24 placas (6 por sitio) con el fin de tener réplicas. Se tomaron datos cada 20 días registrando coberturas y especies de macroalgas presentes en el cuadrante, también se tomarán datos de espesor del sedimento. Para identificar las especies se tomaron muestras del sustrato para ver las especies de macroalgas que colonizaban las placas. Para registrar datos sobre el proceso de herbivoría se tomó película de un cuadrante en cada uno de los sitios durante una hora en secciones de 5 minutos en cada muestreo. La cámara se colocó de tal manera que cubriera toda la superficie del cuadrante.

Se registraron todas las especies observadas durante el periodo de muestreo en los cuatro sitios de estudio para determinar la evolución de la riqueza de especies por cada fecha de muestreo. Además, estas especies se clasificaron por grupo funcional para determinar si existe una secuencia de sustitución a lo largo del periodo de estudio. La determinación e identificación de las especies de macroalgas colectadas en las placas experimentales se uso las claves taxonómicas descritas en el capítulo II.

4.3. Análisis de Similitud

Teóricamente, si la sucesión sigue un trayectoria de sustitución de grupos de especies, entonces la composición de especies presentes sobre las placas en cada muestreo se parecerá más entre sí que las combinaciones de especies observadas en cualquier otro muestreo realizado antes o después. Así, la composición de especies de cada muestreo formará un grupo diferenciable de los demás muestreos que podrá ser detectado mediante un análisis de conglomerados.

Para determinar la trayectoria de sucesión en las placas experimentales se realizó un análisis de similitud a partir de una matriz de valores del índice de Sørensen. Este índice relaciona el número de especies en común con respecto a todas las especies encontradas en dos sitios y toma valores de 0 (cuando en dos sitios no hay especies en común) a 1 (cuando los sitios tienen comparten todas las especies). De esta forma se obtuvo una matriz de 54 x 54 (6 réplicas x 9 muestreos) en cada sitio. La ecuación para obtener el índice de Sørensen se define de la siguiente forma:

$$QS = \frac{2C}{A+B} = \frac{2|A \cap B|}{|A| + |B|}$$ **Ecuación 3.**

Donde

A ∩ B es el número de especies en las muestras A y B, respectivamente.

QS: Cociente de similitud que varía de 0 a 1.

Los valores del el índice de similitud de Sørensen se calcularon con el programa estadístico EstimasteS versión 9.1.0. La matriz generada se utilizó para realizar análisis de conglomerado con Statistica utilizando el método de ligamiento simple.

4.4. RESULTADOS

Especies de macroalgas

Se registraron 56 taxa de macroalgas totales considerando los cuatro sitios arrecifales durante el periodo de colonización de 9 meses, de las cuales 41 especies pertenecen a la División Rhodophyta, 11 a Chlorophyta y 4 a Phaeophyta (Cuadro 8).

Cuadro 11. Especies de macroalgas identificadas sobre la superficie de las placas colocadas en los sitios arrecifales de Puerto Morelos e Isla Contoy.

Especies de macroalgas	**Puerto Morelos**			**Isla Contoy**
	Limones	**Bonanza**	**Jardines**	**Ixlaché**
Coralinas				
Amphiroa brasiliana		**x**	**x**	
Amphiroa rigida	**x**	**x**		
Amphiroa fragilissima		**x**	**x**	**x**
Antithamnion s	**x**	**x**		
Hydrolithon s	**x**	**x**		**x**
Jania fragilissima	**x**	**x**		
Jania pumila		**x**	**x**	
Jania sp		**x**	**x**	**x**

Titanoderma sp	x		x	x
Peyssonnelia sp	x		x	x
Mesophyllum sp	x		x	
Galaxaura sp	x	x	x	
Carnosas				
Anotrichium tenue		x		
Brythamnion triquetrum		x		
Callithamnion sp		x		
Centroceras clavulatum		x		
Ceramium flaccidum		x	x	
Ceramium sp		x	x	
Chondria cf. littoralis		x		
Chondria sp		x		x
Dasya acellata		x	x	
Dasya sp	x	x		
Gelidiella s	x	x	x	
Gelidiopsis s		x	x	x
Gelidium pusillum			x	
Gelidium sp	x	x		x
Gracilaria cervicornis		x		
Gracilaria s		x		
Hypnea musciformis	x	x	x	
Hypnea sp	x	x	x	
Laurencia intricata			x	
Laurencia sp	x		x	
Laurencia sp 1			x	
Liagora farinosa	x			

Liagora mucosa	x			
Wrangelia argus	x	x	x	
Acetabularia calyculus			x	
Dictyosphaeria cabernosa			x	
Bryopsis				x
Cladophoropsis sp				x
Neomeris annulata		x		x
Ulva sp		x		
Dictyota s	x	x	x	x
Padina sanctae-crusis			x	x
Sphacelaria sp	x	x	x	x
Stypopodium zonolae	x		x	
Carnosas epifitas				
Heterosiphonia s	x	x		x
Polysiphonia cf. flaccidissima		x	x	x
Spyridia cf. filamentosa	x	x		x
Spyridia sp		x	x	
Centroceras s	x		x	x
Chaetomorpha sp	x	x	x	x
Enteromorpha sp		x	x	x
Calcáreas				
Halimeda sp	x			x
Rhipocephalus sp	x	x	x	
Penicillus dumetosus			x	

Evolución de la riqueza de especies

El número máximo de especies registradas (sin contar a las cianobacterias) fue de 19 en una placa de Jardines en M4 (Junio), mientras que una especie fue el registro mínimo que se observó en diferentes sitios y en distintas fechas. Jardines tuvo consistentemente el mayor número de especies en promedio durante todo el periodo con excepción de los dos muestreos de Mayo (M1 y M2), en que Limones tuvo el mayor promedio de especies. En Agosto se siguió observando un número alto de especies en Jardines pero en Limones y Bonanza este valor alcanzó el máximo para todo el periodo con 5 y 7 especies promedio respectivamente. Por su parte, en Ixlaché el registro de especies en las placas fue consistentemente el más bajo de los cuatro sitios, sin pasar de 4 especies en promedio. (Figura 31)

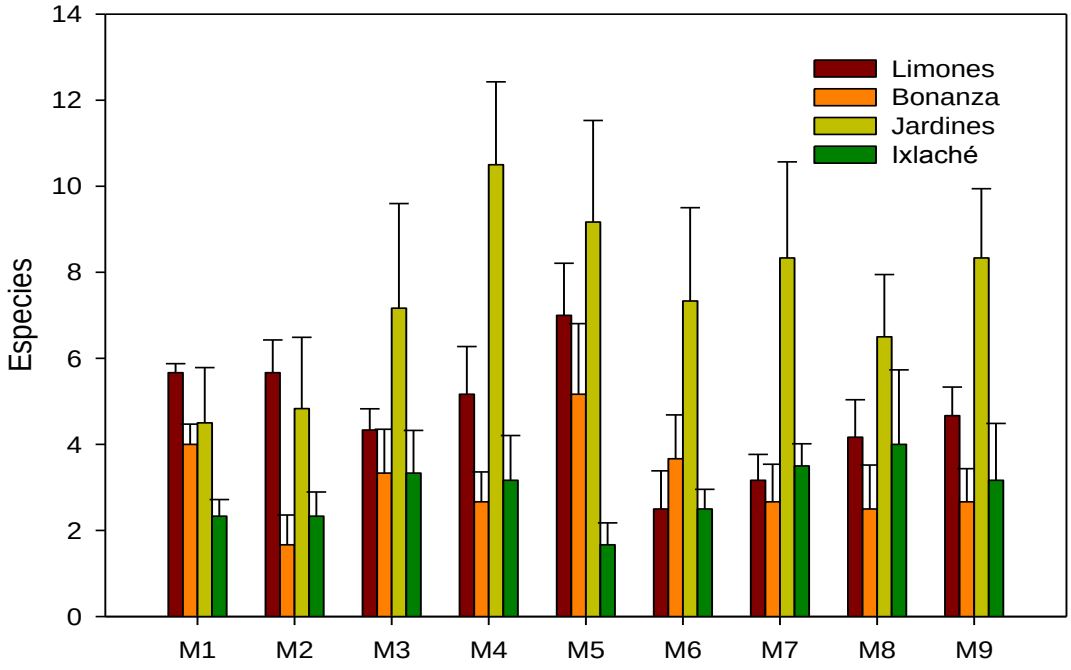


Figura 31. Riqueza promedio total de especie de macroalgas encontradas en cada sitio de muestreo.

Sucesión de grupos funcionales

En la figura 32, se presentan los porcentajes promedio del número de especies en cada grupo funcional de macroalgas. Si se suma la contribución de las epífitas, que en su mayoría son carnosas, serían estas el grupo más numeroso en todos los sitios, aunque en Jardines las especies coralinas llegaron a contribuir hasta con el 50% en algunos meses. Las algas calcáreas fueron las menos representadas en todos los sitios y en algunas fechas no se observaron en las placas. En Ixlaché hubo cambios muy notables en la contribución de cada grupo funcional entre fechas de muestreo. Por ejemplo, en M1 casi el 80% de la contribución provino de las algas coralinas, mientras que en M8 el 90% son especies carnosas.

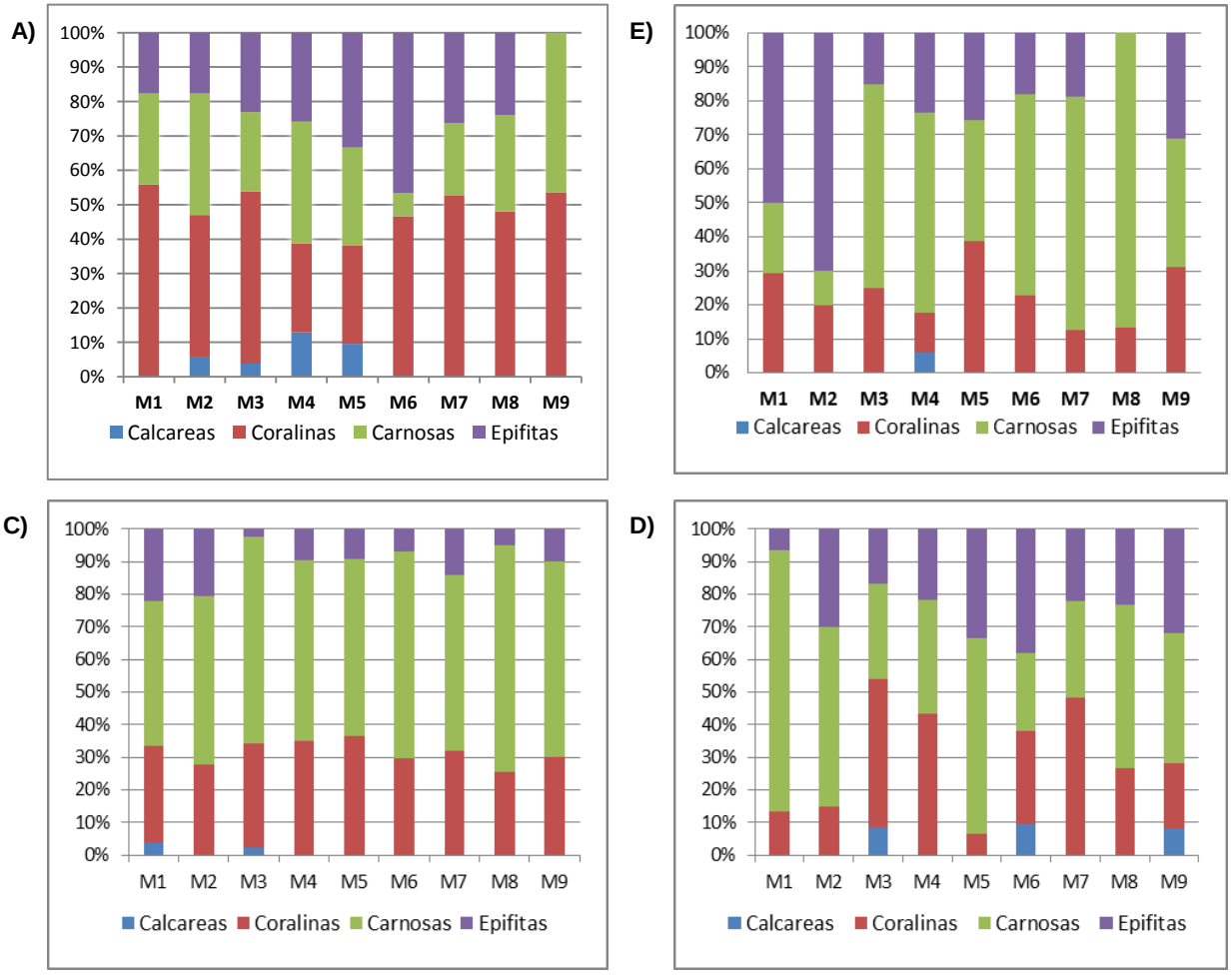


Figura 32. Porcentaje de ocupación de las especies de macroalgas en las 4 zonas arrecifales de Caribe Mexicano. A) Limones, B) Bonanza, C) Jardines e D) Ixlaché.

4.5. Análisis de similitud

En los dendogramas de las figuras 33 y 34, correspondientes a cada uno de los sitios de trabajo no se observó ningún patrón de sustitución de grupos de especies por otros. Aunque se alcanzan a formar algunos *clusters* bien diferenciados en todos los dendogramas, estos se conforman por placas provenientes de diferentes fechas de muestreo. Sólo en Ixlaché hay un poco de consistencia en cuanto a que hasta tres placas del mismo muestreo llegan a agruparse, pero no en la secuencia esperada.

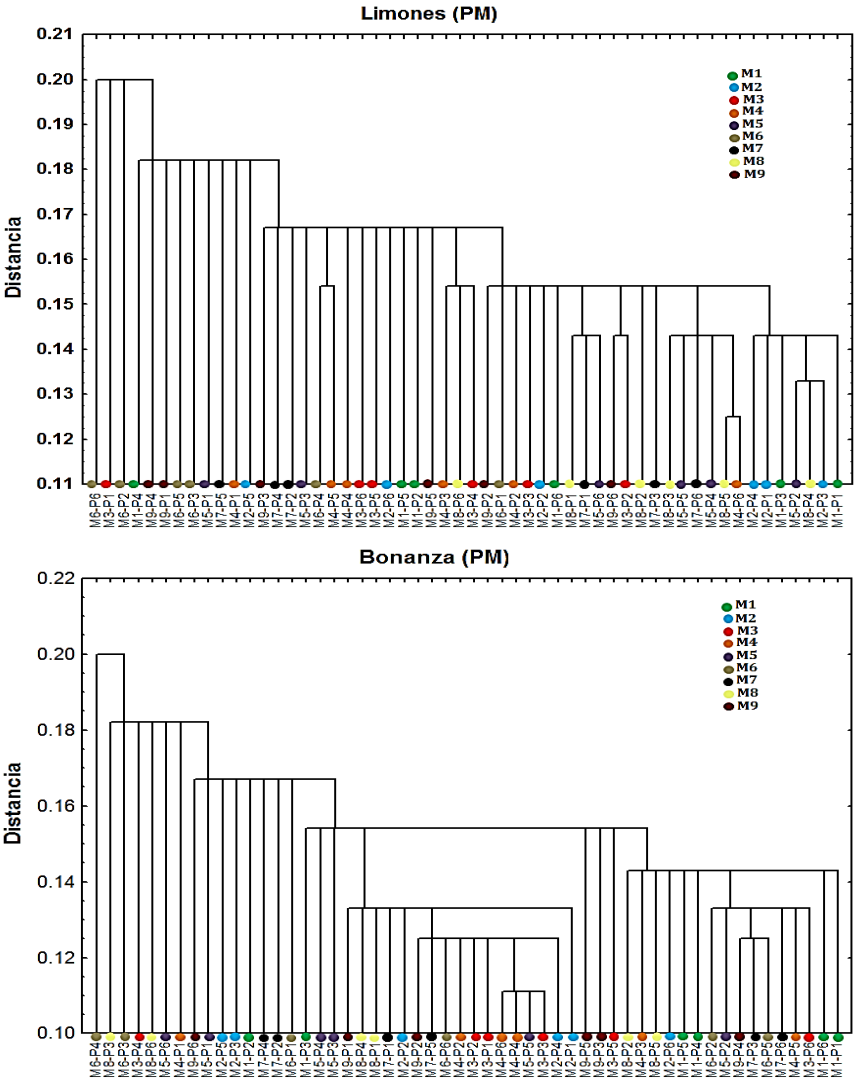


Figura 33. Análisis de conglomerados de las especies registradas en las placas de Limones y Bonanza.

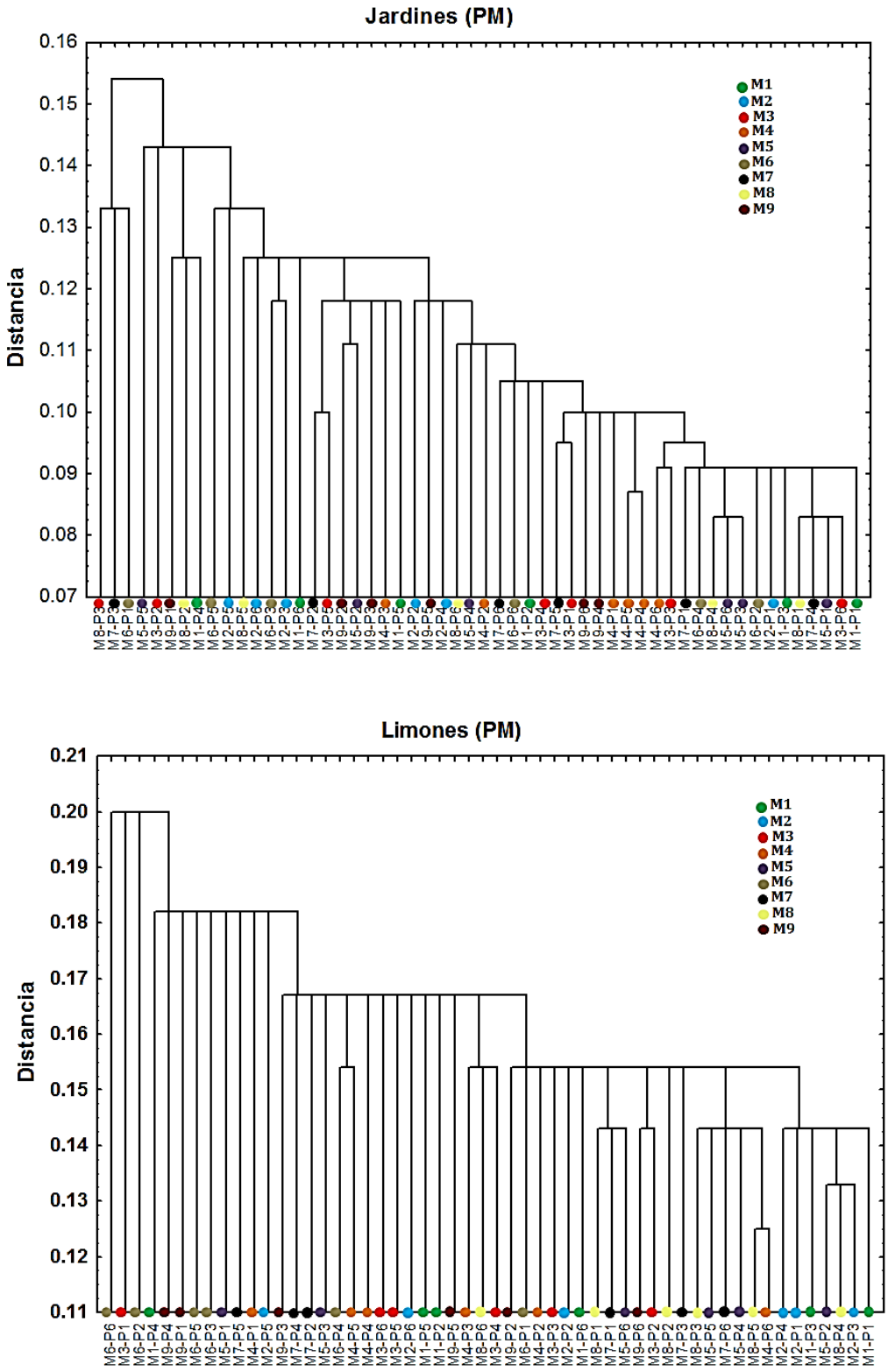


Figura 34. Análisis de conglomerados de las especies registradas en las placas de jardines e Ixlaché.

4.6. DISCUSIÓN

Los resultados de este trabajo mostraron que no hubo ningún patrón de sucesión en las placas experimentales en ninguno de los sitios estudiados. Teóricamente la trayectoria de sucesión de macroalgas comienza con una película de microalgas (cianobacterias); macroalgas filamentosas y coralinas incrustantes, seguidos por las algas corticales, calcáreas y finalmente las macroalgas pardas carnosas (McClanahan et al., 2001; Díaz-Pulido y McCook, 2002; Díaz-Pulido et al., 2007). Las causas por las cuales no se pudo haber observado este patrón son de origen biótico y abiótico.

Factores abióticos

Uno de los factores que se ha detectado que juegan un papel importante en el éxito de las macroalgas es el sedimento. La dinámica de este elemento está ligada a factores hidrodinámicos pero también a la presencia de las comunidades de macroalgas establecidas en los arrecifes coralinos. Mientras que altas cargas de sedimento puede sofocar a las algas (Adey y Goertemiller, 1987), también se ha hipotetizado que el propio talo del alga es su vez, una trampas de sedimento que sería utilizado por el alga para extraer el fósforo adsorbido en ellos (Enstch *et al.,* 1983). De hecho, Purcell (2000) encontró una correlación positiva entre la altura de las macroalgas y la carga de sedimento. Sin embargo, en estadios de sucesión temprana, los sedimentos impiden la fijación y desarrollo de los propágulos de algas epilíticas y coralinas incrustantes, y favorecen la formación de turf (McClanahan, 1997). Por ello, las oportunidades de establecimiento de las algas epilíticas dependen de la presencia de espacios libres de sedimento. En este trabajo, el espesor del sedimento varió de 0 hasta 1.3 cm de espesor con variaciones entre fechas de muestreo determinadas probablemente por actividad hidrodinámica. La presencia del sedimento favoreció la presencia de cianobacterias y la falta de éste permitió el establecimiento de los propágulos de varias especies de algas principalmente calcáreas incrustantes y filamentosas. Sin embargo, no se encontraron patrones de correlación significativas entre la cantidad de sedimento y la diversidad de especies en las placas.

Otro factor relevante en la dinámica de las comunidades de las macroalgas observadas en este trabajo son los eventos meteorológicos o de naturaleza oceanográfica que impactaban la hidrodinámica de los sitios. Por ejemplo, diversos estudios señalan que la

colonización de las macroalgas expuestas a bajas corrientes tendría mayor éxito; por el contrario, en condiciones de corrientes fuertes, la colonización de especies declinaría (Baynes et al. 1989; Abelson y Denny, 1997). Aunque el sedimento y el movimiento del agua pueden tener efectos importantes en la sucesión de la comunidad de macroalgas, no se realizaron los análisis pertinentes para determinar su efecto.

Factores bióticos

Sin lugar a dudas, el papel de los herbívoros en determinar la estructura de la comunidad de macroalgas es primordial (Burkepile y Hay, 2010). Entre los grupos de herbívoros más importantes se encuentran los peces y los erizos. Sin embargo, el efecto que tiene cada uno de estos grupos es totalmente diferente (McClanahan, 1997). Aunque los arrecifes del Caribe perdieron poblaciones importantes de *Diadema antillarum* que es probablemente la especie de invertebrado con mayor contribución a la herbivoría (Edmonds y Carpenter, 2001), el efecto de los peces sigue siendo fundamental. Incluso, dentro de los peces existen grupos funcionales cuyo papel también tiene efectos diferentes en la estructura de la comunidad de macroalgas. Al menos se pueden citar dos tipos de peces herbívoros, los forrajeadores, representados por Acanthuridos y Scáridos, mientras que los granjeros están representados por las damiselas del género *Stegastes* que defienden su territorio de los forrajeadores (Ceccarelli *et al.,* 2011). Los primeros pueden ramonear por amplios tramos del arrecife, y debido a su alta tasa de consumo desvían a la comunidad de macroalgas hacia un estado de baja diversidad dominada por especies resistentes a la herbivoría. Por el contrario, los peces granjeros excluyen de sus territorios a especies de algas carnosas y mantienen la comunidad en un estado dominado por el turf. En este trabajo fue evidente la presencia de ambos grupos de peces, especialmente, en aquellas placas que no fueron territorializadas por las damiselas, se encontró una variedad de especies ejerciendo herbivoría sobre la comunidad en estadios tempranos (figura 35). Entre estas destacan los géneros *Acanthurus*, *Sparisoma* y *Scarus*, en especial organismos juveniles de ejemplo *Scarus iserti* y *Sparisoma* se alimentaba sobre la placa en grupos de 6 a 12 individuos. Por otra parte, en las placas con presencia de Stegastes las placas estaban dominadas por especies de algas palatables de los géneros Polysiphonia, Hypnea, Wrangelia entre otras, lo cual es consistente con los reportes de Hinds y Ballantine (1987); Hixon y Brostoff, (1996) y Gobler et al. (2006).

Figura 35. Láminas de las especies de peces e invertebrados, alimentándose de las placas de sucesión. A) *Abudefduf* saxatilis (Pez sargento). B) Pez Damisela. C y D) *Acanthurus* (Pez cirujano). E y F) *Scarus iserti* Juveniles (Pez Loros). G) *Eudoris novarsii* (Erizo punta de Lápiz). H) Babosa de mar (*Elysia* sp).

Una observación interesante, de la cual no se sabe qué efecto pudiera tener en la sucesión de la comunidad de macroalgas es cierto comportamiento de algunos peces que de varias se desplazaban en las superficies placas de las placas frotando el costado de su cuerpo contra las mismas. Tal comportamiento sugiere la posible remoción de parásitos (Figura 36).

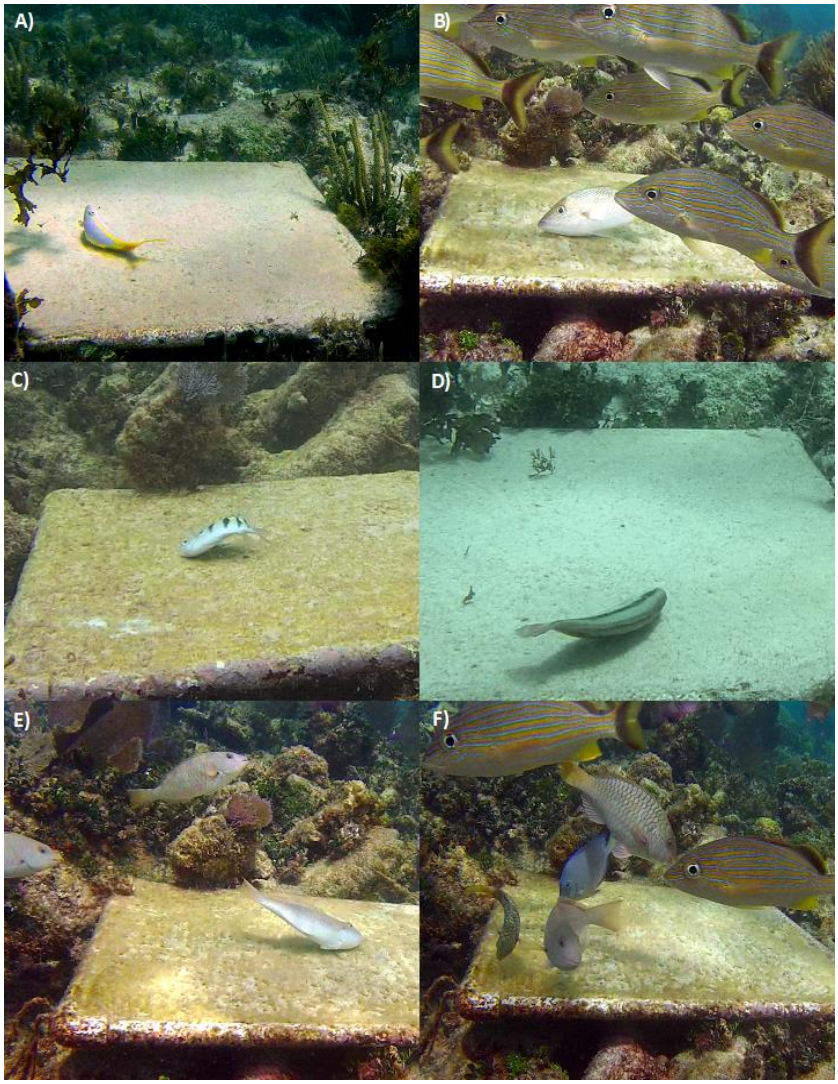


Figura 36. Láminas de comportamiento de las especies de peces presentes en las placas de sucesión. A) *Lutjanus sp*. B) *Haemulon plumieri* C) *Abudefduf* (Pez sargento). D) Labrido. E) *Sparisoma*. F) Haemulon, *Sparisoma*, Acanthurus etc.

Después de 7 meses de haberse colocados las placas experimentales, estas no presentaron coberturas de especies carnosas con talos completamente formadas cuya composición taxonómica y grado de desarrollo asemejara la de los alrededores. Con excepción de una placa en Limones y otra en Jardines en las que se apreció durante el último muestreo una cobertura importante de *Dictyota* (45%) y de coralinas incrustantes (*Titanoderma* sp, *Mesophyllum* sp) respectivamente (Figura 37), en ninguna otra se observó estadios intermedios o tardíos de sucesión. Este estudio contrasta con los hallazgos de experimentos similares (Stubler et al., 2016) en los que se llegó a estimar hasta 60% de cobertura de algas coralinas incrustantes y 20% de algas carnosas como *Sargassum*, *Lobophora* y *Dictyota*, aunque esto fue después de 2.5 años. No obstante, es similar al trabajo realizado por Fricke *et al.* (2011) quienes reportaron que sus superficies experimentales expuestas a factores bióticos y abióticos tenían un recubrimiento aproximado del 50% de cianobacterias y pocos crecimientos de algas carnosas.

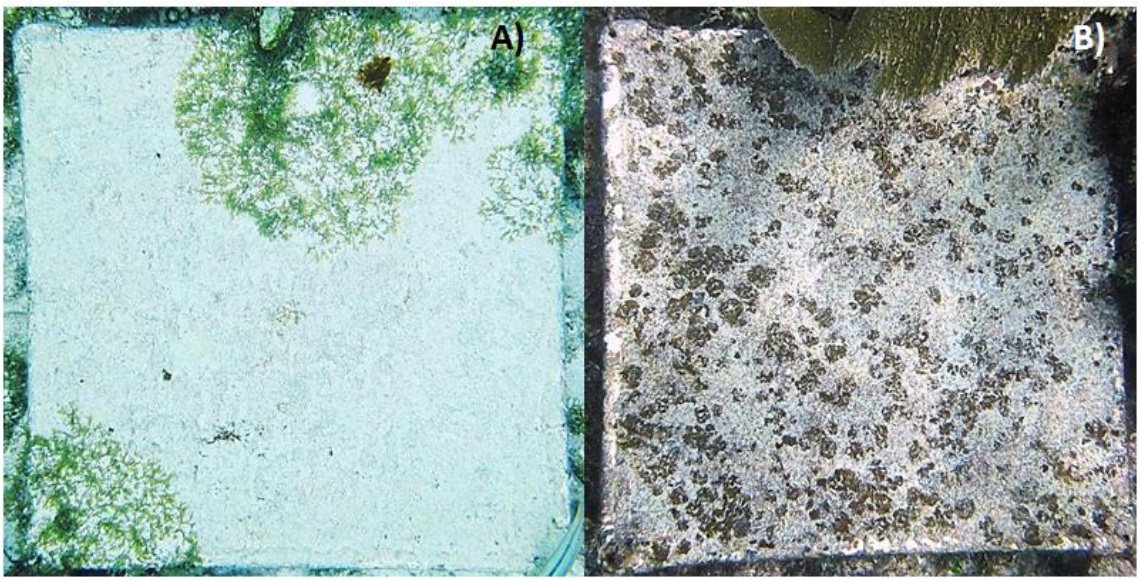


Figura 37. Placas con algas completamente formadas en 2 sitios de Puerto Morelos. A) Limones crecimiento del género *Dictyota*, B) Crecimiento de algas coralinas incrustantes y carnosa.

4.7. BIBLIOGRAFÍA

Abelson, A. y M. Denny (1997) Settlement of marine organisms in flow.Annual Review of Ecology and Systematics, 317-339.

Adey, W. H. y T. Goertemiller (1987). Coral reef algal turfs: master producers in nutrient poor seas. Phycologia, 26(3), 374-386.

Baynes, T. W. y A. M. Szmant (1989) Effect of current on the sessile benthic community structure of an artificial reef. Bulletin of Marine Science, 44 (2), 545-566.

Burkepile, D. E. y M. E. Hay (2010) Impact of herbivore identity on algal succession and coral growth on a Caribbean reef. PLoS One, 5(1), e8963.

Ceccarelli, D. M., G. P. Jones y L. J. McCook (2011) Interactions between herbivorous fish guilds and their influence on algal succession on a coastal coral reef. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 399(1), 60-67.

Clements, F. E. (1916). Plant succession: an analysis of the development of vegetation (No. 242). Carnegie Institution of Washington.

Diaz-Pulido, G. y L. J. McCook (2002) The fate of bleached corals: patterns and dynamics of algal recruitment. Marine Ecology Progress Series, 232, 115-128.

Diaz-Pulido, G., L. J. McCook., A. W. Larkum., H. K. Lotze., J. A. Raven., Schaffelke, B. y Steneck, R. S. (2007) Vulnerability of macroalgae of the Great Barrier Reef to climate change.

Drury, W. H. y I. C. Nisbet (1973) Succession. J. Arnold Arbor., 54(3), 331-368

Edmunds P. J. y R. C. Carpenter (2001) Recovery of Diadema antillarum reduces macroalgal cover and increases abundance of juvenile corals on a Caribbean reef. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 98: 5067-5071.

Enstch, B., K. G. Boto, R. C. Sim y J. T. Wellington (1983) Phosphate and nitrogen in coral reef sediments. Limnology. Oceanographyc. 28; 465-476.

Ferrari, R., M. Gonzalez-Rivero, J. C. Ortiz, y P. J. Mumby (2012) Interaction of herbivory and seasonality on the dynamics of Caribbean macroalgae. Coral Reefs, 31(3), 683-692.

Fricke, A., M. Teichberg, S. Beilfuss y K. Bischof (2011) Succession patterns in algal turf vegetation on a Caribbean coral reef. Botanica Marina, 54 (2); 111-126.

Gleason, H. A. (1926). The individualistic concept of the plant association.Bulletin of the Torrey Botanical Club, 7-26.

Gleason, H. A. (1927) Further views on the succession-concept. Ecology,8 (3), 299-326.

Gobler, C. J., D. B. Thibault., T. W. Davis., P. B. Curran., B. J.Peterson y L. B. Liddle., (2006). Algal assemblages associated with Stegastes sp. Territories on Indo-Pacific coral reefs: characterization of diversity and controls on growth. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 336, 135–145.

Hinds, P.A. y D.L. Ballantine (1987) Effects of the Caribbean threespot damselfish, Stegastes planifrons (Cuvier), on algal lawn composition. Aquat. Bot. 27, 299–308

Hixon, M.A. y W.N. Brostoff (1996). Succession and herbivory: effects of differential fish grazing on Hawaiian coral-reef algae. Ecol. Monog. 66, 67–90.Hixon, M. (1981). An experimental analysis of territoriality in the california reef fish embiotoca jacksoni (embiotocidae). American Society of Ichthyologists and Herpetologists (ASIH), 1981(3), 653-665.

Ives, A. R. y S. R. Carpenter (2007). Stability and diversity of ecosystems. Science, 317(5834), 58-62.

Lapointe, B. E., P. J. Barile, M. M. Littler., D. S., Littler, B. J. Bedford., y C. Gasque, (2005). Macroalgal blooms on southeast Florida coral reefs: I. Nutrient stoichiometry of the invasive green alga Codium isthmocladum in the wider Caribbean indicates nutrient enrichment. Harmful algae, 4(6), 1092-1105.

MacArthur R. H. y Connel J. H. (1966) The biology of population. John Wiley, New York. 200.

McClanahan, T. R. (1997). Primary succession of coral-reef algae: differing patterns on fished versus unfished reefs. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 218(1); 77-102.

McClanahan, T. R., y R. Arthur, (2001). The effect of marine reserves and habitat on populations of East African coral reef fishes. Ecological Alications, 11(2); 559-569.

McClanahan, T. R., N. A. Graham., J. M. Calnan y M. A. MacNeil (2007) Toward pristine biomass: reef fish recovery in coral reef marine protected areas in Kenya. Ecological Alications, 17(4); 1055-1067.

Odum, E. P. (1969) The strategy of ecosystem development. Sustainability: Sustainability, 164, 58.

Steneck, R.S. (1997) Crustose corallines, other algal functional groups, herbivores and sediments: complex interactions along reef productivity gradients. In: Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium, 695–700

Stubler, A. D., A. K. Stevens y B. J. Peterson (2016). Using community-wide recruitment and succession patterns to assess sediment stress on Jamaican coral reefs. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology. 474; 29-38.

Thacker, R., D., Ginsburg y V. Paul (2001) Effects of herbivore exclusion and nutrient enrichment on coral reef macroalgae and cyanobacteria. Coral reefs, 19(4); 318-329.

Venera Pontón, D., A. Rangel Campo., L. Flórez Leiva., G. Díaz Pulido y M. Díaz Ruiz (2010) Efecto de la sedimentación en el reclutamiento de las macroalgas *Dictyota* s. y *Lobophora variegata*: un estudio experimental en el Parque Nacional Natural Tayrona, Caribe colombiano.

5. DISCUSIÓN GENERAL

Actualmente las comunidades de macroalgas en arrecifes coralinos son objeto de estudios ecológicos, debido a su papel en la función de estos ecosistemas (Mumby, 2009; Bruno *et al.,* 2009; Bennett *et al.,* 2010; Cheal *et al.,* 2010; Serrano *et al.,* 2012; Graham et al., 2013). El Caribe Mexicano hay ha habido varios trabajos florísticos que dan cuenta de la riqueza de macroalgas (Dreckmann *et al*., 1996; Collado- Vides et al., 1998). En este trabajo se encontraron 104 especies de las cuales el género *Dictyota* tuvo el mayor número de especies con 11, seguido de *Halimeda* y *Udotea* con 8, *Amphiroa* con 7 y *Laurencia* con 6 especies entre otras. Sin embargo en este estudio la División Rhodophyta fue la más diversa. Hay evidencia de que los géneros *Dictyota, Lobophora*, *Halimeda*, *Amphiroa* entre otras, tienen un efecto negativo como positivo en los arrecifes por su capacidad de crecer masivamente y tener baja palatabilidad, además de los efectos que pueden tener sobre los corales (Mumby *et al.,* 2005; Box y Mumby, 2007; Rasher y Hay, 2010; Olsen *et al.,* 2015).

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran que el género *Dictyota* es dominante en estos ecosistemas en los cuatro sitios estudiados. También se observó que los eventos hidrodinámicos, generalmente reflejados en la temperatura, pueden eliminar hasta el 80% de la cobertura de *Dictyota*, y que en periodos de apenas 20 días esta se puede recuperar. Es posible que las condiciones actuales de nutrientes, que se encontraron en concentraciones muy altas (Cap III), hayan dejado de ser limitantes para la mayoría de las algas, por lo que el control bottom-up se haya debilitado. Si esto fuera así, y el flujo de nutrientes fuese continuo en los niveles detectados, se verían favorecidas todas aquellas especies de rápido crecimiento, o cuyo crecimiento no dependiera únicamente de la reproducción sexual. *Dictyota* cumple con estas dos características, y probablemente su gran capacidad de crecer y ser removida puede considerarse como un mecanismo de remoción de nutrientes del medio. Debido a su capacidad de crecer masivamente, *Dictyota* representa en sí es un sumidero de nutrientes que pasan del medio a almacenarse en sus tejidos formando alta biomasa. Con el advenimiento de un norte moderado o fuerte, mucha de la biomasa ganada por *Dictyota* es expulsada del medio acuático hacia la playa liberando con ello de nutrientes al sistema arrecifal. Desafortunadamente, este mecanismo podría ser útil si la concentración de nutrientes en las cantidades detectadas fuera de naturaleza temporal, lo cual no parece ser la situación.

Se ha observado que la herbivoría es una fuerza muy importante en la configuración de las comunidades de macroalgas. Aunque en el pasado también Diadema tenía un papel determinante en la remoción de algas, ahora esa función recae principalmente en los peces. Al respecto Bukerpile y Hay (2015) mencionan que para mantener saludable el arrecife, habría que evitar la competencia de las algas con los corales mediante la herbivoría. Estos mismos autores consideran que una alta diversidad de estrategias herbívoras impide que haya especies de macroalgas que pudieran prosperar. Hay estudios que dudan incluso del efecto de los nutrientes en el crecimiento de las algas y el concomitante cambio de fase (McCook, 1999), y le atribuyen a la herbivoría el peso mayor en su control.

Si fuera el caso que el control de las algas esta mediado principalmente por herbivoría, debería darse un papel muy importante a la conservación de las comunidades de peces. Sin embargo, incluso en el ANP de Puerto Morelos la pesca en permitida desde antes de que fuera declarado como parque nacional. En este trabajo se observó que los géneros de peces *Scaridae* y *Sparisoma* tienen un papel relevante en el sistema ya que permanentemente pastoreaban sobre las placas experimentales impidiendo la sucesión hacia especies de macroalgas carnosas. No obstante lo anterior, sigue siendo una pregunta a contestar cuál sería la cantidad de tiempo necesaria para que las placas reflejen la composición y el grado de desarrollo de las comunidades de algas adyacentes, ya que después de 9 meses no había indicios de que esto hubiera sucedido.

6. CONCLUSIONES GENERALES

1. Se obtuvo un registro de 104 especie de macroalgas distribuidas en 4 zonas arrecifales de la cual la división Rhodophyta dominó en Puerto Morelos y la división Chlorophyta en Isla Contoy.
2. Se Identificaron 5 nuevos registros de macroalgas para el Parque Nacional de arrecifes de Puerto Morelos. *Amphiroa hancockii, Liagora norrisiae, Ceratodictyon scoparium, Acetabularia crenulata* y *Avrainvillea silvana.*
3. Las coberturas oscilaron entre los 60% y 90 % dominado principalmente por el género *Dictyota* en Limones y Jardines a comparación de Ixlaché que *Dictyota* s y *Halimeda opuntia* fueron las coberturas dominantes. En Bonanza se encontraron 5 especies dominantes de las cual *Dictyota* s estuvo presente todo el año. *Acanthophora spicifera* y *Palisada* sólo dominaron en Mayo. *Sargassum* y *Turbinaria turbinata* se encontraron dominantes en Diciembre.
4. Se identificó que los eventos climáticos (Nortes) determina la dinámica de las coberturas macroalgales en la zona principalmente del género *Dictyota*. El tiempo de recuperación de la cobertura de esta especie fue en corto plazo .
5. Las coberturas de algas coralinas (*Amphiroa*, *Jania*, *Galaxaura*, *incrustantes*) se correlacionaron negativamente con la temperatura en Ixlaché. En Puerto Morelos en Bonanza el género *Sargassum* se correlacionó negativamente con la temperatura.
6. La cobertura de las macroalgas no se correlacionaron con la concentración de los nutrientes.
7. Se encontraron concentraciones altas de DIN (NO_3^-+NO_2^-+NH_4^+) entre los 8 a 11µM y los fosfatos se identificaron en concentraciones muy altas (2 – 2.5 µM).
8. Se identificó que la alta concentración de DIN y de fosfatos de debió a la descomposición del genero de macroalga *Sargassum* que arribo en toda la costa del Caribe Mexicano.
9. Se encontraron correlaciones significativas negativas y positivas entre especies de macroalgas.
10. Se registraron 56 especies de macroalgas en las placas experimentales de la cual la división Rhodophyta fue dominante.
11. No se encontraron patrones sucesión de las especies de macroalgas en las placas experimentales, las especies identificadas no llevaban una secuencia de colonización,

nunca se llegó a una comunidad madura en las placas. Se concluyó que las especies de macroalgas solo esperan un sustrato disponible para colonizar.

7. BIBLIOGRAFÍA

Bennett, S., A. Vergés y D. R. Bellwood (2010) Branching coral as a macroalgal refuge in a marginal coral reef system. *Coral Reefs*, *29*(2); 471-480.

Box, S. J. y P. J. Mumby (2007) Effect of macroalgal competition on growth and survival of juvenile Caribbean corals. Marine Ecology Progress Series 342; 139-149.

Bruno, J. F., H. Sweatman, W. F. Precht., E. R. Selig y V. G. Schutte (2009) Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. Ecology, 90(6); 1478-1484.

Burkepile, D. E. y M. E. Hay (2006) Herbivore vs. nutrient control of marine primary producers: context-dependent effects. Ecology, 87(12); 3128-3139.

Cheal, A. J., M. A. MacNeil., E. Cris., M. J. Emslie., M. Jonker., B. Schaffelke y H. Sweatman (2010) Coral–macroalgal phase shifts or reef resilience: links with diversity and functional roles of herbivorous fishes on the Great Barrier Reef. Coral reefs, 29 (4); 1005 - 1015.

Collado-Vides, L., I. Ortegón-Aznar., A. Sentíes-Granados., L. Comba-Barrera y J. González-González, (1998) Macroalgae of Puerto Morelos Reef System, Mexican Caribbean. Hidrobiológica, *8*(2); 133-143.

Dreckmann, K. M., I. Stout., y A. Sentíes-Granados (1996) Lista actualizada de las algas marinas bentónicas de Puerto Morelos, Quintana Roo, Caribe Mexicano. *Polibotánica*, *3*; 1-17.

Graham, N. A., D. R. Bellwood., J. E. Cinner., T. P. Hughes., A. V. Norström y M. Nyström (2013) Managing resilience to reverse phase shifts in coral reefs. Frontiers in Ecology and the Environment, *11*(10); 541-548.

McCook, L. J. (1999) Macroalgae, nutrients and phase shifts on coral reefs: scientific issues and management consequences for the Great Barrier Reef.*Coral reefs*, *18*(4); 357-367.

Mumby P. J., N. Foster y E. Fahy (2005) Patch dynamics of coral reef macroalgae under chronic and acute disturbance. Coral Reefs 24; 681–692

Mumby, P. J. (2009) Phase shifts and the stability of macroalgal communities on Caribbean coral reefs. Coral Reefs, 28(3); 761-773.

Olsen, K., V. J. Paul y C Ross (2015) Direct effects of elevated temperature, reduced pH, and the presence of macroalgae (Dictyota s.) on larvae of the Caribbean coral Porites astreoides. Bulletin of Marine Science, 91(2); 255-270.

Serrano, E., R. Coma y M. Ribes (2012) A phase shift from macroalgal to coral dominance in the Mediterranean. Coral Reefs; 1-1.