



UNITED NATIONS  
UNIVERSITY

UNU-INWEH



# Conservando la Conectividad de los Arrecifes

Guía para los Administradores de las  
Áreas Marinas Protegidas

[www.gefcoral.org](http://www.gefcoral.org)

**Este guía se debe citar como:** P.F. Sale, H. Van Lavieren, M.C. Ablan Lagman, J. Atema, M. Butler, C. Fauvelot, J.D. Hogan, G.P. Jones, K.C. Lindeman, C.B. Paris, R. Steneck y H.L. Stewart. 2010. Conservando la Conectividad de los Arrecifes: Guía Para los Administradores de las Áreas Marinas Protegidas. Grupo de Trabajo de Conectividad, Programa de Investigación Dirigido a los Arrecifes de Coral y a la Creación de Capacidades para la Gestión, UNU-INWEH.

**Editado por:** Lisa Benedetti

**Traducción en Español:** Fabiola Sagrario Sosa Rodríguez

**Foto de la portada:** Commonwealth de Australia (GBRMPA)



---

**ISBN:** 978-1-9213-17-06-4

**Código del producto:** CRTR 004/2010

**Diseño editorial y producción:** Currie Comunicaciones, Melbourne, Australia, mayo de 2010.

© Programa de Investigación Dirigido a los Arrecifes de Coral y a la Creación de Capacidades para la Gestión, 2010.

# Contenido

Agradecimientos	2
La degradación de los mares costeros y la razón de la existencia de este guía	3
¿Cómo utilizar este guía?	5
1. ¿Qué es conectividad?	7
2. ¿Qué procesos causan la conectividad?	11
3. El uso de la conectividad en la gestión	29
4. La ciencia de la conectividad	45
5. La integración de la conectividad con la gestión actual	67
Referencias	77
Apéndice	83

Acrónimos  
Definiciones clave  
Miembros del Grupo de Trabajo de Conectividad del PIDAC  
Detalles de los autores

1

2

3

4

5

## Agradecimientos

Este guía es un producto del Programa de investigación dirigido a los arrecifes de coral y a la creación de capacidades para la gestión (PIDAC)—un proyecto de desarrollo internacional financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (FMAM), implementado por el Banco Mundial y ejecutado por la Universidad de Queensland, así como por numerosas instituciones asociadas que incluyen el Instituto para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-INWEH). La UNU-INWEH está encargada de la dirección del Grupo de Trabajo de Conectividad. Agradezco a los numerosos miembros del programa de conectividad PIDAC, quienes participaron como autores, proporcionaron imágenes o asesoría, y ayudaron de diversas formas para llevar a cabo a buen término la elaboración de este guía.

Este guía ha sido producido por el Grupo de Trabajo de Conectividad PIDAC con la asistencia de la UNU-INWEH y el CRIOBE (Le Centre de Recherches et Insulaires Observatoire de l'Environnement de Polinesia Francesa). El CRIOBE fue sede del taller Lecciones de nuestros días de la conectividad en los sistemas de arrecifes de coral y sus objetivos para el futuro, el cual se realizó en Moorea, en marzo de 2009. Durante este taller se finalizó la planificación de su elaboración. También han sido de gran utilidad las discusiones, el suministro de información detallada e imágenes aportadas por los siguientes participantes del taller: Jesús Ernesto Arias González, de CINVESTAV-Unidad Mérida, México; Paul H. Barber, de la Universidad de California, EE.UU.; Michael Berumen, del Instituto Oceanográfico Woods Hole, EE.UU.; Brian Bowen, de la Universidad de Hawai, EE.UU.; Michael L. Domeier, del Instituto de Ciencias para la Conservación Marina, EE.UU.; Cécile Fauvelot, de la Universidad de Perpignan, Francia; Daniel Heath, de la Universidad de Windsor, Canadá; Serge Planes, de la Universidad de Perpignan de Francia; Tonya Shearer, del Instituto de Tecnología de Georgia, EE.UU., y Hannah L. Stewart, del Departamento de Pesca y Océanos, Canadá. También me gustaría dar las gracias a Alina M. Szmant, de la Universidad de Carolina del Norte en Wilmington, EE.UU.

Estoy muy agradecido con todos los miembros del Grupo de Trabajo de Conectividad quienes han trabajado constantemente para garantizar que la información proporcionada sea precisa y actual. Le doy las gracias a Gabrielle Sheehan de Currie Comunicaciones y a Adam Cusak de Cusak Design, por su paciencia y creatividad en el diseño y finalización de este guía. De igual forma, agradezco a Melanie King de la Universidad de Queensland, quien realizó muchos milagros, y en particular a Hanneke Van Lavieren y Lisa Benedetti de la UNU-INWEH, quienes trabajaron incansablemente como editoras finales para convertir el borrador de este proyecto en un producto profesional y sofisticado.



Peter F. Sale  
UNU-INWEH

## La degradación de los mares costeros y la razón de la existencia de este guía

El entorno de los mares costeros proporciona enormes beneficios que incluyen la pesca, otros productos del mar, así como servicios ambientales que incluyen la protección costera, la purificación del agua y el establecimiento de puertos, embarcaderos, centros urbanos, destinos turísticos, además de numerosas actividades recreativas. Los ambientes costeros también pueden limpiar el alma, estimular la mente y restaurar el cuerpo de las personas. Sin embargo, 40% del total de la población vive dentro de un área de 50 km alrededor de la costa, aunado a nuestro entusiasmo por la vida costera, están causando cada vez un mayor daño ambiental sobre estos ecosistemas.

Desafortunadamente, las prácticas actuales de gestión en la mayoría de las regiones costeras son ineficaces. De continuar, se pondrán en peligro tanto las economías como los ecosistemas costeros en donde se concentra más de la mitad de la población mundial. La tendencia de los ecosistemas marinos costeros en las últimas décadas ha sido de una degradación progresiva que enfrenta el aumento de la población humana, una demanda creciente de los recursos costeros y un uso cada vez más intensivo del medio ambiente costero. Actualmente, el cambio climático está añadiendo a las presiones existentes sobre este medio ambiente más ecosistemas en situación de estrés.



Figura 1. El entorno de los mares costeros proporciona enormes beneficios que incluyen la pesca, otros productos del mar, así como servicios ambientales como la protección costera, la purificación del agua y el establecimiento de puertos, embarcaderos, centros urbanos, destinos turísticos, además de numerosas actividades recreativas. Los ambientes costeros también pueden limpiar el alma, estimular la mente y restaurar el cuerpo de las personas. Foto: Hanneke Van Lavieren

La degradación de los ambientes costeros se ha convertido en uno de los problemas más significativos para muchos países tropicales, en cuyos territorios existen arrecifes de coral. En estos países, los arrecifes suelen contribuir en una proporción considerable de su PIB, debido a su importancia en el turismo y la pesca. Asimismo, los arrecifes de coral proporcionan una fuente relevante de alimentos con un alto contenido en proteínas y apoyan a los pueblos costeros a preservar sus estilos de vida tradicionales.

Este guía aborda en específico, una preocupación que debe ser considerada para llevar a cabo una gestión eficaz de los ambientes marinos costeros– el tema de la conectividad. Las áreas marinas protegidas (AMPs) se han convertido en una importante herramienta para la gestión, especialmente en las regiones tropicales, en donde dicha conectividad requiere ser tomada en cuenta para el diseño efectivo de las AMPs, así como de las redes de AMPs. El tema de la conectividad también está relacionado con muchos otros aspectos de la gestión costera por dos razones: en primer lugar, el agua mueve y transporta elementos como sedimentos, nutrientes y contaminantes a distancias considerables; en segundo lugar, la mayoría de los organismos marinos también se mueven dentro de la corriente de agua de los océanos para transportarse entre diferentes lugares. Nuestro objetivo es apoyar a los administradores de las AMPs, así como a otros actores involucrados, en la comprensión y aplicación del concepto de conectividad en su trabajo. De esta forma, esperamos poder ayudarlos a fortalecer sus habilidades para hacer frente a la difícil tarea de preservar los ambientes marinos costeros. A la par, esta iniciativa también ayudará a proteger la pesca y otros productos que provienen del mar, además de los servicios ambientales que proporcionan los ambientes marinos costeros.

## ¿Cómo utilizar este guía?

Este guía contiene un resumen de la ciencia de la conectividad de los arrecifes de coral y una guía para orientar a sus lectores sobre cómo utilizar esta información para apoyarlos en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de los mares costeros. Aunque se ha escrito para los administradores de los arrecifes de coral, los tomadores de decisiones y otros actores involucrados en los esfuerzos de gestión de estos ecosistemas, el contenido que aborda este guía también es de gran importancia y utilidad para los administradores de las aguas costeras en todos los océanos. Todavía falta descubrir una gran parte de la ciencia de la conectividad; a pesar de ello, la investigación científica está llevando a cabo un esfuerzo sustancial para hacer frente a los vacíos actuales en este campo del conocimiento y para traducir este conocimiento en prácticas que permitan mejorar la gestión de los arrecifes.

Este guía explica qué entendemos por el concepto de “conectividad” y discute los diversos usos de este término. El estudio del concepto de conectividad se ha enfocado principalmente en la conectividad poblacional—la medida de conexión que existe entre las poblaciones locales de una especie—, ya que es el tipo de conectividad más difícil de manejar y el menos utilizado con eficacia en las prácticas actuales de gestión. La conectividad poblacional se presenta en dos formas: la conectividad evolutiva (o conectividad genética) y la conectividad demográfica (o conectividad ecológica). La primera se asocia con las diferencias genéticas que se presentan en las diversas poblaciones de la misma especie. Este tipo de conectividad puede ser informativa al ser estudiada en el largo plazo (evolutiva) y al analizar las grandes escalas de los patrones bio-geográficos de dispersión de los organismos. También puede ser útil para los gerentes que desean evaluar la singularidad genética de las poblaciones, cuando se toman decisiones relativas a la preservación de su biodiversidad. En contraste, la conectividad demográfica se refiere al grado de vinculación que existe entre las poblaciones locales cercanas de una especie por el intercambio de individuos entre especies. Este tipo de conectividad es muy importante para las áreas marinas protegidas (AMPs), y en particular para las reservas no pesqueras (RNPs), cuando se toman decisiones sobre su diseño y gestión, en especial al tratar de determinar la cantidad óptima de los hábitats de arrecifes que son necesarios proteger para la conservación de estos ecosistemas o cuando el objetivo es llevar a cabo una gestión precautoria de la pesca. Otras formas de conectividad se refieren a la transmisión de nutrientes, contaminantes u otros elementos entre diferentes lugares, mediante el transporte pasivo a través de las corrientes de agua. Estas formas de conectividad también son importantes para los administradores de las áreas costeras, pero son más fáciles de entender y aplicar, ya que este tipo de transmisión se explica únicamente por procesos físicos.



Figura 2. Reserva marina del Cayo de las Aguas del Sur, Belice. Foto: Ron Schaasberg

Este documento ofrece un resumen sobre lo que se sabe actualmente en la ciencia de la conectividad. De igual forma, menciona las técnicas y herramientas utilizadas para la medición de la conectividad de los distintos tipos de organismos marinos costeros (como corales, peces y langostas). También se destacan los vacíos en nuestro conocimiento y se ofrecen tanto sugerencias como consejos a cerca de cómo utilizar la información relacionada con la conectividad que está actualmente disponible. Una fuerte petición para los científicos y los administradores de las ecosistemas marinos costeros consiste en crear grupos de trabajo con una colaboración estrecha, así como utilizar la

gestión de las actividades pesqueras en un contexto de manejo adaptativo para avanzar de manera simultánea en la comprensión científica de la conectividad, utilizando de manera simultánea el mejor conocimiento disponible para orientar la gestión de las decisiones actuales.

Este guía ha sido escrito para que la ciencia sea lo más accesible posible para los administradores de los ecosistemas marinos costeros con diferentes niveles de formación científica o técnica. Para aquellos que no tienen tiempo de leer todo el documento, los puntos clave se resumen en el apartado de “Tablero de mensajes”. También se ofrece una lista de contactos útiles que participan en el Proyecto de investigación dirigido a los arrecifes de coral y a la creación de capacidades para la gestión (PIDAC), además de varias referencias bibliográficas relevantes sobre la literatura científica existente en materia de conectividad para quienes desean profundizar en este campo.



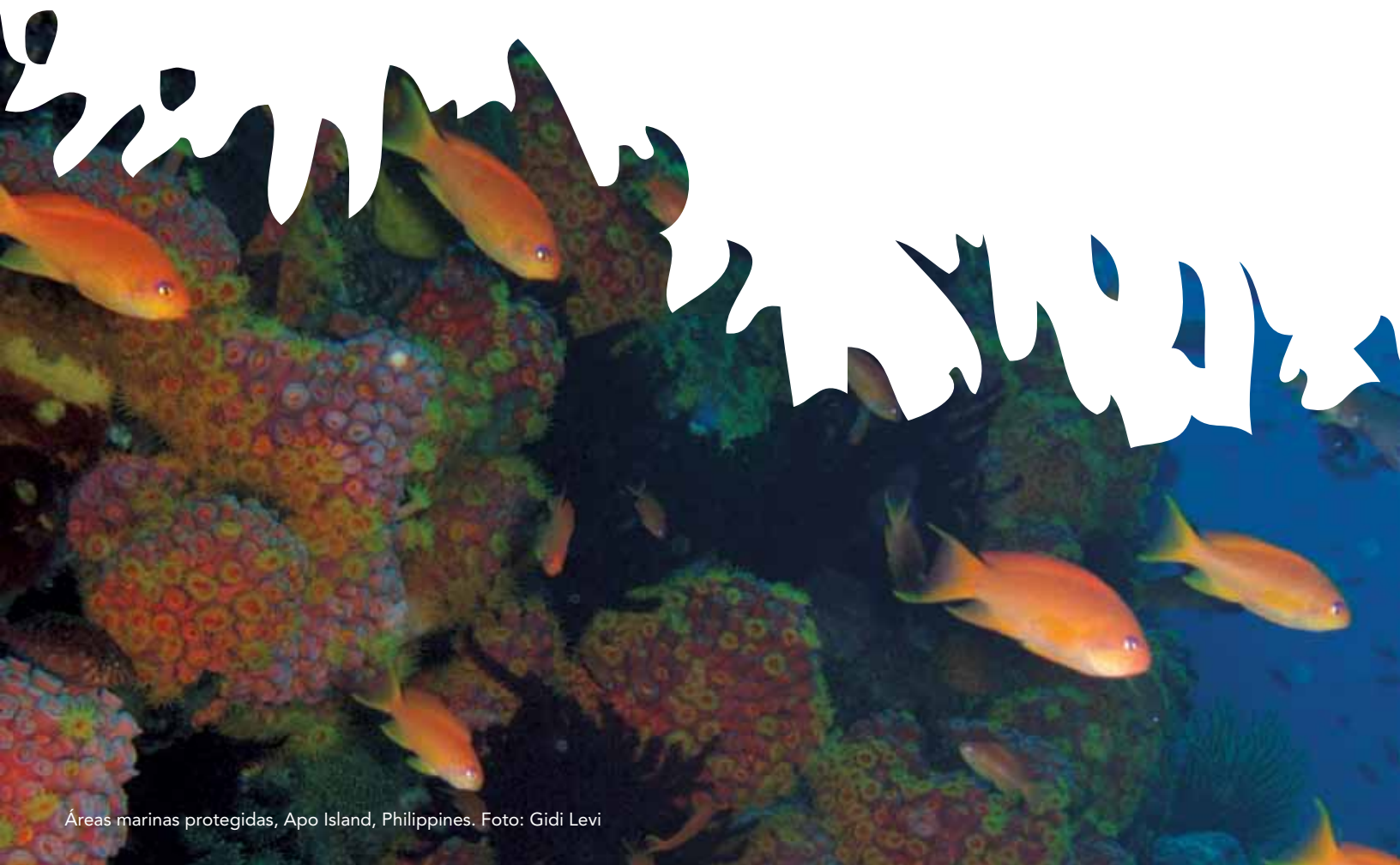
# Sección 1

## ¿Qué es conectividad?

En esta sección podrán encontrar:

*La importancia particular de la conectividad poblacional*

---



## 1. ¿Qué es conectividad?

Los arrecifes de coral son habitats que se distribuyen irregularmente y se encuentran en los océanos proporcionando un mecanismo para el transporte entre ellos. Otros ejemplos de ambientes oceánicos incluyen los manglares, las praderas de pastos marinos y otros ambientes costeros. Cada área local, de cualquiera de estos entornos costeros, mantiene poblaciones de organismos particulares cuando son lo suficientemente grandes como para hacerlo. De manera que, la distribución desigual de los habitats resulta en un patrón de numerosas, y más o menos aisladas, poblaciones locales de cada especie que son características de esa región, es decir, más o menos aisladas, porque cada arrecife de coral y otros habitats distribuidos irregularmente, rara vez son tan remotos que no hay movimiento de organismos entre los habitats. Este movimiento de los organismos de un habitat a otro, es una forma de conectividad.



**Figura 3.** Formación de zonas de arrecifes en Gran barrera de coral, Australia. La distribución desigual de los arrecifes de coral se subdivide en muchas poblaciones con diferentes escalas espaciales. Foto: Ove Hoegh-Guldberg

La conectividad es el flujo de elementos o productos entre ubicaciones que pueden ser del mismo tipo o diferentes (por ejemplo, los arrecifes y/o praderas de pastos marinos). La conectividad existe por los nutrientes, los organismos en los sedimentos, los contaminantes y la dispersión individual de organismos, es decir, cualquier elemento que tenga el potencial para moverse entre dos o más arrecifes, al igual que entre otros ambientes. En el contexto de la gestión costera, la transferencia eficaz de individuos (por lo general, las larvas pelágicas) entre las poblaciones locales es una de las más importantes, y sin duda, la más difícil forma de conectividad de cuantificar. Si bien la transferencia de materiales no vivos, como sedimentos o contaminantes es probable que sea determinada principalmente por la hidrodinámica local y regional, también se sabe que la transferencia de organismos es más compleja. Esto se debe a que el transporte pasivo probablemente sea modificado por las capacidades sensoriales y de comportamiento de las larvas individuales. La transferencia efectiva entre las poblaciones requiere el asentamiento exitoso de las poblaciones reproductoras. Por lo tanto, la conectividad entre las poblaciones no puede ser medida centrándose sólo en los patrones de dispersión, sino que se deben incluir de igual forma, el reclutamiento exitoso de la población receptora.

## Cuadro 1. Tipos de conectividad poblacional

Conectividad poblacional puede presentarse de dos formas:

- 1) **Conectividad evolutiva** (o conectividad genética): mide la cantidad del flujo de genes que se producen entre las poblaciones de más de una escala de tiempo, abarcando varias generaciones. La conectividad evolutiva determina el alcance de las diferencias genéticas entre las poblaciones.
- 2) **Conectividad demográfica** (o conectividad ecológica): consiste en un intercambio de individuos entre las poblaciones locales que pueden influir en la demografía de la población total y en su dinámica. La conectividad demográfica incluye:
  - El intercambio de crías entre las poblaciones de larvas por medio de la dispersión;
  - El reclutamiento de los organismos jóvenes y su supervivencia hasta la edad reproductiva;
  - Incluye cualquier movimiento de gran escala de los organismos jóvenes y los adultos entre diferentes ubicaciones.

### 1.1 La importancia particular de la conectividad poblacional

El traslado de los individuos entre las poblaciones permite la transferencia de genes. Por lo tanto, es útil hacer una distinción entre los dos tipos de conectividad que influyen sobre las poblaciones de organismos marinos costeros: la conectividad evolutiva y la conectividad demográfica. El intercambio relativamente bajo de los organismos individuales también puede permitir un nivel suficiente de transferencia de genes, y por ende, puede dar lugar a poblaciones genéticamente similares. En el caso de niveles de intercambio excepcionalmente bajos de organismos individuales, las poblaciones tienden a divergir genéticamente de manera muy lenta, por medio de procesos como la deriva genética, la mutación y la selección diferencial. Con el tiempo, estas poblaciones pueden convertirse en especies separadas.

Los bajos niveles de intercambio que mantienen la similitud genética entre las poblaciones vecinas se conoce como conectividad evolutiva (o conectividad genética). Este intercambio, tal vez de uno o dos individuos por generación es usualmente demasiado bajo para tener algún efecto medible sobre las tasas de crecimiento de la población, es decir, los intercambios que se presentan son demográficamente insignificantes. A ciertas tasas de intercambio consideradas como elevadas, las poblaciones siguen siendo muy similares genéticamente, por ende, las tasas tanto de llegada como de salida de los individuos son lo suficientemente altas para tener un impacto medible en las tasas de crecimiento de cada población. En estos casos, se trata del concepto de conectividad demográfica (o conectividad ecológica).

La conectividad evolutiva y demográfica son aspectos de igual importancia que se deben tomar en cuenta en la gestión costera, aunque su importancia tiene diferentes implicaciones. Un administrador de los ambientes marinos costeros, cuyo principal objetivo es la conservación de la biodiversidad, estará especialmente interesado en los patrones producidos por la conectividad evolutiva. Esto implica que las decisiones de conservación que realice dicho administrador se basaran, a menudo, en si una determinada población es taxonómicamente única o si no lo es. La falta de conectividad evolutiva frecuentemente permite identificar la existencia de este patrón. Además, los patrones de conectividad evolutiva entre los lugares pueden ayudar a revelar patrones subyacentes del flujo de genes, por ende, también pueden probablemente revelar eventos biogeográficos ocurridos en el pasado o futuro cercano.

Cuando la conectividad demográfica existe entre las poblaciones, ésta puede influir en los patrones de crecimiento o degradación. Esto ocurre cuando el número de individuos intercambiados por generación es lo suficientemente grande para tener un impacto medible en la tasa de crecimiento poblacional de una o varias de las poblaciones de intercambio. Una preocupación fundamental

para muchos de los administradores de los ambientes marinos costeros se remite a asegurar que la pesca sea sostenible o que los arrecifes de coral, frecuentemente administrados para el turismo, puedan mantener continuamente el rango normal de las especies. Por consiguiente, estos administradores serán los principales interesados en la conectividad demográfica. Las AMPs conocidas como reservas no pesqueras deben ser diseñadas teniendo en cuenta este tipo de conectividad, al igual que las redes de dichas reservas no pesqueras.

## Tablero de mensajes

- Se ha generalizado el uso de las AMPs y de las redes de dichas AMPs como una herramienta de gestión, especialmente en las regiones tropicales. La conectividad entre las especies de estas áreas es considerada un componente crítico en su diseño.
- La conectividad evolutiva y la conectividad demográfica son dos aspectos igualmente importantes a considerar en la gestión costera. Ambos tipos de conectividad son importantes, aunque de diferentes formas.
- En el contexto de la gestión costera, la transferencia eficaz de los individuos (usualmente, las larvas pelágicas) entre las poblaciones locales es una de las formas de conectividad más importantes en los ambientes costeros, y sin duda, este tipo de conectividad es la más difícil de cuantificar.
- Todavía gran parte de la ciencia de la conectividad se necesita descubrir y desarrollar. Sin embargo, la investigación científica está llevando a cabo un esfuerzo sustancial para hacer frente a los vacíos de conocimiento en este campo, además de traducir dicho conocimiento a la práctica para mejorar la gestión de los arrecifes.

## Sección 2

# ¿Qué procesos causan la conectividad?

En esta sección podrán encontrar:

*El agua se mueve, a menudo en formas misteriosas*

---

*La mayoría de los organismos marinos tienen larvas pelágicas*

---

*Muchos organismos marinos se mueven después de su vida larvaria*

---

2



## 2. ¿Qué procesos causan la conectividad?

### 2.1 El agua se mueve, a menudo en formas misteriosas

El ambiente marino es bañado por el agua, y es un medio que rara vez está en reposo. El movimiento del agua puede transportar objetos, como plantas y animales, de un lugar a otro. Los organismos como las algas marinas, las ostras o los corales, que estén fijos en el sustrato marino no se pueden mover, pero el paso del flujo del agua les proporciona alimentos y nutrientes. Los organismos que no están sujetos al sustrato marino, como los peces, las medusas, los cangrejos o las ballenas asesinas, podrán ser transportados por las masas de agua, dentro de las cuales estos organismos se trasladan nadando. De hecho, en el océano abierto, si un organismo no cuenta con el equivalente de un Sistema de Posicionamiento Global (SPG) para determinar su ubicación o con una referencia externa como la vista de una isla lejana, no puede detectar que está siendo transportado.



**Figura 4.** Formación de remolinos detrás de un arrecife, Arrecife Bowden en Australia. Procesos oceanográficos, como por ejemplo estos remolinos y su variabilidad en el tiempo y en el espacio, determina en gran medida los patrones de conectividad por medio de la dispersión de las larvas entre localidades. Foto: James Oliver, Reef Base

El movimiento del agua oceánica es provocado diversos factores que incluyen la rotación de la tierra, el viento, las mareas y la fricción contra los márgenes continentales. También dicho movimiento es afectado por los cambios en la salinidad del agua o en la temperatura. El agua con una salinidad y temperatura particular tiene un peso específico, por ende, una masa de agua de la misma salinidad y temperatura tiende a moverse como una sola unidad. Por otro lado, las masas de agua adyacentes cuya temperatura o salinidad difiere ligeramente, pueden permanecer como capas distintas durante largos periodos de tiempo hasta que la mezcla promedie las diferencias, favoreciendo que dichas capas que se encontraban separadas, se fusionen. Conforme el agua de la superficie se calienta por el calor del sol, ésta se hace menos densa y se mueve hacia la superficie; mientras que el agua más fría se mueve hacia las partes bajas. Al mismo tiempo, la evaporación debida al calor del sol hace que las aguas superficiales sean más salinas; el aumento en la salinidad de estas aguas incrementa también su densidad, haciéndolas más propensas a hundirse por debajo de las capas más profundas.

Uniendo todos estos factores, es posible analizar el mar como un conjunto de áreas adyacentes de agua que se encuentran en movimiento relativo una respecto a la otra, en dirección tanto horizontal como vertical. La escala de estos patrones de movimiento se inicia con los remolinos más pequeños de tan sólo centímetros de tamaño hasta llegar a escalas mayores como las corrientes de larga duración o los giros de rotación (o grandes remolinos) que pueden abarcar cientos de kilómetros de ancho, además de viajar miles de millas. La Corriente del Golfo es un ejemplo de un enorme río de agua que se mueve dentro del mar, desde el Caribe hasta el Estrecho de la Florida, a lo largo de la costa oriental de América del Norte hasta las costas del norte de Europa. Esta corriente oceánica desempeña un papel importante en el transporte de calor desde los trópicos hacia los polos, al igual que otras corrientes comparables de gran escala localizadas en otras cuencas oceánicas.

Cuando una masa de agua en movimiento entra en contacto con un margen continental, una isla en medio del océano, o un arrecife de coral, las fuerzas de fricción modifican los patrones de movimiento, resultando en corrientes ascendentes, en la refracción de las olas y en lugares donde se presenta una intensa acción de las olas o donde prevalecen las condiciones de calma. La complejidad del movimiento del océano se ha hecho cada vez más evidente con el desarrollo de instrumentos más sofisticados para la observación de los océanos. Los patrones de movimiento de gran escala pueden ser vistos con facilidad con varios sistemas de imágenes satelitales; mientras que los movimientos verticales pueden ser detectados usando una gran variedad de dispositivos que pueden ser colocados en el fondo del océano, amarrados en medio de las aguas, así como arrastrados por buques u otro tipo de embarcaciones. Junto con las mejoras en la comprensión tanto de los patrones como de los procesos hidrodinámicos también se ha desarrollado una mayor capacidad para modelar con precisión estos patrones. Este es el entorno en el que todos los organismos marinos pasan sus vidas.

El movimiento de los océanos se vuelve más complejo cerca de las costas, ya que es donde las fuerzas que mueven las capas de agua chocan contra el sustrato relativamente inmóvil, así como con la costa (por ejemplo, el margen de la plataforma oceánica, los arrecifes, los bancos marinos, las islas, los cabos y las playas). Esta interacción crea corrientes ascendentes, favorece la refracción y el rompimiento de las olas, además de permitir el transporte de sedimentos a través de las corrientes a largo de la costa. La descarga del caudal fluvial introduce menos agua salina en las aguas oceánicas. Este caudal primero flota sobre las capas más salinas, pero posteriormente, se mezcla lentamente a través de la difusión por medio de remolinos. Las descargas de los grandes ríos, como en el caso del Río Orinoco en el Caribe, pueden generar una columna de agua superficial de baja salinidad que se extiende miles de kilómetros desde la desembocadura del río. Este caudal transporta sedimentos, nutrientes y contaminantes, así como algunos organismos que se encuentran en una fase de dispersión. En las costas que carecen de ríos, las cuales pueden abarcar grandes extensiones, la descarga de agua dulce es más difusa (al igual que para los nutrientes y contaminantes). Esta descarga se realiza principalmente por medio de la escorrentía superficial o subterránea. En muchas de las regiones de arrecifes, los paisajes costeros están constituidos por piedras calizas erosionadas (frecuentemente arrecifes fósiles) que reciben grandes cantidades de agua dulce descargadas a través de las corrientes subterráneas. Este paisaje se puede extender por varios kilómetros a la orilla de las costas. La presencia de las rocas calizas crea corrientes ascendentes que a veces son visibles desde la superficie. Los patrones de la marea, que son esencialmente ondas de periodos lentos, también se ven distorsionadas por las interacciones de la masa de agua superficial o de la batimetría litoral. Esta interacción produce variaciones en la altura de la marea y en el tiempo en que ésta se modifica de un lugar a otro a lo largo de las zonas costeras. Las mareas alteran los niveles locales del mar en un ciclo diario regular, de aproximadamente 6.25 horas en la mayoría de localidades. Estas alteraciones pueden modificar las pautas de circulación del agua como resultado de los cambios en las corrientes y en las olas, cuando de manera alternada el agua se vuelve ya sea más profunda o más superficial. El resultado integral de cada uno de estos procesos por separado determina los patrones de movimiento real del agua cerca de un arrecife o de la costa, así como la manera en que el movimiento del agua define los patrones de conectividad entre las áreas costeras marinas.

## 2.2 La mayoría de los organismos marinos tienen larvas pelágicas

Con excepción de algunos grandes depredadores, los organismos marinos de los arrecifes y de otros hábitats costeros son relativamente sedentarios a lo largo de la mayor parte de sus vidas. Mientras las grandes ballenas y tiburones, al igual que algunas variedades de tortugas, pueden viajar largas distancias en las escalas de las cuencas oceánicas, muchos de los tiburones comunes que habitan en los arrecifes y de los pez meros más grandes, pasan sus vidas moviéndose algunos kilómetros, en vez de moverse cientos de kilómetros como otras especies marinas. Asimismo, son numerosos los pequeños peces de arrecife que viven toda su vida en un espacio comparable al de una sala promedio. Por ejemplo, muchos de los pequeños gobios que son comensales en los corales acropóridos ramificados y algunos damiselas que encuentran refugio entre las ramas de los corales, pasan su vida en las inmediaciones de una sola colonia de coral. Además de estas especies móviles, relativamente sedentarias, en el hábitat de los arrecifes también se identifican una amplia gama de especies que son sésiles—los mismos corales y una amplia variedad de taxones, incluidos los gusanos de tubo, las esponjas, los percebes, las ascidias y las algas están adheridas permanentemente al sustrato.

Este modo de vida sedentaria o sésil no se presenta durante las primeras etapas de desarrollo de varios de los organismos marinos costeros. La gran mayoría de las especies de los arrecifes experimentan estadios larvarios pelágicos y producen huevos pelágicos; cuando los huevos son eliminados dentro de la columna de agua y las larvas permanecen en las capas medias de agua por varios días o semanas, es muy probable que su dispersión sea considerablemente extensiva. De hecho, un argumento que es ampliamente aceptado en este campo del conocimiento sobre el por qué los organismos de los arrecifes producen larvas pelágicas se explica porque esta forma de reproducción es esencial para la dispersión. En un mundo que cambia con el paso del tiempo, el organismo que sea más capaz de dispersar sus crías incrementa la probabilidad de que éstas persistan. Lo anterior, debido a que no existen sitios que sean adecuados permanentemente para ser ocupados por una especie en particular.

### Tablero de mensajes

- La complejidad del movimiento del océano se ha hecho cada vez más evidente con el desarrollo de instrumentos más sofisticados para la observación de los océanos.
- La forma en que se mueve el agua determinará los patrones de conectividad entre los diferentes lugares en donde se asienten los organismos marinos costeros.
- La mayoría de los organismos marinos de los arrecifes y de otros hábitats de las aguas costeras son relativamente sedentarios a lo largo de la mayor parte de sus vidas. Este modo de vida sedentario o sésil no se presenta durante toda la vida de todas las especies de arrecife. De hecho, la gran mayoría de las especies de arrecife experimentan estadios larvarios pelágicos y producen huevos pelágicos.
- En un mundo que cambia con el paso del tiempo, los organismos que sean más capaces de dispersar sus crías incrementan la probabilidad de que éstas persistan, debido a que ningún sitio es adecuado para ser ocupado por una especie en particular de manera permanente.



### 2.2.1 El desove en una noche especial del año

Dado que los patrones de movimiento del agua varían a través del tiempo para los organismos que ponen sus huevos o para las larvas que se localizan en la columna de agua, habrá algunas momentos a lo largo del año que serán mejores que otros para garantizar una reproducción exitosa – los huevos depositados en los momentos más adecuados se verán favorecidos, ya sea porque dichos huevos serán dispersados a lo largo de mejores trayectorias o porque serán menos sujetos a sufrir las consecuencias de la depredación en el camino. Esta situación, además del hecho que el esfuerzo reproductivo es normalmente más exitoso cuando los miembros de una especie se reproducen al mismo tiempo, ha dado lugar a que muchas especies exhiban un momento preciso para llevar a cabo sus actividades de desove. Estos eventos están ligados con frecuencia a los ciclos de la marea (normalmente el desove ocurre cuando las mareas comienzan a menguar – lo cual facilita que los huevos se diseminen fuera del arrecife estando lejos de sus hambrientos planctívoros) – durante los picos de las mareas mensuales que se presentan en la primavera y algunas veces cuando se registran las mareas más extremas del año, eventos que ocurren también durante la primavera. Un ejemplo bien conocido es el de la masa de desove en la Gran Barrera de Arrecifes de Coral. En estos arrecifes, la mayoría de las especies desovan al mismo tiempo, una o dos noches al año, por lo general 4 o 5 noches después de la luna nueva del mes de noviembre y de la marea más grande del año que se presenta en la primavera. A veces, se registran eventos de desove un mes más tarde, pero éstos son más pequeños.



Figura 5. Las claves principales para el desove parecen ser la temperatura del océano, el ciclo lunar y las mareas. En los días de calma después de un evento masivo de desove de coral, las manchas del desove (y por lo tanto, la dispersión de las larvas), se pueden rastrear desde el aire. Foto: Charlie Veron

Algunas especies de peces desovan todos los días durante gran parte del año, ocurriendo dicho desove durante la marea alta a lo largo del día. Otras especies tienen ciclos de desove semi-lunares o lunares, una o dos veces al mes, y reiteradamente durante varios meses. En el caso de otras especies, se sabe que desovan durante un período de 2 a 3 semanas en un momento específico del año (generalmente durante las mareas más altas que se presentan en la primavera). Entre los organismos que se reproducen por medio de huevos como las damiselas y algunos crustáceos, su desove se presenta en momentos muy cercanos en el tiempo. En varias especies de pez damisela se ha confirmado que el desove se produce poco después del atardecer durante la marea viva. En tales casos, el desove está también estrechamente sincronizado, aunque la liberación de los huevos se presenta en el momento más oportuno.

### 2.2.2 Comportamiento larval

En esta sección se examina brevemente la biología de los estados larvales. Lejos de ser organismos “embrionarios” o “en desarrollo”, las larvas son completamente funcionales, bien adaptadas a la vida pelágica y seleccionadas por sus habilidades que les permiten encontrar un hábitat juvenil adecuado, en donde se asientan al final de su vida larvaria.

Los huevos pelágicos se comportan como pequeñas partículas que tienen fuerza para fijarse o adherirse. En los días de calma, los huevos de los corales están positivamente boyantes y pueden formar una espuma visible en la superficie del agua. Las larvas recién eclosionadas están usualmente un poco limitadas de comportamiento, pero no incapacitadas. Por ejemplo, las larvas plánula de coral son capaces de modificar su flotabilidad, avanzando de esta forma una mayor o menor



Figura 6. Una larva de la langosta espinosa del Caribe (*Panulirus argus*). Estas larvas de vida larga gastan más de seis meses en el plancton, durante los cuales pueden potencialmente dispersarse miles de kilómetros. Sin embargo, las investigaciones recientes sobre la conectividad ponen en evidencia que su comportamiento migratorio vertical puede reducir esta dispersión a pocos cientos de kilómetros, lo que a su vez, puede duplicar su éxito para asentarse en las zonas de cría de las costas. Foto: Mark Butler

distancia en la columna de agua, siendo tal vez capaz de tomar ventaja de las actuales estructuras en ciertas profundidades. Entre los peces, las larvas recién nacidas son físicamente débiles y lo suficientemente pequeñas para que la viscosidad del agua se convierta en un factor importante para que éstas no se hundan, además de determinar su tasa de movilidad. Muchas larvas de peces poseen radios de aletas muy alargadas o filamentos que pueden obstaculizar la función de hundirse a través de este medio viscoso (Leis 1991).

Aun cuando son muy jóvenes, las larvas se encuentran a profundidades específicas (dichas profundidades cambian de acuerdo con la hora del día y la edad de las larvas). Esto indica que son capaces de ajustar su flotabilidad, y por lo tanto, se pueden mover verticalmente dentro de las masas de agua. Sin embargo, las larvas de los arrecifes de coral no se quedan pequeñas y limitadas en su conducta. A pesar de que están en gran medida a merced del movimiento del agua durante sus primeras etapas de gestación, a medida que crecen desarrollan una capacidad limitada

de locomoción, así como la capacidad de control de la flotabilidad que les permite un movimiento vertical y la posibilidad de seleccionar potencialmente las masas de agua en que se mueven hacia direcciones específicas. Aunque la mayoría de las especies de peces de los arrecifes tienen una vida larvaria que dura aproximadamente un mes, algunos permanecen en forma de larvas hasta un máximo de tres a cuatro meses. Las larvas del pez tropical, al final de su vida larval que fluctúa entre 2 y 3 meses, pueden nadar a velocidades de entre 36 y 42 cm por segundo. Cuando logran mantener una velocidad de nado de aproximadamente 13.5 cm por segundo, pueden nadar por más de 194 horas sin recibir ningún alimento, cubriendo distancias de hasta 94 km (Stobutzki y Bellwood 1997, Hogan et al. 2007). Existe evidencia que estas larvas también pueden nadar en direcciones específicas, cambiando la orientación de la dirección en que dirigen con base en señales particulares.

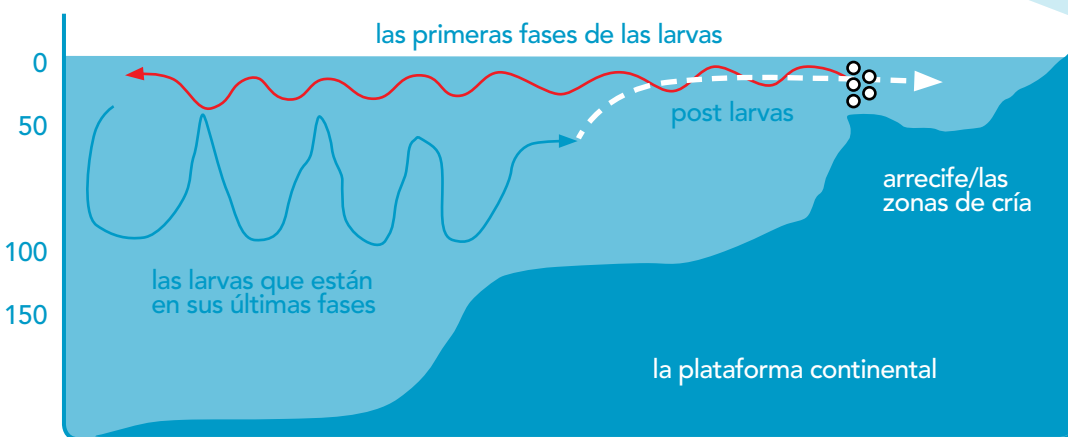


Figura 7. Esta figura resume las zonas de desove, así como la dispersión y el comportamiento larval/postlarval de la langosta espinosa del Caribe (*Panulirus argus*), y de hecho, de la mayoría de las langostas espinosas. Las larvas eclosionan de los huevos que son transportados por las hembras adultas a los bordes del arrecife durante la noche, mientras la marea baja dispersa las larvas en el alta mar (círculos blancos). En las primeras fases de las larvas, éstas se sienten atraídas por la luz por lo que permanecen en las aguas superficiales (a menos de 50 m). Las larvas se mueven cada día de arriba abajo, dentro de la columna de agua en respuesta a la luz (durante el día o la migración vertical diaria). De manera contraria, las larvas que están en sus últimas fases evitan la luz y permanecen en aguas más profundas (> 50 m). Por consiguiente, este comportamiento que depende de la edad se le conoce como "migración ontogenética vertical"; aunque también incluye la migración vertical diaria de mayor amplitud, dado que las larvas son nadadores más fuertes. Cerca del margen de la plataforma continental, las larvas se transforman en postlarvas puerulus, experimentando la última etapa de esta fase. Estas larvas son transportadas por las mareas, pero también pueden nadar hacia las zonas de cría en las costas siguiendo diversas señales químicas. Crédito: Mark Butler

Los peces no son los únicos organismos de los arrecifes que muestran cambios notables en su capacidad de conducta durante su vida de larvas. La langosta espinosa del Caribe (*Panulirus argus*) pasa por más de veinte mudas durante su larga vida de larva, la cual asciende aproximadamente a casi seis meses. En su vida de larva, las preferencias de este organismo por la profundidad y por los patrones de migración vertical diario van cambiando a lo largo de su desarrollo (Goldstein et al. 2008). En el último estadio larval de la *postlarva puerulus*, no recibe alimento y puede nadar rápidamente durante 2-4 semanas, con una velocidad de hasta 15 cm por segundo. La langosta espinosa del Caribe nada a esta velocidad mientras identifica un camino a seguir desde mar abierto para llegar a los viveros con vegetación costera, los cuales pueden estar a decenas de kilómetros. Estos organismos pueden detectar la ubicación de dichos viveros por medio de señales químicas (Goldstein y Butler 2009).

### 2.2.3 ¿Qué ven, escuchan, huelen y saborean las larvas? Las señales para encontrar los arrecifes

Una fase de dispersión no sería muy adaptable ni tendría mucho sentido si las larvas se movieran a la deriva de manera pasiva o nadarían en direcciones aleatorias. Los arrecifes de coral no son muy comunes en el océano a nivel mundial, dado que ocupan apenas un 0.1% de su extensión total. Bajo este contexto, se espera que las larvas de los arrecifes y otras especies de los hábitats costeros hayan desarrollado capacidades sensoriales que les permitan detectar un hábitat adecuado para el momento en que se completa su vida larvaria. A pesar de ello, la identificación de estas capacidades sensoriales no es una tarea sencilla, ya que las larvas en la última etapa de su estadio se encuentran en un período donde su desarrollo es muy rápido. Adicionalmente, muchas de estas larvas experimentan una metamorfosis sustancial en cuanto se encuentran en el hábitat costero adecuado para completar esta etapa larval. Esta situación hace que los estudios de su fisiología y su comportamiento sean muy difíciles de llevar a cabo, debido a que las larvas dejan dicho estadio casi tan pronto como son atrapadas. Sin embargo, los científicos han sido capaces de hacer algunos progresos en este campo de investigación.

Incluso en las últimas etapas de vida de las larvas, por ejemplo, las larvas plánula de coral sólo tienen una capacidad limitada de locomoción, pero muestran una capacidad de discriminación y clara preferencia por algunos sustratos como lugares de asentamiento, sobre otros. Esta capacidad discriminatoria también es común en otros invertebrados (tal es el caso de los percebes y las ostras), y está relacionada con su capacidad para responder a las señales químicas específicas provenientes del sustrato adecuado. Lo anterior, con el fin de poder asentarse en este hábitat de manera exitosa y permanente.

Entre los peces, existe una limitada pero creciente evidencia de que pueden usar la audición y el olor en la selección de un hábitat juvenil adecuado. Esta aseveración se basa fundamentalmente en la investigación del comportamiento donde se les da a las larvas de peces diferentes opciones de elección de posibles hábitats, observando posteriormente sus respuestas. Parte de este trabajo ha consistido en la localización de laberintos flotantes simples en los sitios de estudio marino, en los cuales posteriormente se introducen larvas dentro de su estructura para probar si éstas nadan hacia la dirección del arrecife. Este experimento permitirá inferir si las larvas son capaces de detectar la presencia de los arrecifes.

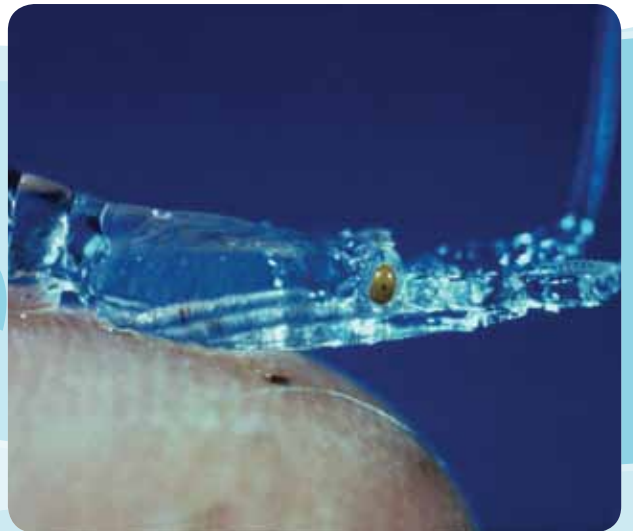


Figura 8. La fase final puerulus postlarvas de la langosta espinosa del Caribe (*Panulirus argus*). Las larvas de langosta usan las señales químicas y las variaciones en la presión para localizar los arrecifes que son utilizados como zonas de cría, conforme nadan hacia el mar abierto para completar su complejo ciclo de vida. Foto: William Herrnkind

Algunos estudios fisiológicos han confirmado que las larvas de etapa tardía tienen "orejas" que les permiten detectar el ruido (sobre todo el rompimiento de las olas) creado por los arrecifes. Estudios recientes realizados por Gerlach et al. (2007), en la Gran Barrera de Coral del Sur, han demostrado convincentemente que las larvas de peces cardenales (*Apogonidae*) y de los pez damisela (*Pomacentridae*) son capaces de detectar el olor del agua de los arrecifes y activamente elegir nadar hacia las aguas de estos hábitats, en lugar de nadar hacia el océano abierto o hacia otros arrecifes vecinos (Atema et al. 2002, Gerlach et al. 2007). De igual forma, se ha encontrado que esta habilidad es utilizada de diferente manera por dos especies. Por ejemplo, los análisis genéticos de la estructura de la población de varios arrecifes cercanos ha demostrado que los peces cardenal de Doederlein (*Ostorhinchus doederlein*) y no los peces doncella neón (*Pomacentrus coelestis*), muestran un fuerte comportamiento de búsqueda de ciertos arrecifes (Gerlach et al. 2007). Presumiblemente, los peces doncella utilizan el reconocimiento del olor de su hábitat de origen para discriminar el agua que proviene de otros arrecifes en donde no fueron criados. Este sentido les ayuda a encontrar el camino de regreso al arrecife que fue su hábitat de origen. Ambas familias de peces cuidan de sus huevos y su descendencia sólo se vuelve pelágica al momento de la eclosión, es decir, cuando las larvas se exponen por primera vez al olor del ambiente y desarrollan un órgano olfativo funcional. Por lo tanto, esta capacidad de reconocer y responder a los olores de su hábitat de origen podría ser una forma de impresión. Impresiones similares podrían causar una fuerte atracción de las larvas del pez payaso (*Amphiprion percula*) al olor de las hojas de los árboles, las cuales se piensa que pueden ayudar a identificar el hábitat costero que sea adecuado para asentarse (Dixson et al. 2008).

No es de sorprender que las larvas de peces cardenales muestren una preferencia selectiva por el arrecife de su lugar de origen. Mucha de la investigación previa que se ha realizado sobre este tema en los arrecifes australianos ha demostrado que los pez damisela del género *Dascyllus*, los cuales existen en pequeños grupos que ocupan de manera individual las cabezas de las ramas de los corales, son capaces de discriminar y favorecer las colonias de coral que contienen a sus congéneres, en lugar de a otras especies de *Dascyllus* o alguna otra especie de peces al momento de elegir el hábitat juvenil en donde se asentarán. De hecho, diversos experimentos



Figura 9. La fase larval de los peces de los arrecifes de coral fue considerada una incógnita. Las larvas de todas las formas y tamaños parecen estar diseñados para ir a lugares distantes, pero lo que hacen y hacia dónde van en un ambiente oceánico en 3-dimensiones ha sido un constante misterio. A través del uso de las nuevas tecnologías, estos misterios están siendo rápidamente resueltos. Crédito: C.M. Guigand y R.K. Cowen, Escuela de Ciencias Marinas y Atmosféricas Rosenstiel, Universidad de Miami

relacionados que utilizan laberintos flotantes pusieron en evidencia que los peces pueden detectar y responder al olor de sus congéneres (Sweatman 1988).

Si bien existe claramente una enorme cantidad de conocimiento que todavía falta por aprender sobre cómo las larvas pelágicas encuentran los arrecifes que se convertirán en su hogar, los resultados de las investigaciones hasta nuestros días han proporcionado información útil al respecto. Por ejemplo, la dispersión de las larvas pelágicas no se realiza a la deriva en el océano. Las larvas pelágicas usan sus distintas capacidades sensoriales y de comportamiento para reducir al mínimo el grado de dispersión, y en muchas especies, dichas capacidades sensoriales constituyen agentes activos para garantizar el retorno exitoso a los arrecifes que fueron sus hábitats de origen, así como para garantizar su asentamiento en micro-hábitats específicos que sean adecuados para la vida juvenil de las larvas.

#### 2.2.4 Conectividad a través de la dispersión larval

El hecho que la mayoría de las especies de los arrecifes experimenten una fase larval pelágica significa que gran parte de los organismos adultos de dichos arrecifes existen como grupos de reproductores locales (o poblaciones locales) que ocupan un hábitat adecuado y que en su mayoría están relacionados entre sí por la dispersión de las larvas. En escalas de decenas de kilómetros o menos, se lleva a cabo la mezcla de larvas conforme estas se dispersan de una población a otra. Sin embargo, a escalas de cientos de kilómetros, las poblaciones están muy aisladas demográficamente (aunque siguen manteniendo un vínculo genético). Los detalles de los patrones de dispersión del intercambio de larvas varían según la especie por lo que algunos taxones se dispersan distancias muy limitadas, mientras que otros presentan patrones de dispersión más amplios. En la actualidad sólo se cuenta con información detallada limitada de estas diferencias. A pesar de ello, es evidente que la reproducción de diversas, aunque se lleve a cabo al mismo tiempo y en el mismo lugar, puede mostrar patrones de dispersión muy diferentes durante su vida de larvas. Esto se puede atribuir a las variaciones en la duración de la fase larval, así como a la conducta y a las capacidades sensoriales de estos organismos (Gerlach et al. 2007).

*Los detalles de los patrones de dispersión del intercambio de larvas varían según la especie, por lo que algunos taxones se dispersan distancias muy limitadas, mientras que otros presentan patrones de dispersión más amplios.*

Algunas conclusiones importantes pueden derivarse con base en la dispersión de las larvas. En primer lugar, la conectividad entre las poblaciones de las diferentes especies de arrecife se debe principalmente, o (para las especies sésiles) exclusivamente, a la dispersión durante su vida larvaria. En segundo lugar, para la mayoría de las especies de arrecife que se han estudiado, la conectividad demográfica se ha demostrado que actúa en una escala de hasta decenas de kilómetros, en lugar de tener algún impacto en las escalas de cientos de kilómetros o más. Por lo tanto, el concepto de una población demográficamente bien comunicada a través del Caribe, o a lo largo de la longitud de la Gran Barrera de Coral, no se aplica. La conectividad genética (o conectividad evolutiva) funciona a grandes escalas espaciales debido a que las larvas individuales rara vez se transportan más allá de su rango común de dispersión. Si las AMPs están destinadas a desempeñar un papel en la gestión de la pesca, la pequeña escala de la conectividad demográfica debería tomarse en cuenta en el diseño de las redes de estas AMPs. Este tipo de conexión también puede ser de carácter informativo al considerar la destrucción extensiva de los arrecifes, causada por el blanqueado, los brotes de las coronas de espinas y los huracanes de gran intensidad, dado que este tipo de conectividad define la distancia a la que probablemente se lleve a cabo la re-siembra de los arrecifes de manera natural.

## Tablero de mensajes

- El hecho de que algunas veces sean mejores ciertos lugares para albergar tanto huevos como larvas dentro de la columna de agua en comparación con otros y que el esfuerzo reproductivo sea normalmente más exitoso cuando los miembros de la misma especie se reproducen al mismo tiempo, ha dado lugar a que muchas especies tengan un momento específico para realizar sus actividades de desove.
- Muchos organismos muestran cambios notables en su comportamiento y apariencia durante su vida larvaria.
- Entre los peces existe una limitada pero creciente evidencia de que pueden usar la audición y el olor en la selección de su hábitat juvenil más adecuado.
- Muchos organismos de los arrecifes muestran una capacidad de discriminación y clara preferencia por algunos sustratos sobre otros para asentarse. A menudo lo hacen respondiendo a las características químicas de la superficie.
- La conectividad entre las poblaciones de diferentes especies de arrecifes es principalmente, y en algunos casos exclusivamente, debido a la dispersión de las larvas a lo largo de su vida.
- Para la mayoría de las especies de arrecife, la conectividad demográfica ha demostrado que actúa en escalas de hasta decenas de kilómetros, en vez de grandes escalas de cientos de kilómetros o más. Si las AMPs están destinadas a desempeñar un papel en la gestión de la pesca, la conectividad demográfica de pequeña escala debería tomarse en cuenta en el diseño de las redes de estas áreas.

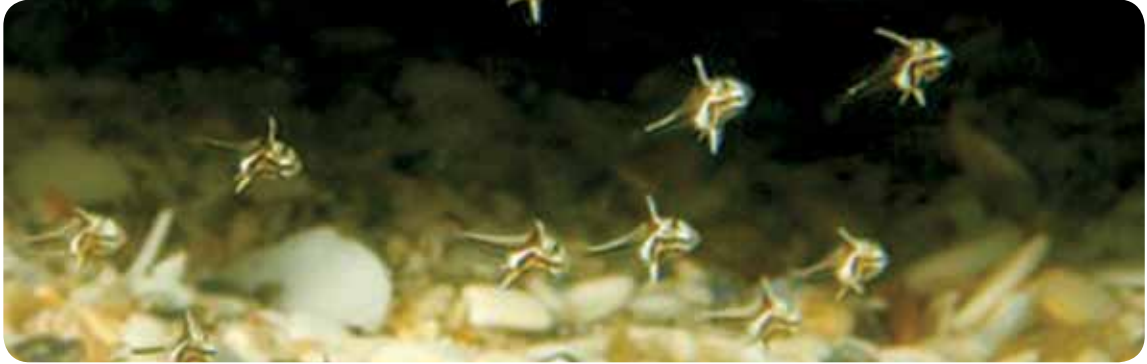
## 2.3 Muchos organismos marinos se mueven después de su vida larvaria

Gran parte de la vida de la mayoría de los organismos marinos no la pasan como larvas en el mar, sino como en forma de organismos jóvenes o adultos, estando asociada a los hábitats costeros de diversas formas a lo largo de sus vidas. El asentamiento de los organismos marinos costeros al final de la fase de su vida larval varía tanto en términos ecológicos como de desarrollo entre las diferentes especies. Si dichos organismos no son devorados por un depredador marino o por el hombre, los individuos de muchas especies pueden sobrevivir por décadas y ocupar muchos hábitats diferentes a lo largo de su vida.

### 2.3.1 Establecimiento y reclutamiento

La transición de un entorno oceánico pelágico a un hábitat de arrecifes bentónicos, durante el cual la relación entre los organismos y su ambiente cambia radicalmente, es una etapa particularmente peligrosa en la vida de cualquier especie. El establecimiento de las larvas en los arrecifes se produce de diferentes maneras entre los peces e invertebrados, siendo por lo general este proceso esporádico, nocturno y/o críptico. Este parámetro es difícil de medir, por ende, los ecologistas tienden a la recolección de muestras (animales que se han establecido y han sobrevivido en estos hábitats) después de su asentamiento. El término reclutamiento, en el sentido más amplio, significa la adición de nuevos individuos a la población o a las etapas sucesivas del ciclo de vida dentro de las poblaciones. En términos más específicos, el reclutamiento de los individuos puede tener implicaciones muy distintas:

**Reclutamiento larval:** Se refiere al número de individuos que se agregan a una población por la llegada de nuevas larvas a los hábitats del fondo marino. Figura 10a. Nube de larvas de recién establecimiento (de 8 a 12 mm). Foto: D.B. Snyder



**Inter-hábitat de reclutamiento:** Tiene que ver con el número de individuos que llegan a la siguiente etapa de asentamiento en otro hábitat—no en el primer sitio de asentamiento larval, sino a otro hábitat al cual se movieron posteriormente. Figura 10b. Foto: Gerald Nowak/WaterFrame/Specialist Stock



**Reclutamiento de la pesca:** Está relacionado con el número de individuos que alcanzan un determinado tamaño en el que pueden ser retenidos por ciertos tipos de redes de pesca (por ejemplo, cuando entran a las zonas de pesca). Esto puede ocurrir muchos años y hábitats después del reclutamiento larval. Figura 10c. Foto: Photoshot/VISUM/Specialist Stock



Crédito por la figura: Kenyon C. Lindeman

Después de la etapa de asentamiento, algunas especies durante su desarrollo pueden moverse una o más veces entre los hábitats en donde se asientan (como los pez ronco), y en algunos casos, para otras especies el movimiento de un hábitat a otro nunca se presenta (por ejemplo, para el pez damisela).

### 2.3.2 El movimiento entre los hábitats y el desarrollo costero

Muchas zonas costeras tienen una gran variedad de hábitats que incluyen la vegetación, el sustrato y los arrecifes, las cuales se localizan a lo largo de las plataformas costeras desde un gradiente de poca profundidad hasta otro de mayor profundidad. Existen algunas conexiones notables entre los animales y los hábitats marinos, especialmente cuando se toma en cuenta el ciclo de vida de las especies pesqueras, las cuales constituyen una fuente de alimentos para los seres humanos. Para algunas especies, un solo hábitat dentro de un complejo paisaje marino es suficiente para completar un ciclo de vida. Pero para muchas otras especies es necesario el movimiento entre los hábitats a diferentes escalas temporales y espaciales. Para muchas especies de peces, langostas y camarones, algunos hábitats son críticos durante las primeras etapas de desarrollo, supervivencia y crecimiento; otros hábitats sirven como zonas de desove y alimentación. Los organismos marinos pueden llevar a cabo migraciones repetidas entre los hábitats en varias escalas de tiempo, especialmente de tipo diario y estacional. Los movimientos diarios de los organismos marinos frecuentemente implican migraciones nocturnas para alimentarse, entre los hábitats en donde buscan alimento y aquellos que utilizan para descansar cada 12 horas. Por ejemplo, los movimientos diarios y los patrones de uso de los hábitats han sido evidenciados por los peces salmonetes (*Mullidae*) y para los pez ronco (*Haemulidae*). Estas especies llevan a cabo migraciones crepusculares entre los arrecifes durante el día y los hábitats de arena plana por las noches (Meyer et al. 2000). En algunas especies de peces, estos turnos diarios pueden favorecer la transferencia directa de nutrientes entre los hábitats utilizados para alimentarse con pastos marinos y manglares, hacia los arrecifes que constituyen hábitats de descanso

*Existen algunas conexiones notables entre los animales y los hábitats marinos, especialmente cuando se toma en cuenta el ciclo de vida de las especies pesqueras que forman parte de los alimentos consumidos por los seres humanos.*



Figura 11. Langosta espina (*Panulirus argus*), el recurso pesquero más importantes en el Gran Caribe. Este tipo de langosta cambia en varias ocasiones de hábitat durante su crecimiento. Las larvas se asientan en la vegetación superficial, mientras que los organismos jóvenes migran hacia los hábitats en el fondo marino costero, y eventualmente, hacia los arrecifes más profundos. Otras especies importantes en el Caribe que se mueven entre diferentes hábitats, a menudo localizados en aguas más profundas, a lo largo de su vida después de su primer hábitat de asentamiento, incluye a los meros, los pargos, los caracoles, las tortugas marinas, los peces sargos, los loros, los boyacates, y los peces gato. Foto: Mark Butler



Figura 12. El caracol rosado (*Strombus gigas*) es una importante especie pesquera en el Caribe. El efecto positivo de las reservas no está confinado dentro de las "fronteras" de estas áreas, ya que las larvas de esta especie de caracol que se producen dentro de las reservas se han encontrado a la deriva fuera de sus límites, así como en las áreas circundantes (Stoner et al. 1996). Foto: Ron Schaasberg



El tamaño de la población adulta depende de la supervivencia exitosa de los organismos marinos y de desarrollo durante las etapas tempranas de vida. Incluso, en las mejores condiciones naturales, los individuos en estas etapas suelen registrar elevadas tasas de mortalidad. Los depredadores se alimentan frecuentemente de las presas que migran de manera nocturna, al igual que de cualquier irrupción de las trayectorias entre los hábitats de asentamiento y los hábitats de origen causada por los seres humanos. Esta irrupción producto de las actividades humanas también puede aumentar las tasas de mortalidad. El acceso a la vivienda y a los alimentos proporcionados por los hábitats costeros es esencial para la supervivencia de los organismos marinos. Desafortunadamente, importantes hábitats (como los que son utilizados para la cría de huevos o larvas, así como los que son visitados para la alimentación diaria) son utilizados por los peces más jóvenes y por otros organismos de los arrecifes que están a menudo en áreas poco profundas, y que por ende, son más vulnerables al impacto humano.

Muchas zonas costeras en las regiones de arrecifes de coral se están desarrollando para el turismo con un enfoque de crecimiento costero rápido y especulativo. El Caribe, por ejemplo, representa una de las zonas costeras más concurridas en el mundo por el turismo con lugares como Cancún, en México. Tan sólo en la entrada a México al sureste de los Estados Unidos (EE.UU.), se registra un ingreso de aproximadamente 5 millones de turistas al año.

El desarrollo costero, la contaminación y los fenómenos naturales pueden conjuntarse para modificar o dañar los hábitats costeros de manera relevante. Muchos de estos hábitats son utilizados para el desarrollo de peces, langostas y otros organismos haciendo que éstos dejen de ser apropiados para la cría y desarrollo de diversas especies en sus primeras etapas, además de irrumpir las trayectorias consideradas como vitales entre estos organismos y sus hábitats en alta mar. Por otra parte, cualquier impacto negativo durante las primeras etapas de vida de un organismo puede afectar indirectamente la abundancia de los individuos adultos, al igual que las redes de alimentos en los hábitats en donde están inmersos. Aunque no se ha estudiado de manera detallada este tema, se sabe que pequeñas alteraciones en el ambiente costero pueden afectar de manera importante los patrones migratorios diarios o estacionales. Lo anterior, podría ocasionar que disminuyeran las poblaciones de los ecosistemas marinos costeros o que se presente una extirpación local de las especies pesqueras, que a su vez podría impactar en la pesca que se realiza en aguas más profundas donde las condiciones ambientales aparentemente se encuentran sin cambios.



Figura 13. Dubai, Emiratos Árabes Unidos. La mayoría de los peces e invertebrados marinos utilizan más de un hábitat a lo largo de sus vidas. El desarrollo costero puede hacer que los hábitats costeros ya no sean adecuados, irrumpiendo las trayectorias utilizadas por estos organismos marinos costeros de sus hábitats de origen hacia otros hábitats en alta mar. Foto: iStockphoto

La protección de los hábitats cruciales puede realizarse mediante el desarrollo de algunas especies de peces. Este mecanismo de protección de los hábitats costeros podría constituir un enfoque de gestión muy rentable para aumentar la producción pesquera. Cuando se está diseñando una AMP, incluso para proteger una o pocas especies, es fundamental disponer de la información necesaria para conocer los patrones de migración específicos, así como los requerimientos de los hábitats para las especies objetivo. Con el fin de llevar a cabo una gestión eficaz de estos hábitats, las AMPs o las redes de las AMPs deben ser lo suficientemente grandes para abarcar todos estos hábitats. Asimismo, se requiere tener en cuenta en la gestión de estas áreas, las rutas migratorias diarias y estacionales que siguen las especies que se van a proteger.

En casi todas las regiones, el uso de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para analizar la amenaza potencial de cualquier desarrollo costero ha sido insuficiente, además que este mecanismo de evaluación no ha sido empleado de manera adecuada. Entre las causas de esta problemática se incluyen:

- Las conclusiones no siempre se basan en información científica sólida;
- Existe una ausencia de una revisión de los documentos utilizados realizada de manera independiente por colegas ajenos al proceso de evaluación;
- No hay un control sobre las variaciones espaciales o temporales;
- Falta la participación de la comunidad;
- La coordinación entre los actores e instituciones involucradas es deficiente.

Dada la pobre calidad con la que frecuentemente se realiza la Evaluación del Impacto Ambiental, no es de extrañarse que muchos proyectos se lleven a cabo a pesar de tener graves efectos perjudiciales sobre la conectividad de los sistemas marinos costeros, y en última instancia, también sobre su propio funcionamiento. La presión política que fomenta el desarrollo y la corrupción en el proceso de aprobación de los proyectos de desarrollo en estos ecosistemas, solamente está empeorando esta situación.

## Cuadro 2. La *Turbinaria* en la Polinesia Francesa – conectividad y colonización a través de la dispersión de los adultos

Mientras que la dispersión de las larvas es de primordial importancia para las especies de los arrecifes; la dispersión separada de los organismos adultos de forma pasiva hacia la deriva en el océano y por medio de las corrientes impulsadas por el viento o por su adhesión en otros organismos también puede desempeñar un papel importante en el mantenimiento de la conectividad y la colonización de nuevas ubicaciones. Los individuos que ya han llegado a la etapa adulta tienen mayores tasas de supervivencia en comparación con las tasas que presentan cuando se encuentran en la etapa larval. Como estos organismos son maduros en términos reproductivos, pueden establecer nuevas poblaciones al momento de llegar a una nueva ubicación. Los adultos también son generalmente más grandes y pueden de manera más evidente administrar los arrecifes en comparación con las larvas. Adicionalmente, su llegada a una nueva área es más obvia. Es importante recordar, que las especies invasoras que se dispersan de esta manera, pueden de la misma forma representar una grave amenaza para los ecosistemas de los arrecifes.

Por ejemplo, la propagación actual del alga *Turbinaria ornata* en la Polinesia francesa, muestra el potencial para la conectividad obtenida por los adultos, al igual que los desafíos que pueden plantear a los administradores de los arrecifes. La gran dispersión de esta macro-alga del Indo-Pacífico tradicionalmente se registra en pocas áreas dentro de la Polinesia Francesa. Sin embargo, desde principios de 1980 se ha ido extendiendo, hasta llegar a ser tan abundante en la

actualidad que se considera como una especie invasora, la cual se está desplazando sobre muchos de los arrecifes de coral de toda esta región (Stewart 2008).

Los talos del alga *Turbinaria* crecen adheridos a los arrecifes, pero a medida que alcanzan la madurez sexual se vuelven boyantes y su adhesión al sustrato marino se debilita (Stewart 2006). Después de las tormentas, grandes balsas de talos separados son expulsados y se mueven hacia la deriva, viajando de isla en isla (Martínez et al. 2006). A pesar de que estos talos están separados, son capaces de mantener su fertilidad y viabilidad, incluso después de flotar durante 3 meses (o tal vez por más tiempo) (Stiger y Payri 1999). Durante este periodo, la fecundación se produce (los gametos masculinos que son móviles encuentran los huevos en los talos femeninos) por lo menos una vez al mes. Los esporofitos jóvenes se liberan de la planta madre, para posteriormente establecerse con éxito a lo largo del arrecife creando nuevas poblaciones de algas. El examen de la genética del alga *Turbinaria revela* que existe muy poca diferenciación genética en toda la Polinesia Francesa, lo cual se podría explicar como consecuencia de la alta conectividad entre las poblaciones de algas de esta región, resultado de la dispersión a la deriva de los talos.



Figura 14. Una fronda desprendida, flotante, del alga parda tropical *Turbinaria ornata* en la laguna de Moorea, Polinesia Francesa. Foto: Hannah L. Stewart

Se ha observado que un conjunto diverso de invertebrados y algas se mueven a la deriva pasivamente ligados a las balsas de alga *Turbinaria* (Stewart y Meyer, datos no publicados). Como la presencia de grandes balsas flotantes de alga *Turbinaria* es un fenómeno relativamente reciente en la Polinesia Francesa, este hecho puede representar un nuevo mecanismo de conectividad en la región. Los investigadores han comenzado a investigar sólo el impacto potencial sobre la conectividad de estas especies asociadas.

Un número creciente de esta alga está causando severos problemas. Además de reducir la luz que reciben los arrecifes de coral, están provocando la abrasión de estos ecosistemas y compiten por el espacio donde se localizan los arrecifes. Los talos que flotan en las aguas costeras dañan las redes de pesca, reducen el número de peces capturados, tapan los motores, están afectando negativamente a la industria del turismo, y donde son arrojadas en las playas, terminan pudriéndose. El impacto sobre la dinámica de los nutrientes de los arrecifes por el aumento en la biomasa de algas todavía no se ha determinado, pero los investigadores han estado buscando en vano incentivos económicos para cosechar estas algas (por ejemplo, con fines cosméticos o para medicamentos). Adicionalmente, los grupos locales de pescadores se están comenzando a organizar para remover el alga *Turbinaria* de los ecosistemas costeros en un intento por reducir su propagación. Como resultado, los arrecifes de coral de esta región enfrentan de manera creciente cambios en sus sistemas, al estar cada vez más dominados por las algas. Este tipo de conectividad adulta, que es característico de muchas algas, podría llegar a ser cada vez más importante. Por este motivo, es necesario que este tipo de conectividad se tome en cuenta en la gestión costera.

### 2.3.3 Migraciones de desove

Durante las migraciones anuales de desove, los adultos de algunas especies de peces como meros, pargos, entre otras especies, realizan movimientos oceánicos de gran escala. Algunos emprenden migraciones de cientos de kilómetros, aunque la mayoría recorren distancias mucho más cortas, lo que puede suponer semanas de viaje entre diferentes hábitats hasta llegar a los sitios adecuados para el desove. Estos eventos anuales utilizan importantes hábitats en el fondo marino costero, así como sitios y rutas específicas con el fin de posibilitar que los huevos y las larvas pasen por las diferentes etapas de desarrollo, que son independientes de los arrecifes durante las etapas pelágicas. Las agregaciones de desove favorecen una mayor concentración de un número más elevado de peces adultos que viven en los arrecifes, los cuales pueden ser vistos en todo el mundo. No es de sorprenderse que estos grupos sean muy susceptibles a la presión de las actividades pesqueras. El destino de los huevos y las larvas generadas a partir de estas migraciones puede determinar sustancialmente el nivel de conectividad de los peces entre los diferentes sistemas de hábitats. El grado relativo de dicha conectividad es un factor determinante en la estructura poblacional de la especie objetivo a preservar, además de un factor clave en el desarrollo de políticas coherentes en materia de ordenación espacial de los ambientes marinos costeros.

## Cuadro 3. Agregaciones de desove y conectividad

Con respecto a las agregaciones de desove, la conectividad se produce a través de dos mecanismos diferentes:

- 1) El movimiento de los peces como huevos y larvas de un sitio de agregación de desove a otros sitios de asentamiento por medio de la dispersión; y
- 2) El movimiento de los adultos de los sitios de residencia habitual (considerados como "áreas de captura") a los sitios de desove.

Ambas formas de conectividad deben ser estudiadas para determinar la relación que existe en una agregación de desove particular o en los sitios que se ubican a sus alrededores.



Figura 15. Algunas especies de peces como estos meros rayado, *Epinephelus striatus*, se reúnen en lugares determinados de desove cada año en el que son extremadamente vulnerables a la sobrepesca. Estos sitios de agregaciones para el desove deben incorporarse en las reservas no pesqueras (RNPs), con el objetivo de proteger a estos peces en esta etapa tan vulnerable. Foto: Enric Sala



Figura 16. Este maduro ronco de labios grandes (*Plectorhinchus albovittatus*) tiene un ovario en completa madurez que casi llena la cavidad de su cuerpo. Este pez fue capturado en un sitio de agregación de desove en el Palau. Los peces más grandes y más viejos son notablemente más fecundos porque tienen en sus cuerpos cavidades más grandes que permiten una mayor expansión del tamaño de los ovarios conforme los huevos maduran. Foto: Patrick L. Colin

## Tablero de mensajes

- El asentamiento de las larvas en los hábitats de los arrecifes se produce de diferentes maneras entre los peces e invertebrados. Dicho asentamiento se da por lo general de manera esporádica, nocturna y/o críptica.
- Existen notables conexiones entre los animales y los hábitats. Estas conexiones son fundamentales para el funcionamiento ecológico de los hábitats costeros, así como para la producción de sus bienes y servicios ambientales.
- El desarrollo costero, la contaminación y los fenómenos naturales pueden actuar de manera conjunta para modificar o dañar considerablemente los hábitats costeros utilizados para el desarrollo de peces, langostas y otros organismos costeros. Por ejemplo, al hacer que los hábitats del fondo costero no sean aptos para el asentamiento de organismos jóvenes o al afectar las trayectorias vitales entre estos organismos y los hábitats localizados en alta mar.
- Cuando una AMP está diseñada para proteger ya sea una o pocas especies, es indispensable contar con la información necesaria sobre los patrones específicos de migración, al igual que sobre los requerimientos de los hábitat que necesitan las especies que se van a proteger.



## Sección 3

# El uso de la conectividad en la gestión

En esta sección podrán encontrar:

*Áreas marinas protegidas*

---

*Las redes de las AMP*

---

*¿Qué es lo que las redes de las AMPs no pueden hacer?*

---

*El valor de los ecosistemas marinos costeros*

---

3



## 3. El uso de la conectividad en la gestión

### 3.1 Áreas marinas protegidas

Ante el deterioro generalizado de salud de los océanos, muchas naciones están recurriendo a las áreas marinas protegidas (AMPs) como una herramienta para mejorar la gestión de los hábitats marinos más importantes, al igual que de sus especies. Muchos de los “tipos” de zonas marinas protegidas han sido desarrollados con diferentes propósitos y también han sido utilizadas de diversas maneras. Las AMPs varían desde las que no tiene como objetivo establecer reservas de ciertos organismos costeros (RNPs), las cuales son áreas pequeñas donde todas las actividades extractivas (por ejemplo, la pesca) están prohibidas para conservar las especies principales o los hábitat más sensibles para la gestión de las áreas marinas más extensas (AMEs). Estas últimas áreas



Figura 17. Escuela de los peces cabra amarilla (*Mulloidichthys martinicus*). Las RNPs en gran medida reducen la presión pesquera sobre los animales que viven dentro de sus fronteras, además que tienden a mantener niveles más altos de población de varias especies. Foto: Robert Steneck



Figura 18. El coral cuerno de alce (*Acropora palmata*), que fue en algún tiempo una especie abundante, es considerado como una de las especies de corales que constituyen parte de los arrecifes más importantes en el Caribe y en los Cayos de la Florida. Actualmente se encuentra en la lista de las especies en peligro de extinción, y está incluido en la Lista Roja de la UICN y en el Apéndice II de CITES. Desde 1980, se estima que se han perdido entre 90 y 95% de los corales cuerno de alce como resultado de enfermedades, tormentas y decoloración. Si bien las RNPs pueden actuar para proteger y mejorar los hábitats, al igual que para recuperar los ecosistemas, estas áreas no pueden resolver todos los problemas de la gestión para las diversas especies, como en el caso de esta especie de coral. Foto: Robert Steneck

mencionadas tienen un solo plan de gestión integral que incluye a menudo la zonificación espacial para permitir la implementación de diferentes herramientas de gestión, incluida las reservas no pesqueras (RNPs) en diferentes lugares. Las AMEs constituyen un intento de integrar en la gestión de los ecosistemas costeros diversas especies, hábitats y sus diferentes usos dentro de una región específica.

Las AMPs cubren algunas o todas las siguientes funciones:

- Mantener la pesca al garantizar que la población de peces no colapse, actuando como amortiguador contra la falta de reclutamiento de nuevos individuos, además de posiblemente proporcionar centros para la dispersión de propágulos y adultos hacia las áreas de pesca que se encuentran a los alrededores de estas áreas (procesos conocidos como reclutamiento subsidiario y como efectos derrama o colaterales, respectivamente);
- Conservar los ecosistemas marinos y la biodiversidad;
- Proteger los hábitats que son atractivos para las especies en donde un turismo sustentable puede ser utilizado para este fin;
- Contribuir al conocimiento científico de las especies marinas, las comunidades y los ecosistemas, al proporcionar sitios relativamente inalterados para la investigación, además de puntos de referencia ecológica para medir los impactos causados por los humanos;
- Conservar la diversidad genética;
- Proteger la diversidad cultural (por ejemplo, los lugares sagrados, los naufragios y los faros).



La confusión sobre la terminología de las AMPs complica el diálogo relacionado con cuándo y cómo esta herramienta para la gestión de los ecosistemas costeros debe ser utilizada. Asimismo, las AMPs tienen nombres similares pero suelen diferenciarse sustancialmente en su eficacia para la protección de los hábitats y recursos. Por ejemplo, existe una percepción errónea generalizada de que todas las AMPs se basan en la idea de “no-tener” reservas de los organismos marinos costeros; pero la mayoría de estas áreas no constituyen reservas ni pesqueras. En el Cuadro 4 se enumeran y definen los términos más utilizados para diferenciar los distintos tipos de AMPs que son utilizadas hasta el día de hoy. El resto de esta sección se enfoca en las áreas en donde no se tienen reservas pesqueras.

## Cuadro 4. Definiciones de las AMPs

Existe una gran variedad de nombres utilizados para las áreas marinas protegidas (AMPs). A continuación se mencionan las definiciones más comunes de estas áreas, poniendo énfasis principalmente en donde no existen reservas pesqueras, incluyendo las redes de AMPs.

### Áreas marinas protegidas (AMPs)

Se trata de cualquier área dentro de la inter-marea o sub-marea, que junto con las aguas suprayacentes a ésta, su flora y fauna, así como sus características históricas y culturales asociadas ha sido reservada por medio de la ley, u otro medio eficaz, para proteger el ambiente que alberga de manera parcial o total (IUCN/WCPA 1994).

Es una zona geográfica definida, que ha sido designada o regulada, además de administrada para alcanzar objetivos específicos de conservación (UN CBD 1992).

De acuerdo con la UICN, un AMP también tiene que seguir la definición propuesta de la UICN sobre las Áreas Protegidas (APs): Un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, a través de medios jurídicos efectivos u otro tipo de mecanismos, para lograr la conservación a largo plazo de la naturaleza que está asociada con la prestación de los servicios ambientales y que además cuentan con valores culturales particulares (IUCN/WCPA 2008).

### Áreas de gestión marina (AGMs)

Las AGMs suelen ser relativamente grandes. Su ubicación se delimita legalmente en (la costa) el océano que se encuentra bajo una gestión activa con fines de conservación o de gestión de los recursos. Con frecuencia, estas áreas se subdividen o zonifican para establecer diferentes patrones de gestión, en distintos lugares. Algunas de estas áreas, son por lo general áreas en donde se tienen las reservas para la pesca.

### Reservas no pesqueras (RNPs)

Las áreas en donde no se realiza la extracción de reservas para la pesca (RNPs) también se conocen como reservas marinas, es decir, áreas de no extracción o reservas ecológicas. Las RNPs son una categoría especial de las AMPs en las que las actividades extractivas asociadas a la pesca están reguladas (y por lo general, estas actividades no son permitidas). Dentro de algunas RNPs, todos los recursos biológicos están protegidos a través de prohibiciones de pesca, que están encaminadas a evitar la eliminación, alteración o daño a cualquier ser vivo o recurso marino no-vivo en estas áreas, excepto cuando sea necesario para fines de seguimiento o investigación (Lubchenco et al. 2003).

En algunas RNPs está restringido el acceso y/o la realización de ciertas actividades (por ejemplo, la contaminación, la construcción, la investigación, el canotaje o el buceo), ya que estas actividades pueden perjudicar de manera negativa los recursos existentes, así como los procesos o servicios ecológicos y culturales que proporcionan estas áreas. En otras RNPs, solo están restringidas las actividades extractivas.

## Áreas marinas y costeras protegidas (AMCP)

Se trata de cualquier área definida dentro o adyacente al medio marino, junto con las aguas que la cubren, su flora y fauna, así como sus características históricas y culturales, que se han conservado con base en la ley, u otros medios eficaces, incluyendo las costumbres, con el fin de que el ambiente marino y/o la biodiversidad costera disfruten de un elevado nivel de protección en comparación con su entorno (UNEP-WCMC 2008). Una AME adyacente a la costa, y asociada con áreas terrestres protegidas, estaría integrada por un AMCP.

### La “red” o “sistema” de AMPs

El uso del concepto “red” o “sistema” puede ser confuso, ya que estos términos no cuentan con una definición globalmente aceptada, además que a menudo se usan indistintamente con el mismo significado y en los mismos documentos. La definición más general para una red de AMPs es que consiste en una colección de AMPs individuales o reservas que operan cooperativa y sinérgicamente, en diferentes escalas espaciales y con una gama muy diversa de niveles de protección que están diseñados para cumplir los objetivos que una sola reserva no puede lograr por sí sola (IUCN/WCPA 2008). Aunque existen diversas excepciones, la palabra “sistema” tiende a ser usada con mayor frecuencia en las áreas terrestres protegidas; mientras que el término “red” es más frecuente en el caso de las AMPs (UNEP-WCMC 2008).

### 3.1.1 La ausencia de reservas pesqueras

El cierre de algunas áreas del océano para evitar la pesca, para que las dotaciones de peces sean preservadas, posee un gran atractivo intuitivo. En muchas regiones del mundo, uno de los principales argumentos utilizados para justificar la creación de nuevas AMPs es la afirmación de que ayudan a mantener o reponer las reservas pesqueras agotadas en las aguas circundantes. Al prohibir (o restringir algunas veces severamente) las actividades pesqueras, las reservas no pesqueras (RNPs) sirven como el único tipo de AMPs que pueden ayudar a la gestión de la pesca, ya sea operando por separado o como varias reservas en una red de AMPs. Algunas RNPs, también pueden restringir el acceso y/u otras actividades, tales como el desarrollo, la construcción, la investigación, la navegación y el buceo.

Debido a que la presión de la pesca sobre los animales que viven dentro de las fronteras de las RNPs se reduce considerablemente, estas zonas ayudan a promover la supervivencia y la reproducción de los peces, incluso aún si el área que rodea a las RNPs se encuentran severamente sobreexplotadas. También tienden a mantener altos niveles de población de las especies que se localizan adjuntas. Adicionalmente, estas áreas ayudan a proteger las funciones ecológicas de los lugares adjuntos como las zonas de agregaciones de desove. Al servir como refugios para las especies que se están muy explotadas, las RNPs pueden proteger a las especies que enfrentan una sobrepesca, de su extinción local. Sin embargo, ninguno de estos efectos tiene un impacto directo sobre las poblaciones de las especies capturadas en las zonas circundantes.

La conectividad demográfica de las poblaciones marinas es un elemento clave en el rol que tiene la gestión de la pesca sobre las reservas no pesqueras, dado que proporcionan un mecanismo de reserva capaz de mejorar la producción de peces fuera de las fronteras de estas áreas (Kritzer y Sale 2004). Debido a la conectividad, las reservas podrán complementar la población de peces en las áreas pesqueras que se localizan a los alrededores, ya que parte de la producción de peces se exporta a las zonas adjuntas favoreciendo los efectos derrama o colaterales o el reclutamiento subsidiario. Este argumento se suele utilizar para convencer a las comunidades pesqueras de apoyar la introducción de las RNPs. A pesar de ello, con base en la evidencia existente, este mecanismo de gestión sigue recibiendo un apoyo limitado. Desafortunadamente, es muy difícil poder demostrar técnicamente la existencia de un reclutamiento subsidiario de peces, al igual que la maduración lenta de los peces e invertebrados, por ende, los efectos positivos de las RNPs pueden no ser evidentes hasta después de muchos años que fueron establecidas. De ahí la necesidad de implementar la protección y el monitoreo de largo plazo, junto con experimentos

bien diseñados que sean útiles para cuantificar los efectos derrama o colaterales y el reclutamiento subsidiario, en el caso que los beneficios de este tipo de reservas no sean revelados.

Los estudios empíricos han demostrado en diversos grados, que existen cuatro cambios en el interior (Mumby et al. 2006) y/o en el exterior (Roberts et al. 2001, Russ et al. 2003) de las RNPs que pueden beneficiar a las poblaciones de peces fuera de estas reservas. Estos cambios incluyen:

- 1) El aumento de la producción reproductiva en las RNPs debido al aumento en la abundancia de peces, en la biomasa reproductora, en la edad media y en el tamaño corporal;
- 2) Mayores exportaciones netas tanto de organismos jóvenes como adultos hacia las áreas adjuntas de pesca (también conocido como efectos derrama o colaterales);
- 3) Mayores exportaciones netas de huevos y larvas hacia las áreas circundantes de pesca (o reclutamiento subsidiario); y
- 4) La protección y recuperación dentro de la reserva tanto del hábitat como de los ecosistemas completos de los cuales dependen las especies marinas costeras.



Figura 19. La parte inferior de una langosta hembra del Caribe (*Panulirus argus*) que muestra el espermatóforo negro como alquitrán, el cual fue depositado por un macho para fertilizar los huevos de color naranja brillante que están adheridos a su abdomen. En las zonas de pesca, las langostas pequeñas pueden producir unos cientos de miles de huevos; mientras que las hembras más grandes que se localizan en las AMPs pueden producir millones de huevos en cada desove. Foto: Mark Butler

### 3.1.2 La protección de una porción de la población

Se han desarrollado pruebas convincentes de que las RNPs ayudan a proteger a los animales que se encuentran dentro de sus fronteras de los efectos negativos de la pesca. Cualquier RNP que es lo suficiente grande para abarcar la mayoría de los movimientos de un organismo individual favorecerá a que se establezcan dentro de estas áreas, poblaciones individuos más viejos y más grandes, haciendo que la densidad poblacional de los grupos sea cada vez mayor. Esto se puede atribuir al aumento en la supervivencia resultado de la reducción de los impactos de la pesca. En la planificación de dichas reservas, se deben tener en cuenta las necesidades específicas de los hábitats de los individuos en sus diferentes etapas de vida, además de la extensión de los movimientos diarios o estacionales. Idealmente, las RNPs también deben ser lo suficientemente grandes para que una proporción razonable de larvas alcance a complementar su etapa de vida pelágica y se establezca dentro de las fronteras de estas reservas. Incluso si la RNP, puede proporcionar un buen nivel de protección a los individuos en su interior; en caso que la superficie de estas zonas no esté lo suficiente cubierto, la población objetivo dentro de esta área puede terminar dependiendo de la reproducción fuera de las fronteras de dichas reservas para la reposición de sus individuos. Por consiguiente, la sobrepesca contribuiría a la disminución en la abundancia de peces e invertebrados tanto dentro como fuera de la reserva.

*Nuestra relativa falta de información científica sobre cuestiones tales como el tamaño correcto, el espacio que debe existir entre las reservas no pesqueras o su ubicación, limita nuestra capacidad para predecir los efectos que podría tener la propuesta de establecer este tipo de áreas sobre la pesca o la conservación de la biodiversidad en las zonas aledañas.*

Por este motivo, el tamaño adecuado (y en algunas ocasiones también la forma) de una RNP debería depender de la geografía de la región en cuestión (presencia de un hábitat requerido), al igual que de la hidrodinámica y los hábitos de las especies objetivo. De ello se deduce que una RNP no puede ser simultáneamente óptima en tamaño, así como en la colocación de un conjunto más amplio de especies, a menos que sus hábitats y los requerimientos de dichos hábitats sean similares. Sin embargo, en la actualidad no existe suficiente información sobre este tema para la mayoría de las especies de los arrecifes, por ende, todavía no es posible determinar los requisitos mínimos de tamaño con base en el tipo de especie a proteger. Tampoco se cuenta con información suficiente sobre los beneficios concretos de la creación de redes de RNPs, en lugar de promover la creación de reservas independientes. Algunas pruebas disponibles muestran que los organismos dentro de las RNPs alcanzan una mayor longevidad y tamaño. Lo anterior indica, que incluso las pequeñas reservas que ocupan pocas hectáreas en la zona pueden ofrecer protección para muchas especies de los arrecifes que se encuentran adjuntas a ésta. A pesar de ello, todavía falta por descubrir si estas pequeñas reservas pueden seguir albergando de manera viable dichas poblaciones ante una situación de sobrepesca, que vaya más allá de sus fronteras.

### 3.1.3 Efectos derrama o colaterales y el reclutamiento subsidiario

La protección de una porción de la población pesquera como un seguro contra el colapso de estas actividades económicas o contra la extinción de las especies que se capturan, es uno de los beneficios más importantes del establecimiento de las reservas no pesqueras (RNPs). Estos beneficios son más importantes, si la población protegida es capaz de aumentar significativamente la productividad de las poblaciones de peces que se encuentran fuera de las fronteras de las reservas en donde se encuentran. La conectividad debe conducir a esta mejora a través de las exportaciones netas sostenidas de las especies objetivo de biomasa desde las reservas hacia las áreas circundantes. El hecho de que esta exportación neta debería ser suficiente para compensar también las pérdidas de la zona de pesca, es un hecho de gran relevancia que suele no tomarse en cuenta con frecuencia. A pesar de ello, la evaluación precisa de las funciones de exportación no sólo es técnicamente difícil, también lo es logísticamente. Adicionalmente, el reclutamiento subsidiario rara vez se ha demostrado con datos científicos (Russ 2002, Sale et al. 2005).

Aunque la evidencia de los efectos derrama o colaterales es cada vez mayor, los mecanismos que fomentan el movimiento de los peces adultos desde las reservas hacia las áreas de pesca siguen siendo poco conocidos (Abesamis y Russ 2005). Se asume regularmente que los efectos derrama o colaterales son resultado de procesos dependientes de la densidad. Los movimientos dependientes de la densidad se produce cuando la tasa y direccionalidad de los movimientos individuales cambian con base en la densidad de la población objetivo (Sutherland et al. 2002). Esto a menudo se piensa que es impulsado por las altas tasas de interacciones agresivas dentro de las poblaciones más densas. Para causar dichos efectos derrama o colaterales por este mecanismo, las diferencias medibles de la densidad entre la reserva y sus zonas aledañas son necesarias, además que también es probable que la densidad dentro de la reserva requiera un enfoque basado en la capacidad de carga del ambiente local antes de que los efectos derrama o colaterales se presenten. Estos efectos asumen por lo general, que son procesos muy locales que pueden mejorar el éxito de la pesca cerca de los límites de las reservas pesqueras, pero no muy lejos de donde dichas reservas se encuentran ubicadas.

Una situación análoga, igualmente especial a la presencia de los efectos derrama o colaterales, se produce cuando la reserva se establece en el hábitat de crianza de una especie. En tal caso, la supervivencia mejorada de los organismos se esperaría que fuera resultado de la protección del hábitat (por ejemplo, de las actividades pesqueras destructivas que utilizan para la captura de los peces e invertebrados trampas o redes de arrastre), más que por la reducción en la presión generada por la pesca. Dicha supervivencia mejorada se podría presentar sólo en los casos en que los objetivos de la pesca de los organismos jóvenes o su captura incidental, se ejerciera apoyando la protección de los organismos marinos en contra la pesca. Aún así, siempre que se tenga como resultado una supervivencia mejorada de los peces, un hábitat de crianza protegida podría dar lugar a un mayor número de peces que lleguen a una edad en la que son capaces de dejar las

zonas de cría para trasladarse a otro hábitat donde vivirán como adultos. Esto favorecería una mayor producción de la reserva para apoyar la pesca dirigida a capturar individuos maduros, lo cual tendría un impacto positivo más amplio sobre la pesca exitosa cuando ésta se compara con los efectos derrama o colaterales entre las zonas protegidas y las no protegidas del mismo hábitat (de los adultos).

El reclutamiento subsidiario debería influir en el rendimiento de la pesca a mayores distancias de los límites de las reservas. Poblaciones más densas, con un mayor tamaño de individuos (y por lo tanto más fecundas) dentro de una reserva pueden producir un mayor número de larvas, muchas de las cuales se dispersarán más allá de las fronteras de las reservas aún las más grandes. Hasta la fecha, han habido pocas demostraciones experimentales de la dispersión de las formas núcleo, pero en teoría debería ser posible utilizar estos datos en una especie receptora, junto con los datos relacionados con la geografía y la oceanografía local para calcular el tamaño óptimo, así como el espaciamiento tanto de las Reservas No Pesqueras individuales como de las redes de dichas reservas. Hasta que la ciencia progrese alcanzando este punto, los resultados en esta materia se limitan a realizar estimaciones como las de las especies típicas de peces de arrecife, donde un reclutamiento subsidiario demográficamente importante podría extenderse desde 10-30 km más allá de las fronteras de las RNPs.

La escala espacial de la conectividad y su resolución es un asunto de una relevancia crítica para la gestión de los arrecifes pesqueros con el uso de las RNPs o las redes de estas reservas. La resolución de la conectividad, también tiene importantes implicaciones cuando mejora la comprensión de la estructura y dinámica de estas comunidades, además de favorecer la determinación de las escalas más adecuadas en donde se deben realizar las intervenciones de gestión. Por ejemplo, si las larvas son principalmente retenidas en las escalas locales (kilómetros), una gestión de los ecosistemas marinos costeros basada en una escala local podría ser más eficaz. Pero si además se dispersan las larvas, dicha gestión tendría que ampliarse con el fin de que ésta siga siendo eficaz. La tarea de definir los patrones de dispersión de las especies pesqueras importantes exigirá experimentos cuidadosamente diseñados que incluyen un muestreo espacial a gran escala de los organismos. Tales experimentos serán más viables si se aplican conjuntamente por los administradores de las RNPs y los científicos, bajo un contexto de gestión adaptativa.

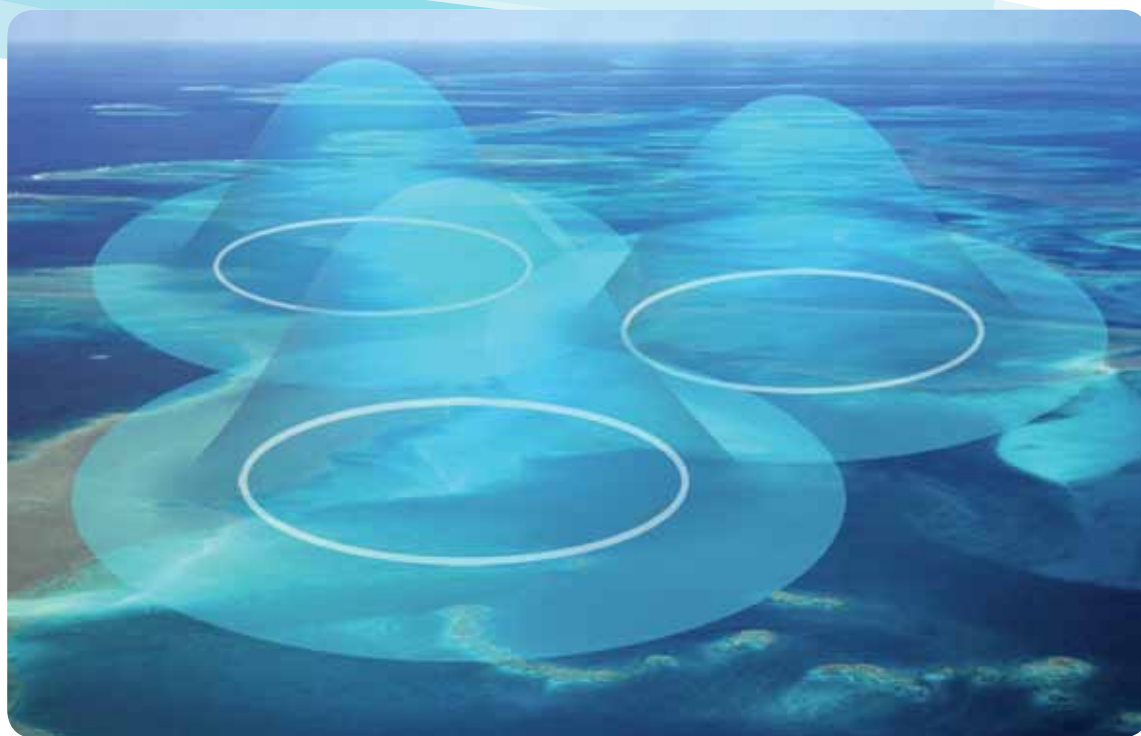
*Para conservar la diversidad biológica, independientemente de la historia particular del asentamiento de las especies marinas costeras, se requiere poner en marcha un programa eficaz de gestión en toda la red de RNPs, incluyendo los espacios que existen entre estas áreas. Adicionalmente, este programa debe abarcar los ecosistemas costeros marinos y las zonas terrestres que lo afectan.*

### 3.2 Las redes de las AMP

Debido a la conectividad, un grupo de AMPs (por lo general RNPs) en una región determinada puede operar ecológicamente como una red de organismos individuales que se dispersan de una RNP a otra área, así como de una RNP hacia otras áreas localizadas a sus alrededores. Es crítico para el éxito de la gestión del ambiente marino costero, los detalles de los patrones de dispersión que ayudarán a determinar la escala adecuada de una red de RNPs. Por consiguiente, las RNPs dentro de una red deben estar lo suficientemente cerca para que exista cierto intercambio de individuos. Por otra parte, se espera que una red de RNPs sea operativamente más eficaz en comparación con un número equivalente (así como un área similar) de RNPs que operan en forma aislada. Esta expectativa existe porque la conectividad demográfica entre las RNPs dentro de una red, les confiere resistencia a las poblaciones individuales. De la misma manera, que los procesos de dispersión dentro de una meta-población les proporciona a una mayor resistencia a las sub-poblaciones locales.

Las redes de las AMPs se han propugnado para la conservación de la biodiversidad marina, para la protección contra las perturbaciones naturales y humanas, así como para la regulación de la pesca excesiva, siendo una herramienta para aumentar la resiliencia de los ecosistemas costeros, al igual que su capacidad para adaptarse al cambio climático. A pesar de ello, la teoría que reconoce que sus beneficios siguen siendo insuficientes, y en todo caso, la falta de datos exhaustivos sobre la conectividad de las especies objetivo a proteger obstaculiza la aplicación formal de los avances teóricos en el diseño de las redes de AMPs. En la actualidad, sólo es posible anticipar que se producen beneficios por la instauración de redes de AMPs y que dichas redes deben planificarse de manera que las zonas vecinas a las RNPs estén separadas de 10-30 km de distancia: una escala ideal para la mayoría de las especies objetivo de los arrecifes (este enfoque es esencialmente el mismo que debe tenerse en cuenta cuando se establecen RNPs únicas para la gestión de la pesca).

En la práctica, las redes de AMPs se desarrollan de dos maneras. La primera consiste en que una vez establecidas y administradas por separado las RNPs, se introducen RNPs adicionales de manera intercalada según sea necesario. La otra forma, tiene que ver con el desarrollo de las AMPs como áreas marinas de gestión en una escala regional, las cuales se zonifican de tal manera que se determina tanto el número como la distancia adecuada que debe existir entre las RNPs. Para conservar la diversidad biológica, independientemente de la historia particular de asentamiento de los organismos marinos costeros, un programa eficaz de gestión debe ser puesto en marcha en toda la red, incluyendo el espacio entre las RNPs. Adicionalmente, este programa debe abarcar los ecosistemas marinos costeros y las zonas terrestres que lo afectan.



**Figura 20.** El tamaño y el espaciamiento de las reservas no pesqueras, con respecto a la distancia de dispersión de las especies de interés. Los círculos blancos representan los límites de las reservas, mientras que la forma del domo representa el patrón de dispersión de las larvas (mayor número de larvas se producen dentro de la reserva, que es su lugar de nacimiento; éstas van disminuyendo gradualmente en número conforme aumenta la distancia a dicha reserva). Las reservas están destinadas a:

- 1) La conservación, por ende, estas áreas deben ser lo suficientemente grandes para retener una parte sustancial de la dispersión de las larvas y asegurar su adecuado auto-reclutamiento;
- 2) Al fomento de la pesca, para lo cual estas áreas deben ser del tamaño y tener un espacio entre ellas que permita que una proporción significativa de las larvas pueda migrar a las áreas pesqueras que las rodean. Sin embargo, para que las reservas funcionen como una red, éstas deben estar a una distancia lo suficientemente cerca, como para garantizar la conectividad por medio de la dispersión larval.

### 3.2.1 Dinámica de la meta-población, poblaciones fuente y poblaciones receptoras

Los arrecifes de coral son hábitats inherentemente desiguales y fragmentados, por ende, muchos de los organismos que viven en los arrecifes existen como poblaciones locales conectadas en un grado y distancia desconocidos, además que se distribuyen espacialmente de manera diferente (Kritzer y Sale 2004). El nivel de conectividad entre las poblaciones de los arrecifes locales determinará esencialmente si estos grupos funcionan como poblaciones aisladas, "casi cerradas", o como meta-poblaciones donde la dinámica de las poblaciones separadas se extiende con base en un reclutamiento subsidiario proveniente de las poblaciones cercanas o como poblaciones espacialmente discontinuas de manera unitaria, y sin una subestructura demográfica particularmente interesante. De los tres niveles de conectividad, las meta-poblaciones son las menos conocidas, pero en teoría tienen mayor resiliencia en el nivel de las poblaciones locales debido al intercambio de individuos. Gran parte de la teoría sobre el desarrollo de redes de AMPs depende de la expectativa de conectividad esperada entre las AMPs dentro de una red, la cual confiere una resiliencia comparable a la que existe dentro de una meta-población. Esta resistencia debería hacer a las AMPs localizadas dentro de dichas redes menos susceptibles a disminuir como resultado de la pesca excesiva, así como por otros factores que tengan un impacto negativo sobre las poblaciones que se encuentran fuera de las fronteras de estas áreas. En general, la conectividad entre las sub-poblaciones debería aumentar de manera específica dependiendo de la especie, a medida que disminuye la distancia. Conocer el nivel de conectividad entre un conjunto de poblaciones cercanas es importante para entender la demografía de cada población. Para los organismos que se dispersan, el arreglo espacial en que se encuentran distribuidas las poblaciones y/o los patrones prevalecientes en el movimiento del agua pueden hacer que ciertas poblaciones constituyan poblaciones fuente, mientras que otras sean poblaciones receptoras. Las poblaciones receptoras son aquellas cuyos individuos fallan al reponerse a sí mismos y están a salvo de la extinción sólo por el exceso de dispersión de otras poblaciones (poblaciones fuente). No es raro que en los debates teóricos sobre las meta-poblaciones, se asuma la presencia de ambos tipos de poblaciones. Sin embargo, es probable, especialmente cuando los patrones hidrodinámicos son variables, que pocas o ninguna de las poblaciones puedan estar permanentemente etiquetadas como poblaciones fuente o poblaciones receptoras. A pesar de ello, las poblaciones fuente deben ser consideradas intrínsecamente más importantes para el funcionamiento de una meta-población, debido a que son autosuficientes y están en mejores condiciones para realizar un reclutamiento subsidiario beneficiando otras poblaciones.



Figura 21. Las boyas pueden ser utilizadas para delinear las fronteras de las zonas turísticas con respecto a una reserva marina. Foto: Miguel Ángel Maldonado, Centro Ecológico Akumal

Determinar los factores que definen si las RNP realizan funciones como poblaciones fuente o poblaciones receptoras para una especie en particular, es de gran relevancia tanto para la ciencia como para el diseño de las redes de reservas marinas. En la actualidad, estos factores aún no han sido claramente definidos y verificar si las RNP llevan a cabo funciones como poblaciones fuente o receptoras requerirá de llevar a cabo muestreos sobre la producción y dispersión de las especies marinas costeras por varios años. En esta fase, sólo se puede afirmar que ciertas condiciones previas pueden favorecer que las RNP tengan un estatus de población fuente o de población receptora.

Por ejemplo, una oceanografía física constante, que puede cambiar estacionalmente, pero que es consistente a través del tiempo, es esencial para determinar el estatus que tiene la población de una especie, ya sea como población fuente o receptora. Por consiguiente, la oceanografía uniforme favorece la existencia de patrones constantes en la dispersión de las larvas. En el caso de un entorno oceanográfico variable, la mayoría de las poblaciones puede ser poblaciones fuente por un tiempo. Asimismo, para la mayoría de los hábitats, la ubicación de las RNPs aguas arriba con una oceanografía consistente debería garantizar su estatus de población de origen. A pesar de ello, esta situación no garantiza la fortaleza ni la viabilidad de dichas poblaciones. Por otro lado, aunque no siempre es así, una localización aguas abajo favorece la existencia de poblaciones receptoras. Además, una población que ocupa los hábitats marginales o que experimentan consistentemente una tasa de mortalidad más elevada en comparación con la normal, independientemente de las actividades pesqueras, probablemente constituirá una población receptora.



Figura 22. La educación ambiental y los programas de sensibilización dirigidos a los actores y usuarios de las zonas marinas son una parte importante de la gestión costera. Foto: Miguel Ángel Maldonado, Centro Ecológico Akumal

A pesar de nuestra incapacidad actual para especificar el estatus de dichas poblaciones, existe un consenso general sobre la mejor manera de maximizar la eficacia de una red de AMPs en una región donde las poblaciones fuente y las poblaciones receptoras están presentes. Este consenso se ha traducido en un conjunto de “principios” que son razonables, pero que no han sido validados. Adicionalmente, estos “principios” son prácticamente imposibles de aplicar:

- 1) Una red en la que las reservas se encuentran en hábitats fuente será superior a las reservas que tienen una localización aleatoria o a las que se ubican en hábitats receptores;
- 2) La importancia de la estructura de las poblaciones fuente y receptoras es mayor si la red de las AMPs se desplaza en lugar de reducir el esfuerzo pesquero;
- 3) La adecuada ubicación de las AMPs es cada vez más importante conforme una mayor proporción de los hábitats en el ambiente marino costero tiene una baja calidad (hábitats receptores); y
- 4) Si el entorno contiene corrientes con una determinada dirección, la ubicación espacial de las reservas será fundamental para el fortalecimiento de la población de las especies de los arrecifes.

Si las especies de los arrecifes se distribuyen de manera consistente como poblaciones fuente y poblaciones receptoras, dicho arreglo espacial deberá ser reconocido al momento de definir las redes de AMPs. Al igual que en los casos donde la falta de conocimiento de los patrones de dispersión de las especies objetivo se opone a un conjunto preciso y objetivo de las decisiones sobre el tamaño de las RNPs, así también la falta de información sobre la dinámica de las poblaciones fuente-receptora, incluso si existe una dinámica constante entre estas poblaciones (fuente y



receptora), obstaculiza las decisiones sobre la ubicación de las RNPs en una red. Aunque estos vacíos en el conocimiento de la ciencia de la conectividad requieren ser resueltos, una red de AMPs no debería ser diseñada sin hacer referencia a estas importantes observaciones demográficas. En general, deben ser alentados los esfuerzos para lograr avances científicos en el contexto del diseño e implementación de nuevas redes. Una vez más, para ello será necesario que los científicos y administradores de las zonas marinas costeras trabajen juntos en un proceso de gestión adaptativo a largo plazo, en el que la creación de una red constituye una forma de probar las ideas sobre la eficacia de las opciones elegidas. Es lamentable, que el uso de las AMPs como herramientas de gestión de la pesca se haya desarrollado como hasta el momento, sin evidenciar preocupación alguna por la falta de información científica demográfica que la sustenta. Sin embargo, existen excelentes oportunidades de trabajo para corregir este problema, como resultado de los esfuerzos actuales para mejorar la gestión de la pesca en los arrecifes.

*Es lamentable que el uso de las AMPs como herramientas de gestión de la pesca se haya desarrollado como una medida que evidencia poca preocupación por la falta de información científica demográfica que la sustenta. Sin embargo, existen excelentes oportunidades de trabajo para corregir este problema, como resultado de los esfuerzos para mejorar la gestión de la pesca en los arrecifes.*

Más allá de las meta-poblaciones, las comunidades de los arrecifes de coral están siendo analizadas cada vez más como meta-ensamblajes (o meta-comunidades) en las que cada especie existe en su propia meta-población. Por lo tanto, una sola ubicación representa un nodo dentro de cada meta-población y el meta-ensamblaje cuenta con un recubrimiento espacial de meta-poblaciones individuales. En un meta-ensamblaje, las meta-poblaciones se organizarán en diferentes escalas espaciales en función de las propiedades de dispersión de cada especie. En este caso, las interacciones entre las especies pueden ser particularmente ricas. La teoría de los meta-ensamblajes no está bien desarrollada todavía y cualquier intento de aplicarla en el diseño de redes de las AMPs o en la gestión de las comunidades de arrecifes, se basa en un conjunto de reglas prácticas que son escasas y débiles. Si bien los administradores operan en este estado libre de la teoría, existe un margen considerable para los ecólogos de construir la teoría necesaria, al igual que para introducir dicha teoría dentro de los regímenes de gestión.

### 3.3 ¿Qué es lo que las redes de las AMPs no pueden hacer?

Las áreas marinas protegidas, y en particular, las RNPs y las redes de estas reservas, son herramientas valiosas para los administradores de los arrecifes. Las RNPs protegen a las especies objetivo de la mortalidad atribuida a la pesca, y también protegen los hábitats marinos costeros de la degradación relacionada con las actividades pesqueras. Otros tipos de RNPs proporcionan una protección sólida limitada en contra de otros impactos humanos localizados en sitios específicos. Sin embargo, la firme defensa de la utilización de las AMPs ha oscurecido el hecho de que no son la única herramienta que los administradores de los arrecifes necesitan, y ni siquiera es la mejor herramienta para la protección de estas áreas marinas costeras. Evidentemente, la gestión de la pesca es una tarea compleja que no puede ser resuelta mediante la aplicación de una sola herramienta.

Por otra parte, el establecimiento de las AMPs rara vez se monitorea con base en una buena gestión y reforzamiento. Existen muchas AMPs en los mapas y en la legislación; pero estas áreas ofrecen poca protección real. A menudo dichas áreas son conocidas como "parques de papel", ya que estos sitios representan un fracaso para proteger los recursos y los ecosistemas marinos costeros. La adición de más de estos "parques de papel" no favorece la conservación o la gestión de la pesca. De hecho, el despliegue ineficaz de los fondos mínimos y el poco personal para proporcionar la apariencia de la gestión, representa un agotamiento de los recursos que se podrían haber utilizado para gestionar adecuadamente las AMPs en otros lugares.

## Cuadro 5. Las reservas no pesqueras pueden ser ineficaces

Algunas circunstancias en que las RNPs no serán efectivas incluyen los siguientes casos:

- 1) Especies altamente móviles que son servidas de forma deficiente por cualquier tipo de AMPs, a menos que una parte sustancial de su hábitat se encuentre dentro de los límites de las AMPs. Por consiguiente, la pesca de las especies pelágicas asociadas a los arrecifes, y más ampliamente a las especies demersales, son especies poco probables de que sean conservadas con la creación de redes de RNPs; a menos que dichas áreas sean excepcionalmente grandes o numerosas. De lo contrario, los individuos pasarán la mayor parte de su tiempo fuera de las fronteras de reserva siendo objeto de las actividades pesqueras.
- 2) Especies de pesca que experimentan una etapa crítica en su vida dentro de los hábitats utilizados como guarderías. Cuando estos hábitats se encuentran degradados por la contaminación o por el desarrollo costero, no podrán preservarse mediante el establecimiento de RNPs que sólo protejan los hábitats de los adultos. La falta de hábitats para la adecuada crianza se convierte en un cuello de botella que restringe la producción y reposición mínima de la población adulta de peces.
- 3) Las RNPs también son una herramienta de gestión pesquera eficaz en las regiones en donde la contaminación y otras actividades en general degradan los hábitats y reducen las capacidades de las RNPs para apoyar a las especies objetivo. Estos hábitats continuarán degradándose tanto dentro como fuera de las RNPs, además que las actividades pesqueras probablemente se reducirán.
- 4) Para ser plenamente eficaces en el mantenimiento de una determinada área pesquera, el espacio que existe entre las RNPs en una red y su tamaño deben reflejar las características de dispersión de las especies objetivo. De igual forma, se deduce que una red de RNPs no puede ser óptima al mismo tiempo, para varias especies objetivo; especialmente si en cada una de estas especies objetivo, los patrones de dispersión de las larvas son muy diferentes. Por consiguiente, no existe un tamaño de RNPs o de sus redes que sirva para todas las especies que se pretende proteger.
- 5) En la mayoría de los casos, la introducción de RNPs trae como resultado la redistribución, más que la reducción del esfuerzo pesquero en los lugares que recientemente son protegidos en comparación con los que no cuentan con protección. En circunstancias donde el esfuerzo pesquero sea mayor que el considerado como sostenible, y que la sobrepesca continúe sin control, es posible que las especies objetivo sigan disminuyendo en tamaño, edad y abundancia. Mientras las RNPs ofrezcan algún tipo de garantía y favorezcan la mitigación de la sobrepesca, las prácticas inadecuadas en las actividades pesqueras provocarán eventualmente el colapso de la pesca. Si la pesca es sostenible, la definición de otros controles sobre el esfuerzo pesquero, así como la captura, deberán realizarse en combinación con la delimitación de las RNPs.

Finalmente, y quizás lo más importante,

- 6) Las RNPs que no se administran de una forma que garanticen el cumplimiento de las regulaciones, no alcanzarán sus funciones previstas. En estas circunstancias, las RNPs no estarán libres de evitar una elevada mortalidad por la pesca, y por ende, las especies objetivo no sobrevivirán un mayor tiempo dentro de las fronteras de estas reservas. Tampoco ocurrirán los incrementos en la producción de crías y no habrá efectos derrama o colaterales o de reclutamiento subsidiario en las poblaciones localizadas en las áreas circundantes a dichas RNPs.

## Tablero de mensajes

- Los arrecifes de coral son inherentemente hábitats desiguales y fragmentados, por ende, muchos organismos de los arrecifes existen como poblaciones locales distintas, que están conectadas espacialmente tanto en un grado como a una distancia desconocida.
- La conectividad demográfica de las poblaciones marinas es clave en el rol que tiene la gestión de la pesca en las reservas no pesqueras (RNPs), dado que dichas reservas proporcionan un mecanismo para aumentar la producción de peces fuera de sus fronteras.
- Si la presión de la pesca sobre los animales que viven dentro de las fronteras de las RNPs se reduce considerablemente, estas áreas puede ayudar a promover la supervivencia y la reproducción de los peces, incluso si en las áreas circundantes estos organismos se encuentra gravemente sobreexplotados.
- Idealmente, una RNP debería ser lo suficientemente grande para que una proporción razonable de las larvas de la especie objetivo pueda completar las distintas etapas de su vida pelágica y establecerse dentro de las fronteras de la RNP.
- Las RNPs dentro de una red deben estar lo suficientemente cerca como para que exista cierto intercambio de individuos. Aquí, los patrones de dispersión determinan la escala adecuada de las redes de RNPs.
- Las mejores estimaciones indican que las áreas vecinas de las RNPs deberían ubicarse a una distancia de entre 10-30 km de distancia, una escala de conectividad estructural razonablemente adecuada para la mayoría de las especies objetivo de los arrecifes.
- La disposición espacial de las poblaciones y/o las pautas de movimiento del agua pueden hacer que ciertas poblaciones sean poblaciones fuente; mientras que otras, sean poblaciones receptoras como resultado de la dispersión de los demás organismos.
- Las poblaciones receptoras son aquellas que fallan en reponerse por sí misma y se han salvado de la extinción por el exceso de dispersión de otras poblaciones (poblaciones fuente).
- Existe una necesidad de protección y monitoreo de largo plazo de las RNPs, junto con el diseño adecuado de experimentos que cuantifique los efectos derrama o colaterales y el reclutamiento subsidiario para que todos los beneficios de la implementación de una reserva sean puestos en evidencia.
- Las RNPs serán eficaces si estas áreas se gestionan y fortalecen de manera adecuada. Estas reservas no son las únicas herramientas que los administradores de los arrecifes necesitan, ni siquiera constituyen la mejor herramienta para la conservación de las áreas marinas costeras.

### 3.4 El valor de los ecosistemas marinos costeros

Para que los recursos marinos sean saludables, se requiere que los ecosistemas estén intactos. Los ecosistemas marinos costeros son altamente productivos y apoyan tanto a las comunidades como a las economías por medio de la entrega de diversos bienes y servicios (por ejemplo, la seguridad alimentaria, el suministro de agua potable, las oportunidades recreativas, entre otros beneficios).

Se estima que para el año 2050, aproximadamente 91% de las costas del mundo serán afectadas por el desarrollo. Muchas zonas costeras de los países en desarrollo están dominadas por el turismo de "sol y playa" con un enfoque basado en el rápido crecimiento costero. El desarrollo en estas

zonas a menudo continúa, ya que al parecer genera trabajo e ingresos en el corto plazo. Pero los costos a largo plazo de un desarrollo inadecuado tanto de bienes como servicios en estas zonas provocan la pérdida de ecosistemas, deterioran las culturas locales, además de tener otros impactos negativos aún mayores que siguen siendo negados.

Varias de las principales actividades económicas son por definición de tipo costero, tal es el caso de:

- La pesca comercial y recreativa;
- Los puertos y el transporte marítimo;
- El turismo de “sol y playa”;
- Los servicios comunitarios recreativos;
- El turismo de aventura y el ecoturismo; y
- La construcción en los litorales, incluyendo los malecones, espigones y otras estructuras para proteger las orillas de las costas.

Muchas de las empresas y actividades recreativas costeras dependen en gran medida de los servicios naturales y ambientales que proporcionan los hábitats costeros sanos. Estos servicios incluyen: la protección de los litorales, los espacios que sirven de guarderías para los peces y los destinos de gran valor para las industrias turísticas.

Es necesario que todas las comunidades costeras, las empresas locales, los administradores de las zonas costeras y los gobiernos reconozcan que es un negocio inteligente conservar los hábitats costeros y ampliar tanto las redes para las industrias turísticas como los ecosistemas costeros que las soportan, ya que esto les permitirá garantizar un mejor rendimiento de sus inversiones en estos hábitats a lo largo del tiempo.



Figura 23. Los tipos de hábitats del océano están conectados por los movimientos de los organismos jóvenes y de los organismos adultos por medio de la transferencia de materiales y nutrientes. Estas conexiones deben ser consideradas en el diseño de las AMP y de las redes de AMPs. Foto: Stillpictures



Figura 24. Muchos negocios y actividades recreativas costeras dependen en gran medida de los servicios naturales que proporcionan los hábitats costeros sanos, y no sólo de los servicios de mercado. La gestión sostenible de los ecosistemas costeros sirve numerosos propósitos recreativos, familiares y culturales. Foto: Stillpictures

### 3.4.1 El mantenimiento de los corredores de hábitats y de sus servicios económicos

Los hábitats que enlazan las distintas fases del ciclo de las especies a través de las plataformas continentales son vitales para una pesca sana, al igual que para el funcionamiento de los ecosistemas. Desafortunadamente, aunque la función de mantener los ecosistemas es importante para la producción económica en las zonas costeras, todavía es poco conocida. Los manglares, los pastos marinos o los arrecifes pueden ser seriamente dañados por los desarrollos costeros que bloquean, desvían, alentan o mejoran el flujo del agua (así como por la transferencia de sustancias), de un hábitat a otro; incluso si la construcción de dichos desarrollos costeros se produce a una distancia considerable.

El siglo pasado ha sido testigo de una amplia modificación de los ecosistemas costeros. Los individuos, las comunidades, las entidades empresariales, los científicos ambientales, las agencias de gestión y reguladoras, así como los gobiernos deben trabajar juntos para que estos impactos puedan ser manejados exitosamente. Tenemos que aplicar la mejor ciencia actual con base en la mejor información disponible para garantizar que las decisiones políticas hechas sean las más eficaces, además de que todos los grupos acepten los resultados de estas decisiones de gestión. Para ello, es necesario pensar en escalas temporales que duren más que un ciclo electoral.

## Cuadro 6. Principales actividades económicas costeras

Para lograr una gestión más sostenible de las costas, tanto las comunidades como los gobiernos y los administradores de estas zonas deben insistir en llevar a cabo las siguientes acciones:

- Anticipar y planificar los cambios en los hábitats costeros en escalas de tiempo que abarquen un periodo de 5 a 20 años;
- Anticipar los impactos acumulativos, ya que el desarrollo costero es un proceso continuo cuyos impactos negativos pueden acumularse con el tiempo;
- Proporcionar incentivos para que las empresas adopten prácticas costeras comerciales sostenibles;
- Asegurarse que todos los actores involucrados en la gestión de las costas se involucren en la toma de decisiones de manera pública;
- Evitar la expansión urbana mediante la aplicación de normas de zonificación del uso del suelo, así como por medio de la ejecución de planes de uso de suelo más estrictos;
- Adoptar mejores prácticas en la gestión de los residuos para reducir la contaminación de las costas;
- Realizar evaluaciones ambientales integrales y objetivas a todas las propuestas existentes en materia de desarrollo costero; y
- Utilizar los conocimientos de los expertos ambientales independientes para evaluar las propuestas enfocadas en el desarrollo costero.
- En este sentido, la gestión sostenible de las comunidades costeras sirve para diversos propósitos recreativos, culturales y familiares, así como para la realización de inversiones más inteligentes para las generaciones futuras.

### 3.4.2 El alivio de la mala conectividad

Existen muchas razones para que una población de una especie de los arrecifes no esté conectada con otras especies en la misma región. Por ejemplo, los patrones de distancia y corriente pueden limitar el suministro de larvas que se dispersan en una población. Adicionalmente, la falta de un arreglo adecuado de los hábitats puede reducir el éxito en el asentamiento de las larvas. Asimismo, cuando se ha reducido el tamaño de la población, ya sea por cultivo directo o por los impactos indirectos sobre los recursos necesarios, el efecto Allee, el cual limita la eficacia reproductiva de las poblaciones dispersas también puede reducir o eliminar la conectividad (Stephens et al. 1999). En las especies que tienen poblaciones dispersas, el número de larvas que se producen es limitado, ya que existe una menor probabilidad de que la fertilización sea exitosa. Esto es especialmente cierto para las especies en donde la liberación de gametos se realiza directamente en la columna de agua. Cuando las poblaciones han disminuido considerablemente, este fracaso reproductivo puede conducir a la extinción local de esa especie.

La compilación y la reposición de los individuos de las especies objetivo constituyen opciones de gestión que pueden ayudar a restaurar las poblaciones viables de organismos de los arrecifes (Bell et al. 2008). Por ejemplo, los restos de una concentración de población en las zonas de no extracción se puede utilizar como una forma de intervención de bajo costo para mitigar el efecto Allee. Cuando las poblaciones han sido diezgadas, la repoblación con individuos criados en centros piscícolas puede ser una opción efectiva. En los casos en que la reducción de los hábitat adecuados para el establecimiento de los organismos de los arrecifes limite el éxito reproductivo, la estabilización de los sustratos costeros para mejorar la calidad de los hábitats puede ayudar a atraer nuevos reclutas (Raymundo et al. 2007). Aunque la agregación y la repoblación sirvan como soluciones locales a estos problemas también locales, si éstos se aplican a través de una región donde las especies de diversas poblaciones se han reducido, estos mecanismos de gestión ofrecen formas rentables para fortalecer y reconstruir la reproducción local de la conectividad. La restauración de la conectividad entre las poblaciones es un objetivo deseable por la forma en que mejora la resistencia a las perturbaciones locales en el número de individuos.

#### Tablero de mensajes

- La gestión sostenible de los ecosistemas costeros sirve a numerosas actividades recreativas, culturales y familiares, además de favorecer las inversiones inteligentes para las generaciones futuras.
- Donde el tamaño de la población se ha reducido, ya sea por el cultivo directo o por los impactos indirectos sobre los recursos necesarios, el efecto Allee limita la reproducción eficaz en las poblaciones dispersas, además que también puede reducir o eliminar la conectividad.
- Aunque la agregación y la repoblación sirven como soluciones locales en problemas también locales, si se aplican a través de una región en la población de una especie que se ha reducido, ofrecen formas efectivas y poco costosas para fortalecer y reconstruir la reproducción local de la conectividad.

# Sección 4

## La ciencia de la conectividad

En esta sección podrán encontrar:

*Métodos para la definición de los patrones de dispersión de las larvas*

---

*Biología larvaria, comportamiento y capacidades sensoriales*

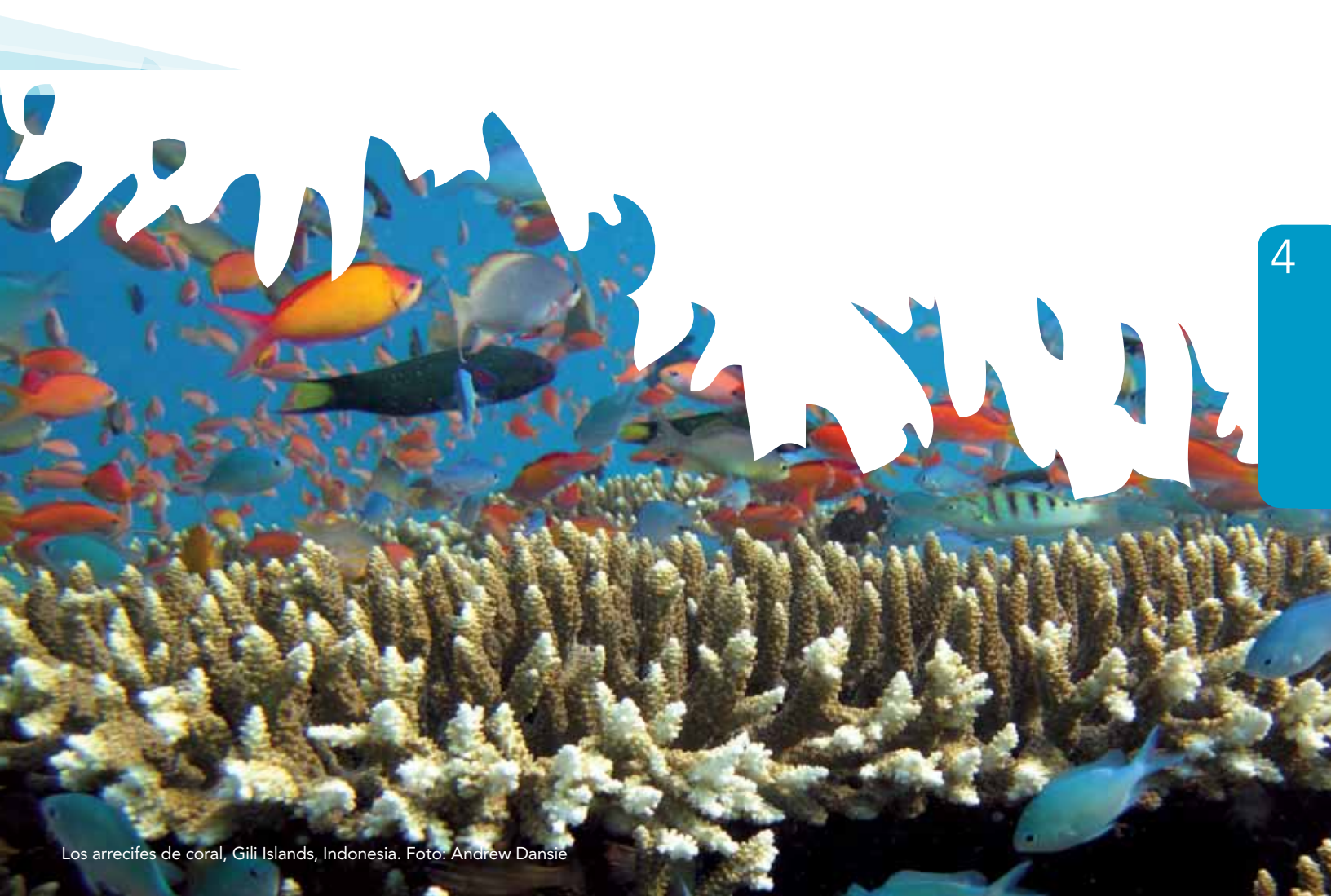
---

*Determinando los patrones de migración posteriores a la vida de larva*

---

*El conocimiento actual sobre la conectividad*

---



## 4. La ciencia de la conectividad

### 4.1 Métodos para la definición de los patrones de dispersión de las larvas

La conectividad demográfica surge de las interacciones dinámicas entre las poblaciones geográficamente separadas, debido a la dispersión que existe entre los individuos. En el ambiente marino, los organismos pelágicos son a menudo muy móviles y las poblaciones se pueden mantener conectadas en escalas espaciales muy grandes por el movimiento de los adultos. Para las especies costeras y bentónicas, como los arrecifes de coral, las interacciones entre las poblaciones reproductoras tienen lugar sobre todo mediante la dispersión natal (Sugden y Pennisi 2006) durante la fase larval pelágica. Esta interacción se produce también en algunas especies a través de las migraciones de desove u otros movimientos para su asentamiento posterior en hábitats diferentes a donde vivieron su fase larval (véase el Cuadro 3). Por lo tanto, la conectividad poblacional depende tanto de la topografía marina (es decir, las corrientes y los hábitats distribuidos de manera desigual) como de las historias individuales de cada organismo.

#### 4.1.1 Modelos biofísicos de la dispersión de las larvas

##### 4.1.1.1 ¿Por qué se necesitan modelos numéricos?

Dado que muchas especies costeras se dispersan durante la fase larvaria, se podría predecir que la medición de la dispersión natal y el intercambio desigual entre las poblaciones de larvas proporcionaría una evaluación precisa de la conectividad. Sin embargo, surgen dificultades cuando se trata de hacer observaciones directas de pequeñas larvas pelágicas. Los métodos empíricos para el seguimiento de las larvas (por ejemplo, estudios de plancton, el marcado de otolitos y las comparaciones genéticas) se limitan a instantes en el tiempo y en el espacio, así como a vínculos específicos entre las larvas y las poblaciones. La modelación numérica es un enfoque único que genera un amplio espectro de patrones de conectividad, además que proporcionan estimaciones importantes sobre las características de la dispersión de las larvas (véase el Cuadro 7. Características de un modelo moderno de conectividad biofísica). Al final, una combinación de técnicas es necesaria para lograr una evaluación seria de las redes de población. A pesar de ello, la modelación numérica sigue siendo un instrumento clave para comprender los complejos procesos involucrados en la conectividad de las poblaciones (Werner et al. 2007). Una fortaleza particular de los modelos en una era de cambio climático, es su utilización en el análisis predictivo, ya que pueden generar hipótesis que revelan la importancia de procesos particulares, cuyos efectos no están previstos o no son lineales.

##### 4.1.1.2 ¿Qué tipo de modelos necesitamos?

Para capturar los importantes procesos físicos (por ejemplo, el transporte y la dispersión de las masas de agua, los remolinos, entre otros) y biológicos (que incluyen, el crecimiento, la mortalidad, la capacidad para nadar y la respuesta de los gradientes), el uso de modelos biofísicos acoplados es imperativo (Werner et al. 2007). El acceso casi en tiempo real a datos de teledetección basados en la observación oceánica, en combinación con una mayor capacidad computacional, ha permitido que en la actualidad se cuente con una mejor comprensión de los procesos oceánicos, de igual forma ha mejorado considerablemente los modelos oceánicos en 3-D. En la perspectiva biológica, la utilización de las trayectorias individuales (como Modelos de Base Individual, MBIs) puede proporcionar resultados más realistas, al permitir la simulación del comportamiento de especies específicas durante una fase determinada de la vida larvaria de los organismos. Los modelos de conectividad también deberían incorporar la incertidumbre en las características físicas (como en el caso de los Modelos Estocásticos de Lagrange, MEL) y biológicas (por ejemplo, la mortalidad estocástica), de lo contrario los resultados obtenidos de su estimación podrían ser limitados. Un "buen" sistema de modelos de conectividad debe generar todas las características de dispersión que faltan en los datos empíricos (tal es el caso de las diferencias espaciales y temporales, véase el Cuadro 7. Características de un modelo moderno de conectividad biofísica). Este sistema de modelos de conectividad también debería estar directamente unido a otros modelos de flujo de



genes, además de comparar sus resultados con las estructuras genéticas derivadas de los estudios de población. Estos modelos son herramientas poderosas para probar las hipótesis que podrían abordar diversas interrogantes relacionadas con la gestión de las AMPs, incluyendo aspectos relacionados con cuál es su mejor ubicación y qué tamaño sería el más apropiado para éstas áreas.

#### 4.1.1.3 La resolución de los modelos y su validación

La resolución espacial de los modelos de conectividad es crítica por el énfasis que pone en los patrones espaciales (como, dónde están las poblaciones fuente y dónde las poblaciones receptoras). Los Modelos de Circulación General Oceánica (MCGOs, como el Modelo Híbrido de Océano Acoplado (MHOA), con una proyección geográfica en escala de Mercator) operan actualmente en una escala regional, además de archivar los datos en los servidores en tiempo real, constituyendo una fuente de información para los modelos biofísicos de los arrecifes que estudian la dispersión de las larvas (Cowen et al. 2006). El acoplamiento de los resultados estimados de los modelos oceánicos con herramientas estocásticas para el rastreo de partículas, simplifica la configuración de estos modelos. Estudios recientes han demostrado que las escalas espaciales de intercambio de las larvas puede ser del orden de pocos kilómetros para algunos organismos de los arrecifes (por ejemplo, Almany et al. 2007, Jones et al. 2009) y que el desarrollo temprano de las habilidades sensoriales y de comportamiento de las larvas juega un papel importante en el impulso para el reclutamiento de los individuos (Irisson et al. 2004, Paris y Cowen 2004). Los modelos que mejor simulan la topografía local y los patrones de dispersión inicial se están perfeccionando cada vez más (como en el caso del Modelo Oceánico Regional de Alta Resolución (MORAR) o el Modelo Oceánico Princeton (MOP). La resolución temporal en un modelo es de igual forma muy importante, porque la dispersión de las larvas suele ser estacionalmente discreta y porque se hace hincapié en la modelación de los patrones climáticos temporales. Por lo tanto, más allá de los requisitos de resolución espacial de los MCGOs en los estudios de conectividad, también se requieren datos de series temporales de las últimas décadas como base para poder realizar pronósticos. Esto podría ser utilizado con modelos climáticos acoplados a los modelos oceánicos (MCGOs) para evaluar los efectos del cambio climático en la estratificación del océano y en la dispersión larval.

La validación de cada componente dentro del modelo acoplado debe ocurrir con los datos físicos disponibles (por ejemplo, la temperatura superficial de los mares derivada de manera satelital (TSM), la altura de la superficie del mar (ASM), las series de tiempo acústicas de Doppler de los Sistemas de Observación de los Océanos, los flotadores superficiales y las anclas) y por la comparación de la dispersión de los resultados con respecto a los patrones de las muestras recolectadas en campo de los datos biológicos (que incluyen estudios de plancton, huellas genéticas, series temporales de reclutamiento de organismos y otros marcadores biológicos como las firmas químicas en los otolitos de los peces). Un buen modelo biofísico validado puede convertirse en una herramienta muy poderosa para la comprobación de la hipótesis de investigación sobre la conectividad. Sin duda, la comprensión que se tiene en materia de conectividad se hará más eficaz a través de las comparaciones consistentes a largo plazo tanto de los modelos como de los estudios empíricos.

## Cuadro 7. Características de un modelo moderno de conectividad biofísica

El Sistema de Modelación Multi-Escala de la Conectividad (SMMC), desarrollado en la Universidad de Miami, está proporcionando una serie de estudios efectivos que examinan la conectividad de los organismos de los arrecifes. Este sistema es capaz de proporcionar resultados detallados generados por los modelos sobre las tres características de conectividad que puedan ser de interés: la distancia de dispersión, la advección/difusión y la forma del núcleo de dispersión.

### Distancia

La información sobre la distancia de dispersión de las larvas se puede obtener a partir de modelos numéricos espacialmente explícitos que incorporan tanto la hidrodinámica como el comportamiento individual de las larvas. Este sistema de modelos simula las trayectorias que seguirán las larvas y proporciona una medida exacta del desplazamiento total para cada individuo. Dado que estamos interesados en el camino más corto que siguen dichas larvas desde el principio (después del desove), hasta el punto final (cuando se asientan en un determinado hábitat), teniendo en cuenta las trayectorias individuales de las diferentes especies, la distancia de las migraciones se estima como la distancia promedio en que se dispersa un grupo de larvas desde su desove hasta llegar a otros hábitats (Paris et al. 2007).

### Advección/difusión

La advección es el medio de transporte de un grupo de larvas; mientras que la difusión es la varianza que existe entre la dirección media y la distancia recorrida, producto de las diferencias individuales de las larvas (Okubo 1989). Los modelos biofísicos que tratan de resolver los movimientos individuales resultantes de las de los remolinos oceánicos y del comportamiento de las larvas (por ejemplo, la alimentación, el nado y la recepción de nuevos individuos al grupo). Estos modelos pueden ser fácilmente utilizados para conocer la dirección y propagación de la dispersión (en una dimensión) de las larvas, a partir de una función de distribución de Gauss (Botsford et al. 1994, Hastings y Botsford 2006) o (en 2-D) como una nube de partículas (Paris et al. 2005, Cowen et al. 2006). Largier (2003) estimó que la advección media asociada con la hidrodinámica fluctuaba entre 10-100 km para la duración de una fase larval de 30 días aproximadamente. Este investigador también identificó que la advección disminuye con una mayor difusión y que todas las larvas eran exportadas fuera de la región local antes de que se asentaran en su hábitat de origen (por ende, no existe una absorción local). Sin embargo, en otro estudio, cuando el comportamiento de las larvas se introdujo, la advección disminuyó considerablemente; mientras que la difusión se mantuvo sin cambios (Paris et al. 2007). La difusión puede en realidad aumentar si las larvas presentan patrones de nado aleatorios (es decir, sin estar orientados), lo cual podría permitirles llegar a más hábitats para establecerse (Armsworth y Roughgarden 2005). No obstante, el aumento de la difusión puede diluir el número de larvas que logren asentarse en un determinado lugar y el movimiento dirigido favorece la concentración del número de larvas en lugares específicos. En términos generales, el Sistema de Modelación Multi-Escala de Conectividad puede introducir los valores explícitos de la difusión de las larvas a través de los remolinos oceánicos, extrayéndolos de los modelos MCGO para mejorar la estimación de la advección/difusión.

### La dispersión del núcleo

Esta función muestra la distribución de probabilidad de la ubicación de un individuo en función de su ubicación y el tiempo de desove, una vez que el proceso de dispersión ha comenzado. En la naturaleza, la dispersión de los modelos actuales es asimétrica debido a la irregularidad del agua y los hábitats de reclutamiento. Por lo tanto, modelos biofísicos razonables deben generar formas de dispersión que cambien con los rasgos de la historia de vida de los individuos. Debido a la naturaleza estocástica de los MBIs, la frecuencia relativa de todos los resultados posibles tiende a estabilizarse en valores dados, proporcionando una buena estimación del éxito en la dispersión del núcleo (Cowen et al. 2006). Además, la tendencia media de las fluctuaciones

estocásticas también está bien representada en los MBI. Los núcleos de dispersión se pueden representar en una dimensión (es decir, la probabilidad de llegada frente a la distancia) o en 2-D (la probabilidad de transición de la matriz). En hábitats muy fragmentados, como los arrecifes de coral, el modelado de los núcleos de dispersión en 2-D permite el análisis de los patrones de movimiento individual entre los diversos hábitats de la población objetivo (Bode et al. 2006, Cowen et al. 2006). En ambas formas, los núcleos de dispersión también proporcionan un nivel relativo de reclutamiento local, es decir, un valor importante sobre la persistencia de las poblaciones (Levin et al. 2003; Hastings y Botsford 2006).

El Sistema de Modelación Multi-Escala de la Conectividad (SMMC) incorpora una variedad de datos biológicos de especies específicas y de datos físicos de sitios particulares que proporcionan ciertos resultados para los organismos de una especie, en una determinada región. Los periodos de tiempo relevante incluyen la duración de la etapa del huevo antes de la eclosión (horas-días), la etapa larval (mes) y el tiempo de vida reproductivo de los adultos (años). Los valores de la velocidad (advección) y la difusión (difusión por medio de remolinos) se promedian en estas escalas de tiempo (Botsford et al. 2002). De esta manera, la variabilidad de la dispersión de las larvas y su asentamiento puede ser modeladas en diferentes escalas de tiempo, según sea apropiado para el organismo objetivo (Paris et al. 2002). Por ejemplo, los datos del clima pueden ayudar a predecir los patrones de conectividad que se esperan en una región durante un mes en particular. El SMMC se ve obligado por las corrientes realistas (tiempo y espacio variable), así como por los parámetros demográficos apropiados, a simular la dispersión de los núcleos resultantes y los patrones de asentamiento con un nivel de detalle que supera con creces lo que es posible encontrar con los métodos empíricos (Cowen et al. 2000).

Un núcleo de dispersión puede ser uni- o multi-modal dependiendo de la historia de vida de un organismo, el grado de fragmentación del hábitat, la oceanografía y la geomorfología de la región. La disposición espacial y la distancia entre las áreas que conforman los arrecifes de coral, los atolones o los archipiélagos de la capa de hábitat del SMMC, juegan un papel definitivo en la forma final que tendrá el núcleo. Por ejemplo, para los dispersores de grandes distancias o los organismos pelágicos con una duración variable de la fase larval se pueden extender significativamente más allá del período de competencia y la distribución puede ser multi-modal, lo que sugiere una mayor probabilidad de que dichas larvas sean capaces de cruzar las brechas que existen en grandes hábitats. Las especies con gran potencial de dispersión (es decir, de larga duración larval pelágica) muestran bi-modalidad en el núcleo de dispersión, ya que tienen la capacidad de reclutar nuevos miembros cerca de su lugar natal, moviéndose hacia aguas más profundas donde la corriente no es tan fuerte; además, también tienen la capacidad de reclutar nuevos individuos provenientes de lugares lejanos a los arrecifes cuando éstos se dispersan demasiado lejos de su lugar de origen. Este es el caso de las larvas de la langosta espinosa (Butler et al. en revisión).

La mayoría de la mortalidad tiene lugar durante la etapa larval pelágica (Cushing 1990). Esta situación limita la distancia a la que puede ocurrir una dispersión significativa de las larvas (Cowen et al. 2000), y por lo tanto, también el patrón y la escala de la conectividad. Estas complejidades se están estudiando actualmente para que se mejoren las predicciones de la mortalidad de las larvas en su análisis espacial. En concreto, el modelo de las larvas de seguimiento (véase el Módulo de MBI en el Cuadro 8) se vinculará al modelo de nutrientes fitoplancton-zooplancton (NPZ). Este último modelo puede ser utilizado para determinar la disponibilidad de alimento para las larvas; situación que afecta el crecimiento de las larvas, al igual que sus tasas de mortalidad. Una función de crecimiento también se utilizará para determinar la duración de larvas de los individuos, es decir, si una larva tiene comida suficiente y crece más rápido, su duración como larva pelágica será más corta y su supervivencia también se incrementará.

En los modelos de meta-poblaciones, es una práctica común usar especies con distancias específicas de dispersión para predecir el intercambio de individuos entre los fragmentos de hábitats. La influencia de la distribución de los fragmentos de hábitats en el asentamiento de las especies puede ser también analizada con base en los modelos de intercambio de larvas. Los efectos de los adultos pueden ser modelados añadiendo o eliminando reservas marinas (Botsford 2001). Esto cambia el patrón espacial de la producción, de manera que los impactos de los resultados de los modelos de dispersión pueden ser explorados.

## Cuadro 8. Los componentes del Sistema de Modelación Multi-Escala de Conectividad

El Sistema de Modelación Multi-Escala de Conectividad (SMMC) ha sido diseñado para modelar partículas abióticas y/o bióticas, incluyendo su movimiento, crecimiento y supervivencia. Este sistema de modelación también tiene en cuenta la interacción de estos factores con los nutrientes, los campos depredador-presa, el ambiente pelágico físico (como la temperatura, la salinidad y las corrientes), al igual que los hábitats bentónicos (la producción, el establecimiento y la capacidad de carga de estos hábitats). Todos estos procesos se extienden por la costa hacia los ecosistemas oceánicos y pueden ser modelados por unidades funcionales independientes con base en los datos e información, que fluye de forma progresiva desde el entorno físico hasta los niveles tróficos superiores en múltiples escalas decenales en el tiempo. Los resultados de las simulaciones SMMC en menores escalas, con modelos de circulación basados desde cuencas hasta las costas, integra los modelos geoquímicos NPZ; además de acoplar modelos de base individual del transporte de larvas y de reclutamiento, los cuales a su vez, se pueden alimentar con modelos climáticos. El SMMC es un sistema de modelos interdisciplinarios que en esencia representa un novedoso marco para integrar eficazmente varias aplicaciones que generan resultados en cualquier tipo de resolución y formato espacial. El SMMC cuenta con dos herramientas ampliamente utilizadas en la comunidad: el Sistema de Referencia Terrestre (SRT) y el Proyecto de Acceso Abierto al Protocolo de la Red de Datos (AbiertoPRD). Ambas herramientas, permiten superar los problemas técnicos relacionados con el intercambio de información entre los diferentes modelos y la gestión de los datos. El Sistema de Modelación Multi-Escala SMMC incluye seis módulos principales como son:

### 1) El Módulo Oceanográfico

Los Modelos de Circulación General Oceánica (como MHOA, MORAR, etc.) proporcionan la velocidad de circulación del océano en 3-D, la cual mueve tanto de manera pasiva como activa las partículas, desde la superficie de los hábitats de los arrecifes de coral hacia los mares costeros y de regreso.

### 2) El Módulo del Paisaje Marino (Hábitat Matrix)

Este módulo representa tanto el desove como los lugares de asentamiento de las larvas. Se asocia con hábitats particulares para las especies objetivo y de la región. Por ejemplo, el paisaje marino de los organismos de los arrecifes de coral se deriva de la teledetección de arrecifes de coral (Andréfouët et al. 2006). Con base en Paris et al. (2005), los polígonos de los hábitats se extienden sobre una distancia que representa las capacidades de las larvas para determinar el hábitat más adecuado para establecerse. En este sentido, el paisaje marino puede dividirse en más polígonos que constituyen unidades discretas (o nodos) con un nivel de tolerancia que define la resolución del hábitat de la matriz.

### 3) El Módulo Biológico

Este módulo aborda las estrategias tanto para la reproducción de los adultos (por ejemplo, la época de reproducción, la ubicación, la frecuencia y la producción), así como las características de las larvas (que incluyen, el período de competencia, la duración larval pelágica (DLP), la tasa de mortalidad y el comportamiento de nado (como la flotabilidad, la migración vertical y la orientación), desde el huevo hasta la etapa de asentamiento. Este módulo usa las características del ciclo vital de una especie y sirve para simular el movimiento de otras larvas que es causado por la advección de una corriente inducida. Por ejemplo, con base en los resultados encontrados por Paris y Cowen (2004), en un modelo de larvas del pez damisela, las partículas se mueven pasivamente en las capas menos profundas del agua hasta la fase de flexión, después de la cual se mueven en un esquema de migración vertical hasta que llegan a una etapa en que son competentes para asentarse en un hábitat determinado. Este proceso de asentamiento se realiza cuando la trayectoria de las partículas se encuentra con un polígono de arrecife. La estrategia reproductiva es entonces simulada por el programa de liberación de partículas. Con el fin de encontrar resultados significativos, las simulaciones utilizan una serie de lanzamientos de partículas de cada nodo de origen (ubicación del desove).

## 4) El Módulo de Nutrientes Fitoplancton-Zooplancton (NPZ)

Este módulo se ejecuta en línea con el Módulo oceanográfico. Este módulo se ve afectado por la climatología (por ejemplo, el viento, el flujo de calor y la radiación solar, las cuales determinan la profundidad de las capas de agua que se mezclan), además de la fotosíntesis y la densidad de zooplancton. La producción diaria de zooplancton (copépodos pequeños generalmente) está acoplada en línea al Módulo biológico con el fin de parametrizar la mortalidad de las larvas y calcular su crecimiento (y su duración pelágica) tanto en el tiempo como en el espacio. El componente fitoplancton de este módulo se puede validar a través de imágenes vía satélite del color del océano.

## 5) El Módulo de Base Individual (MBI)

Las partículas individuales (las larvas) son movidas por una corriente en 3-D (véase el Módulo oceanográfico), presentando un comportamiento específico que incluye la conducta de supervivencia (véase el Módulo biológico), al igual que las sub-escalas de las turbulencias en el océano. La base subyacente del módulo de MBI es un modelo estocástico de Lagrange (MEL). Un modelo estocástico es una herramienta para la estimación de las distribuciones de probabilidad de resultados potenciales, que permiten la variación al azar en una o varias entradas en el tiempo. Un modelo lagrangiano utiliza un marco de referencia en movimiento que describe cómo se mueven las partículas. Debido a que la circulación en las zonas costeras de desove es compleja, y por lo general se caracteriza por remolinos tanto de una meso-escala como en una pequeña escala, las estadísticas de Lagrange son utilizadas en un esquema de rastreo de partículas estocástico, que deberían ser espacialmente explícitas (Paris et al. 2007).

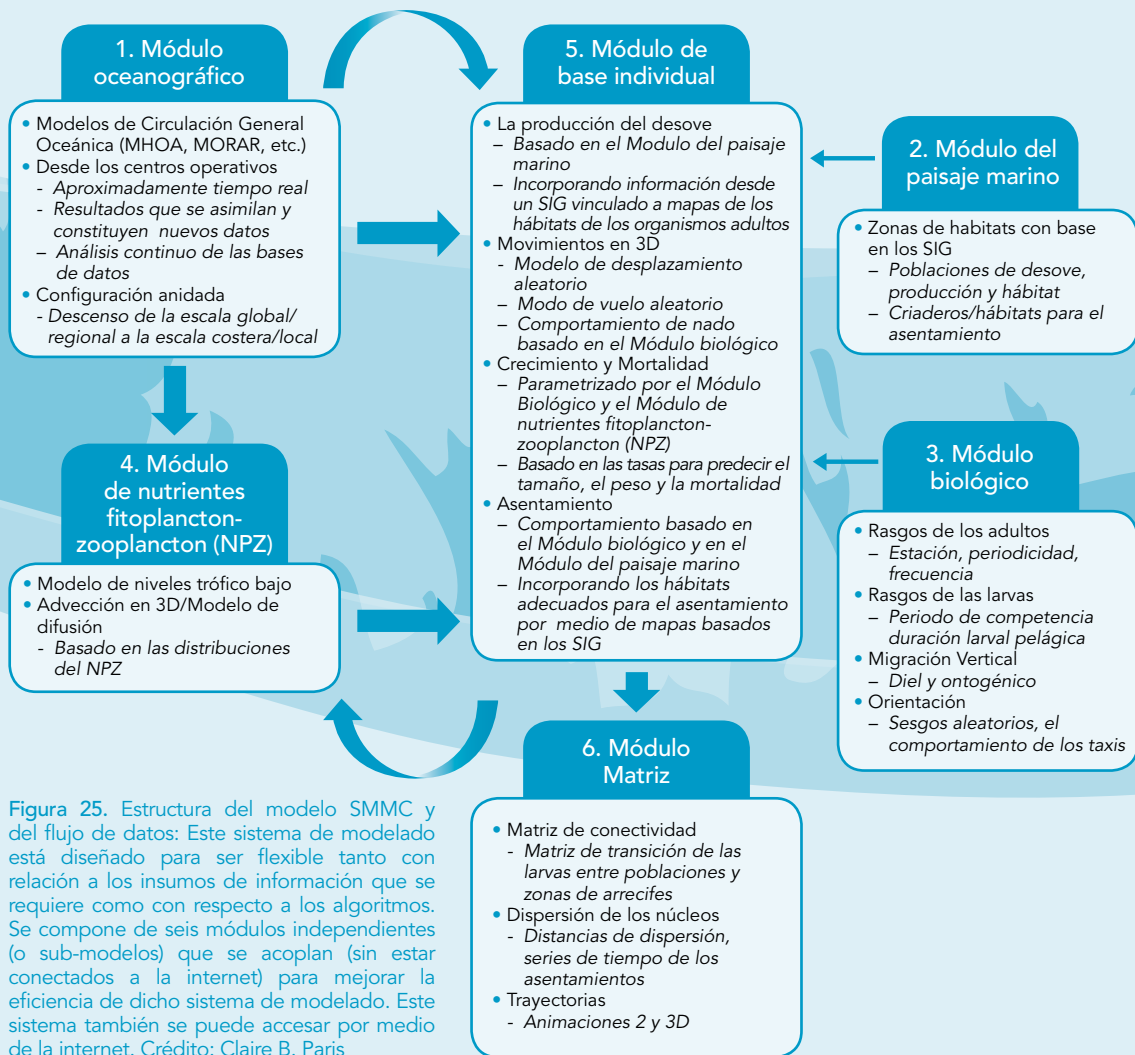


Figura 25. Estructura del modelo SMMC y del flujo de datos: Este sistema de modelado está diseñado para ser flexible tanto con relación a los insumos de información que se requiere como con respecto a los algoritmos. Se compone de seis módulos independientes (o sub-modelos) que se acoplan (sin estar conectados a la internet) para mejorar la eficiencia de dicho sistema de modelado. Este sistema también se puede acceder por medio de la internet. Crédito: Claire B. Paris

## 6) El Módulo Matriz

El resultado típico de este modelo utiliza matrices cuadradas llamadas matrices de conectividad o matrices de probabilidad de transición. Con el fin de describir un sistema en una escala ecológica, la proporción de individuos reclutados de manera exitosa debe reflejar las tasas de reclutamiento (es decir, el número de reclutas por generación) necesarias para reponer la población local a un mínimo de crecimiento cero (Cowen et al. 2006). Estas tasas de reclutamiento pueden ser estimadas *a posteriori* para igualar las tasas de mortalidad de los organismos adultos, usando sencillos modelos de crecimiento poblacional. Del mismo modo, los modelos demográficos de conectividad *a posteriori* pueden ser estimados en otras escalas con base en la producción (por ejemplo, con relación en la biomasa reproductora por unidad de población o la proporción del hábitat de los adultos en cada población), que puede ser aproximado por el área de cada nodo (véase el Módulo del paisaje marino). Dado que los modelos de conectividad son por naturaleza espacialmente explícitos, el algoritmo de los MEL se acopla con el Módulo del paisaje marino. Esto sirve para delimitar el hábitat más adecuado para establecerse a lo largo de una ruta de las partículas individuales. Asimismo, es importante incorporar la incertidumbre en el modelo de conectividad (por ejemplo, con Modelos Estocástico de Lagrange [MEL o mortalidad estocástica]), de lo contrario el valor analítico del Módulo matriz será limitado.

## Tablero de mensajes

- Los métodos empíricos para el seguimiento de las larvas (por ejemplo, los estudios de plancton, el marcado de los otolitos y las comparaciones genéticas) se limitan a instantes en el tiempo y espacio; mientras que, la modelación numérica es un enfoque único que genera un amplio espectro de patrones de conectividad y proporciona estimaciones importantes sobre las características de la dispersión de las larvas.
- Un buen modelo biofísico validado puede convertirse en una herramienta poderosa para la comprobación de la hipótesis de la investigación sobre la conectividad, además que incrementa de manera más eficaz la comprensión actual del tema de conectividad por medio de comparaciones consistentes a largo plazo tanto de los modelos como de los estudios empíricos utilizados para su análisis.
- El Sistema de Modelado Multi-Escala de Conectividad incorpora una variedad de datos biológicos de especies específicas y de datos físicos de sitios particulares que proporcionan ciertos resultados para los organismos de una especie y una región determinada.
- Una fortaleza particular de los modelos en una era de cambio climático es su utilización en análisis predictivos. Por ejemplo, estos modelos pueden generar hipótesis que pongan en evidencia la importancia de procesos particulares, al igual que efectos no previstos o no lineales.

## 4.1.2 Los análisis genéticos de las poblaciones e individuos

### 4.1.2.1 La conectividad evolutiva versus la conectividad ecológica

Las poblaciones de especies de los arrecifes de coral pueden estar separadas geográficamente a distancias que van desde pocos metros (por ejemplo, los invertebrados que habitan en las cabezas de coral) hasta miles de kilómetros (como las especies presentes tanto en la parte occidental como oriental del Océano Pacífico). Si estas poblaciones están aisladas unas de otras (es decir, si no presentan intercambios de individuos o de genes) por un período prolongado de tiempo, evolucionan de forma independiente mediante el proceso de selección natural y de deriva genética (cambios aleatorios en el gen de frecuencia). En última instancia, este aislamiento puede conducir a que se desarrollen poblaciones genéticamente diferentes, además de favorecer el surgimiento de nuevas especies. Por el contrario, si las poblaciones intercambian de manera regular individuos migrantes (y genes), el flujo de genes favorecerá a que dichas poblaciones sean genéticamente similares. Este proceso de intercambio de genes conduce a la conectividad evolucionaria (o conectividad genética) y corresponde a la tasa de flujo génico entre las poblaciones que ocurren en una escala de tiempo de varias generaciones. Por el contrario, la conectividad ecológica (o conectividad demográfica) se refiere al intercambio real de los individuos que ocurren en escalas espaciales que pueden influir en la demografía y en la dinámica de la población. Incluye la dispersión de las larvas, el reclutamiento de organismos jóvenes y la supervivencia de dichos organismos hasta su edad reproductiva. Esta forma de conectividad entre las poblaciones medibles influirá en la cantidad de individuos reclutados para una población, el número de individuos reproductores en una determinada ubicación y la cantidad de biomasa disponible para la pesca.

Es importante diferenciar entre estos dos tipos de conectividad porque las tasas de intercambio de migrantes que se requiere para conectar las poblaciones ecológicamente, deben ser de mucho mayor en magnitud que las que conectan a las poblaciones en un sentido evolutivo. Por ende, no puede haber una conexión evolutiva entre las poblaciones de gran relevancia; incluso si experimentan niveles tan bajos de intercambio, que la conectividad ecológica es esencialmente ausente.

Los administradores ambientales, en particular, los que son responsables de la gestión de las AMPs, por lo general hacen preguntas que están relacionadas con la conectividad ecológica en lugar de con la conectividad evolutiva. Por ejemplo, estos administradores se harían las siguientes preguntas ¿están las AMPs dentro de una red adecuadamente conectadas? ¿Cuál es la distancia geográfica máxima en que se mantienen conectadas ecológicamente estas áreas? ¿Son las poblaciones que habitan dentro de las AMPs autosostenibles? ¿Cuáles son los resultados de la instauración de una AMP sobre la explotación pesquera de las áreas circundantes? ¿Hasta dónde pueden ser explotadas las larvas que son suministradas por un AMP?

Preguntas que incluyen si una determinada población es lo suficientemente diferente genéticamente para justificar el esfuerzo de conservación especial de ciertas especies de arrecife son también importantes, pero son abordadas de manera menos frecuente por la conectividad evolutiva. En la siguiente sección, se abordarán las herramientas para realizar un análisis genético que puede ser utilizado para responder las cuestiones relativas a la conectividad ecológica.

### 4.1.2.2 Patrones en la diferenciación de la población

La conectividad entre las poblaciones dentro de las AMPs, o fuera de ellas, puede ser estimada indirectamente mediante el análisis de la variación genética de los individuos incluidos en la muestra de las poblaciones espacialmente discretas. De hecho, las poblaciones pueden diferir en la presencia de formas alternativas de genes (alelos) que constituyen la diversidad heredada entre individuos con-específicos. Las poblaciones también pueden diferir en la frecuencia de estos alelos y en las asociaciones entre dichos alelos (vínculos genéticos). Bajo los supuestos de la teoría de la genética de la población, el número de migrantes intercambiados por generación puede estimarse indirectamente como una varianza estandarizada de las frecuencias de los alelos entre las poblaciones locales. La dificultad de este enfoque es que sólo permite una representación promedio de los patrones de dispersión, ya que sintetiza las diferentes características de la

dispersión que pudieran ocurrir de un año a otro. Desafortunadamente, tampoco se distingue entre el flujo genético contemporáneo (o flujo en curso) y el flujo genético histórico, dado que los métodos indirectos no pueden distinguir entre el intercambio de 100 individuos cada 100 generaciones, con relación al intercambio de un individuo en cada generación. Por otra parte, un migrante que se asienta y entra en una población reproductora local por generación es suficiente para evitar la acumulación de grandes diferencias genéticas; mientras que diez migrantes por generación son suficientes para prevenir todas, excepto las diferencias genéticas menores del desarrollo. Por lo tanto, estos estudios genéticos indirectos son muy poco sensibles para detectar la conectividad ecológica entre las poblaciones, cuando poco o nada de las variaciones genéticas se han detectado. En los reinos marinos, esto a menudo ocurre cuando se examinan las escalas espaciales que son de preocupación para las AMPs.

Recientemente, técnicas moleculares y estadísticas más sensibles han sido creadas y mejoradas para realizar estimaciones directas de la conectividad ecológica en las poblaciones marinas. Éstas estimaciones se basan en la asignación de los individuos (por lo general, la descendencia de las poblaciones) a las poblaciones de origen (con métodos de asignación) o de padres específicos (por medio del análisis de parentesco). Estos enfoques son conceptualmente similares a las pruebas obtenidas del uso de marcadores físicos o químicos/ambientales (véase la Sección 4.1.3.3).

#### 4.1.2.3 La asignación del genotipo de la descendencia a las poblaciones de origen



Figura 26. Una estimación de la proporción del auto-reclutamiento en comparación con las larvas dispersas en las cohortes de los peces doncella bicolor (*Stegastes partitus*) se hizo utilizando la asignación del análisis del genotipo en dos arrecifes ubicados en el atolón de Turneffe, en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM). Foto: John E. Randall

En los métodos de base individual, un individuo es asignado a una de las muchas poblaciones posibles con base en la frecuencia de su genotipo en múltiples locus genéticos. A diferencia de los métodos indirectos presentados anteriormente, los métodos de asignación permitirán la estimación de la conectividad actual. Sin embargo, cuando se aplican a escalas espaciales pertinentes para las AMPs, los problemas potenciales de estas pruebas son las siguientes: (1) en algunos casos, estos métodos requieren que todas las fuentes posibles hayan sido incluidas en la muestra, y (2) las fuentes putativas de poblaciones de origen deben ser lo suficientemente diferenciadas genéticamente (por ejemplo, una baja migración entre las poblaciones de origen). De hecho, se ha demostrado que a medida que la tasa de dispersión de la población aumenta, la diferenciación genética entre las poblaciones disminuye

y se vuelve cada vez más problemático distinguir la población de origen de cada individuo (Saenz-Agudelo et al. 2009). Por lo tanto, las pruebas de asignación individual pueden ser más útiles para determinar dichos patrones, sólo cuando hay una baja conectividad. Varios ejemplos en la literatura han demostrado la utilidad y versatilidad de las pruebas de asignación para detectar la conectividad ecológica en los organismos marinos. A pesar de ello, para muchas especies marinas, la subdivisión genética puede ser demasiado baja para que pueda realizarse una asignación exacta.

#### 4.1.2.4 El análisis de la paternidad

El análisis de la paternidad puede proporcionar una escala más fina para el análisis de asignación, en comparación con los análisis que asignan individuos a una población de origen putativa. En esta forma de análisis, los individuos se asignan a un solo padre, o a un par de padres, en donde se selecciona el padre más probable de un grupo de padres potenciales. Dicho análisis permite la determinación del origen natal de un individuo, si la ubicación de los padres en el momento de la concepción es conocida. Este método es especialmente adecuado para un marco de AMPs, ya que proporciona datos sobre los eventos de la dispersión actual. Para las pruebas de asignación y el análisis de parentesco, el uso de muchos polimórficos (muchos alelos) como marcadores genéticos (por ejemplo, los marcadores de microsatélites) es necesario. Esto puede ser problemático porque el desarrollo y la caracterización de los marcadores genéticos son muy caros, además que dicho proceso requiere de mucho tiempo. Aparte de las dificultades mencionadas, se identifican principalmente



dos inconvenientes específicos para llevar a cabo el análisis de la paternidad: (1) la ubicación de los padres en el momento de la concepción debe ser conocida (esto puede ser difícil de determinar para algunas especies móviles grandes), y (2) la asignación disminuye drásticamente tanto el éxito como el número de los padres considerados como candidatos incluidos en la muestra. Por lo tanto, una alta proporción de la población adulta debe ser muestreada y procesada genéticamente, lo que hace este planteamiento difícil y costoso. El análisis de la paternidad sería muy útil cuando se utilizan especies para las que los marcadores de microsatélites ya están disponibles y para las cuales el número de adultos es lo suficientemente bajo, que casi todos los padres posibles pueden ser incluidos en la muestra.

### 4.1.3 El uso de señales químicas para identificar la localización de las poblaciones de origen

#### 4.1.3.1 Los otolitos, estatolitos y otras estructuras útiles

Muchos organismos marinos tienen partes duras del cuerpo, incluidos los huesos, conchas, escamas, otolitos y estatolitos. Los otolitos y estatolitos son estructuras calcificadas, como las estructuras que utilizan los peces y crustáceos para escuchar y/u orientarse. La mayoría de estas estructuras se componen sobre todo de minerales de calcio (por ejemplo, las conchas de moluscos, los peces, los otolitos y los estatolitos, casi en su totalidad están compuestos de carbonato de calcio). Estas estructuras crecen en proporción con el cuerpo del animal en un proceso por el cual los compuestos de calcio se incorporan a la estructura diaria. Los productos químicos que constituyen la composición de estas partes duras se toman desde el agua circundante. Los otolitos son 97% carbonato de calcio. Sin embargo, otros elementos que también se incorporan en las estructuras duras incluyen estroncio, magnesio, bario y plomo, entre otros elementos (Campana 1999). Debido a que estos productos químicos proceden del medio ambiente, las estructuras como los otolitos se pueden utilizar como un registro del tiempo de vida de un animal.



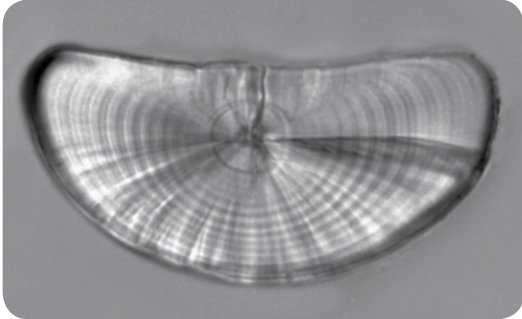
Figura 27. Los otolitos y las conchas de los mejillones han sido utilizados por los investigadores para encontrar posibles lugares de origen de las larvas. Estas estructuras crecen en proporción al cuerpo de un animal y los productos químicos que constituyen la composición de estas partes duras se toman del animal de las aguas circundantes. Foto: iStockphoto

#### 4.1.3.2 Señales naturales que definen la localización de los lugares de origen

Muchos estudios han utilizado productos químicos naturales como marcadores para diferenciar entre los hábitats costeros, es decir, distinguir entre los estuarios y los hábitats costeros, así como entre los arrecifes y los manglares (Chittaro et al. 2005, Gillanders 2005, Becker et al. 2007, Ruttenberg et al. 2008, Kingsford et al. 2009). Además de esto, los otolitos y las conchas de los mejillones han sido utilizados por los investigadores para definir posibles lugares de origen de las larvas (otolitos: Swearer et al. 1999; conchas de mejillón: Becker et al. 2007). Para ello, los investigadores realizan varias muestras de los animales de los arrecifes, de los bosques de manglar o de los estuarios específicos, para posteriormente analizar los otolitos o las conchas de estos animales. Al realizar las muestras de los organismos de numerosos arrecifes y otros hábitats costeros, los científicos pueden crear un "mapa químico" de estos ecosistemas. Si hay suficientes diferencias químicas entre los arrecifes y otros hábitats, entonces puede ser posible identificar en qué áreas los animales tienen un origen desconocido (por ejemplo, en el caso de las larvas dispersas recientemente). La química de los otolitos o de las conchas de algunos de animales con lugares de origen desconocidos se compara con las de los animales procedentes de lugares conocidos en el "mapa químico"; de tal forma, que los animales con un origen desconocido se asignan a los sitios más probables. Si la química de los otolitos o las conchas de las larvas dispersas coincide con la química de los individuos de un lugar conocido, y sólo con dicha ubicación, es posible decir con un nivel de certeza que la larva se generó en ese hábitat.

#### 4.1.3.3 Etiquetado de los otolitos con distintos marcadores químicos

Los investigadores han desarrollado técnicas para rastrear los otolitos y otras partes duras con marcas químicas. Estas etiquetas artificiales son poderosas porque son únicas y no se producen de forma natural, además que pueden utilizarse para identificar el movimiento de los individuos entre



**Figura 28.** Los investigadores han desarrollado técnicas para marcar los otolitos y otras partes duras de los organismos objetivo, con marcas químicas para seguir el movimiento de los individuos entre y dentro de los hábitats costeros. Los estudios han utilizado los antibióticos de tetraciclina y los isótopos de bario para etiquetar las larvas antes de la dispersión en sus hábitats natales. Foto: Evan D'Alessandro y Su Sponaugle, RSMAS, Universidad de Miami

y dentro de los hábitats costeros. Cuando un ejemplar marcado es recapturado, no hay duda de su origen. Este método ha sido utilizado por diversos investigadores para realizar el seguimiento de la dispersión de los peces (Jones et al. 1999, Almany et al. 2007). El principio es simple: el investigador introduce una etiqueta a los adultos o jóvenes de un organismo estudiado, y la etiqueta se incorpora en los otolitos u otras partes duras. Los estudios han utilizado antibióticos como tetraciclina e isótopos de bario para etiquetar las larvas antes de su dispersión fuera de su hábitat natal (Jones et al. 1999). Después de un determinado período de tiempo, el investigador recoge los animales jóvenes que se han dispersado, para posteriormente comprobar la presencia de etiquetas. Cuando se detecta una etiqueta, el investigador puede determinar el origen del animal y hasta dónde viajó y cuándo.

### Tablero de mensajes

- Los administradores ambientales, particularmente, los responsables de la gestión de las AMPs, por lo general hacen preguntas que están relacionadas con la conectividad ecológica.
- Si las poblaciones están aisladas (es decir, si no se presenta ningún intercambio de individuos o genes) por un largo periodo de tiempo, estos organismos evolucionan de forma independiente por medio del proceso de selección natural y de la deriva genética (con cambios aleatorios en las frecuencias genéticas), terminando como poblaciones genéticamente diferenciadas.
- Si las poblaciones regularmente intercambian individuos migrantes (y genes), el flujo de genes entre las poblaciones favorecerá a las que sean genéticamente similares.
- Se han desarrollado técnicas estadísticas y moleculares sensibles para realizar estimaciones directas de la conectividad ecológica en las poblaciones marinas. Estas estimaciones se basan en la asignación de individuos (por lo general, la descendencia de las poblaciones) a las poblaciones de origen (con métodos de asignación) o de padres específicos (con un análisis de parentesco).
- En los métodos de asignación individual, un individuo es asignado a una de las muchas poblaciones posibles con base en la frecuencia esperada de su genotipo en múltiples locus genéticos.
- Los análisis de paternidad permiten la determinación del origen natal de un individuo si la ubicación de los padres es conocida en el momento de la concepción.
- Los otolitos y las conchas de los mejillones han sido utilizadas por los investigadores para definir posibles lugares de origen de las larvas. Un "mapa químico" de los ecosistemas costeros se construye a partir de los otolitos y de la química de las conchas de los animales procedentes de lugares conocidos, así como de las larvas de lugares desconocidos que se adecuan a este "mapa químico".
- Los investigadores han desarrollado técnicas para rastrear los otolitos y otras partes duras con marcas químicas. Un investigador puede usar este tipo de etiquetas para seguir el movimiento de los organismos entre y dentro de los hábitats costeros.

## 4.2 Biología larvaria, comportamiento y capacidades sensoriales

El estudio de la biología de las larvas se encuentra todavía en su infancia, en comparación con el estudio de los organismos adultos de los arrecifes. La falta de progreso en el estudio de las larvas se explica por diversos factores que incluyen su pequeño tamaño, la dificultad para capturarlas vivas y el hecho de que las larvas de muchas especies tiendan a comenzar su asentamiento y se convierten en organismos jóvenes, inmediatamente después de ser capturadas y colocadas en un cubo. A pesar de ello, algunos avances se están realizando en este campo del conocimiento, sobre todo para los peces de los arrecifes.

### 4.2.1 Duración de la vida de las larvas

Para la mayoría de los taxones, la duración de vida de las larvas sólo se puede determinar mediante el uso de experimentos en las crías. Por ejemplo, como se indica (en la Sección 2.2.2), la duración de vida de las larvas de la langosta común del Caribe, recientemente se determinó en 6 meses. A pesar de ello, dado que muchos taxones son capaces de prolongar su vida de larvas, una vez que alcanzan una etapa en la que pueden asentarse y convertirse en organismos jóvenes; estos experimentos a menudo sólo proporcionan estimaciones de la duración mínima de las larvas. Uno de los mayores retos es que rara vez es posible criar larvas en condiciones que imiten lo suficiente el océano abierto como para evitar su asentamiento, en cuanto el organismo es competente.

Para los peces de los arrecifes, la duración de las larvas puede evaluarse sin la necesidad de analizar las crías. Esto se debe a que los otolitos de los peces proporcionan un registro de edad, además que la mayoría de las especies tienen una marca reconocible que identifica el momento del asentamiento individual, así como la metamorfosis de la etapa juvenil. De hecho, en la actualidad existe una abundancia de datos en diversos informes sobre la duración del estadio larval de varios peces de los arrecifes, los cuales se basan en el análisis de la microestructura de los otolitos. La duración puede variar desde un mínimo de 7 a 10 días en el *Amphiprion* y en algunos *Apogonidae*, y hasta 100 días en diversos peces tropicales (*Acanthuridae*) y en otros grupos taxonómicos. En todas las especies que se han estudiado, hay una cierta flexibilidad en el tiempo de asentamiento, así como algunos estudios interesantes que muestran los efectos de la edad, el tamaño o las condiciones durante la vida larval, en la supervivencia posterior al asentamiento y el crecimiento.

### 4.2.2 Respuesta a las señales del hábitat

Además de los estudios del olfato y el oído mencionados previamente (en la Sección 2.2.3), ha habido un considerable número de estudios experimentales que muestran que los arrecifes de muchas especies son capaces de tomar decisiones precisas al momento de elegir los microhábitats específicos para su asentamiento. El más simple de estos experimentos utiliza muestras de los diferentes tipos de hábitats (por ejemplo, el coral vivo, el coral muerto o la arena), para después registrar cuál de estos



Figura 29. Ejemplos de colectores experimentales utilizados en los estudios de conectividad de la langosta espinosa para capturar a las postlarvas cuando regresan a sus hábitats de origen. La foto de arriba es un colector de tipo Witham utilizado para capturar a la langosta común del Caribe. La foto de abajo muestra un aparato experimental diseñado para atraer a las postlarvas de la langosta común del Caribe, a las cuales posteriormente se les proporciona un lugar para establecerse en las estructuras de las grietas, conforme dichas larvas van creciendo. Foto: Mark Butler (arriba); Desconocido (abajo)



hábitats es seleccionado por los organismos al momento de asentarse. En algunos de estos estudios también ha sido posible identificar las señales específicas utilizadas por las larvas para responder. De manera que, ahora sabemos: (1) que las larvas de las ostras se sienten atraídas por productos químicos específicos provenientes de las conchas de las ostras, (2) que un número de especies de coral se establecen preferentemente cerca de varias especies de algas coralinas incrustantes, (3) que algunas larvas pueden ser particularmente atraídas por las especies *Titanoderma prototypum*, presumiblemente en respuesta a determinadas señales químicas, y (4) que algunos peces de los arrecifes responden al olor de sus congéneres o de sus hábitats de origen. En la mayoría de los casos, las señales que utilizan las larvas para tomar la decisión de asentarse o para dar respuesta

al momento de establecerse funcionan para distancias cortas. (El uso del olor por los peces cardenale para el reconocimiento del arrecife de origen natal, es la única respuesta química que podría guiar a las larvas de esta especie cuando todavía están a cierta distancia de otro tipo de señales de los hábitats de origen.)

Es indudable que los organismos marinos utilizan más de una señal durante las etapas de su vida de larvas y que emplean señales específicas en las diversas etapas para su regreso a su hábitat juvenil y de adultos. También, que las señales a veces pueden ser muy específicas y cuando dichas señales están ausentes, el establecimiento de los organismos podría no llevarse a cabo. Por ejemplo, las larvas de los peces payaso, *Amphiprion percula*, muestran una gran preferencia por el olor de las hojas de árboles específicos y por ciertas anémonas cerca de las costas insulares, que los ayudan a identificar el hábitat más adecuado para su asentamiento. En el resto de las investigaciones realizadas, se registra un elevado número de señales, algunas precisas y otras más generales, que son usadas por los organismos de las larvas en las distintas fases de su viaje de regreso a su hábitat natal, así como en ambientes específicos.

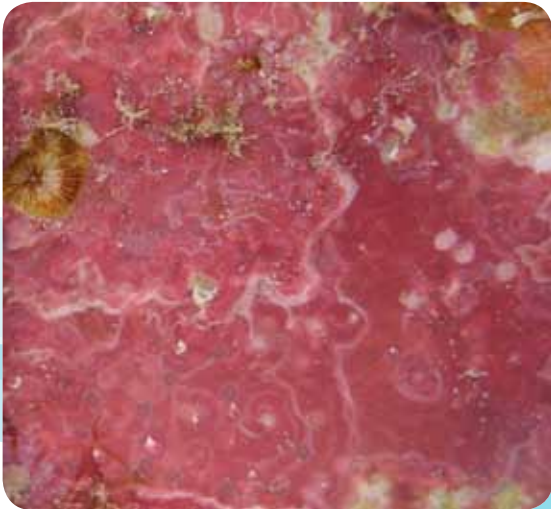


Figura 30. Cualquier especie de arrecife es capaz de tomar decisiones precisas al momento de decidir el microhábitat en donde se va a asentar. Algunas especies de corales prefieren establecerse cerca de algunas especies de algas incrustantes coralinas, además también pueden ser particularmente atraídos por la *Titanoderma prototypum*, probablemente en respuesta a señales químicas específicas. Foto: Robert Steneck

### 4.2.3 Las habilidades de nado

Recientemente, ha habido un considerable interés en las habilidades de nado de las larvas de los peces de los arrecifes. En parte, debido a que estas habilidades son muy diferentes cuando se comparan con las larvas de las especies de peces de climas templados. El estudio de las habilidades de nado de las larvas había sido el foco primario de las investigaciones fisiológicas y de comportamiento que se habían realizado previamente para distintas especies de peces. Las larvas de los arrecifes de los peces son fuertes nadadoras que exhiben generalmente tanto velocidad como resistencia. De hecho, muchas de estas especies pueden nadar más o menos indefinidamente, a velocidades de 13 cm por segundo, o longitudes de 6 a 10 cuerpos por segundo – comparable con un nadador olímpico que nada en estilo libre 100 m en un tiempo de entre 7 y 11 segundos; en lugar de 46.91 segundos, que corresponden al récord actual mundial. Asimismo ningún ser humano podría nadar en forma indefinida, incluso a un ritmo de 46 segundos. La larva langosta común del Caribe es también una fuerte nadadora. Esta larva puede nadar por un periodo de 2 a 4 semanas a una velocidad de 15 cm por segundo. Es claro que algunas especies de arrecifes, o tal vez muchas, tienen larvas que por lo menos al final de este estadio de su vida son capaces de nadar con tanta rapidez que puedan superar las corrientes predominantes y trasladarse largas distancias de viaje.

### 4.3 Determinando los patrones de migración posteriores a la vida de larva

El uso del hábitat para el asentamiento de las larvas todavía ha sido poco estudiado y entendido en el caso de muchas especies de invertebrados y peces. Las áreas en donde se localizan los organismos recién asentados y aquellos que se encuentran en un estadio juvenil, a menudo son conocidas como hábitats de crianza. Sin embargo, la definición correcta de un hábitat de crianza debe ser el hábitat en el que las etapas tempranas de vida de una especie en particular se llevan a cabo, y en las que dichas especies registran tanto una mayor supervivencia como desarrollo. Un buen hábitat de crianza debe satisfacer las necesidades biofísicas (por ejemplo, la comida abundante y la buena calidad del agua), las cuales promueven tasas eficientes de crecimiento.

Los criterios para evaluar los valores relativos de los hábitats en las etapas tempranas de la vida de los organismos podrían ayudar a identificar con mayor precisión aquellos hábitats que potencialmente pueden ser utilizados para la crianza. Los métodos de evaluación del movimiento de los organismos entre los hábitats se han basado tradicionalmente en el etiquetado físico de los individuos y en la recolección repetida de dichos individuos a través del tiempo. A pesar de que existe una amplia gama de etiquetas, sorprendente hay una ausencia de información que aborde cómo realizar un etiquetado significativo de manera económica y ecológica para la mayoría de los peces marinos costeros e invertebrados. Por ejemplo, los estudios detallados de los comportamientos frecuentes de los organismos como las migraciones de alimentación diaria, no son comunes. A pesar de ello, nuevos avances en la tecnología para el etiquetado se han desarrollado considerando el uso de transmisores digitales para el monitoreo de los organismos objetivo. Estos avances han permitido la creación de mapas de movimientos precisos, sobre todo si los hábitats fueron mapeados con anterioridad y en la actualidad también se encuentran disponibles en formatos digitalizados compatibles con los Sistemas de Información Geográfica (SIGs).

A pesar de su considerable potencial, el mapeo de los patrones migratorios pre y post desove de las agregaciones de peces es también un área de investigación que se encuentra poco estudiada.

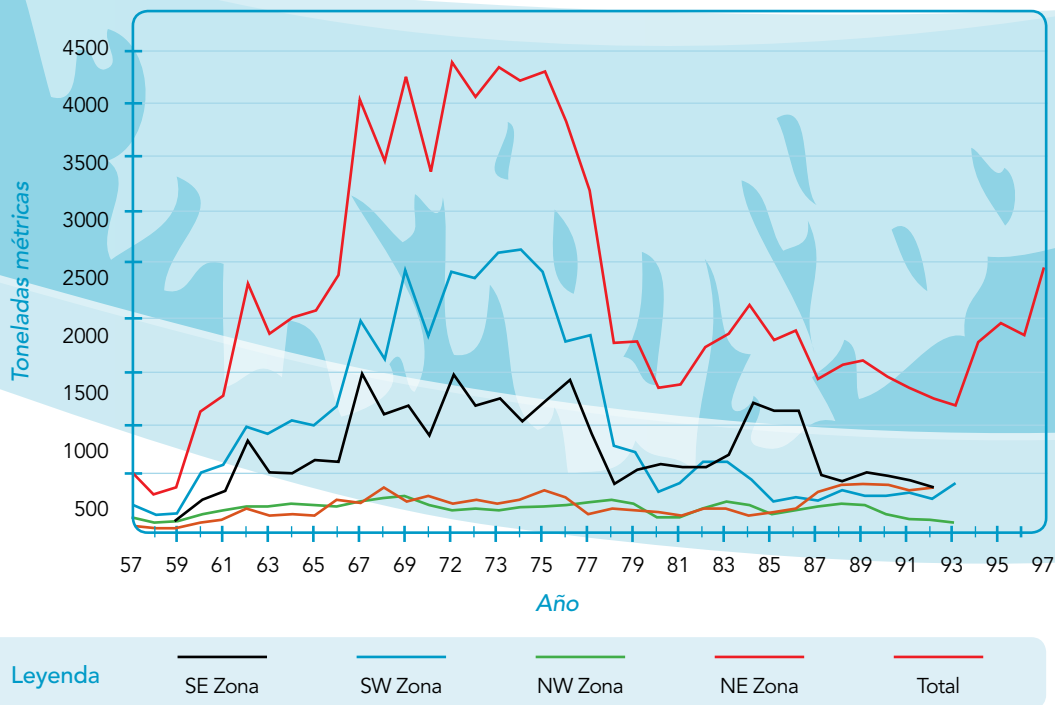


Figura 31. A veces aprendemos sobre las rutas de migración de desove y sobre los sitios de desove de agregación de la industria pesquera. El gráfico anterior muestra una marcada reducción en los desembarques de peces pargo rayado *Lutjanus synagris* en Cuba desde varios lugares en 1978. Esta reducción en los desembarques se debió a la utilización intensiva de las redes en las trayectorias empleadas para las migraciones de desove en los años previos. Crédito: Paris et al. 2005.

Sabemos que algunas agregaciones de peces pueden estar altamente concentradas durante la migración anual a través de canales y ensenadas, simplemente porque la industria pesquera nos lo dice. De hecho, los desembarques pico de peces se han logrado mediante el uso de etiquetado en los organismos marinos durante la “carrera” previa al desove. La Figura 31 muestra cómo una plataforma cruzada de migraciones de desove de los peces pargo rayado (*Lutjanus synagris*) en Cuba se vieron severamente afectadas a comienzos de mediados de la década de los setenta, cuando los pescadores empezaron a utilizar las redes de canales para capturar a los peces que migraban para desovar.

## 4.4 El conocimiento actual sobre la conectividad

### 4.4.1 El contexto histórico y los avances recientes

La falta de información sobre qué tan lejos se dispersan las larvas marinas ha sido históricamente un impedimento para la gestión de las poblaciones marinas y el diseño de las redes de AMPs (Sale et al. 2005). Sin embargo, la ciencia de la conectividad larval está avanzando rápidamente y los grandes vacíos en nuestro conocimiento poco a poco se van cubriendo (Jones et al. 2009). Con la aplicación de muchos nuevos enfoques (ver la Sección 4.1), nuestra comprensión de la extensión de la conectividad de las larvas ha cambiado dramáticamente en los últimos 10 a 15 años. A su vez, estos avances están incrementando nuestra comprensión sobre cómo las actuales redes de AMPs operan y cómo pueden ser mejor diseñadas en el futuro.

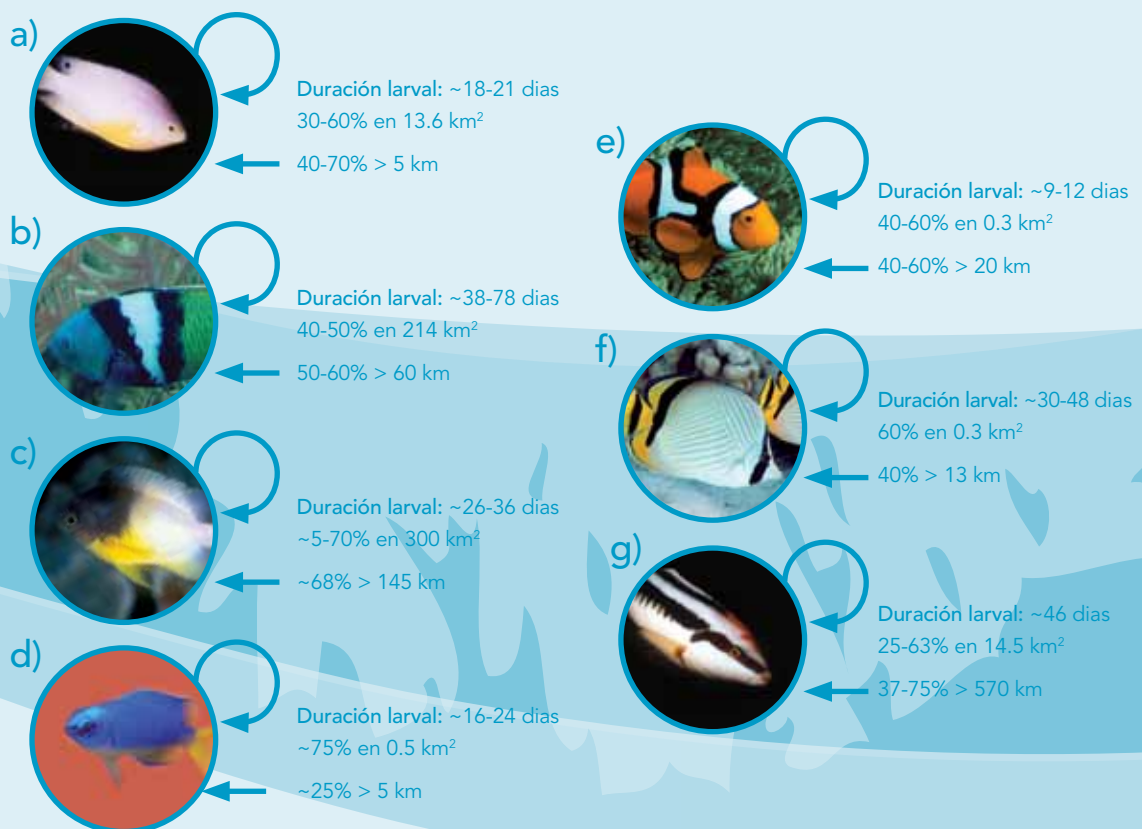
En general, antes de finales de los noventa, se suponía que debido a su pequeño tamaño las larvas marinas eran transportadas pasivamente entre las poblaciones espacialmente discretas por las corrientes de agua prevaletentes. Las poblaciones individuales se consideraban “abiertas”, donde la mayoría de los organismos jóvenes se agregaban al resto de la población por medio de un transporte pasivo de larvas provenientes de otros lugares. Los primeros modelos hidrodinámicos basados en partículas pasivas predijeron que las distancias de dispersión eran de más de 100 kilómetros de longitud (como Roberts 1997). Pero a finales del milenio, la información que comenzó a surgir con respecto a este tema, era que no todas las larvas marinas son transportadas distancias tan largas. Algunos atributos biológicos de las larvas y la información sobre su comportamiento comenzaron a ser incorporados en los modelos de dispersión. Con modelos más realistas y con escalas de análisis más finas, se predijeron niveles mucho más altos de retención local de las larvas cerca de sus fuentes de origen, aunque la dispersión sobre largas distancias de algunas especies de larvas también era esperada (Cowen et al. 2000, 2006). La información sobre los nuevos métodos para estimar la dispersión larval, incluyendo la microquímica de los otolitos, el etiquetado de las larvas, las pruebas genéticas de asignación y el análisis de parentesco, indicaban la presencia de importantes niveles ecológicos de auto-reclutamiento en escalas mucho más pequeñas que las utilizadas previamente (véase la revisión de Jones et al. 2009).

La visión que surge es una de una curva de dispersión con una porción sustancial del reclutamiento que ocurren cerca de las fuentes de origen y una cola larga que incluye un número importante de larvas que se dispersaron sobre largas distancias. La escala exacta de una dispersión significativa de la dinámica demográfica y de la gestión de los recursos sigue siendo un problema, ya que una curva de dispersión completa aún no ha sido desarrollada para ningún especie (Botsford et al. 2009). Sin embargo, se cree que tanto la retención de las larvas como la conectividad son susceptibles de desempeñar un papel importante en la dinámica de la población local. En los arrecifes de coral por ejemplo, los estudios de los peces y del coral proporcionan evidencia tanto de los patrones de escala muy local del auto-reclutamiento (a escalas de menos de 1 km), así como de la conectividad ecológica significativa entre los arrecifes a escalas de 10 kilómetros o más (en algunos casos de hasta 100 kilómetros) (Jones et al. 2009).

El porcentaje de auto-reclutamiento (la proporción de reclutamiento para una población local que se deriva de los adultos de dicha población) proporciona un índice útil para determinar el grado en que una población marina de la región se puede considerar como “abierta” o “cerrada” (Jones et al. 2009). Para un rango de especies de peces asociados con islas tropicales, cada vez hay más evidencia del auto-reclutamiento significativo en un rango de entre 30 a 70% (véase el Cuadro 9). Es

importante destacar, que mientras que las cifras en porcentaje de auto-reclutamiento en un rango de 30 a 70% son comunes en diversas especies, no hay pruebas que documenten un reclutamiento de 0 o de 100% (Jones et al. 2009). Las estimaciones de la distancia entre la isla objetivo y la isla más cercana representa la estimación mínima de qué tan lejos han viajado las larvas migrantes para asentarse (véase el Cuadro 9). Estas distancias de dispersión van desde aproximadamente 5 km en el caso de la *Pomacentrus coelestis* en la Isla Lizard, hasta casi 570 km para la *Coris picta* en la Isla de Lord Howe. Estos extremos sugieren que la conectividad ecológica significativa puede ocurrir a través de grandes distancias y puede aumentar a medida que la distancia geográfica entre los hábitats considerados como adecuados se vaya incrementando.

## Cuadro 9. Estimación del auto-reclutamiento y conectividad de un rango de especies de peces asociados con las islas tropicales



a) *Pomacentrus amboinensis*, Isla Lizard, Gran Barrera de Arrecifes. Jones et al. (1999), James et al. (2002). Métodos: marcado con tetraciclina, modelos biofísicos. b) *Thalassoma bifasciatum*, Santa Cruz, el Caribe. Swearer et al. (1999); Hamilton et al. (2008). Método: microquímica de los otolitos. c) *Stegastes partitus*, Barbados, el Caribe. Paris et al. (2002); Paris & Cowen (2004). Método: modelos biofísicos. Foto: John E. Randall d) *Pomacentrus coelestis*, Isla Lizard, Gran Barrera de Arrecifes. Patterson et al. (2005). Método: microquímica de los otolitos. e) *Amphiprion percula*, Isla Kimbe, PNG. Almany et al. (2007); Planes et al. (2009). Métodos: etiquetado con bario; análisis de paternidad. Foto: Brian Donahue f) *Chaetodon vagabundus*, Isla Kimbe, PNG. Almany et al. (2007). Método: marcado con bario. Foto: Paul Asman g) *Coris picta*, Isla de Lord Howe, Australia. Patterson & Swearer (2007). Método: microquímica de los otolitos. Crédito por la figura: Geoffrey P. Jones

Aunque todavía hay pocos datos, es evidente que muchas poblaciones parecen confiar tanto en el suministro local de los organismos jóvenes como en el reclutamiento de otras poblaciones. La capacidad de las poblaciones individuales de reponerse por sí mismas, ya sea por medio del auto-reclutamiento o de la inmigración, les confiere un alto nivel de resistencia, debido a que pueden ser capaces de persistir con reclutas tanto provenientes de sus ecosistemas natales, como aquellos que migraron de otros hábitats de origen (Almany et al. 2007).

#### 4.4.2 Los factores biológicos que afectan la distancia de la dispersión

La modelación de los datos de la distancia sugieren que una serie de factores biológicos pueden afectar a la distancia de dispersión real, incluidas la duración de la etapa pelágica de las crías, la supervivencia de las larvas, al igual que la velocidad de nado y su dirección (por ejemplo, Cowen et al. 2000, 2006). Sin embargo, muchas de estas generalizaciones permanecen sin ser resueltas por métodos independientes. Por ejemplo, la propagación en porcentajes del auto-reclutamiento muestran una poca relación con respecto a la duración media de las larvas pelágicas (véase el Cuadro 9). En un único estudio, realizado por Almany et al. (2007), encontraron el mismo alto nivel de auto-reclutamiento en una pequeña isla por dos peces de arrecife, el desove de los peces payaso bentónicos *Amphiprion percula* con una duración de entre 9 y 12 días de larvas pelágicas, y el desove de los peces mariposa *Chaetodon vagabundus* con entre 30 y 48 días de duración de larvas pelágicas.



Figura 32. Medición del reclutamiento de los corales con placas de asentamiento. Foto: Robert Steneck

Aunque se podría esperar un mayor auto-reclutamiento para las poblaciones de origen geográfico más amplio, este resultado no ha sido identificado con base en los datos actuales (véase el Cuadro 9). En cierta medida, la ausencia de este patrón refleja probablemente las diferencias entre las técnicas utilizadas y la escala espacial en la que las poblaciones discriminan el auto-reclutamiento. Mientras que el marcado de las larvas y el análisis de parentesco ofrecen un panorama con una escala más fina para sitios menores de 15 km<sup>2</sup> (Jones et al. 1999, 2005, Almany et al. 2007), la microquímica de los otolitos y el modelamiento de la biofísica son probablemente más adecuados para discriminar la retención de las larvas, y la conectividad entre los organismos más grandes y más distantes (Swearer et al. 2002, Patterson et al. 2005, Patterson y Swearer et al. 2007, Hamilton



et al. 2008). La validación cruzada de estas técnicas se requiere, previo a que las cifras absolutas en porcentaje del auto-reclutamiento puedan ser consideradas como confiables.

Se puede esperar que los arrecifes aislados exhiban mayores niveles de auto-reclutamiento que los arrecifes de los archipiélagos, dado que la baja probabilidad de encontrar un hábitat adecuado le asigna una prima al poder asentarse cerca del hábitat de origen. Sin embargo, algunas estimaciones registradas del porcentaje de auto-reclutamiento parecen no estar relacionadas con la distancia más cercana al hábitat natural. Por ejemplo, la *Pomacentrus coelestis* exhibió un 75% de auto-reclutamiento en la isla Lizard en la Gran Barrera de Coral, la cual tiene muchos otros arrecifes en sus proximidades (Patterson et al. 2005); mientras que la *Coris picta* en la Isla de Lord Howe registra un auto-reclutamiento de entre 25 y 63% (Patterson y Swearer 2007).

#### 4.4.3 Implicaciones para el diseño y el funcionamiento de las AMPs

Algunas cuestiones clave para el diseño y el funcionamiento de las AMPs incluyen si las AMPs individuales son parcialmente autosuficientes, en qué medida están conectadas a las poblaciones pesqueras y cómo están conectadas con otras AMPs a través de una red. A pesar de ello, para las redes de AMPs los detalles de estos factores siguen siendo relativamente desconocidos. Prueba de ello, es que en la actualidad las AMPs activas podrían ser auto-sostenibles como resultado del uso de nuevos métodos en el marcado de las larvas (Jones et al. 1999, 2005, Thorrold et al. 2006, Almany et al. 2007, Williamson et al. 2009) y de la aplicación del análisis de parentesco genético (Jones et al. 2005, Planes et al. 2009, Saenz-Agudelo et al. 2009). Estas técnicas han alterado las percepciones pasadas sobre qué tan cerca a sus lugares de origen las larvas de peces pelágicos se pueden asentar. Por ejemplo, Jones et al. (1999) utiliza tetraciclina para etiquetar las larvas, con el fin de demostrar que entre 30 y 60% del reclutamiento del pez doncella ambon (*Pomacentrus amboinensis*) (véase el Cuadro 9) en la Isla Lizard (en la Gran Barrera de Coral [GBC]) procedía de los adultos residentes. Esta isla es hoy un núcleo de reservas no pesqueras en el norte de la laguna de la GBC. El modelado de estudios no sólo confirmaron este nivel de auto-reclutamiento, también demostró que la Isla Lizard está fuertemente vinculada a las islas adyacentes (James et al. 2002) y puede ser una importante fuente de larvas al sur de la GBC (Bode et al. 2006). Por lo tanto, no sólo es esta reserva al norte auto-sostenible, también puede ser una fuente importante de larvas para muchos otros arrecifes localizados aguas abajo.

La evidencia demuestra, que incluso las AMPs relativamente pequeñas pueden ser auto-sostenibles. Un estudio de campo reciente mostró que una alta proporción de organismos jóvenes (~60%) de dos especies de peces reclutados en una pequeña isla aislada que constituye una AMP, fueron descendientes de los adultos residentes (Almany et al. 2007). En otro estudio, el análisis de parentesco genético utiliza muestras de ADN de los organismos jóvenes y los futuros padres como hipervariables nucleares para medir correctamente las distancias exactas de la dispersión individual de las larvas (Jones et al. 2005, Planes et al. 2009, Saenz-Agudelo et al. 2009). El análisis de paternidad no sólo ha confirmado que un gran número de peces reclutados dentro de las AMPs se generan a nivel local, sino también que las larvas pueden dispersarse distancias superiores a 30 km, desde una a otra AMP (Planes et al. 2009).

Una vez que lleguemos a un punto donde la dispersión de los núcleos esté bien definido, el tamaño y el espaciamiento de las reservas individuales se puede ajustar de acuerdo con objetivos específicos. En general, se espera que las mayores distancias de dispersión será un argumento para la creación de reservas más grande (por medio de una auto-reposición significativa) y más espaciadas (mientras se mantiene una conectividad significativa) (Jones et al. 2007, Almany et al. 2009). En cualquier caso, las poblaciones que son principalmente autosuficientes (por ejemplo, las islas aisladas) y/o importantes fuentes de larvas (como lugares aguas arriba) será una alta prioridad en la selección de las AMPs.

## Cuadro 10. Métodos para la medición de la dispersión de las larvas en los corales

Con el fin de ser proactivos en la restauración de los arrecifes de coral, los administradores de estos ecosistemas necesitan saber que las larvas de coral podrían trasladarse a ciertos arrecifes, de manera que los arrecifes degradados pueden ser resembrados. Sin embargo, ha sido difícil determinar los patrones de transporte y conectividad actual del coral sin el uso de extrapolaciones de la genética de las poblaciones y de los modelos hidrográficos. Las dificultades en la medición de la conectividad del coral surgen debido a que las larvas de coral son:

- Muy pequeñas (<1 mm de longitud);
- Es difícil capturarlas desde el plancton sin dañarlas; y
- Es difícil identificar a que especie individual pertenecen.

Adicionalmente, los reclutas recién asentados en los arrecifes de coral son también casi invisibles, por lo que es difícil examinarlos y monitorear su desarrollo.

**Innovadoras técnicas están siendo desarrolladas para medir directamente el transporte de las larvas de coral:**

### 1) Ensayos de Enzimas Ligadas Inmuno-absorbentes (EELIA):

se utilizan para detectar y determinar de manera positiva la presencia de larvas en el plancton conforme se van dispersando. También estos ensayos pueden ser utilizados para evaluar la riqueza de un grupo de larvas en una zona determinada durante el periodo de tiempo cercano al desove. Actualmente, esta herramienta está siendo mejorada para hacerla más cuantitativa. Los resultados podrían facilitar la evaluación de la oferta de larvas provenientes de los arrecifes saludables, así como la determinación del suministro de larvas que se requiere para que éstas puedan ser reclutadas en un arrecife objetivo específico. Este método es fácil de aprender, además de ser relativamente barato.

**2) Las partículas magnéticas:** se pueden utilizar para realizar un seguimiento de las cohortes de la dispersión larval. Se construyen pequeñas partículas magnéticas que sean de tamaño y densidad similar al de un blanco biológico (es decir, mini partículas a la deriva). Las partículas son posteriormente enviadas a diversas distancias a partir de una ubicación específica de una masa de desove. Las muestras colectadas en distintos momentos después del desove proporcionan un registro del número de las partículas que se acumulan pasivamente a diferentes distancias del punto de origen y hasta 100 kms de distancia. Esta técnica es útil para cualquier estudio detallado de la dispersión de pequeñas partículas en una columna de agua y puede mostrar los patrones de dispersión actual imitados por las larvas de coral. Asimismo, estos datos pueden ser utilizados para validar los modelos de dispersión.

**Para utilizar estas técnicas en la mejora de la gestión de los ecosistemas marinos costeros se necesita la siguiente información:**

### 1) Características biológicas:

- El patrón de desarrollo de cada especie (el comportamiento pasivo versus el comportamiento activo);
- El tiempo para la competencia (días o semanas);
- La duración de la competencia (días o semanas).

## 2) Determinantes físicos:

- Patrones hidrográficos de las áreas de origen y de las áreas de recepción;
- El clima durante el periodo de larva;
- Distribución y distancia entre las áreas de origen y las áreas de recepción;
- Determinar cómo se dispersan las larvas tanto en el tiempo como en el espacio.

### 4.4.4 Conclusiones y desafíos

La proliferación de los estudios de conectividad de las larvas en los últimos 10 a 15 años, en escalas que van desde los arrecifes individuales de varios cientos de kilómetros, ha revelado una serie de patrones interesantes. Los niveles de conectividad entre las poblaciones de los arrecifes claramente se encuentran entre los niveles de alto auto-reclutamiento en un área pequeña para una dispersión significativa en las escalas de 10 kms, y a veces en distancias que llegan a abarcar hasta 100 kilómetros. Además, la variación en la distancia de dispersión dentro de las especies de peces es probable que sea grande y las diferencias no parecen estar estrechamente vinculadas a la duración de la fase larval pelágica. Por lo tanto, el aislamiento geográfico y el espaciado de los arrecifes tienen una mayor influencia sobre la dispersión de las características de cada especie.

Las posibles variaciones en longitud de la distancia de dispersión deben contribuir a la resistencia de las poblaciones locales. Dichas variaciones permiten una gran flexibilidad en el diseño de las redes de AMPs cuando se trata de lograr un aprovechamiento más sostenible, así como la conservación de la biodiversidad. Si la configuración geográfica tiene una mayor influencia que las características de las especies sobre los niveles de conectividad, la optimización en el diseño de las AMPs para la mayoría de las especies podría no ser un problema insuperable. El diseño óptimo de estas áreas se abordará de mejor manera mediante el uso de modelos biofísicos aplicados en entornos geográficos particulares, que estén desagregados en escalas muy finas. Estos modelos requieren ser complementados con una verificación independiente de la dispersión y la conectividad para las especies representativas, utilizando técnicas de identificación individual (que incluyen el etiquetado de las larvas o el análisis de parentesco, entre otras).

A pesar del esfuerzo de investigación que ya ha tenido lugar, todavía existen grandes lagunas en nuestros conocimientos sobre el grado de conectividad de las larvas. De hecho, todavía no se cuenta con una descripción completa del núcleo de dispersión para ninguna de las especies que habitan en los arrecifes de coral. Demográficamente, los niveles de conectividad significativos entre las larvas pueden ser modificados por la disponibilidad de los hábitats para el reclutamiento (Jones et al. 2007), así como por un conjunto de procesos posteriores a la fase de reclutamiento (Hamilton et al. 2008, Steneck et al. 2009). Como la degradación de los arrecifes de coral ha aumentado tanto en magnitud como en escala, cualquier resiliencia proporcionada por una amplia dispersión de los núcleos y de las redes de AMPs se erosionará rápidamente. Hasta que la conectividad demográfica esté totalmente cuantificada, nuestra comprensión del impacto humano sobre los organismos de los arrecifes y las herramientas necesarias para gestionar eficazmente estos ecosistemas, seguirá siendo muy limitado.

## Tablero de mensajes

- Algunas cuestiones clave para el diseño y el funcionamiento de las AMPs incluyen si las AMPs individuales son parcialmente autosuficientes, en qué medida están conectadas a las poblaciones pesqueras y cómo están conectadas con otras AMPs a través de una red.
- La falta de información actual sobre cómo se dispersan las larvas marinas ha sido históricamente un impedimento para la gestión de las poblaciones marinas, así como para el diseño de las redes de AMPs.
- La comprensión sobre la extensión de la conectividad de las larvas ha cambiado dramáticamente en los últimos 10 a 15 años, como resultado de la aplicación de nuevos enfoques. Sin embargo, la escala exacta de una dispersión significativa en la dinámica demográfica y en la gestión de los recursos marinos sigue siendo un problema, dado que no se ha definido para ninguna especie una curva de dispersión completa.
- Los estudios revelan que los arrecifes de muchas especies son capaces de tomar decisiones precisas al momento de elegir en qué micro-hábitat se asentarán durante las etapas larvales, además de identificar qué señales específicas utilizan en las diferentes etapas de su vida las diversas especies al momento de su regreso a sus hábitats de jóvenes y adultos.
- El mapeo de los patrones migratorios pre y post desove de los grupos de peces agregados es también un área de investigación poco desarrollada.
- El porcentaje del auto-reclutamiento proporciona un índice útil para determinar el grado en que una población marina de una región determinada se pueden considerar "abierta" o "cerrada".
- Los estudios sobre los corales y los peces han permitido conocer más sobre los patrones de auto-reclutamiento en escalas extremadamente locales (es decir, en escalas de menos de 1 km), así como en escalas ecológicamente significativas, dado que rescatan la conectividad de los arrecifes al abordar escalas de 10 kilómetros (y en algunos casos hasta 100 kilómetros).
- Los nuevos métodos de etiquetado de las larvas, así como la aplicación del análisis de parentesco genético ha proporcionado evidencia para afirmar que las AMPs pueden ser auto-sostenibles.

# Sección 5

## La integración de la conectividad con la gestión actual

En esta sección podrán encontrar:

*Las limitaciones en los datos actuales disponibles sobre la conectividad de las especies marinas*

---

*Las especies difieren en las escalas espaciales en las que están conectadas y los patrones de conectividad son también transitorios en el tiempo*

---

*La gestión de las especies marinas costeras es en última instancia, una gestión de las personas*

---

*Reglas de oro para incorporar la información de conectividad en la gestión*

---



## 5. La integración de la conectividad con la gestión actual

### 5.1 Las limitaciones en los datos actuales disponibles sobre la conectividad de las especies marinas

A pesar del considerable esfuerzo de muchos científicos en los últimos dos decenios, hoy en día existen sólo datos limitados sobre la conectividad de las especies marinas. Las especies de los arrecifes de coral pueden ser más conocidas en comparación con otras, aunque la mayor cantidad de información disponible sobre dichas especies se ha derivado de los estudios realizados sobre los arrecifes de coral. A pesar del desarrollo de una serie de técnicas innovadoras, la naturaleza de la interrogante asegura que todas las técnicas, con la excepción de los modelos biofísicos, requieren de un trabajo de campo relativamente intensivo en varios sitios durante períodos prolongados de tiempo. Por ejemplo, cualquier estudio que usa la filiación genética, el enfoque de asignación o la técnica de etiquetado de los otolitos para determinar la conectividad en una especie de peces, requerirá de un amplio muestreo de los organismos jóvenes de nuevo reclutamiento (o de larvas que pronto se asentarán) en una escala espacial de al menos 100 km. Esto es necesario para garantizar que un número adecuado de individuos sean colectados en un área de distribución geográfica apropiada, de manera que se puedan identificar pautas claras de la dispersión que los caracteriza. Por otra parte, el esfuerzo de muestreo probablemente requerirá ser reciente, con el fin de capturar la cohorte correcta de los reclutas recién asentados (con base en los que lleven marcas químicas). Para realizar este trabajo se requerirá, ya sea de un gran equipo o de fondos considerables para apoyar los viajes de un pequeño equipo de trabajo en toda la región de estudio. Asimismo, sería difícil encontrar financiamiento para estos estudios de investigación por parte de agencias de financiamiento convencionales. Por otro lado, la colaboración entre los científicos y los administradores de los ecosistemas marinos podría resolver el problema relacionado con la amplia distribución del muestreo que se requiere realizar (si los administradores fueran distribuidos en todos los sitios de la región). Dicha colaboración permitiría asegurar que los datos recopilados sean proporcionados rápidamente a todos los administradores de los ecosistemas marinos costeros que los necesitan. Si alguna vez hubo un área de investigación que se pudiera beneficiar de la colaboración científica y de la asociación entre los gestores, sin duda es la estimación precisa de los patrones de conectividad para especies concretas en los ecosistemas marinos costeros.

*Si alguna vez hubo un área de investigación que se pudiera beneficiar de la colaboración de los científicos y de las asociaciones entre los administradores de los ecosistemas marinos costeros, sin duda es la estimación precisa de los patrones de conectividad para especies concretas en los ecosistemas marinos costeros.*

Sin embargo, aunque se están aumentando los escasos datos por las nuevas investigaciones que se están realizando, la gestión tiene que llevarse a cabo con la información que está disponible actualmente. Las "reglas de oro" sugeridas a lo largo de este guía ofrecen a los administradores conjeturas razonables sobre el método considerado como el más óptimo para tomar las decisiones de gestión que involucran la conectividad. Estas reglas deberían ser aplicadas, aunque también se reconoce claramente que estas reglas son las mejores estimaciones con las que se cuenta en la actualidad, más que estar fundamentadas en datos y resultados científicos rigurosos. Sin embargo, la buena noticia es que esta situación está por cambiar. Conforme nueva información se está recolectando, están emergiendo y se están identificando regularidades tanto entre las especies como entre las regiones. Esto puede hacer que las tareas de los administradores de los ecosistemas marinos costeros sean menos complejas de lo que podrían haber sido con anterioridad. Por ejemplo, el trabajo empírico y de modelación actual sugiere que la geografía física del hábitat disponible en

una región tiene un importante papel en la determinación de los patrones de conectividad entre los sitios. Por ende, mientras que las especies con una biología de larvas radicalmente diferente no responderán de la misma manera a una geografía particular, aquellas especies con una biología de larvas moderadamente similar se dispersa en patrones muy similares a través del paisaje marino. Esta aparente regularidad significa que probablemente no sea necesario investigar los patrones de conectividad de cada especie que sea de interés, además que podría ser posible diseñar sistemas de RNPs que se enfoquen a preservar una serie de especies objetivo de manera más óptima. Aunque existen técnicas sensibles y se cuenta con considerables datos acumulados para diversas especies de peces, el problema sigue siendo que se cuenta con muchas menos técnicas o datos disponibles de conectividad para el estudio de los corales, las langostas, otros invertebrados y las algas.

*Agitando los brazos mientras se habla sobre las aparentes regularidades o pautas generales, no es una forma adecuada para hacer frente a la escasez de datos sobre la conectividad. Cuanto antes los científicos y los administradores de los ecosistemas marinos costeros realicen un esfuerzo serio para responder a las diversas difíciles preguntas para mejorar la gestión de estas áreas, como lo es determinar el tamaño óptimo que debe tener una AMP, mejor será la ciencia y la gestión que se lleve a cabo de los arrecifes de coral.*

## Cuadro 11. El cambio climático y la conectividad

El cambio climático está causando cambios significativos en la temperatura superficial del mar, en la circulación oceánica, en la química del océano, en los patrones del clima (por ejemplo, ciclones, tormentas y precipitaciones) y en los niveles del mar. Estos cambios podrían afectar a muchos procesos ecológicos fundamentales como la conectividad de la población entre los ecosistemas de arrecifes. Al mismo tiempo, el grado de esta conectividad influirá en la capacidad de los organismos de los arrecifes de coral para adaptarse a estos cambios, ya que la alta conectividad permitirá el intercambio favorable de genotipos que son más resistentes a los efectos del cambio climático, al tiempo que facilita la recuperación de daños localizados que son causados por tormentas o por la decoloración.

Nuestra comprensión de los impactos potenciales del cambio climático en la conectividad de las poblaciones de arrecife es incompleta. Sin embargo, existe evidencia que sugiere el potencial de los siguientes efectos sobre las poblaciones de peces de los arrecifes (Munday et al. 2009):

- Las temperaturas elevadas del agua pueden dar lugar a cambios en el tiempo de reproducción, reducir la reproducción de resultados y acortar las etapas de la vida pelágica.
- Los cambios en las corrientes oceánicas pueden alterar la dinámica de la oferta de larvas y afectar la productividad del plancton. Esto puede tener impactos negativos en el número de larvas que sobreviven la fase pelágica, así como en su capacidad de asentamiento.
- Ciclones más intensos incrementarán la tasa de destrucción de los arrecifes, mientras que las temperaturas más cálidas aumentarán la frecuencia y severidad de la decoloración de los corales. Ambos factores provocarán la pérdida y fragmentación del hábitat de los peces de los arrecifes, a menos que la conformación de dichos arrecifes y sus procesos de reparación pueden mantener el ritmo.

- Los cambios en la química de los océanos (como la acidificación de los océanos) son capaces de disminuir la capacidad de las poblaciones de coral para recuperarse del blanqueamiento o de los daños causados por tormentas; eventos que aumentarán el riesgo de que se reduzcan los hábitats de los peces de los arrecifes.
- El aumento del nivel del mar puede alterar los patrones de dispersión de las larvas, debido a los cambios tanto en la circulación del agua como de las corrientes.

Estos impactos potenciales pueden variar de un lugar a otro, así como a lo largo del tiempo. Los cambios en las escalas espaciales y temporales de la conectividad tienen implicaciones para la gestión de los ecosistemas de los arrecifes de coral. Por ejemplo, aunque lejos de ser cierto, la evidencia sugiere que el cambio climático probablemente reducirá la distancia de dispersión de los organismos de los arrecifes, principalmente al acortar la duración de la etapa larval. Esto significa que el tamaño y el espaciamiento de las AMPs pueden requerir ser ajustados estratégicamente si las redes de reservas mantienen su eficacia en el futuro.

## 5.2 Las especies difieren en las escalas espaciales en las que están conectadas y los patrones de conectividad son también transitorios en el tiempo

A pesar de los limitados datos disponibles, sabemos que las especies con larvas que son diferentes substancialmente en su biología pueden responder de maneras muy diversas tanto a una geografía particular como al movimiento de los patrones del agua. Además, las especies con mayores rangos de adultos de origen responderán de manera muy diferente a las especies que son sedentarias o sésiles como adultos. Por estas razones, a pesar de que un régimen particular de gestión de las AMPs pueda ser “más o menos” óptimo para un número de especies, éste tal vez no sea óptimo para todas las especies marinas. Los directivos que buscan diseñar una red de AMPs, deben empezar por seleccionar las metas y objetivos que tendrán estas redes; dichas metas y objetivos serán frecuentemente específicos para cada especie, y en algunas ocasiones serán específicas por “grupo funcional”. Sin embargo, debe recordarse que aunque se desee ejecutar un régimen de ordenación que atienda las necesidades de todos los objetivos de la pesca, o incluso de todas las especies, esta aspiración ha sido siempre imposible. En este sentido, la gestión sólo puede mejorarse cuando las limitaciones de las acciones de gestión cuenten con un reconocimiento explícito.

*La gestión sólo puede mejorarse cuando las limitaciones de las acciones de gestión cuenten con un reconocimiento explícito.*

Un problema adicional, es que los actuales datos empíricos revelan que los patrones de conectividad son variables temporalmente como respuesta a la variabilidad temporal de la oceanografía. Esto complica la tarea de determinar los patrones de conectividad de forma experimental, dado que los resultados siempre estarán en función del tiempo. La modelación ofrece una manera de ir más allá de esta limitación, debido a que un modelo puede ser estimado con base en las características oceanográficas de diferentes periodos de tiempo, lo cual daría respuestas sobre el grado de variación temporal de dichas características. Las variaciones temporales probablemente asegurarán que rara vez se identifiquen lugares en donde las poblaciones sean exclusivamente clasificadas como poblaciones de origen o poblaciones receptoras, o los lugares en donde normalmente la mayoría de las poblaciones son alternativamente ya sea poblaciones de origen o poblaciones receptoras. Gran parte de la teoría que se está desarrollando sobre la gestión de las regiones que contienen poblaciones fuente (o de origen) y poblaciones receptoras puede comenzar a ser vista



como algo esotérico, en comparación con la situación que comúnmente se presenta en el mundo real. Finalmente, las variaciones temporales también significan que para la gestión de la pesca, probablemente las redes de AMPs se convertirán en instrumentos de coyuntura que podrían ser considerados relativamente como los instrumentos más certeros para la defensa de la preservación de los ecosistemas marinos costeros. Esto refuerza el argumento, de que la ordenación pesquera es una tarea difícil que requiere la aplicación de muchas herramientas en lugar de sola una.

El foco de la investigación de conectividad se ha centrado en la dispersión de las larvas por una serie de razones obvias. Sin embargo, este interés ha puesto de manifiesto lo poco que sabemos acerca del movimiento de los organismos jóvenes y adultos de



Figura 33. *Montastrea faveolata* Hay una serie de técnicas sensibles, así como un número considerable de datos acumulados para diversas especies de peces. Sin embargo, existen menos técnicas y aún menos datos disponibles para los corales, las langostas, otros invertebrados o para las algas. Foto: [http://coralpedia.bio.warwick.ac.uk/en/corals/montastreae\\_faveolata.html](http://coralpedia.bio.warwick.ac.uk/en/corals/montastreae_faveolata.html)

la mayoría de las especies de los arrecifes. Por consiguiente, es necesario que se lleven a cabo nuevas investigaciones en este tema, además de garantizar que el movimiento de los organismos jóvenes y adultos se tome en cuenta en la elaboración de los planes de gestión para que se asegure tanto la preservación de importantes corredores marinos costeros como la protección de hábitats críticos. El uso de las RNPs para la ordenación pesquera no se trata de simplemente establecer un RNP del tamaño y en el lugar adecuado a lo largo de una región. También requiere que los sitios protegidos estén posicionados de tal manera, que beneficien al máximo a las diversas especies objetivo por medio de la protección de los vínculos críticos entre los hábitats utilizados como criaderos y aquellos en donde se asientan los organismos adultos, de la protección de los hábitat de desove, así como de la atención de las necesidades de los organismos que se mueven más allá de las fronteras de los hábitats protegidos.

### 5.3 La gestión de las especies marinas costeras es en última instancia, una gestión de las personas

En última instancia, los administradores de los arrecifes son los gerentes de las personas, o más específicamente, los administradores de los efectos negativos que los humanos pueden tener sobre las especies y los hábitats afectados. Si bien la gestión de la pesca no es el único papel que realizan los administradores de los arrecifes de coral, ésta es una tarea importante y difícil porque en la mayoría de las regiones de arrecifes la pesca costera es intensamente explotada por un sistema mixto comercial y/o por las comunidades pesquera artesanales que utilizan una serie de técnicas para capturar un amplio conjunto de especies de diferente biología. La complejidad de la pesca hace que su gestión sea especialmente difícil y que la explotación excesiva, al igual que la necesidad de reducir el esfuerzo pesquero, sea un desafío extremo.

En los países en desarrollo, en donde la industria pesquera se caracteriza por la gran diversidad de especies objetivo y por la amplia gama de técnicas para llevar a cabo las actividades pesqueras, las estrategias de la gestión de la pesca de especies específicas, así como la limitación de las capturas de ciertas especies en un número recomendado usando periodos de veda y definiendo algunos límites para la pesca, serán también necesarias en muchos casos a pesar de que también se utilicen las RNPs. Algunos ejemplos incluyen, la pesca gancho-línea de meros y pargos o la pesca que tiene como objetivo la captura de invertebrados como erizos de mar y almejas gigantes.



Figura 34. La gestión de las especies marinas costeras es en última instancia, la gestión de las actividades humanas.  
Foto: Andy Hooten

*La gestión que se realiza de los sistemas de arrecifes de coral mejoraría enormemente si simplemente se comienzan a hacer cumplir las normas existentes en la mayoría de las jurisdicciones.*

Sin embargo, los enfoques de gestión basados en áreas y distribuciones espaciales explícitas son sin duda más comunes y convenientes para la gestión de múltiples especies pesqueras. La definición de las zonas de pesca en donde se utilicen determinadas técnicas pesqueras es una práctica común en los países en el sureste de Asia y África (McClanahan y Mangi 2004, Ablan y Garcés 2005). El establecimiento de las RNPs, las cuales se espera que funcionen como reservas de pesca, es una estrategia que parecería tener un gran éxito cuando estas áreas se encuentran bien administradas (Russ y Alcalá 1999). En tales circunstancias, la información sobre la conectividad se convierte en un insumo esencial para la toma de decisiones.

En última instancia, la gestión debe ser ejecutada de manera que realmente cambie las formas en que repercuten las actividades humanas en los ecosistemas costeros. Los límites de captura, los límites de tamaño y las temporadas de veda pueden reducir la explotación pesquera pero sólo si se aplican con el rigor necesario. Las RNPs y las redes de RNPs también pueden funcionar para ayudar a gestionar la pesca en los arrecifes; pero de nuevo, estos mecanismos de gestión serán eficaces sólo si las normas de estas reservas se aplican con rigor. A pesar de la necesidad de una ciencia nueva para delinear una mejor conectividad en los sistemas de arrecifes de coral, nuestra gestión de estos sistemas mejoraría enormemente si simplemente se comienzan a hacer cumplir los reglamentos que ya existen en la mayoría de las jurisdicciones. La conciencia de la conectividad, y sobre todo, de cómo se puede demostrar que las actividades inapropiadas en un solo lugar pueden tener consecuencias perjudiciales en otros sitios, proporciona un elemento adicional para aquellos que persiguen que se realice una mejor gestión costera y de los arrecifes.



Figura 35. En los países en desarrollo donde las comunidades de pescadores comerciales o artesanales utilizan una serie de técnicas para cosechar un amplio conjunto de especies objetivo. Las estrategias de gestión de la pesca basadas en ciertas especies como los tamaños mínimos de pesca, las vedas y los límites de captura a menudo son necesarias, a pesar de que las RNPs también se utilicen. Foto: Yvonne Sadovy

*En un mundo en el que el clima está cambiando rápidamente, con consecuencias que aún no son evidentes, es más importante que nunca garantizar que los arrecifes de coral, así como otros ecosistemas costeros, se manejen con la mayor eficacia posible.*

En un mundo en el que el clima está cambiando rápidamente con consecuencias que aún no son evidentes, es más importante que nunca garantizar que los arrecifes de coral, así como otros ecosistemas costeros, se manejen con la mayor eficacia posible. Sólo de esta manera, se tiene alguna probabilidad de poseer la capacidad de recuperación necesaria para adaptarse con éxito al cambio climático.

## Tablero de mensajes

- Tenemos técnicas sensibles y considerables datos acumulados para diversas especies de peces. Sin embargo, no se cuentan con técnicas o con datos disponibles sobre la conectividad para los arrecifes de coral, las langostas, otros invertebrados y las algas.
- A pesar de un régimen particular, la gestión de las AMPs pueden ser “más o menos” óptima para un determinado número de especies, pero podría no ser óptima para todas las especies de organismos marinos.
- La variación temporal en los patrones de conectividad dificulta la tarea de determinar los patrones de conectividad experimentalmente.
- Los administradores de los arrecifes son los gerentes de las personas, o más específicamente, de los efectos negativos que las actividades humanas pueden tener sobre las especies marinas y los hábitats objetivo de que se trate.
- El conocimiento de la conectividad, y en particular, de cómo se puede demostrar que las actividades inapropiadas en un solo lugar pueden tener consecuencias perjudiciales en otros sitios, ofrece mayores argumentos a quienes promueven una mejor gestión costera y de los arrecifes.

## Reglas de oro para incorporar la información de conectividad en la gestión

Nota: Estas reglas básicas pueden ser aplicadas, pero sólo con el reconocimiento que sirven como las mejores estimaciones actuales, en lugar de definir rigurosamente los principios científicos.

### 1) Establecer objetivos claros

- Los administradores que buscan el diseño de las AMPs y/o de las redes de AMPs deben comenzar por seleccionar los objetivos de la gestión, los cuales con frecuencia se especifican dependiendo de la "especie", o algunas veces del "grupo funcional" específico que puede estar relacionado con las mejoras en la pesca, la conservación de la biodiversidad, la protección del hábitat y con otros objetivos a alcanzar. A pesar de que un régimen de gestión en particular puede ser el mejor para un número de especies, tal vez no sea óptimo para todas las especies.

### 2) Aplicar un enfoque de sistemas

- Piensa en grande, gestionar todas las regiones costeras en lugar de las áreas marinas protegidas aisladas.
- Reconocer los patrones de la conectividad dentro y entre los ecosistemas, incluidos los vínculos entre los hábitats costeros (por ejemplo, los arrecifes, los pastos marinos, los manglares y los humedales), los vínculos entre dichos hábitats y los hábitats terrestres de agua dulce que se encuentran "aguas arriba", los vínculos con las actividades que se realizan en las zonas costeras (como el desarrollo del turismo), y los vínculos con los procesos dinámicos (tales como, las corrientes y ríos).
- Incluir en el área sujeta a dicha gestión, unidades biológicas completas y la zona de influencia alrededor del núcleo de interés.

### 3) Incorporar los diferentes aspectos de la conectividad en el diseño de la red

#### I. La dispersión de las larvas:

- Dentro de una red debe ser considerada, con el objetivo de que las RNPs sean de un tamaño tal, que puedan garantizar que un número razonable de individuos de una especie objetivo puedan completar las diferentes etapas de su vida larval dentro de las fronteras sus RNPs natales.
- El objetivo de establecer redes de RNPs es que proporcionen un rango más amplio para las distancias de la dispersión entre las áreas protegidas.
- Tener en cuenta que la distancia de la dispersión de las larvas de algunas especies es más pequeña de lo que se pensaba previamente y que la retención local de las larvas de los peces de los arrecifes es frecuente.
- Las AMPs se deben colocar entre 10 -30 km entre cada una, con el fin de capturar la conectividad efectiva para la mayoría de las especies objetivo de los arrecifes.
- Un espacio variable es mejor que el espaciamiento uniforme cuando las redes se componen de varias pequeñas reservas, en lugar de pocas reservas de grandes dimensiones (siempre y cuando se encuentren entre 10 a 30 kilómetros).

#### II. El movimiento en la vejez:

- Debe ser considerada la gama de patrones de movimiento de los organismos jóvenes y adultos para proteger una gama de especies dentro de una AMP o de las redes de AMPs.

- Las rutas de migración de desove y los hábitats requeridos en las diferentes etapas de la vida de los organismos marinos costeros, así como las tendencias diarias o estacionales utilizadas por las especies objetivo deben ser protegidas.
- En última instancia, una red de AMPs que protege los patrones de movimiento de los adultos de especies particulares, es probable que también pueda proteger a las especies de adultos más sedentarios.

### III. Hábitats:

- Proteger los hábitats que son importantes para mantener la conectividad incluye:
- Los hábitats críticos, los cuales son hábitats de crucial importancia durante el ciclo de vida de las especies objetivo (por ejemplo, las zonas de crianza, la zonas de nidificación y otros sitios de desove).
- Los refugios, que son áreas protegidas contra perturbaciones y pueden servir como fuentes de propágulos para la recolonización de los lugares dañados.
- Los sitios aislados, los cuales suelen tener conjuntos de especies endémicas y únicas, por ende, exhiben una baja diversidad genética. Las poblaciones que habitan estos sitios suelen ser pequeñas y con una baja conectividad (tal es el caso de los arrecifes oceánicos remotos). Estas características los hacen menos resistentes a las perturbaciones que enfrentan (McCook et al. 2009).
- Es indispensable considerar las posibles repercusiones del desarrollo costero, la contaminación y los impactos de otras actividades humanas sobre los hábitats que se encuentran cerca de la costa, así como sobre los caminos utilizados por los organismos de los arrecifes durante su ciclo de vida.

### IV. El movimiento del agua:

- En las zonas donde las corrientes son complejas (como remolinos o corrientes inversas), es recomendable una distribución equilibrada de las AMPs.
- Ciertas poblaciones pueden actuar como fuentes consistentes y otras como receptoras para la dispersión de los organismos. En las zonas donde las corrientes son muy fuertemente direccionales, las AMPs localizadas en lugares aguas arriba tendrán una mayor probabilidad de apoyar el reclutamiento para el resto de las áreas administradas.
- Se prevé que el cambio climático puede conducir a cambios en los regímenes actuales, por lo que se requiere garantizar que los instrumentos jurídicos que rigen las redes de AMPs establezcan disposiciones que tomen en cuenta los cambios en el patrón espacial de la gestión a futuro.

## 4) Realizar investigación dirigida a llenar los vacíos de información

- Debido a que la base científica que apoya la gestión ambiental es débil, se motiva e invita tanto a los científicos como a los administradores de las áreas marinas costeras a establecer colaboraciones estrechas y utilizar la gestión de actividades en un contexto de manejo adaptativo que avance simultáneamente con la comprensión científica de la conectividad, mientras se usa mejor el conocimiento disponible para orientar la gestión de las decisiones actuales.
- Los programas de investigación asociados con el desarrollo de las AMPs protegidas y de las redes de las AMPs, así como los que están dirigidos a la mejora de su eficacia, deben incluir los estudios de conectividad de las poblaciones objetivo (por ejemplo, la biología de las larvas, el comportamiento de los organismos y la dispersión de las especies en sus hábitats destino).

## 5) La gestión de las zonas de amortiguamiento y de las zonas circundantes

- La protección de las especies y los hábitats situados dentro de los límites “invisibles” de una RNP no es suficiente por sí misma. Las prácticas de una pesca sostenible y la buena calidad ambiental en las zonas circundantes a las reservas no pesqueras también son necesarias para lograr que se lleven a cabo procesos sanos en los ecosistemas y en sus vínculos. El seguimiento y la gestión de las AMPs fuera de las fronteras son elementos esenciales.

## 6) Integrar el uso de modelos con la investigación de campo

- El diseño óptimo de las redes de AMPs es mejor abordado usando modelos biofísicos aplicados con escalas finas de definición para configuraciones geográficas específicas. Estos modelos biofísicos pueden ser complementados con estudios de campo independientes de la dispersión y la conectividad de las especies representativas (por ejemplo, los estudios que utilizan distintas técnicas como el marcado y la identificación de las larvas, el análisis de parentesco, entre otras técnicas).

## 7) Asegurar tanto el cumplimiento de las disposiciones como el monitoreo de las AMPs

- Vigilar el cumplimiento de las disposiciones de las AMPs con la gestión de planes de regulación y con el monitoreo de los impactos sobre los organismos (en el corto plazo) y en el largo plazo de los hábitats protegidos en donde se localizan las especies objetivo, con el fin de medir la eficacia de los esfuerzos de gestión.

## 8) Educar

- Educar e informar a las comunidades costeras, a las agencias de gestión y a los gobiernos sobre el concepto y la importancia de mantener la conectividad en los ecosistemas costeros.

## 9) Ser adaptable

- Los científicos y los administradores de los ambientes marinos costeros deben trabajar juntos en programas de gestión adaptativa de largo plazo, en donde se establezcan redes o se tomen otras medidas de gestión que ofrezcan la oportunidad de probar la efectividad de las acciones y la ciencia subyacente.
- Utilizar la nueva información y la comprensión de la conectividad en los programas de gestión tal como se desprende, sin dejar de reconocer que nunca tendremos el panorama completo de cómo funcionan en la realidad los sistemas costeros.
- Adaptar la gestión de los ecosistemas de los arrecifes de coral a los impactos del cambio climático en los procesos de conectividad, a medida que éstos van ocurriendo.

## Referencias

- Abesamis, R.A., and G.R. Russ, 2005. Density-dependent spillover from a marine reserve: long-term evidence. *Ecological Applications* 15: 1798-1812.
- Ablan, M.C.A., and L.R. Garces, 2005. Exclusive economic zones and the management of coastal fisheries in the South China Sea. In: Ebbin, S., A. Sydnes, and A.H. Hoel (Eds.), *A sea change: the exclusive economic zone and governance institutions for living marine resources*. Springer, pp. 136-149.
- Almany, G.R., 2007. Population connectivity and conservation of marine biodiversity. *Oceanography* 20: 100-111.
- Almany, G.R., M.L. Berumen, S.R. Thorrold, S. Planes, and G.P. Jones, 2007. Local replenishment of coral reef fish populations in a marine reserve. *Science* 316: 742-744.
- Almany, G.R., S.R. Connolly, D.D. Heath, J.D. Hogan, G.P. Jones, L.J. McCook, M. Mills, R.L. Pressey, and D.H. Williamson, 2009. Connectivity, biodiversity conservation, and the design of marine reserve networks for coral reefs. *Coral Reefs* 28: 339-351.
- Andréfouët, S., S. Ouillon, R. Brinkman, J. Falter, P. Douillet, F. Wolk, R. Smith, P. Garen, E. Martinez, V. Laurent, C. Lo, G. Remoissenet, B. Scourzic, A. Gilbert, E. Deleersnijder, C. Steinberg, S. Choukroun, and D. Buestel, 2006. Review of solutions for 3D hydrodynamic modeling applied to aquaculture in South Pacific atoll lagoons. *Marine Pollution Bulletin* 52: 1138-1155.
- Armsworth, P.R., and J.E. Roughgarden, 2005. The impact of directed versus random movement on population dynamics and biodiversity patterns. *American Naturalist* 165: 449-465.
- Atema, J., M.J. Kingsford, and G. Gerlach, 2002. Larval reef fish could use odour for detection, retention and orientation to reefs. *Marine Ecology Progress Series* 241: 151-160.
- Becker, B.J., L.A. Levin, F.J. Fodrie, and P.A. McMillan, 2007. Complex larval connectivity patterns among marine invertebrate populations. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104: 3267-3272.
- Bell, C., S.W. Purcell, and W.J. Nash, 2008. Restoring small-scale fisheries for tropical sea cucumbers. *Ocean and Coastal Management* 51: 589-593.
- Bode, M., L. Bode, and P.R. Armsworth, 2006. Larval dispersal reveals regional sources and sinks in the Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series* 308: 17-25.
- Botsford, L.W., C.L. Moloney, A. Hastings, J.L. Largier, T.M. Powell, K. Higgins, and J.F. Quinn, 1994. The influence of spatially and temporally varying oceanographic conditions on meroplanktonic metapopulations. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 41: 107-145.
- Botsford, L.W., 2001. Physical influences on recruitment to California current invertebrate populations on multiple scales. *ICES Journal of Marine Science* 58: 1081-1091.
- Botsford, L.W., C.A. Lawrence, M.F. Hill, A. Hastings, and K.S. McCann, 2002. Dynamic response of California current populations to environmental variability. *American Fisheries Society Symposium* 32: 215-226.
- Botsford, L.W., J.W. White, M-A. Coffroth, C.B. Paris, S. Planes, T.L. Shearer, S.R. Thorrold, and G.P. Jones, 2009. Measuring connectivity and estimating resilience of coral reef metapopulations in MPAs: matching empirical efforts to modeling needs. *Coral Reefs* 28: 327-337.
- Butler, M.J. IV, C.B. Paris, J.S. Goldstein, H. Hirokazu Matsuda, and R.K. Cowen, (in review). Behavior constrains the dispersal of long-lived spiny lobster larvae, submitted to *Limnology and Oceanography*, December 2009.
- Campana, S.R., 1999. Chemistry and composition of fish otoliths: pathways, mechanisms and applications. *Marine Ecology Progress Series* 188: 263-297.

- Chittaro, P.M., P. Usseglio, B.J. Fryer, and P.F. Sale, 2005. Using otolith microchemistry of *Haemulon flavolineatum* (French Grunt) to characterize mangroves and coral reefs throughout Turneffe Atoll, Belize: difficulties at small spatial scales. *Estuaries and Coasts* 28: 373-381.
- Cowen, R.K., K.M.M. Lwiza, S. Sponaugle, C.B. Paris, and D.B. Olson, 2000. Connectivity of marine populations: Open or closed? *Science* 287: 857-859.
- Cowen, R.K., C.B. Paris, and A. Srinivasan, 2006. Scaling of Connectivity in marine populations, *Science* 311: 522-527.
- Cushing, D.H., 1990. Recent studies on long-term changes in the sea. *Freshwater Biology* 23: 71-84.
- Dixson, D.L., G.P. Jones, P.L. Munday, S. Planes, M.S. Pratchett, M. Srinivasan, C. Syms, and S.R. Thorrold, 2008. Coral reef fish smell leaves to find island homes. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B* 275: 2831-2839.
- Gerlach, G., J. Atema, M.J. Kingsford, K.P. Black, and V. Miller-Sims, 2007. Smelling home can prevent dispersal of reef fish larvae. *Proceedings of the National Academy of Science* 104: 858-863.
- Gillanders, B., 2005. Using elemental chemistry of fish otoliths to determine connectivity between estuarine and coastal habitats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 64: 47-57.
- Goldstein, J.S., H. Matsuda, T. Takenouchi, and M.J. Butler IV., 2008. A description of the complete development of larval Caribbean spiny lobster *Panulirus argus* (LATREILLE, 1804) in culture. *Journal of Crustacean Biology* 28: 306-327.
- Goldstein, J.S., and M.J. Butler IV., 2009. Behavioral enhancement of onshore transport by postlarval Caribbean spiny lobster (*Panulirus argus*). *Limnology and Oceanography* 54: 1669-1678.
- Hamilton, S.L., J. Regetz, and R.R. Warner, 2008. Postsettlement survival linked to larval life in a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105: 1561-1566.
- Hastings, A., and L.W. Botsford, 2006. Persistence of spatial populations depends on returning home. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103: 6067-6072.
- Hogan, J.D., R. Fisher, and C. Nolan, 2007. Critical swimming speed of settlement-stage coral reef fishes from the Caribbean: A methodological and geographical comparison. *Bulletin of Marine Science* 80: 219-231.
- Irisson, J.O., A. Levan, M. de Lara, and S. Planes, 2004. Strategies and trajectories of coral reef fish larvae optimizing self-recruitment. *Journal of Theoretical Biology* 227: 205-218.
- IUCN/WCPA, 1994. Guidelines for protected area management categories, Gland, Switzerland.
- IUCN/WCPA, 2008. Guidelines for applying protected area management categories, 3rd draft of revised guidelines.
- James, M.K., P.R. Armsworth, L.B. Mason, and L. Bode, 2002. The structure of reef fish metapopulations: modelling larval dispersal and retention patterns. *Proc. B., Royal Society of London*, 269: 2079-2086.
- Jones, G.P., M.J. Milicich, M.J. Emslie, and C. Lunow, 1999. Self-recruitment in a coral reef fish population. *Nature* 402: 802-804.
- Jones, G.P., M. Srinivasan, G.R. Almany, 2007. Population connectivity and conservation of marine biodiversity. *Oceanography* 20: 100-111.
- Jones, G.P., G.R. Almany, G.D. Russ, P.F. Sale, R.S. Steneck, M.J.H. van Oppen, and B.L. Willis, 2009. Larval retention and connectivity among populations of corals and reef fishes: history, advances and challenges. *Coral Reefs* 28: 307-325.
- Kingsford, M.J., J.M. Hughes, and H.M. Patterson, 2009. Otolith chemistry of the non-dispersing reef fish *Acanthochromis polyacanthus*: cross-shelf patterns from the central Great Barrier Reef. *Marine Ecology Progress Series* 377: 279-288



- Kritzer, J.P., and P.F. Sale, 2004. Metapopulation ecology in the sea: from Levins' model to marine ecology and fisheries science. *Fish and Fisheries* 5: 131-140.
- Largier, J.L., 2003. Considerations in estimating larval dispersal distances from oceanographic data. *Ecological Applications* 13: 71-89.
- Leis, J.M., 1991. The pelagic stage of reef fishes: the larval biology of coral reef fishes. In: P.F. Sale, (Ed.), *The ecology of fishes on coral reefs*. Academic Press, San Diego, pp. 183-230.
- Levin, S.A., H.C. Muller-Landau, R. Nathan, and J. Chave, 2003. The ecology and evolution of seed dispersal: A theoretical perspective. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 34: 575-604.
- Lubchenco, J., S. Palumbi, S. Gaines, and S. Andelman, 2003. Plugging a hole in the ocean: the emerging science of marine reserves. *Ecological Applications* 13: 3-7.
- Martinez, E., K. Maamaatuaiahutapu, C. Payri, and A. Gamachaud, 2006. *Turbinaria ornata* invasion in the Tuamotu Archipelago, French Polynesia: ocean drift connectivity. *Coral Reefs* 26: 79-86.
- McClanahan, T.R., and S.R. Mangi, 2004. Gear-based management of a tropical artisanal fishery based on species selectivity and capture size. *Fisheries Management and Ecology* 11: 51-60.
- McCook, L.J., G.R. Almany, J. Day, A. Green, G.P. Jones, J.M. Leis, S. Planes, G.R. Russ, P.F. Sale, and S.R. Thorrold, 2009. Management under uncertainty: guide-lines for incorporating connectivity into the protection of coral reefs. *Coral Reefs* 28: 353-366.
- Meyer, C.G., K.N. Holland, B.M. Wetherbee, and C.G. Lowe, 2000. Movement patterns, habitat utilization, home range size and site fidelity of whitesaddle goatfish, *Parupeneus porphyreus*, in a marine reserve. *Environmental Biology of Fishes* 59: 235-242.
- Mumby, P.J., C.P. Dahlgren, A.R. Harborne, C.V. Kappel, F. Micheli, D.R. Brumbaugh, K.E. Holmes, J.M. Mendes, K. Broad, J.N. Sanchirico, K. Buch, S. Box, R.W. Stoffle, and A.B. Gill, 2006. Fishing, trophic cascades, and the process of grazing on coral reefs. *Science* 311: 98-101.
- Munday, P.L., J.M. Leis, J.M. Lough, C.B. Paris, M.J. Kingsford, M.L. Berumen, and J. Lambrechts, 2009. Climate change and coral reef connectivity. *Coral Reefs* 28: 379-395.
- Okubo, A., and S.A. Levin, 1989. *Diffusion and Ecological Problems: Modern Perspectives*, Springer NY, pp. 469.
- Paris, C.B., R.K. Cowen, K.M.M. Lwiza, D.P. Wang, and D.B. Olson, 2002. Objective analysis of three-dimensional circulation in the vicinity of Barbados, West Indies: Implication for larval transport. *Deep Sea Research* 49: 1363-1386.
- Paris, C.B., and R.K. Cowen, 2004. Direct evidence of a biophysical retention mechanism for coral reef fish larvae. *Limnology and Oceanography* 49: 1964-1979.
- Paris, C.B., R.K. Cowen, R. Claro, and K.C. Lindeman, 2005. Larval transport pathways from Cuban spawning aggregations (Snappers; Lutjanidae) based on biophysical modeling. *Marine Ecology Progress Series* 296: 93-106.
- Paris, C.B., L.M. Cherubin, and R.K. Cowen, 2007. Surfing, spinning, or diving from reef to reef: effects on population connectivity. *Marine Ecology Progress Series* 347: 285-300.
- Patterson, H.M., M.J. Kingsford, and M.T. McCulloch, 2005. Resolution of the early life history of a reef fish using otolith chemistry. *Coral Reefs* 24: 222-229.
- Patterson, H.M., and S.E. Swearer, 2007. Long-distance dispersal and local retention of larvae as mechanisms of recruitment in an island population of a coral reef fish. *Austral Ecology* 32: 122-130.
- Planes, S., S.R. Thorrold, and G.P. Jones, 2009. Larval dispersal connects fish populations in a network of marine protected areas. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106: 5693-5697.

Raymundo, L.J., A.P. Maypa, E.D. Gomez, and P. Cadi, 2007. Can dynamite-blasted reefs recover? A novel, low-tech approach to stimulating natural recovery in fish and coral populations. *Marine Pollution Bulletin* 54: 1009-1019.

Roberts, C.M., 1997. Connectivity and management of Caribbean coral reefs. *Science* 278: 1454-1457.

Roberts, C.M., J.A. Bohnsack, F. Gell, J.P. Hawkins, and R. Goodridge, 2001. Effects of marine reserves on adjacent fisheries. *Science* 294: 1920-1923.

Russ, G.R., and A.C. Alcala, 1999. Management histories of Sumilon and Apo marine reserves, Philippines and their influence on national marine resource policy. *Coral Reefs* 18: 307-319.

Russ, G.R., 2002. Yet another review of marine reserves as reef fishery management tools. In: Sale, P.F. (Ed.), *Coral reef fishes: dynamics and diversity in a complex ecosystem*. Academic Press, San Diego, pp. 421-444.

Russ, G.R., A.C. Alcala, and A.P. Maypa, 2003. Spillover from marine reserves: the case of *Naso vlamingii* at Apo Island, the Philippines. *Marine Ecology Progress Series* 264: 15-20.

Ruttenberg, B.I., S.L. Hamilton, and R.R. Warner, 2008. Spatial and temporal variation in the metal otolith chemistry of a Hawaiian reef fish: prospects for measuring population connectivity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 65: 1181-1192.

Saenz-Agudelo, P., G.P. Jones, S.R. Thorrold, and S. Planes, 2009. Estimating connectivity in marine populations: an empirical evaluation of assignment tests and parentage analysis at different spatial scales. *Molecular Ecology* 18: 1765-1776.

Sale, P.F., R.K. Cowen, B.S. Danilowicz, G.P. Jones, J.P. Kritzer, K.C. Lindeman, S. Planes, N.V.C. Polunin, G.R. Russ, Y.J. Sadovy, and R.S. Steneck, 2005. Critical science gaps impede use of no-take fishery reserves. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 74-80.

Steneck, R.S., C.B. Paris, S.N. Arnold, M.C. Ablan-Lagman, A.C. Alcala, M.J. Butler, L.J. McCook, G.R. Russ, and P.F. Sale, 2009. Thinking and managing outside the box: Coalescing connectivity networks to build region-wide resilience in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 28: 367-378.

Stephens, P.A., W.J. Sutherland, and R.P. Freckleton, 1999. What is the Allee effect? *Oikos* 87: 185-190.

Stewart, H.L., 2006. Ontogenetic changes in buoyancy, breaking strength, extensibility and reproductive investment in a rafting macroalga *Turbinaria ornata* (Phaeophyta). *Journal of Phycology* 42: 43-50.

Stewart, H.L., 2008. The role of spatial and ontogenetic morphological variability in the range expansion of the tropical brown alga, *Turbinaria ornata*. *Integrative and Comparative Biology* 48: 713-719.

Stiger, V., and C.E. Payri, 1999. Spatial and seasonal variation in the biological characteristics of two invasive brown algae, *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh and *Sargassum mangarevense* (Grunow) Setchell (Sargassaceae, Fucales) spreading on the reefs of Tahiti (French Polynesia). *Botanica Marina* 42: 295-306.

Stobutzki, I.C., and D.R. Bellwood, 1997. Sustained swimming abilities of the late pelagic stages of coral reef fishes. *Marine Ecology Progress Series* 149: 35-41.

Stoner, A.W., and M. Ray, 1996. Queen conch, *Strombus gigas*, in fished and unfished locations of the Bahamas: effects of a marine fishery reserve on adults, juveniles, and larval production. *Fishery Bulletin* 94: 551-565.

Sugden, A., and E. Pennisi, 2006. When to go, where to stop. *Science* 313: 775.

Sutherland, W.J., J.A. Gill, and K. Norris, 2002. Density-dependent dispersal in animals: concepts, evidence, mechanisms and consequences. In: Bullock, J.M., R.E. Kenward, and R.S. Hails (Eds.), *Dispersal ecology*. Blackwell Publishing, Malden, Massachusetts, USA, pp. 135-151.

Swearer, S.E., J.E. Caselle, D.W. Lea, and R.R. Warner, 1999. Larval retention and recruitment in an island population of a coral-reef fish. *Nature* 402: 799-802.

Swearer, S.E., S.R. Thorrold, J.S. Shima, M.E. Hellberg, G.P. Jones, D.R. Robertson, K.A. Selkoe, G.M. Ruiz, S.G. Morgan, and R.R. Warner, 2002. Evidence for self-recruitment in benthic marine populations. *Bulletin of Marine Science* 70: 251-272.

Sweatman, H.P.A., 1988. Field evidence that settling coral reef fish larvae detect resident fishes using dissolved chemical cues. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 124: 163-174.

Thorrold, S.R., G.P. Jones, S. Planes, and J.A. Hare, 2006. Transgenerational marking of embryonic otoliths in marine fishes using barium stable isotopes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 63: 1193-1197.

UN Convention on Biological Diversity, 1992. <http://www.cbd.int/convention/convention.shtml>

UNEP-WCMC, 2008. National and regional networks of marine protected areas: A review of progress. UNEP-WCMC, Cambridge.

Werner, F.E., R.K. Cowen, and C.B. Paris, 2007. Coupled biophysical models: Present capabilities and necessary developments for future studies of population connectivity. *Oceanography* 20: 54-69.

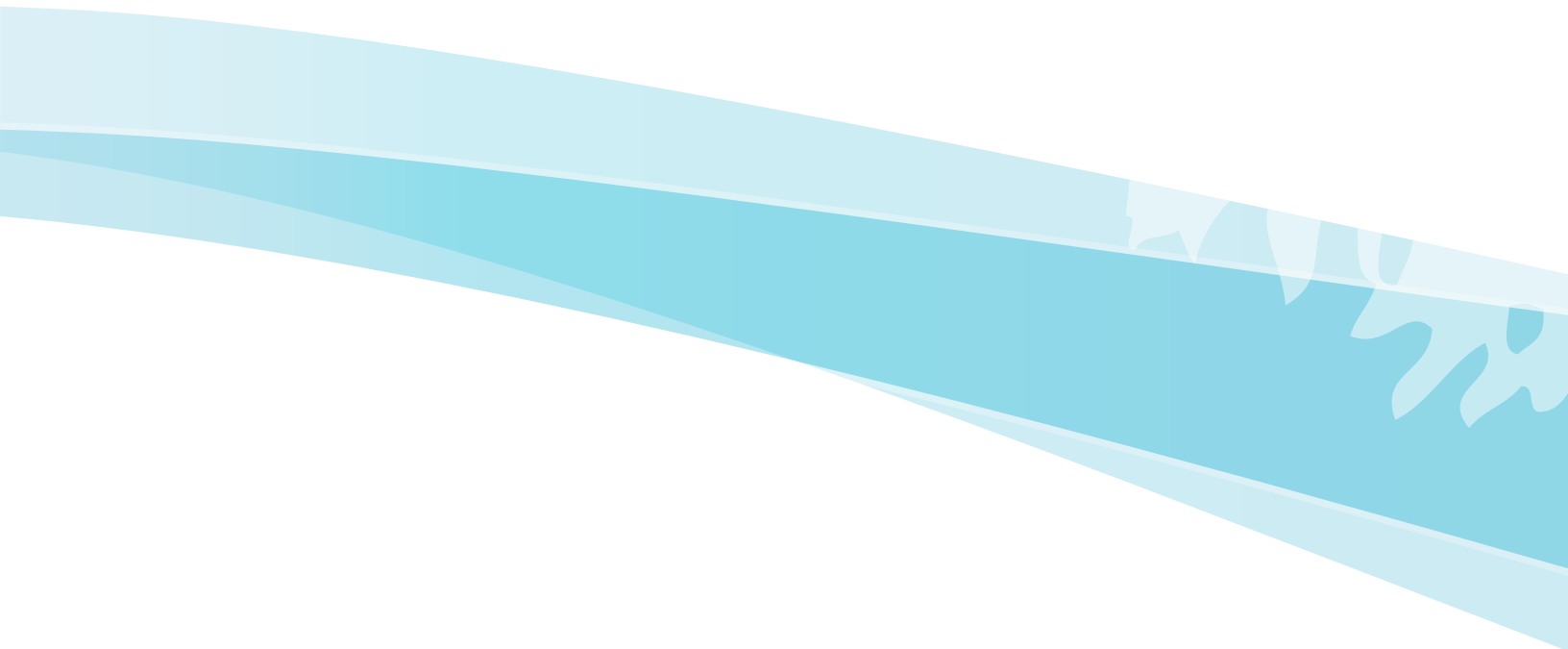
Williamson, D.H., G.P. Jones, S.R. Thorrold, and A.J. Frisch, 2009. Transgenerational marking of marine fish larvae: stable isotope retention, physiological effects and health issues. *Journal of Fish Biology* 74: 891-905.

## Otras referencias útiles

Methods Manual: Selected methods for monitoring coral reef fish, juvenile corals and spiny lobster post-larvae. CRTR, UNU-INWEH. 2007.

Van Lavieren, H., 2009. The science of no-take fishery reserves: A guide for managers. CRTR and UNU-INWEH Brochure.

A handbook for the conservation & management of reef fish spawning aggregations. SCRFA.





## Apéndice

## Apéndice 1

### Acrónimos

<b>AbiertoPRD</b>	Proyecto de Acceso Abierto al Protocolo de la Red de Datos
<b>AGM</b>	Área de Gestión Marina
<b>AMCP</b>	Áreas Marinas y Costeras Protegidas
<b>AMP</b>	Área Marina Protegida
<b>CDB</b>	Convenio sobre la Diversidad Biológica
<b>CRIOBE</b>	Le Centre de Recherches Insulaires et Observatoire de l'Environnement de Polynésie Française
<b>DLP</b>	Duración Larval Pelágica
<b>EELIA</b>	Ensayos de Enzimas Ligadas Inmuno-Absorbentes
<b>FMAM</b>	Fondo para el Medio Ambiente Mundial
<b>IUCN</b>	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza
<b>MBI</b>	Modelo de Base Individual
<b>MCGO</b>	Modelos de Circulación General Oceánica
<b>MEL</b>	Modelos Estocásticos de Lagrange
<b>MHOA</b>	Modelo Híbrido de Océano Acoplado
<b>MOP</b>	Modelo Oceánico Princeton
<b>MORAR</b>	Modelo Oceánico Regional de Alta Resolución
<b>NPZ</b>	Nutrientes del Fitoplancton-Zooplancton
<b>PIDAC</b>	Programa de Investigación Dirigido a los Arrecifes de Coral y a la Creación de Capacidades para la Gestión
<b>SIG</b>	Sistema de Información Geográfica
<b>SMMC</b>	Sistema de Modelación Multi-Escala de la Conectividad
<b>SPG</b>	Sistema de Posicionamiento Global
<b>SRT</b>	Sistema de Referencia Terrestre
<b>RNP</b>	Reservas No Pesqueras
<b>UNU-INWEH</b>	Universidad de las Naciones Unidas – Instituto para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud

## Apéndice 2

### Definiciones Clave

**Auto-reclutamiento** – Es la adición de una nueva cohorte (o grupo de edad) de los organismos jóvenes a una población local, debido a la producción de larvas de dicha población.

**Análisis parental** – Mediante el análisis de genotipos individuales, los individuos son asignados a un solo padre o a una pareja de padres al seleccionar los padres que tengan la mayor probabilidad de serlo a partir de un grupo de padres potenciales. Este tipo de análisis permite la determinación del origen natal de los individuos si se conoce la ubicación por lo menos de uno de los padres en el momento de la concepción.

**Bentónicos** – Está relacionado con la proximidad al sustrato o con la localización en el fondo del mar; se refiere a los organismos que viven próximos al sustrato o en el fondo del mar.

**Comensal** – Se refiere a la relación simbiótica en la que los beneficios de una especie que vive dentro o cerca de una segunda especie, la cual no se ve afectada por esta relación.

**Comportamiento del lugar de origen** – El lugar de nacimiento (o el origen natal) es conocido con el nombre de hogar. El retorno al lugar de origen es una característica común en los peces, siendo los lugares de nacimiento donde las especies regresan para reproducirse.

**Conectividad** – Es la vinculación de los lugares o de las poblaciones a través del movimiento de los organismos, nutrientes, contaminantes o elementos de otro tipo entre ellas. Para las diversas formas de conectividad véase el Cuadro 1.

**Congéneres** – Se refiere a los miembros de la misma especie biológica.

**Curva de dispersión** – Es igual a la dispersión del núcleo.

**Deriva genética** – Se refiere al proceso de cambio en la composición genética de una población debido a la casualidad o a eventos aleatorios; más no es resultado de la selección natural, lo cual da lugar a cambios en las frecuencias alélicas con el tiempo.

**Dispersión** – Es el movimiento de los organismos individuales lejos de una ubicación inicial (por ejemplo, el sitio en donde fueron desovados). La dispersión de los organismos puede ser activa o pasiva.

**Distribución Gaussiana** – Es una distribución teórica de la frecuencia de un conjunto de datos variables que generalmente está representada por una curva en forma de campana simétrica respecto a la media; también se le conoce con el nombre de distribución normal.

**Efecto allee** – Consiste en la limitación de los resultados del desove que puede ocurrir cuando el número de individuos presentes en la fase reproductiva se ha reducido considerablemente como resultado de la pesca o por los impactos indirectos, haciendo más difícil encontrar una pareja.

**Efecto colateral (o efecto derrame)** – La emigración de los adultos y de los organismos menores a través de las fronteras de las AMPs.

**Estatolitos** – Son los objetos calcáreos que se producen en el órgano del equilibrio de los crustáceos o en los estatocistos.

**Etiqueta transmisor** – Se refiere al seguimiento de las etiquetas digitales.

**Firmas químicas** – Es el patrón de huella de abundancias químicas presentes en los otolitos o en otra estructura anatómica que es característica de los organismos que han vivido en un lugar determinado.

**Genotipo** – Es la constitución genética (genoma) de una célula, un individuo o un organismo. El genotipo es distinto de sus características expresadas conocidas como fenotipo.

**Gestión adaptativa** – Se trata de un programa de gestión de recursos en el que las acciones de manejo son deliberadamente utilizadas como manipulaciones experimentales del sistema gestionado para poner a prueba las predicciones de diversos modelos alternativos. De esta forma, el conocimiento científico se expande y la gestión se vuelve más eficaz.

**Huella/Estampación** – Se remite al proceso de aprendizaje rápido por medio del cual un animal muy joven o recién nacido establece un patrón de conducta, por lo general, de reconocimiento, de atracción a otro animal de su propia clase o de atracción a una característica particular de un determinado hábitat, como ha sido mencionado a lo largo de este guía.

**Larva plánula** – Es una larva plana, que nada libremente, de forma ciliada y planctónica, producida por los corales.

**Locus genético** – Se define como la localización de un gen (o de una secuencia significativa) en un cromosoma.

**Núcleo de dispersión** – Proporciona la distribución de la función de probabilidad de la ubicación de un individuo con base en su ubicación y el tiempo de desove, una vez que el proceso de dispersión ha comenzado. Un núcleo de dispersión puede ser uni o multi-modal en función de la historia de vida de los organismos, la oceanografía y la geomorfología de la región, así como del grado de fragmentación del hábitat.

**Marcador genético** – Se trata de un gen o una secuencia de ADN con una ubicación conocida de un cromosoma, que se asocia con un rasgo en particular.

**Meta-ensamblajes o meta-comunidades** – Una comunidad formada por especies que se producen cada una como meta-poblaciones.

**Meta-población** – Se trata de una población que existe como un conjunto de sub-poblaciones locales espacialmente divididas e interconectadas por la inmigración e emigración de individuos. La subdivisión de los hábitats de arrecife y las historias de vida de la dispersión de las larvas pelágicas y de los adultos relativamente sedentarios, posibilita que los organismos que viven en muchos de los arrecifes existan como meta-poblaciones, en donde la población total se constituye de muchas sub-poblaciones separadas, que están al mismo tiempo conectadas debido a la dispersión de las larvas.

**Ontogénico** – Que se relaciona con el origen y el desarrollo de los organismos individuales.

**Otolitos** – Son las estructuras calcáreas diminutas que se encuentran en el oído interno de los peces vertebrados y en algunos otros organismos vertebrados inferiores.

**Progéneres** – Son los hijos o los descendientes considerados como un grupo.

**Propágulos** – Son los huevos fecundados o las larvas que darán lugar a la siguiente generación.

**Puerulus postlarvae** – Es la fase final de las larvas de langosta en donde no reciben alimento y pueden nadar rápidamente hasta encontrar su lugar de asentamiento. El *puerulus* es una etapa de transición que une las fases planctónicas y bentónicas del ciclo de vida. Tiene una breve duración (de 3 a 4 semanas aproximadamente), en esta etapa las larvas no se alimentan (y miden aproximadamente 30 mm de longitud) para posteriormente nadar a través de la plataforma continental hacia la orilla. Cuando el *puerulus* llega a aguas poco profundas cerca de la orilla, allí se asientan.

**Reclutamiento** – Es la adición de una nueva cohorte de animales jóvenes a una población. En las especies marinas, el reclutamiento se mide a menudo en la edad de los animales para completar la etapa larval dispersiva, o bien en la (posterior) época en la que alcanzan la madurez y los individuos se incorporan a la población de cría.

**Reclutamiento subsidiario** – Es la mejora de la producción de una especie pesquera en los lugares de pesca ubicados alrededor de una o más reservas no pesqueras, como resultado de la exportación neta de larvas pelágicas provenientes de dichas reservas.

**Sésil** – Permanentemente adherido o fijo (al sustrato), que no se mueve libremente.

**Sitio de agregación de desove** – Sitio tradicional al que los peces de una determinada especie vuelven cada año para reproducirse.



## Apéndice 3

### Miembros del Grupo de Trabajo de Conectividad del PIDAC

Peter F. Sale, Universidad de las Naciones Unidas, Canadá

Ma. Carmen Ablan Lagman, Universidad de La Salle, Filipinas

Jesús Ernesto Arias González, CINVESTAV Unidad Mérida, México

Mark Butler, Universidad Old Dominion, EE.UU.

Mary Alice Coffroth, Universidad Estatal de Nueva York, EE.UU.

Robert Cowen, Universidad de Miami, EE.UU.

Bret Danilowicz, Universidad del Sur de Georgia, EE.UU.

Geoffrey P. Jones, Universidad James Cook, Australia

Kenyon C. Lindeman, Instituto de Tecnología de Florida, EE.UU.

Serge Planes, Universidad de Perpignan, Francia

Barry Ruddick, Universidad de Dalhousie, Canadá

Yvonne Sadovy, Universidad de Hong Kong, China

Enric Sala, Instituto de Oceanografía Scripps, EE.UU.

Robert Steneck, Universidad de Maine, EE.UU.

Alina Szmant, Universidad de Carolina del Norte en Wilmington, EE.UU.

Simon Thorrold, Instituto Oceanográfico Woods Hole, EE.UU.

## Apéndice 4

### Detalles de los autores

**Ma. Carmen Ablan Lagman**  
Associate Professor, Biology Department  
De La Salle University Manila  
2401 Taft Avenue, Manila  
1004 Philippines  
Email: ma.carmen.lagman@dlsu.edu.ph

**Jelle Atema**  
Professor of Biology  
Boston University Marine Program  
5 Cummington Street, BRB 307  
Boston, MA 02215, USA  
Email: atema@bu.edu

**Mark Butler**  
Professor, Department of Biological Sciences  
Old Dominion University  
Norfolk, VA 23529-0266, USA  
Email: mbutler@odu.edu

**Cécile Fauvelot**  
Chargée de Recherche  
Institut de Recherche pour le Développement (I.R.D.)  
UR 227 – 'Biocomplexité des écosystèmes coralliens  
de l'Indo-Pacifique' Université des Antilles et de la  
Guyane  
DYNECAR (EA 926), Biologie marine  
Campus de Fouillole BP 592  
97159 Pointe-à-Pitre cedex, Guadeloupe  
Email: cecile.fauvelot@ird.fr

**J. Derek Hogan**  
Postdoctoral Research Associate  
Department of Ecology and  
Evolutionary Biology  
Tulane University  
400 Lindy Boggs Building  
New Orleans, LA 70118, USA  
Email: dhogan2@tulane.edu

**Geoffrey P. Jones**  
Professor, School of Marine and Tropical Biology  
ARC Centre of Excellence for Coral Reef Studies  
James Cook University  
Townsville, QLD 4811, Australia  
Email: geoffrey.jones@jcu.edu.au

**Kenyon C. Lindeman**  
Research Professor, Dept. of Marine &  
Environmental Systems  
Florida Institute of Technology  
150 W. Univ. Blvd.  
Melbourne, FL 32901, USA  
Email: lindeman@fit.edu

**Claire B. Paris**  
Assistant Professor  
Rosenstiel School of Marine & Atmospheric  
Science Divisions of Applied Marine Physics  
University of Miami  
Operations Building, Room 24  
4600 Rickenbacker Causeway  
Miami, FL 33149, USA  
Email: cparis@rsmas.miami.edu

**Peter F. Sale**  
Assistant Director, Coastal Zones  
United Nations University – Institute for Water,  
Environment and Health (UNU-INWEH)  
1047 Brandy Crest Road, RR#1  
Port Carling, ON P0B 1J0, Canada  
Email: sale@uwindsor.ca

**Robert Steneck**  
Professor, Marine Biology  
Oceanography and Marine Policy  
School of Marine Sciences  
University of Maine  
Darling Ctr, Walpole, ME 04573, USA  
Email: steneck@maine.edu

**Hannah L. Stewart**  
*Former:* UMS 2978 CNRS – EPHE  
Centre de Recherche Insulaire et  
Observatoire de l'Environnement (CRIOBE)  
BP 1013 – 98 729, Papetoai, Moorea  
Polynésie Française  
*Present:* Research Scientist – Benthic Ecology  
Department of Fisheries and Oceans Canada  
West Vancouver Lab – 4160 Marine Drive  
West Vancouver, B.C. V7V 1N6, Canada  
Email: hannah.stewart@dfo-mpo.gc.ca

**Hanneke Van Lavieren**  
Programme Officer, Coastal Zones  
United Nations University – Institute for Water,  
Environment and Health (UNU-INWEH)  
175 Longwood Road South, Suite 218  
Hamilton, ON L8P OA1, Canada  
Email: vanlav@inweh.unu.edu

autores

## Para mayor información

La Universidad de las Naciones Unidas, Instituto del Agua, Medio Ambiente y Salud, es miembro de la familia de las Universidades de las Naciones Unidas. Este instituto es la instancia de reflexión de las Naciones Unidas en materia de agua, fue creado por el Consejo de Administración de la ONU en 1996, con el fin de fortalecer la capacidad de gestión del agua, especialmente en los países en desarrollo, así como para proporcionar apoyo a los proyectos en el terreno. El Programa Costero de la UNU-INWEH se centra en la mejora de la comprensión científica para fomentar la correcta toma de decisiones, promoviendo una gestión más sostenible de las zonas costeras. Esto está directamente vinculado con los esfuerzos de desarrollo de capacidades para hacer frente a las deficiencias críticas, por medio de la difusión de la investigación científica y el fomento de la capacidad humana e institucional.

---

Instituto para el Agua, el Medio Ambiente y la Salud de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU-INWEH)  
175 Longwood Road South, Suite 204, Hamilton, ON L8P 0A1 Canadá

Téléphone: +1 905 667 5511 Facsimile: +1 905 667 5510  
E-mail: [contact@inweh.unu.edu](mailto:contact@inweh.unu.edu)  
Internet: <http://www.inweh.unu.edu>

El Programa de investigación dirigido a los arrecifes de coral y a la creación de capacidades para la gestión (PIDAC) es una iniciativa de investigación líder a nivel internacional en materia de arrecifes de coral, la cual proporciona un enfoque coordinado sobre la credibilidad y el conocimiento factual y científicamente probado para la mejora de la gestión de los arrecifes de coral. El Programa PIDAC es una alianza entre el Fondo Mundial para el Medio Ambiente, el Banco Mundial, la Universidad de Queensland (Australia), y aproximadamente 40 centros de investigación y otros actores involucrados en todo el mundo.

---

Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management Program  
C/- Global Change Institute  
The University of Queensland St Lucia QLD 4072 Australia

Téléphone: +61 7 3365 4333 Facsimile: +61 7 3365 4755  
Email: [info@gefcoral.org](mailto:info@gefcoral.org)  
Internet: [www.gefcoral.org](http://www.gefcoral.org)

**Liberación de responsabilidad:** La responsabilidad de la información contenida en esta publicación se destina para uso general, con el fin de apoyar tanto al conocimiento como al debate público y contribuir a mejorar la gestión sostenible de los arrecifes de coral y sus ecosistemas asociados. Incluye declaraciones de carácter general basadas en la investigación científica actual. Se les sugiere a los lectores estar conscientes de que esta información puede ser incompleta o no apta para su uso en situaciones específicas. Las opiniones expresadas en esta publicación son de sus autores y no reflejan la opinión de la Universidad de las Naciones Unidas (UNU) con relación a la condición jurídica de cada país, territorio, ciudad o zona, así como la de sus autoridades; tampoco dichas opiniones están relacionadas con la delimitación de sus fronteras o límites.

La degradación de los ambientes costeros es un problema crítico para muchos países tropicales con arrecifes de coral. Estos arrecifes con frecuencia representan un componente importante del PIB de estos países, como resultado de su contribución en las actividades pesqueras y turísticas. Estos ecosistemas también constituyen una fuente de alimentos rica en proteínas para las comunidades costeras, además de apoyar el estilo de vida tradicional de los pueblos costeros. Conservando la conectividad de los arrecifes: Guía para los administradores de las áreas marinas protegidas aborda una temática específica en la gestión eficaz de estos importantes ambientes marinos costeros-la temática de la conectividad. La conectividad es una medida del grado de conexión que existe entre las localidades cercanas y entre las poblaciones locales de una especie.

Este guía resume los avances científicos relevantes sobre la conectividad y proporciona una guía sobre el uso de la información relacionada con la conectividad para fortalecer la gestión de los arrecifes. Aunque está dirigido a los administradores de los arrecifes de coral, los consejos contenidos en este documento también son de gran valor para todos los administradores de las aguas costeras, ya que nuestro objetivo es ayudar tanto a los administradores de las AMPs como a otros actores involucrados en la comprensión y aplicación del concepto de conectividad en su trabajo. Por medio de este guía, esperamos poder contribuir con los administradores de las AMPs para que lleven a cabo una mejor ejecución de su ardua tarea de administrar los ecosistemas marinos costeros y la pesca, así como otros bienes y servicios ambientales que son proporcionados por estos ecosistemas.

Después de una sección introductoria y otra sección que aclara los múltiples significados de la palabra "conectividad" el guía incluye diversos apartados sobre los procesos que causan la conectividad, las formas en que la conectividad es importante para la gestión, la ciencia subyacente que nos está informando sobre la conectividad, y las formas en que se puede incorporar la información sobre la conectividad en la planificación de la gestión y las acciones ejecutadas para llevarla a cabo. Se hace hincapié en la conectividad demográfica entre las poblaciones locales porque ese es el aspecto de la conectividad más difícil de evaluar y la más importante para la gestión diaria de las aguas costeras.

El conocimiento sobre la conectividad, y en particular, sobre la comprensión de cómo este conocimiento puede ser extendido por medio de la colaboración entre los científicos y los administradores en un marco de gestión adaptable, hará las tareas de los administradores costeros marinos más fáciles. La aplicación de estos conocimientos favorecerá a que estas tareas sean exitosas. En un mundo en el que el clima está cambiando rápidamente, con consecuencias que aún no son evidentes, es más importante que nunca garantizar que los arrecifes de coral se manejen con la mayor eficacia posible, al igual que otros ecosistemas costeros.

Sin embargo, para ser realmente eficaces en el mantenimiento de la biodiversidad y en el funcionamiento de los ecosistemas, así como en la realización de las actividades pesqueras sostenidas, la gestión de los arrecifes de coral debe incorporar las ideas de la conectividad tanto en la planificación como en la ejecución de diversas acciones. La conectividad debe dar paso a la gestión de programas coordinados adaptativos que avancen en nuestra comprensión de este tema, al utilizar mejor la ciencia disponible para guiar las acciones de gestión. En nuestro mundo que cambia rápidamente, tenemos que poner en marcha la mejor gestión local posible si queremos desarrollar en los arrecifes de coral las capacidades que se requieren para enfrentar las amenazas globales.

