

COLECCIÓN CICLO BÁSICO

Perspectivas en la ecología de arrecifes coralinos

Juan Armando Sánchez
Juliana López-Angarita
(compiladores)

Perspectivas
en la ecología de
arrecifes coralinos

COLECCIÓN CICLO BÁSICO

El Ciclo Básico de la Universidad de los Andes está conformado por una amplia oferta de asignaturas que representan el conocimiento fundamental de las diversas disciplinas que se cultivan en la Universidad. Esta colección pretende guardar la memoria de ese vasto campo de problemas, de temas y de enfoques, así como de su historia. Los autores de los libros que la conforman son los propios profesores, quienes ponen la experiencia de sus clases a disposición del público lector.

COMITÉ EDITORIAL DE LA UNIVERSIDAD DE LOS ANDES

Decana de la Facultad de Artes y Literatura: Claudia Montilla; Decano de la Facultad de Ciencias Sociales: Hugo Fazio; Decano de la Facultad de Economía: Alejandro Gaviria; Editor General: Felipe Castañeda; Representante Profesores: Luis Quiroga; Vicerrector de Asuntos Académicos: José Rafael Toro; Vicerrectora de Asuntos Administrativos: Claudia Velandia; Vicerrector de Investigaciones: Carl Langebaek.

Perspectivas en la ecología de arrecifes coralinos

Juan Armando Sánchez
Juliana López-Angarita
(compiladores)

Perspectivas en la ecología de arrecifes coralinos / Juan Armando Sánchez, Juliana López-Angarita (compiladores). – Universidad de los Andes, Ediciones Uniandes, 2012.

348 pp.; 15 x 22 cm – (Colección Ciclo Básico)

ISBN 978-958-695-825-7

I. Ecología de arrecifes coralinos I. Sánchez Muñoz, Juan Armando II. López Angarita, Juliana III. Universidad de los Andes (Colombia)

CDD 577.789

SBUA

Primera edición: noviembre de 2012

© Juan Armando Sánchez y Juliana López-Angarita

© Universidad de los Andes

Ediciones Uniandes
Carrera 1 núm. 19-27, edificio AU 6, piso 2
Bogotá D. C., Colombia
Teléfonos: 339 49 49/339 49 99, ext. 2133
<http://ediciones.uniandes.edu.co>
infeduni@uniandes.edu.co

ISBN: 978-958-695-825-7

ISBN e-book: 978-958-695-826-4

Corrección de estilo: Ella Suárez
Cubierta y diagramación: David Reyes
Impresión y acabados: Nomos Impresores
Diagonal 18 bis núm. 41-17
Teléfono: 208 6500
Bogotá D.C., Colombia

Impreso en Colombia - Printed in Colombia

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial.

*A todos aquellos que han dedicado su vida al estudio
y a la conservación de nuestros mares*

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	11
PRESENTACIÓN	13
Juan Armando Sánchez	
Juliana López-Angarita	
PREFACIO	19
Juan Manuel Díaz	
1. ARRECIFES DE CORAL: DESDE DARWIN HASTA NUESTROS DÍAS	25
Juan Armando Sánchez	
Juliana López-Angarita	
2. ARRECIFES CORALINOS: BIODIVERSIDAD ASOCIADA Y ENSAMBLAJE DE COMUNIDADES	53
Dairo A. Escobar	
Johanna Velásquez	
3. CORALES Y ARRECIFES DE PROFUNDIDAD	103
Luisa F. Dueñas	
Felipe Borrero-Echeverry	

4.	ZOOXANTELAS: EL PUNTO CRÍTICO DE LA RESILIENCIA CORALINA FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL	141
	Carolina Castro Sanguino	
5.	ACIDIFICACIÓN OCEÁNICA Y SUS IMPLICACIONES EN LA CALCIFICACIÓN DE ORGANISMOS MARINOS	167
	Carlos E. Gómez-Soto	
6.	<i>HYDRACTINIA</i> COMO MODELO DE INVESTIGACIÓN EN CNIDARIOS	201
	Luis Fernando Cadavid	
7.	RESILIENCIA ARRECIFAL: HACIA ÁREAS MARINAS PROTEGIDAS MÁS EFECTIVAS	229
	Juliana López-Angarita	
8.	LA CAPACIDAD ADAPTATIVA DE LAS COMUNIDADES LOCALES Y SU PAPEL EN EL MANEJO DE ÁREAS MARINAS PROTEGIDAS	277
	Rocío del Pilar Moreno Sánchez	
	Jorge H. Maldonado	
	GLOSARIO	339

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente, agradecemos a todos los autores por el gran tiempo invertido y sus valiosas contribuciones. En especial, destacamos el trabajo colectivo de un grupo de estudiantes de posgrado de la Universidad de los Andes (Departamento de Ciencias Biológicas), que llevó el desafío de un curso a una necesidad real de transmitir al resto de colegas y compatriotas la problemática global de los arrecifes coralinos. Asimismo, agradecemos el apoyo de la Facultad de Ciencias (decano Carlos Montenegro) y a los miembros, y las enriquecedoras discusiones, durante más de siete años al seno del laboratorio de Biología Molecular Marina (Biommar).

Un libro como este tiene, además, la enorme tarea colectiva de la revisión anónima por pares: Camila Granados, Guillermo Díaz-Pulido, Arturo Acero, Juan Manuel Díaz, Nadia Santodomingo, Javier Reyes, Néstor Ardila, Ricardo Téllez, Julio Andrade, Olga Torres, Iván Calixto, Diana Ballesteros y Rocío Acuña, los estudiantes del curso de posgrado en Arrecifes Coralinos 2008 y 2011, así como algunos autores de capítulos, quienes ayudaron a revisar anónimamente otros capítulos. Felipe Castañeda, director de Ediciones Uniandes, y su equipo motivaron y diligentemente hicieron viable la publicación de este libro.

PRESENTACIÓN

Los arrecifes coralinos representan el ecosistema marino más diverso y complejo del océano. Albergan un número excepcional de especies, a pesar de representar tan solo 0.1 % de la superficie del planeta. Esta enorme biodiversidad, que les otorga un gran valor estético y cultural, ha resultado a su vez indispensable para el sustento y el desarrollo económico de muchas comunidades de toda la franja tropical del mundo, gracias a que son una fuente natural de materias primas y recursos para el consumo. Desgraciadamente, este frágil e invaluable ecosistema está atravesando por un inminente declive que amenaza con convertirlo en uno de los ecosistemas más alterados del planeta.

Hace poco, la comunidad científica señaló el cambio global, en todas sus dimensiones, como el principal responsable de la pérdida de biodiversidad sin precedentes que se ha registrado en los arrecifes coralinos en todo el mundo. Esto ocurre porque los corales, organismos que sostienen una relación simbiótica con algas fotosintéticas (zooxantelas) y responsables de la formación de los arrecifes, resultan especialmente vulnerables a las diversas amenazas que emergen como producto de las múltiples alteraciones que las actividades humanas han ocasionado en los sistemas naturales.

Entre las amenazas más importantes están los cambios en las tendencias climáticas, resultantes de la constante acumulación de gases de invernadero y que han ocasionado fenómenos como el calentamiento global y la acidificación oceánica. En particular, estas alteraciones afectan en gran medida el mantenimiento de la delicada simbiosis de los

corales con sus zooxantelas, lo que les impide crecer normalmente y, al mismo tiempo, causan un daño profundo a los innumerables organismos que dependen de los arrecifes para sobrevivir, como peces, artrópodos, equinodermos, moluscos, entre muchos otros.

Durante el año internacional del arrecife (2008), el cual se celebra una vez por década, tuvieron lugar eventos importantes como el XI Simposio Internacional de Arrecifes Coralinos (Fort Lauderdale, Estados Unidos), la Cuarta Conferencia de Corales de Profundidad (Wellington, Nueva Zelanda) y el XIII Seminario Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar (San Andrés, Colombia), así como la primera celebración del día del arrecife de coral en Colombia y el día Darwin en la Universidad de los Andes, como conmemoración de los sesenta años de la institución. Por ser un momento propicio para contribuir al entendimiento de las dinámicas y las problemáticas que caracterizan a los arrecifes, el grupo de investigación en Biología Molecular Marina (Biommar) fue partícipe en todos los eventos mencionados y, adicionalmente, se dictó por primera vez el curso de Ecología de Arrecifes Coralinos, como parte de las materias electivas de la Maestría en Ciencias Biológicas de la Universidad de los Andes.

El propósito de este curso era comprender del funcionamiento de este ecosistema y detectar las reacciones y las posibles transformaciones que surgen de las amenazas actuales, a fin de contribuir a la creación de perspectivas de investigación y acción más efectivas que garanticen su protección. De esta forma, la divulgación de la problemática que envuelve el complejo y fascinante mundo de los arrecifes coralinos representa un paso vital en la lucha para su conservación, que, con fortuna, ofrecerá a las generaciones futuras la oportunidad de apreciar su enorme biodiversidad y disfrutar de sus innumerables beneficios. Un gran porcentaje de este libro es el producto de reflexiones y discusiones que iniciaron durante el año internacional del arrecife y el curso de Arrecifes Coralinos, en el 2008.

Este libro abarca los aspectos más importantes en la investigación en ecología de los arrecifes coralinos, vista desde el contexto actual. Presenta los últimos avances del conocimiento de su ecología y expone los diversos modos en los que este puede ser aplicado para encontrar y

lograr predecir patrones ecológicos de respuesta a las amenazas o para concitar medidas y planes de contingencia que permitan optimizar los esfuerzos por la conservación de estos ecosistemas. El lector podrá advertir que los temas se revisaron con una proyección global y, a su vez, que tienen un fuerte componente regional, que hacen hincapié en los arrecifes de Colombia, el mar Caribe y el Pacífico oriental tropical.

Aunque los capítulos tienen la profundidad necesaria como lecturas de un curso de posgrado, o de último año de pregrado en ciencias biológicas, nos hemos esforzado para que los textos sean accesibles a cualquier profesional o cualquier lector interesado en profundizar en el conocimiento de los arrecifes coralinos dentro de los cursos del ciclo básico (CBU), como Azul Profundo y Biodiversidad, Conservación y Desarrollo. Dentro de las estrategias para facilitar la comprensión de los capítulos están los recuadros, cuyos textos profundizan y explican con detalle temas o casos de estudio importantes. El recuadro permite, sin interrumpir el flujo de información del capítulo, explicar de forma clara estos temas o proporcionar información complementaria al capítulo. Asimismo, al final del libro se encuentra un glosario de términos técnicos que se nombran en todos los capítulos.

El libro inicia con un prefacio de Juan Manuel Díaz, profesor de la Universidad Nacional de Colombia y miembro de la Academia Colombiana de Ciencias, quien ha sido el gran gestor en el país del estudio de los arrecifes coralinos. Él comparte sus experiencias desde los tiempos junto a Henry von Prahll hasta sus expediciones para redescubrir los arrecifes coralinos de Colombia. Los primeros tres capítulos sirven como introducción al universo de los arrecifes coralinos, en los cuales se exponen las características más importantes que los definen. El primer capítulo, “Arrecifes de coral: desde Darwin hasta nuestros días”, explora brevemente el estudio de los arrecifes con una perspectiva histórica, lo que trae a la memoria los aportes realizados por Darwin y los acontecimientos más importantes que han sobrellevado estos sistemas.

El segundo capítulo, “Arrecifes coralinos: biodiversidad asociada y ensamblaje de comunidades”, es una ventana a la extraordinaria biodiversidad por la que son reconocidos los arrecifes, en la que se exhiben los grupos de organismos más importantes que componen y mantienen la

complejidad característica del ecosistema. El siguiente capítulo, “Corales y arrecifes de profundidad”, fue incluido en este texto debido al mínimo grado de conocimiento que existe en torno a las profundidades oceánicas. Allí, se revela al lector la fascinante vida arrecifal que habita de 200 a más de 5000 metros de profundidad y los peligros a los que están sometidos por el desarrollo humano. Posteriormente, los siguientes capítulos se enfocan en ilustrar cómo el cambio global originado por la actividad del hombre ha alterado de manera significativa los regímenes climáticos que afectan de diversas formas los sistemas naturales.

El efecto directo del cambio climático en el desarrollo arrecifal es una de las alteraciones humanas que más daños ha causado, debido a la naturaleza global de su poder destructivo. Así es como el capítulo “Zooxantelas, el punto crítico de la resiliencia coralina frente al cambio climático global” revisa las características y dinámicas de la simbiosis entre zooxantelas y corales, elementos claves para determinar el potencial de recuperación de los arrecifes ante eventos de blanqueamiento coralino (esto es, expulsión de las zooxantelas), producto del calentamiento global y que, en muchos casos, conlleva la mortalidad de la mayoría de los corales. Otro efecto importante ocasionado por el cambio climático es el aumento en la presión parcial del dióxido de carbono del océano, que está reduciendo el pH del agua y está generando un desequilibrio químico de los procesos fisiológicos de los corales. La problemática en torno a este fenómeno se explica en el capítulo “Acidificación oceánica y sus implicaciones en la calcificación de organismos marinos”, en el que se resaltan sus efectos negativos en la dinámica ecológica arrecifal y las estrategias de mitigación que se han diseñado para combatirlos.

El profesor de la Universidad Nacional de Colombia y director de Instituto de Genética, Luis Fernando Cadavid, nos presenta el modelo de estudio en el laboratorio en biología y ecología marina: *Hydractinia simbiolongicarpus*, en el capítulo “*Hydractinia* como modelo de investigación en Cnidarios”. Este fascinante hidroide colonial ha sido el objeto de estudio en diversas investigaciones de ecología funcional, genética e inmunología. *H. simbiolongicarpus*, en su hábitat natural, se asocia con las conchas de los cangrejos ermitaños de las costas de Nueva Inglaterra en el Atlántico nororiental, y hoy en día se encuentra como modelo en

muchos laboratorios del mundo. Este capítulo nos da un recuento del conocimiento sobre esta especie, nos muestra su gran docilidad para mantenerse y reproducirse en el laboratorio, así como su gran potencial como modelo de estudio en el laboratorio.

El siguiente capítulo trata sobre las características intrínsecas de los arrecifes que promueven la maximización de propiedades ecológicas cruciales en la problemática ambiental actual, como lo es la resiliencia ecosistémica y la forma en que su estudio puede aplicarse a las estrategias de conservación. “Resiliencia arrecifal: hacia áreas marinas protegidas más efectivas” afronta el reto de la protección efectiva de los arrecifes coralinos mediante el diseño y planificación de áreas marinas protegidas eficientes y la conciliación entre los sistemas humanos y naturales, teniendo como objetivo la maximización de su resiliencia, para así superar satisfactoriamente los desafíos futuros que acarrea el cambio global.

Queremos destacar el último, y más extenso, capítulo del libro, de Rocío del Pilar Moreno Sánchez y Jorge H. Maldonado, economistas y profesores del Conservation Strategy Fund y la Facultad de Economía de la Universidad de los Andes, respectivamente: “La capacidad adaptativa de las comunidades locales y su papel en el manejo de áreas marinas protegidas”. Afortunadamente, el gran vacío que teníamos al iniciar este libro, el papel de la sociedad en la ecología, tiene ahora una amplia e inspiradora participación con una muestra de casos de estudio que incluyen regiones costeras con arrecifes coralinos. Queda claro que el entendimiento de los sistemas ecológicos y sociales son la mejor fórmula hacia el manejo adaptativo y quizá la mejor estrategia de conservación para los arrecifes coralinos.

JUAN ARMANDO SÁNCHEZ
JULIANA LÓPEZ-ANGARITA

Mayo de 2012

PREFACIO

JUAN MANUEL DÍAZ

Si bien no podemos contarlos como resultado de investigaciones científicas, sino literalmente de accidentes que quedaron plasmados como anécdotas en los escritos de los cronistas, los primeros registros documentados de la presencia de corales y arrecifes coralinos en los mares colombianos se remontan a los albores de la Conquista española de América. No pocos fueron los galeones que surcando las aguas del Caribe terminaron sus días despanzurrados sobre las crestas de los arrecifes que circundan las islas y los cayos del archipiélago de San Andrés y Providencia, las islas del Rosario o las islas de San Bernardo. Tal fue la suerte de un patache español que, navegando de La Habana a Cartagena, en 1526, encalló trágicamente en los arrecifes del Banco Serrana.

A su único sobreviviente, el capitán Pedro Serrano, quien pasó ocho años en el cayo antes de ser rescatado y en cuya memoria se bautizó el banco, debemos quizás el primer registro del coral de fuego (género *Millepora*) en Colombia, tal y como se deduce de la narración que hizo “El Inca” Garcilaso de la Vega (1539-1616) sobre las peripecias del naufragio: “[...] dio en buscar guijarros que le sirviesen de pedernal [...] entraba en la mar nadando y se zambullía. Y tanto porfió en su trabajo que halló guijarros y sacó los que pudo y algunos causáronle mucho escozor en las manos”.

No obstante, el conocimiento científico del que hoy disponemos sobre los arrecifes coralinos de Colombia; sobre su origen, evolución, distribución, composición actual, zonación y relaciones ecológicas; así como sobre su importancia como proveedores de bienes y servicios ambientales, su problemática de deterioro y las perspectivas para su conservación, es producto de un relativamente corto pero vertiginoso proceso de investigación iniciado hace apenas cuarenta años.

A lo largo de esas cuatro décadas pueden distinguirse varios periodos más o menos discretos según las temáticas particulares que abordaban los investigadores y las nacionalidades de estos. Los primeros documentos científicos relacionados con arrecifes coralinos colombianos fueron publicados simultáneamente en 1969.¹ Tales trabajos, como la mayoría de los publicados en años subsiguientes hasta finales de la década de los ochenta, que en total sumaron una veintena, tuvieron una orientación primordialmente taxonómica y descriptiva, centrada en la elaboración de inventarios de las especies de corales que se hallaban en áreas de fácil acceso (islas del Rosario, islas de San Bernardo, región de Santa Marta, isla de San Andrés).

La gran mayoría de sus autores fueron predominantemente de origen alemán, que operaban desde el entonces Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas de Punta de Betín (ICAL), en Santa Marta, precursor del actual Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar): A. Antonius, H. Erhardt, J. Geister, W. Meinel, B. Werding. Las descripciones e interpretaciones de Geister acerca de los arrecifes de la isla de San Andrés y sus patrones de zonación marcaron un hito en el conocimiento de los arrecifes coralinos del Caribe y sus conceptos continúan teniendo completa vigencia [1].

Los años ochenta estuvieron marcados por la prodigiosa capacidad productiva de H. von Prael, quien actuó como docente e investigador,

1 Dos trabajos aparecidos en los *Mitteilungen Aus dem Instituto Colombo-Alemán de Investigaciones Científicas*: "Punta de Betín", vol. 3, 1969: R. Pfaff, "Las Scleractinia y Milleporina de las Islas del Rosario; O. F. Geyer, "Vorläufige Liste der scleractinen Korallen der Bahia de Concha bei Santa Marta, Kolumbien". Otro publicado en el número 129 del *Atoll Resear Bulletin*: J. D. Milliman, de 1969, "Four southwestern Caribbean atolls: Courtown Cays, Albuquerque Cays, Roncador Bank, and Serrana Bank".

primero desde la Universidad de los Andes y luego desde la Universidad del Valle. Su carisma, genialidad y contagiosa laboriosidad se vieron truncadas prematuramente en 1990 por un absurdo atentado terrorista al avión en que viajaba. A H. von Prahl debemos una decena de trabajos con las primeras descripciones de los arrecifes del Pacífico colombiano y la fundamentación científica de la creación del Parque Nacional Natural Gorgona. Fue él quien también publicó la primera síntesis del conocimiento de los arrecifes colombianos [2] y un libro de gran formato para el público en general sobre el tema [3].

El periodo 1986-1992 se destacó por la conformación de los primeros grupos de investigación dedicados primordialmente al estudio de este ecosistema, principalmente en la Universidad Jorge Tadeo Lozano, el Invemar y la Universidad del Valle, los cuales desarrollaron varias investigaciones en las islas del Rosario, de San Andrés, el Parque Nacional Natural Tayrona, bahía Portete, isla Gorgona y Parque Nacional Natural Utría. La mayoría de estos trabajos incorporaron ya aspectos relacionados con la problemática ambiental de los arrecifes, varios de ellos con participación de investigadores de instituciones extranjeras, y se dieron los primeros pasos en acciones de monitoreo articuladas con redes internacionales.²

Gracias a las nuevas políticas implementadas por el Sistema Nacional de Ciencia y Tecnología, entre 1994 y 2000 se consolidaron los grupos de investigación basados en la Universidad del Valle y el Invemar, los cuales adquirieron un carácter más interdisciplinario y articulado con grupos de investigación de otros países (Panamá, Estados Unidos, Costa Rica, Suiza, Australia y Alemania). El proyecto Áreas Coralinas, auspiciado por Colciencias y desarrollado por Invemar con participación de otros grupos nacionales y extranjeros, permitió disponer de un panorama muy completo acerca de la configuración morfológica, la zonación ecológica y la estructura de las principales comunidades biológicas de los más de

2 El Invemar se vinculó en 1991 al Caribbean Coastal Marine Productivity Programm (Caricomp), con la instalación de una estación permanente de monitoreo en la bahía de Chengue, Parque Nacional Natural Tayrona. Caricomp abarca veintinueve estaciones en veintidós países caribeños.

2000 km² de áreas coralinas presentes en los mares colombianos. Ello disparó significativamente la producción científica y contribuyó grandemente a la formación de nuevos investigadores.

Resultado central fue un atlas cartográfico y descriptivo de todas las áreas colombianas caracterizadas por la presencia de arrecifes de coral [4] y los aportes que significó para el diseño y la declaración de la Reserva de la Biósfera Seaflower, en el archipiélago de San Andrés y Providencia, y los planes de manejo de varias áreas marinas protegidas. La delegación colombiana al VIII Congreso Mundial de Arrecifes Coralinos, celebrado en Panamá en 1996, no solo fue nutrida y su participación muy destacada, sino que posicionó definitivamente a los investigadores colombianos sobre el tema en el ámbito internacional.

Algo similar ocurrió en la siguiente edición de ese evento, en el 2000, esta vez en la remota isla de Bali, en Indonesia. Como consecuencia de este proceso de internacionalización de los “arrecifólogos” colombianos, una cantidad apreciable de estudiantes e investigadores de este país accedieron en los años siguientes a becas para posgrado e invitaciones para estancias de trabajo en instituciones del extranjero. De igual forma, se acrecentó inusitadamente el número de contribuciones publicadas en revistas de gran renombre internacional y se creó y consolidó el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos (Simac), vinculado a la Red Global de Monitoreo de Arrecifes de Coral (GCRMN, por su sigla en inglés).

El inicio del siglo XXI estuvo marcado por un ligero receso en el ritmo investigativo, causado principalmente por la emigración de un contingente de investigadores jóvenes para realizar estudios de posgrado en el extranjero, como resultado de los logros en el ámbito internacional y las oportunidades que brindaron los nexos con investigadores e instituciones de otros países durante el periodo anterior. Sin embargo, y por fortuna, dicho receso fue breve y solo aparente.

El nuevo impulso de las investigaciones en arrecifes coralinos que se vive en Colombia desde hace unos años, debido en buena parte al retorno al país de varios miembros de la nueva diáspora de investigadores formados a nivel de doctorado en el extranjero y su inserción laboral en el ámbito académico colombiano, se caracteriza indudablemente por su

diversificación temática y la incorporación de tecnologías de laboratorio de última generación. De las fases exploratoria y de descubrimiento de los arrecifes colombianos, orientada a describir su composición, estructura, zonación y diagnósticos de su situación ambiental, que dominaron la escena investigativa de las décadas anteriores, esta nueva fase se diferencia por plantear preguntas de mayor profundidad y más cercanas a las fronteras del conocimiento global. Las relaciones filogenéticas entre corales y otros organismos arrecifales, la hibridación, la evolución reticulada, la patología de epidemias en corales, la relación simbiótica entre corales y algas como base de la resiliencia del ecosistema ante las manifestaciones del cambio climático global, las alteraciones en el proceso de calcificación del esqueleto coralino, debida a la acidificación oceánica y la conectividad genética entre áreas coralinas, son todos temas que ya hacen parte de la agenda de varios grupos de investigación colombianos. En tal sentido, debe resaltarse el grupo de investigación liderado por el Dr. Juan Armando Sánchez, director del grupo de investigación en Biología Molecular Marina (Biommar), de la Universidad de los Andes y editor del presente libro.

El presente volumen reúne una serie de artículos que, además de reiterar la importancia crucial de los arrecifes coralinos como ecosistema estratégico que ofrece una amplia gama de bienes y servicios esenciales, bien refleja las modernas tendencias en investigación que procuran responder y solucionar la aguda crisis ambiental que los aqueja, exacerbada por el cambio climático global. Ojalá pronto veamos el conocimiento adquirido por este joven grupo de investigadores plasmado en acciones en pro de la conservación de los arrecifes coralinos del país.

Bibliografía

1. Geister J. Riffbau und geologische Entwicklungsgeschichte der Insel San Andrés (westliches Karibisches Meer, Kolumbien). Stuttgarter Beiträge Naturk. (Geol. & Paläont.). 1975; 15: 1-203.
2. Prah H von, Erhardt H. Colombia: corales y arrecifes coralinos. Bogotá: Fondo FEN Colombia; 1985.
3. Prah H von. Arrecifes del Caribe colombiano. Bogotá: Villegas, 1988.
4. Díaz JM, editor. Áreas coralinas de Colombia. Santa Marta: Invemar; 2000.

ARRECIFES DE CORAL: DESDE DARWIN HASTA NUESTROS DÍAS

JUAN ARMANDO SÁNCHEZ Y JULIANA LÓPEZ-ANGARITA

Departamento de Ciencias Biológicas-Facultad de Ciencias, Laboratorio de Biología
Molecular Marina (Biommar), Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia

Resumen

Gracias a la simbiosis con zooxantelas, los corales y otros organismos logran construir los arrecifes coralinos, considerados las estructuras biogénicas más grandes de la naturaleza y que se han convertido en el ecosistema marino de mayor diversidad y complejidad de todo el océano. Restringida a la zona fótica y a las aguas tropicales, la formación de los arrecifes coralinos ha despertado siempre el interés de geólogos y ecólogos. Se destaca, en tal sentido, Charles Darwin, quien propuso en 1842 una teoría que no solo explica satisfactoriamente la formación de los arrecifes de atolón y de barrera, sino que sugiere la complementariedad de procesos como el vulcanismo y la emergencia de islas y continentes con la subducción, ideas realmente adelantadas al pensamiento de su tiempo.

Desde la contribución de Darwin, los últimos sesenta años han sido particularmente importantes para el desarrollo de la ecología de los arrecifes coralinos. Las últimas décadas se han enriquecido por experimentación en laboratorio y el uso de técnicas de biología molecular. Los

desafíos en el entendimiento de los arrecifes coralinos han cambiado del interés por comprender la naturaleza de estos ecosistemas (como el que cautivó la curiosidad de Darwin) hacia la urgente necesidad de predecir el futuro y mantenimiento del arrecife ante las condiciones ambientales que imperan en la actualidad, como el cambio climático, la acidificación oceánica y la degradación de los recursos marinos. Es una conclusión indiscutible la de enfocar los esfuerzos en investigación de los arrecifes coralinos hacia la medición precisa de los actuales efectos ambientales que los afectan, para así generar estudios que contribuyan a tomar medidas de conservación efectivas.

Introducción

Aún en el siglo XXI, la inmensidad y el desconocimiento del océano no dejan de sorprendernos. Lograr comprender de cerca y descifrar con precisión el funcionamiento y los fenómenos que ocurren en las profundidades oceánicas ha fascinado durante años a aquellos que se han atrevido a sumergirse en la incertidumbre de este mundo desconocido e inhóspito para el hombre, acostumbrado cómodamente a pisar tierra bajo sus pies. A pesar de que para estos primeros curiosos develar los secretos marinos significó abandonar los estándares impuestos por siglos de estudio sobre los sistemas terrestres, sus iniciativas abrieron paso a generaciones cada vez más ávidas por la indagación de este ecosistema. La publicación de *La estructura y distribución de los arrecifes coralinos*, de Charles Darwin, hacia 1842, es uno de los primeros ejemplos en los cuales el hombre explica uno de los fenómenos marinos más sorprendentes, como lo es la formación de estos formidables ecosistemas [1,2]. A medida que el tiempo transcurría los nuevos descubrimientos seguían asombrando a la comunidad científica y el conocimiento de las complejas dinámicas marinas continúa representando en la actualidad un desafío bastante tentador.

Particularmente, las diversas formas y criaturas encontradas en los arrecifes coralinos han seducido al ser humano durante años y, a su vez, han impulsado el desarrollo investigativo de la sociedad actual, que lo han convertido en el ecosistema marino de mayor valor económico, estético

y cultural (figura 1.1). Por esta razón, ante los recientes cambios globales que amenazan fuertemente este ecosistema, es imperativo adelantar estudios que permitan construir una línea base de conocimiento más sólida, que promueva el desarrollo de nuevas perspectivas en la ecología de los arrecifes y faciliten el diseño de planes de acción que disminuyan su inminente degradación. Hemos querido empezar con una breve historia sobre nuestro conocimiento de los arrecifes coralinos como introducción (véase también el glosario de este volumen), luego explicamos la contribución de Charles Darwin, posteriormente mencionamos los grandes hitos en la investigación de los arrecifes coralinos y, finalmente, damos un diagnóstico del estado de estos frágiles ecosistemas.

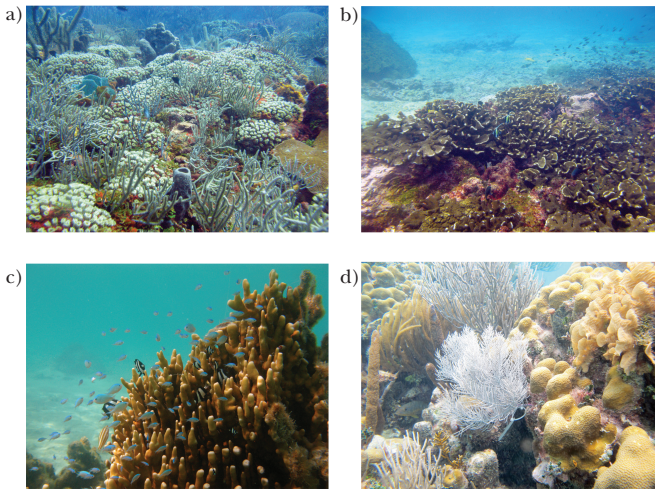


Figura 1.1. Corales y arrecifes de coral diferentes regiones tropicales

a) Isla Fuerte (Burbujas), 20 m, mar Caribe, Colombia, paisaje dominado por el coral *Eusmilia fastigiata* y el octocoral *Eunicea flexuosa*. b) Pacífico oriental tropical, isla Malpelo, 15 m, Colombia, paisaje dominado por corales *Pocillopora* spp. c) Pacífico central, Rarotonga, islas Cook, 1 m, colonia de *Millepora* sp. d) Arrecife de barrera de Belice a la altura de Carrie Bow Cay, 5 m de profundidad, cabezas de coral (*Montastraea annularis*) y en el centro *Pseudopterogorgia bipinnata*.

Este capítulo hace un recorrido introductorio e histórico por el estudio y la problemática de los arrecifes, buscando ofrecer al lector, además de una introducción con referencias importantes en el área, una visión breve pero amplia del desarrollo de la ciencia en torno a estos

ecosistemas. Inicia evocando las primeras teorías que se construyeron con el fin de explicar las formaciones que dieron lugar a la estructura y composición arrecifal, resaltando el papel de Charles Darwin como uno de los científicos más influyentes, cuyos aportes fundamentales sirvieron de anclaje para la postulación de explicaciones posteriores.

El tema se extiende a los patrones de zonación de los arrecifes vistos desde la perspectiva inicial de Darwin y ampliada por aportes importantes de otros investigadores, haciendo una revisión especial de los acontecimientos que han sido cruciales y que han marcado hitos en el estudio de los arrecifes. Finalmente, se expone la problemática ambiental de hoy en día que amenaza a este ecosistema, realizando un recorrido histórico por las tendencias globales de degradación y por las labores más destacadas de conservación que han surgido para mitigar los efectos antropogénicos en este sistema. El capítulo finaliza con una breve reflexión de las perspectivas actuales en la ecología de arrecifes coralinos.

1.1. Mínimos comunes en arrecifes coralinos

Los arrecifes coralinos son enormes construcciones biogénicas, gracias a la acumulación de esqueletos de carbonato de calcio por corales escleractinios (figura 1.1), hidrocorales (*Millepora*) y algas coralinas incrustantes (coralináceas). Estos corales tienen una simbiosis intracelular con dinoflagelados del género *Symbiodinium*, conocidas como zooxantelas, y por lo tanto se encuentran en la zona fótica, por encima de los 50 m de profundidad y en la franja tropical-subtropical del mar en aguas con temperaturas de al menos 20°C generalmente entre los 30° de latitud norte y sur (véase detalles en el capítulo 2, “Biodiversidad asociada a arrecifes coralinos”, y en el capítulo 4, “Zooxantelas, el punto crítico de la resiliencia coralina frente al cambio climático global”, en este volumen).

Otros organismos depositan esqueletos sueltos que hacen parte de los sedimentos arrecifales, como son los escleritos de los octocorales, los fragmentos de algas ramificadas calcáreas verdes y rojas, así como los esqueletos de foraminíferos, moluscos y equinodermos. Un arrecife de coral es un delicado balance entre acreción, depósito de carbonato de

calcio, y erosión, fragmentación en porciones cada vez menores del carbonato de calcio. Los esqueletos y sedimentos sueltos se dinamizan por las olas y movimiento del mar, que los lleva a buscar zonas de depósito, las cuales generan surcos de erosión en el arrecife, y grandes depósitos de arena en las zonas profundas y detrás de las rompientes del arrecife, que generalmente forman cayos y son colonizados por manglares y vegetación terrestre (figura 1.2).

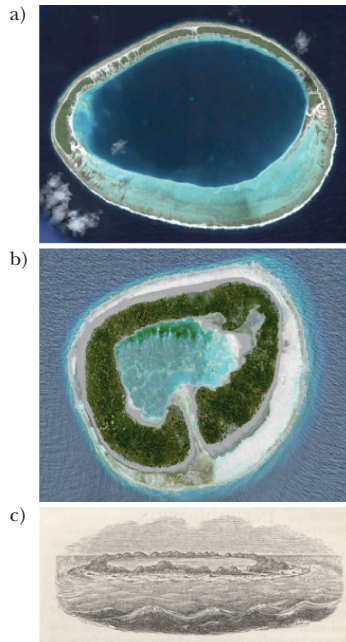


Figura 1.2. Arrecifes de coral de tipo atolón

a) Atolón de Hiti, en el archipiélago de Tuamotu, Polinesia Francesa (Hiti, $16^{\circ}43'52.50''\text{S}$ - $144^{\circ}5'55.25''\text{O}$, Google Earth, 10 de agosto del 2006; 5 de junio del 2010). b) Atolón de Pinaki con cerca de 2 km de longitud, la "Whitsunday I", mencionada por Darwin, en el archipiélago de Tuamotu, Polinesia Francesa ($19^{\circ}23'41.67''\text{S}$ - $138^{\circ}40'30.14''\text{O}$ Google Earth, 4 de enero del 2005; 5 de junio del 2010). c) Dibujo de la isla Whitsunday en el Pacífico, tomado del viaje del capitán Beechey (ca. 1826) primera figura en la página 2 de *La estructura y distribución de los arrecifes coralinos*, de Charles Darwin [1] (tomado de <http://darwin-online.org.uk/> [21]).

Las zonas traseras de los arrecifes y las lagunas en algunas oportunidades incluyen praderas de pastos marinos (figura 1.3). Hay millones de

pólipos coralinos que depositan diariamente carbonato de calcio, dado que su crecimiento y división depende de doblar el espacio ocupado por su antiguo esqueleto [3,4]. Por otro lado, hay cientos de organismos que erosionan esqueletos de coral muerto y vivo. Un sinnúmero de microorganismos e invertebrados como esponjas, moluscos, sipuncúlidos y crustáceos bioerosionan y habitan las partes internas del arrecife; mientras otros invertebrados, como los erizos y muchos peces lo hacen sobre la superficie de las colonias coralinas. Por ejemplo, los grandes peces loro del Indopacífico pueden potencialmente erosionar tanto carbonato de calcio al año como el que se produce en un arrecife; además son un factor de importancia para mantener una diversidad coralina alta, por no permitir la monopolización de ninguna especie en particular [5].

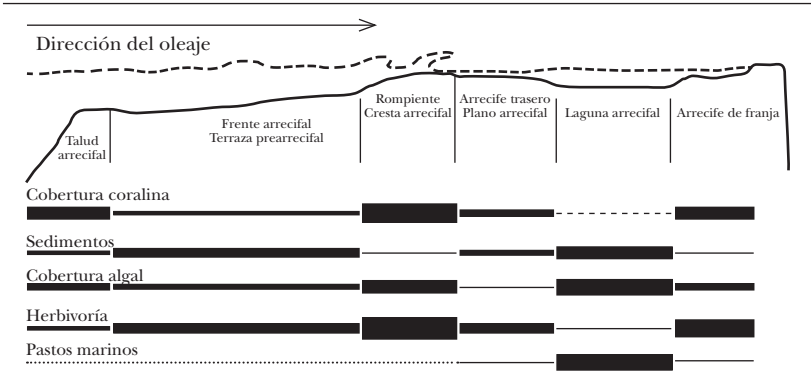


Figura 1.3. **Zonas en el arrecife coralino: arrecife de barrera (modificado de [2])**
El grosor de las líneas, en cada categoría, hace referencia a la abundancia o frecuencia en determinada zona del arrecife.

Ambos procesos (erosión y acreción) son mayores en aguas someras y disminuyen con la profundidad, lo que imprime una gran particularidad a los arrecifes de coral por tener zonas con mucha abundancia de corales, peces y erizos, tanto en las zonas de rompiente en el frente arrecifal como en las lagunas y zonas internas con buen flujo de agua (figura 1.3). Es importante destacar que también se desarrollan extensos arrecifes coralinos en las grandes profundidades marinas, los cuales generalmente son construidos por un número reducido de especies carentes de zooxantelas. Estos son ecosistemas que presentan dinámicas muy

particulares y diferentes en comparación de los arrecifes someros, lo cual los hace increíblemente interesantes (véanse detalles en el capítulo 3, “Corales y arrecifes de profundidad”, en este volumen).

Los arrecifes coralinos se han comparado con los oasis en los desiertos, debido a su gran diversidad y productividad, pese a que se desarrollan en las aguas cristalinas y pobres en nutrientes de los trópicos. Esto ocurre dada la naturaleza tanto autotrófica, por la producción primaria por parte las zooxantelas, como heterotrófica, por la producción secundaria y consumo de material suspendido, de la mayoría de los corales formadores de arrecifes. Los pólipos coralinos tienen capacidades de filtrar materia suspendida y plancton que capturan generalmente durante la noche. Esto le permite al coral tomar elementos limitantes para el desarrollo como el fósforo y nitrógeno, los cuales son suficientes para el mantenimiento de la simbiosis con zooxantelas y permitir que esta se encargue, mediante la fotosíntesis, de producir la mayoría de compuestos energéticos para el crecimiento de ambos [4,6].

Otro aspecto que permite un efectivo acoplamiento bentopelágico es la “trampa” de plancton que representa el arrecife coralino [7,8]. Cerca del 90% del plancton y materia suspendida en las aguas que llegan a los arrecifes son retenidos por los organismos arrecifales tanto de día como de noche. Esto ocurre porque las aguas deben cruzar por estrechos canales y aguas muy someras, así como residir temporalmente en las zonas traseras y lagunares del arrecife, de modo que la retención de partículas es una manera de “concentrar” los pocos recursos de las aguas tropicales oligotróficas.

El mantenimiento de un arrecife coralino depende en gran medida de la integridad trófica de este. El clímax ideal de un arrecife debe tener al menos un 50% de cobertura del fondo dominada por corales. Por esta razón, el recurso más preciado por el que compiten las especies bentónicas principalmente algas y corales, es el espacio para capturar la luz solar. Para alcanzar este clímax es necesario que los competidores más destacados, las algas, se mantengan en proporciones bajas, dado que su rápido crecimiento puede cubrir y asfixiar a los corales [9]. Ante este escenario, los peces herbívoros, como los loros y los cirujanos, que raspan y consumen las algas, tienen una función clave al controlar su

rápida expansión y permitir el buen mantenimiento y supervivencia de los corales.

Otros niveles tróficos superiores, como los grandes peces carnívoros (p. ej., meros, chernas y barracudas), activamente depredan a los peces herbívoros de menor tamaño, lo que permite que peces herbívoros de mayor tamaño tengan mayor sobrevivencia y, a la vez, controlen mejor las algas y mantengan el arrecife coralino saludable [10]. La integridad trófica del ecosistema es un elemento vital para garantizar su resiliencia, es decir, su habilidad de resistencia y recuperación a impactos, debido a que el delicado equilibrio ecológico de los arrecifes coralinos se puede desestabilizar por perturbaciones ambientales (p. ej., huracanes y tormentas) o inducidas por el hombre (p. ej., sobrepesca y contaminación) [11].

Así es como resulta evidente que la resiliencia del arrecife coralino está acoplada con el contexto social de las comunidades que lo rodean, ya que este es un agente importante de cambios y perturbaciones en el ecosistema [12]. De este modo, surge un paradigma completamente diferente en términos del manejo y conservación de los arrecifes coralinos, que es el de estudiar las dinámicas ecológicas de los ecosistemas bajo el contexto social, económico y político que los rodea (véanse detalles en el capítulo 7, “Resiliencia arrecifal: hacia áreas marinas protegidas más efectivas”, y el capítulo 8, “La capacidad adaptativa de las comunidades locales y su papel en el manejo de áreas marinas protegidas”, en este volumen).

Hoy en día, el cambio climático intensificado por la acción humana ha sido crítico para los arrecifes coralinos, pues ha ocasionado efectos como el calentamiento del agua que causa la ruptura entre la simbiosis de corales y zooxantelas o el blanqueamiento coralino [13], que además ha sido relacionado con la emergencia de diversas enfermedades coralinas [14]. Si las condiciones y tasas actuales de acumulación de gases de invernadero se mantienen constantes, en especial de dióxido de carbono, en el mediano a largo plazo se puede presentar una perturbación aún más preocupante, por la acidificación oceánica y su efecto en la calcificación de los organismos marinos [15], entre ellos los corales (véanse detalles en el capítulo 5, “Acidificación oceánica y sus implicaciones en la calcificación de organismos marinos”, en este volumen).

Por otro lado, el sostenimiento de un arrecife coralino depende en gran medida de procesos que influyen en la biología evolutiva de sus poblaciones. Uno de los aspectos más particulares de los corales, y muchas otras especies arrecifales, es la biología reproductiva, incluida una fertilización externa de los gametos. Básicamente, todos los individuos de la población deben sincronizarse con un estímulo ambiental, generalmente alguna fase lunar, y liberar simultáneamente los gametos durante una misma noche [16]. Estos eventos de liberación masiva ocurren una o dos veces al año generalmente para cada especie y en los corales del Indopacífico cerca de 30 especies pueden coincidir en el momento exacto de la liberación [17]. Esta estrategia reproductiva aumenta las posibilidades de dispersar muy lejos las larvas, así como de recibir nuevos miembros de la población de lugares remotos; pero, por otro lado, requiere una enorme inversión de recursos energéticos y la mortalidad antes del reclutamiento es muy alta. Paralelamente, existe otra estrategia en la cual las hembras retienen o incuban los huevos mientras que solo los machos liberan sus gametos, así la fertilización ocurre de manera interna.

En esta estrategia la sobrevivencia es muy alta, pero la dispersión de las larvas es muy limitada y expone a las poblaciones a una alta consanguinidad. En las dos estrategias, se pueden presentar errores y, dada la sincronía entre más de una especie, no es raro que dos o más especies de coral surjan híbridos [18], lo que influye mucho en los procesos evolutivos de los corales. Independientemente del tipo de estrategia reproductiva, el mantenimiento de poblaciones coralinas saludables depende en gran medida de aspectos ecológicos y oceanográficos, que inciden en el transporte de larvas y en la conectividad de las poblaciones de diversos arrecifes. Para comprender la ecología de las comunidades y los múltiples procesos que ocurren, se requiere entender primero lo que ocurre a nivel organizmico. El capítulo “*Hydractinia* como modelo de investigación en Cnidarios” nos introduce al organismo modelo vital en el estudio de los cnidarios y que serían muy difíciles de experimentar directamente en arrecifes coralinos.

En conclusión, un porcentaje considerable de las perspectivas de la ecología marina indudablemente están relacionadas con mejorar el

entendimiento de las características biológicas, ecológicas y evolutivas de los arrecifes coralinos, con el propósito de medir y predecir los efectos del cambio global actual sobre estos. Gracias a tal conocimiento es posible definir las estrategias de prevención y planificar el manejo para hacer más efectiva la protección de estos frágiles ecosistemas.

1.2. El legado de Charles Darwin al estudio de los arrecifes coralinos

No other work of mine was begun in so deductive a spirit as this; for the whole theory was thought out on the west coast of S. America before I had seen a true coral reef. I had therefore only to verify and extend my views by a careful examination of living reefs, but it should be observed that I had during the two previous years been incessantly attending to the effects on the shores of S. America of the intermittent elevation of the land, together with the denudation and the deposition of sediment. This necessarily led me to reflect much on the effects of subsidence, and it was easy to replace in imagination the continued deposition of sediment by the upward growth of this was to form my theory of the formation of atolls.

Charles Darwin, 1876, *Autobiography*
(tomado de Stoddart [19])

El anterior aparte, tomado de las notas autobiográficas de Charles Darwin, nos demuestra el gran interés, y posterior satisfacción, que fue para él proponer la teoría sobre la formación de los arrecifes coralinos y de los atolones [19]. Algo para destacar, como él mismo menciona, fue el carácter hipotético-deductivo de cómo afrontó este problema. Primero propuso cómo un mecanismo haría esto posible donde algunas áreas continentales se elevan mientras otras se hunden. Esta idea fue postulada basándose en observaciones realizadas en la geología de la costa de América del Sur para posteriormente someter a prueba sus ideas mediante observaciones más detalladas en el Indopacífico. Además, su interés en el estudio de los arrecifes coralinos surgió de estudiar detalladamente las propuestas existentes en su época que no le convencían.

La teoría de la formación de los atolones de Darwin es no solo una de las grandes contribuciones a la ciencia de este gran científico, sino un ejemplo valioso de cómo se debe hacer ciencia.

Charles Darwin ha sido una de las mentes más influyentes para la humanidad y en particular para el desarrollo de la teoría evolutiva actualmente aceptada. Sus ideas sobre la evolución y la selección natural no solamente revolucionaron las ciencias biológicas, sino que ejercieron gran influencia en todas las ramas de pensamiento. Por ejemplo, uno de los grandes filósofos del siglo xx, Karl Popper, propuso que su teoría del conocimiento puede ser absorbida por la teoría evolutiva de Darwin, que en esencia es la misma idea [20]. Darwin nos describe la evolución orgánica como linajes que parten de ramas ancestrales de un gran árbol de la vida. Popper, por otro lado, describe la evolución de las teorías científicas bajo la “selección” de la crítica y la corroboración donde las teorías sobrevivientes se van conectando hacia un tronco común.

Ambas teorías se pueden diagramar como un gran árbol ramificado, la vida abriéndose hacia las ramas terminales y las teorías científicas opuestamente hasta las más profundas. El inicio de este pensamiento evolutivo, podemos conjeturar, fue el producto de una de las mentes más críticas, de alguien con un pensamiento que excedió los estándares de su época. Darwin fue, ante todo, un gran crítico de las teorías y los científicos contemporáneos. Afortunadamente, sus esfuerzos para someter a prueba estas teorías, así como su búsqueda constante de proponer alternativas, nos han dejado teorías como la que expondremos a continuación.

Una de las características más interesantes de Darwin fue su carácter polifacético, producto de una innata curiosidad y búsqueda permanente de respuestas, lo que lo lleva a adquirir conocimientos y destrezas en variados campos del conocimiento. Estudios en teología, medicina y una gran motivación hacia el naturalismo, le forjaron una mente crítica capaz de afrontar diversos problemas de la ciencia [21]. Darwin no fue alguien dedicado toda su vida al estudio del origen de las especies, como quizás sea la impresión popular, sino que abordó muchísimas disciplinas, incluidas la geología y la biología marina, siendo sus estudios sobre los arrecifes coralinos su obra más notable en estos campos. *La estructura y*