

3.6 Alternativas tecnológicas para el cultivo y la restauración de los arrecifes de coral en Puerto Rico (Edwin Hernández, Samuel Suleimán, Iván Olivo, Jaime Fonseca y Mary Ann Lucking)

La pérdida de los arrecifes de coral y sus ecosistemas asociados debido a una combinación de factores locales de origen humano y debido a factores asociados al calentamiento del mar ha sido significativa durante las últimas décadas. Esto ha redundado en pérdidas significativas en la biodiversidad de corales y de la fauna asociada al arrecife, así como en un cambio significativo de fase en la estructura de la comunidad en donde la dominancia de los corales ha sido sustituida por la dominancia de las algas y otros grupos de especies no constructores de arrecifes. Este tipo de cambios tiene usualmente consecuencias nefastas para el sostenimiento de la de la resistencia a perturbaciones y de la resiliencia del ecosistema, lo que influye en su capacidad de recuperación después de alguna perturbación. También afecta adversamente el mantenimiento de las funciones ecológicas y los servicios que nos proveen dichos ecosistemas. Las consecuencias ecológicas, ambientales, sociales y económicas de esto pueden ser de gran magnitud. Ante esta situación, la restauración ecológica de los arrecifes de coral emerge como una estrategia de manejo para mitigar parte de dichos impactos, así como para ayudar a rehabilitar sus funciones y servicios. Los objetivos de este capítulo son:

1. Discutir cuál es el valor de la restauración ecológica en los arrecifes de coral;
2. Discutir brevemente algunos de los conceptos ecológicos principales asociados a la restauración ecológica y una guía simple de pasos durante el proceso de restauración;
3. Presentar un caso de estudio relativo a la implantación de métodos de baja tecnología y de bajo presupuesto para el cultivo de corales y la restauración ecológica de los arrecifes de coral bombardeados en la Isla de Culebra;
4. Discutir cuál es la viabilidad de la restauración ecológica de los arrecifes de coral en Puerto Rico de cara al fenómeno del cambio climático; y
5. Discutir algunas de las lecciones aprendidas en el proceso.

La restauración ecológica es *“el estudio de cómo reparar los daños antropogénicos a la integridad de los ecosistemas”* (Cairns y Heckman, 1996). Alasdair y Gómez (2007) la definieron como *“el proceso de ayudar a la recuperación de un ecosistema perturbado, degradado o destruido”*. En el caso de los arrecifes de coral, las metas generalmente incluyen restituir la estructura (restauración) y la función en el ni-

vel del ecosistema (rehabilitación) lo más cercanamente posible a su condición previa a algún tipo de perturbación (Precht y Robbart, 2006). Típicamente, la restauración involucra la reintroducción de corales a un habitáculo perturbado con la meta de restaurar las poblaciones diezmadas de especies clave de corales (Miller y Szmant, 2006), restituir su riqueza de especies o diversidad (Schrimm et ál., 2006), la estructura de la comunidad (Guzmán, 1991), sus funciones ecológicas (Bowden-Kerby, 1997), y en casos extremos, la tridimensionalidad estructural del fondo (Hudson y Díaz, 1988). Usualmente, las restauraciones ecológicas se llevan a cabo después del impacto de perturbaciones severas, como el encallamiento de embarcaciones (Zimmer, 2006). Este tipo de restauración conlleva la implantación de métodos muy costosos, complejos y de alta tecnología. Sin embargo, la gran mayoría de los incidentes de encallamiento son eventos con embarcaciones pequeñas (Lutz, 2006), los cuales rara vez se documentan, impactan áreas relativamente pequeñas y, en la inmensa mayoría de las ocasiones, ni siquiera se restauran. En tales casos, el uso de métodos de baja tecnología puede resultar más costo-efectivos.



Unidad de cultivo del coral cuerno de ciervo, *Acropora cervicornis*, al cabo de un año de crecimiento y listas para cosecharse. Este clono genético se caracteriza por sus ramificaciones cortas y profusas (Foto: E.A. Hernández Delgado).

Pasos para restaurar un arrecife de coral

Precht y Robbart (2006) identificaron una serie de pasos clave para determinar la viabilidad y la naturaleza del tipo de restauración ecológica necesaria bajo diferentes condiciones:

1. Determinar cuán reciente fue el incidente que causó la destrucción del arrecife y caracterizar la magnitud y la extensión del impacto.
2. Estabilizar, si existe aún suficiente complejidad estructural en el arrecife posterior al incidente, el sustrato lo antes posible

(por ejemplo, carricoches [fragmentos muertos], corales desprendidos, sus fragmentos, rocas, etc.).

3. Utilizar documentación previa o estimados aproximados (por ejemplo, comparación con arrecifes aledaños no impactados) de la condición del lugar previo al incidente, como una guía para la restauración futura de la estructura de la comunidad y la composición de especies.
4. Ejecutar medidas costo-efectivas para promover el reclutamiento de corales y/o repoblar la estructura del arrecife con corales o reclutas, o alternativamente, esperar a que el proceso natural de reclutamiento de corales provenientes de arrecifes adyacentes ocurra, y/o proveer otras medidas de compensación mitigatoria, según los recursos lo permitan.
5. Monitorear o auscultar, al menos anualmente durante los primeros cinco años, y eventualmente, al menos cada cinco años durante un período de tiempo mayor, el éxito de la restauración.



Parche semi-artificial del coral cuerno de ciervo creciendo sobre fondo arenoso en una unidad de concreto y de plástico de pvc. Este tipo de unidades se está utilizando para crear parches de crecimiento coralino en fondos desprovistos de relieve con el objetivo de crear corredores biológicos para peces entre arrecifes de parches o entre arrecifes y praderas de hierbas marinas (Foto: E.A. Hernández Delgado).

El uso de métodos de baja tecnología en la restauración ecológica de los arrecifes de coral es, posiblemente, la estrategia de manejo más costo-efectiva que existe al nivel de las áreas marinas protegidas o al nivel de las comunidades de base para restaurar o rehabilitar áreas impactadas. Este tipo de método usualmente conlleva el uso de herramientas simples y de muy poco equipo para completar los

trabajos; su implantación suele ser artesanal e incluye un componente amplio de participación comunitaria, lo que convierte a estos métodos en excelentes herramientas de educación y entrenamiento de las comunidades de base sobre la importancia de la conservación de los arrecifes de coral (Alasdair y Gómez, 2007).

¿Por qué podría fracasar un esfuerzo de restauración ecológica? De acuerdo con Mayer y Rietkerk (2004), el concepto *régimen dinámico del ecosistema* podría explicar por qué algunos esfuerzos de restauración podrían fracasar. Esto puede ocurrir si los esfuerzos son insuficientes para empujar el ecosistema a través de niveles umbrales de regímenes o de estados alternativos, o si los esfuerzos se concentran en escalas inapropiadas (por ejemplo, escalas espaciales muy pequeñas en zonas sujetas a pulsos de escorrentías o escalas temporales muy cortas). Es muy probable que en un caso así se requieran esfuerzos adicionales para identificar clones genéticos de corales con

una tolerancia mayor a regímenes extremos de cambios en la calidad del agua. Igualmente, la restauración podría dar la impresión de fracasar si no se le provee de tiempo suficiente al ecosistema para que los esfuerzos tengan efectos medibles, o si los beneficios de la restauración quedan enmascarados bajo el impacto de fenómenos recurrentes (por ejemplo, pulsos de escorrentías, o brotes de enfermedades o blan-



queamientos como resultado de los incrementos consecuentes en las temperaturas de la superficie del mar). Generalmente, el impacto de una restauración no es lineal, por tanto, la histéresis (necesidad de regresar a condiciones previas antes de las existentes al momento del cambio de fase para poder recuperar la estructura y las funciones del ecosistema al momento de dicho cambio) entre regímenes o estados alternativos requiere de un gran esfuerzo y de mucho tiempo para hacer cambiar la estructura y las funciones de un ecosistema (Scheffer et ál., 2001).

Colonia de coral cuerno de ciervo, *Acropora cervicornis*, transplantada a un arrecife de coral bombardeado y desprovisto de corales (Foto: E.A. Hernández Delgado).

La resiliencia (capacidad de recuperación del ecosistema ante una perturbación) en los estados alternativos —por ejemplo, la dominancia de algas— es mayor en ecosistemas grandes y complejos como los arrecifes de coral. Por ende, requieren de mucho más tiempo y esfuerzos para que pueda restituirse de forma natural la estructura de la comunidad; esto, asumiendo que existan las condiciones ambientales adecuadas de calidad de agua para ello. Por el contrario, mientras más prolongados resulten los estados alternativos y mayor sea la estabilidad que tienen las poblaciones y las relaciones tróficas remanentes, mayor es la resiliencia del ecosistema alterado ante perturbaciones futuras (Cropp y Gabric, 2002). Esto puede explicar la “incapacidad” de recuperación de los ecosistemas de arrecifes bajo regímenes crónicos de deterioro ambiental. Más aún, sugieren la inviabilidad de la restauración ecológica en hábitáculos severamente degradados y con una calidad de agua altamente comprometida.

¿Son restaurables los arrecifes de coral en Puerto Rico? Hernández-Delgado (2000) estimó que el 40% de los arrecifes de coral en Puerto Rico, principalmente aquellos que bordean la costa, se encuentran geológicamente muertos; esto es, con muy poco porcentaje de cobertura viva de corales, tasas bajas de reclutamiento de nuevas colonias y tasas severas de mortalidad y bioerosión de corales. Aproximadamente, el 15% de los arrecifes se encontró bajo un estado de peligro, y el 30%, bajo amenaza debido a su estado avanza-

La rehabilitación del arrecife de coral se enfoca en su reconstrucción paisajista, contribuyendo a aumentar la diversidad de especies de corales, la disponibilidad de relieve tridimensional en el fondo coralino, y fomentando un aumento en la abundancia y diversidad de especies de peces (Foto: E.A. Hernández Delgado).



do de deterioro ambiental. Apenas el 15% de los arrecifes de coral se catalogó como ambientes ecológicamente estables, principalmente aquellos localizados más distantes de la costa y aquellos más profundos. Sin embargo, estimados recientes, posteriores al evento del blanqueamiento masivo de corales de 2005 y su subsiguiente mortandad masiva en 2006, han mostrado evidencia perturbadora sobre un incremento significativo en la pérdida de corales como consecuencia del incremento en las temperaturas de la superficie del mar (Ballantine et ál., 2008; García-Saís et ál., 2008; Hernández-Delgado et ál., en preparación).

Otro factor para la mortandad de corales es que la calidad del agua de la costa en Puerto Rico se encuentra severamente degradada en muchas localidades. De acuerdo con Warne et ál. (2006), en la Isla se depositan de 2.7 a 9.0 millones de toneladas métricas anuales de sedimentos provenientes de las desembocaduras de los ríos. Además, se reciben sobre 300 millones de galones diarios de aguas usadas, la inmensa mayoría por medio de emisarios regionales que proveen solo un nivel primario de tratamiento. El estado de eutroficación (contaminación por una concentración alta de nutrientes disueltos) y de turbidez severa es crónico para muchas localidades, lo que ha afectado, de forma irreversible, la estructura de las comunidades de arrecifes (Hernández-Delgado, en revisión). Bajo dichas condiciones, y debido a los efectos naturales de la histéresis del estado alternativo actual dominado por las algas y la fauna no constructora en los arrecifes degradados, resultaría extremadamente difícil lograr el éxito de cualquier esfuerzo de restauración ecológica. Solo en aquellos arrecifes más distantes de la costa, lejos de los pulsos de escorrentías sedimentadas y de las aguas eutroficadas, es que podría quizá resultar más efectivo. Esto, sin embargo, dependerá en gran medida de los impactos del cambio climático, de

la acidificación marina, y del control poblacional de las algas (competidores de los corales), mediante la actividad herbívora, principalmente de peces loros (*Scaridae*) y médicos (*Acanthuridae*), y de los erizos gigantes (*Diadema antillarum*). Usualmente, la mayor resiliencia arrecifal se alcanza dentro de reservas marinas de no pesca, donde se mantienen aún niveles altos de herbivoría (Hughes et ál., 2006).

A partir de 2003, se desarrolló en la isla de Culebra (Puerto Rico) el Programa Comunitario de Acuicultura de Corales y de Rehabilitación de Arrecifes de Coral como parte de una colaboración entre el Grupo de Investigación de Arrecifes de Coral de la Universidad de Puerto Rico, Recinto de Río Piedras, la Asociación de Pescadores de la Isla de Culebra, la Sociedad Ambiente Marino, y Coralations. Se establecieron diversos métodos de baja tecnología para la acuicultura y propagación del coral cuerno de ciervo (*Acropora cervicornis*) (Fotos 4-1 a 4-7). Esta especie ha sufrido un colapso poblacional en el Caribe durante las últimas décadas (Bruckner, 2002), e incluso, ha desaparecido de la mayoría de los arrecifes de coral en Puerto Rico (Hernández-Delgado, 2000; Weil et ál., 2002). Esto llevó al Gobierno federal de los Estados Unidos a declararla como una especie amenazada conforme a la Ley Federal de Especies en Peligro de Extinción, conjuntamente con el coral cuerno de alce (*A. palmata*).

En el proyecto se utilizaron los corales cultivados para desarrollar un programa experimental de reintroducción de *A. cervicornis* en diversos arrecifes impactados en el pasado, debido a actividades relacionadas con bombardeos militares en la isla de Culebra. Los objetivos del programa fueron: (1) reintroducir la especie aparte de sus hábitáculos antiguos; (2) restaurar sus poblaciones; (3) rehabilitar su rol como constructor de parte del hábitáculo esencial de peces; y (4) restituir parte de la tridimensionalidad estructural del fondo del arrecife de coral.

Durante el año 2005, se registró en el Caribe un evento sin precedentes de aumentos en la temperatura de la superficie del mar. Este aumento causó mortandades masivas de *A. cervicornis*, como consecuencia del brote de un síndrome similar a la conocida enfermedad de la banda blanca durante los meses de junio a agosto. Posteriormente, las colonias sobrevivientes se blanquearon de forma severa entre los meses de septiembre a diciembre, lo que fue seguido por un segundo brote epidémico del síndrome letal entre finales de 2005 y gran parte de 2006. Se identificaron visualmente aquellas colonias silvestres sobrevivientes de *A. cervicornis* en aguas llanas (<4 m), se colectaron fragmentos y se cultivaron para probar su resistencia a eventos futuros de calentamiento de la superficie del mar. Además, se probó su potencial como fuente de propágulas para el desarrollo de actividades de restauración futuras.

Entre 2003 y 2005, las tasas de sobrevivencia de corales transplantados hacia arrecifes bombardeados fueron de 97%, con incrementos aproximados de siete órdenes de magnitud en el largo esquelético total, y de nueve órdenes de magnitud en la producción de nuevas ramificaciones esqueléticas. Sin embargo, luego del evento del 2005 la sobrevivencia de corales decayó a 86% en junio, a 69% en enero de 2006, y a 52% en diciembre de 2006. La mayoría de la mortalidad ocurrió como consecuencia de brotes recurrentes del síndrome similar a la enfermedad de la banda blanca, y al incremento en la depredación por parte de los caracoles coralívoros (*Coralliophila abbreviata*) y del gusano de fuego (*Hermodice carunculata*). Los brotes recurrentes de dicha condición estuvieron típicamente asociados al incremento de la temperatura de la superficie del mar, y en múltiples ocasiones, a la presencia de pulsos significativos de escorrentías sedimentadas y contaminadas luego de eventos de precipitación pluvial significativa (Hernández Delgado, datos no publicados).

La tasa de sobrevivencia de los corales cultivados provenientes de colonias parentales tolerantes de temperaturas altas fluctuó entre el 85 y el 95% entre 2006 y 2008, dependiendo de la localidad. La mayor parte de la mortalidad se asoció al impacto accidental del ancla de las embarcaciones recreativas. El largo esquelético total de las colonias aumentó por 8 a 10 órdenes de magnitud, y la producción de ramas por 10 a 12 órdenes de magnitud a lo largo de dicho período. Sin embargo, un evento de lluvia extrema con un intervalo de recurrencia estimado en 1:250 años durante el mes de septiembre de 2008 tuvo como consecuencia otro brote epidémico del mismo síndrome letal, en proporciones muy similares a las del 2005, durante el calentamiento de la superficie del mar y el blanqueamiento. A pesar de eso, los corales transplantados en algunas localidades remotas de Culebra se encuentran creciendo de forma excelente. Incluso, las colonias cultivadas en la bahía Tamarindo desovaron durante al menos una de las noches después de la luna llena del mes de agosto de 2008. Esto sugiere que, no solo los corales cultivados han sobrevivido generalmente de forma exitosa el proceso de trasplante y reintroducción al arrecife de coral, sino que también se han convertido en nuevas fuentes de gametos y larvas mediante el desove masivo. Esto es sumamente significativo para la rehabilitación de las funciones en el nivel del ecosistema, que incluye el mantenimiento de la diversidad genética.

La restauración ecológica se ha convertido en una herramienta muy valiosa para facilitar la recuperación de arrecifes de coral degradados, perturbados o destruidos por diversas actividades humanas. Si se logra desarrollar estrategias costo-efectivas de baja tecnología para la restauración ecológica en escalas geográficas grandes, esta puede ser una herramienta vital para el manejo de los arrecifes de coral bajo un escenario de cambio climático. Los métodos de baja

tecnología implantados en la isla de Culebra para el cultivo de corales y la rehabilitación de las funciones ecológicas del coral cuerno de ciervo, *Acropora cervicornis*, bajo un modelo de manejo adaptativo con base comunitaria han resultado ser muy efectivos. Dichas técnicas tienen un potencial muy amplio para desarrollarse a escalas geográficas grandes, incluso en el nivel de la cuenca del Caribe. Sin embargo, a pesar de dichos avances, la restauración de arrecifes de coral se encuentra aún en su infancia, ya que todavía no puede crearse o reconstruirse un arrecife totalmente funcional.

El manejo de la restauración de los arrecifes de coral debe incluir la implantación de medidas pasivas o indirectas que contribuyan a eliminar aquellos factores que puedan impedir la recuperación natural del ecosistema (Alasdair y Gómez, 2007). Usualmente, el manejo del ecosistema es más importante que la restauración misma en la recuperación del recurso impactado (por ejemplo, calidad del agua, herbivoría). Además, el ámbito y las metas de una restauración están típicamente asociados al contexto de las limitaciones económicas, políticas, sociales y legales en que esta se da, así como a la realidad ecológica y la historia ambiental del área. Estos dos últimos factores son críticos en determinar el éxito. Los indicadores medibles del éxito de una restauración deben permitir la evaluación periódica del progreso, así como la implantación adaptativa de las medidas de manejo. Una de las metas de todo proyecto de restauración ecológica debe ser la documentación precisa de las lecciones aprendidas. Esto debe facilitar el proceso de diseminación de la información y los procesos de educación en el nivel de las comunidades de base, grupos de interés y público general.

La calidad del agua y el incremento de las temperaturas de la superficie del mar son los dos factores más críticos involucrados en los eventos de mortalidad masiva en el coral *Acropora cervicornis* en Culebra. Esto amerita la continua implantación de respuestas adaptativas en el manejo de las fincas de cultivo de corales y de las áreas restauradas para poder contrarrestar el efecto de los impactos de pulsos de origen antropogénico. Esto es también importante para el manejo de las sorpresas ecológicas (por ejemplo, brotes epidémicos) y los impactos del cambio climático. Sin embargo, resulta imperativo hacer cumplir los planes de uso de los terrenos vigentes en Culebra, así como implantar las medidas requeridas para el control de la ero-



Rehabilitación
paisajista de un arrecife de coral mediante la construcción de un parche del coral cuerno de ciervo fusionado, *Acropora prolifera*. Al aumentar la densidad de colonias transplantadas a nivel paisajista se restuara significativamente la función de reconstruir la tridimensionalidad estructural del fondo, mejorando así el rol de los corales de proveer un hábitaculo de crianza para los peces juveniles (Foto: E.A. Hernández Delgado).

si3n y la sedimentaci3n en aquellas zonas deforestadas y sujetas a la construcci3n. Adem3s, se requiere eliminar la descarga al mar de m3ltiples fuentes dispersas de aguas sanitarias crudas.

La participaci3n comunitaria por medio de varias organizaciones no gubernamentales, buzos voluntarios, estudiantes de escuelas y universidades, etc. ha sido clave para el 3xito del proyecto de restauraci3n de corales en Culebra. Esto nos ha permitido demostrar que el desarrollo de m3todos de baja tecnolog3a para el cultivo de corales y la restauraci3n ecol3gica de los arrecifes de coral pueden ser herramientas importantes en la divulgaci3n de informaci3n, el involucramiento, el entrenamiento t3cnico y la educaci3n de las comunidades de base en lo referente a la conservaci3n de estos arrecifes. M3s a3n, ha resultado clave en demostrar la capacidad que puede tener una comunidad de base debidamente organizada y entrenada para planificar, desarrollar e implantar un modelo estrat3gico alternativo y crio-llo, para el manejo de la resiliencia de los arrecifes de coral. Dichos esfuerzos han resultado hasta el presente en la reintroducci3n de una especie amenazada y severamente diezmada como el coral cuerno de ciervo (*Acropora cervicornis*) a sus antiguos habit3culos, la restauraci3n de la estructura de la comunidad del fondo arrecifal, la rehabilitaci3n de las funciones del coral como un habit3culo esencial para la crianza de peces, y la restituci3n de la tridimensionalidad estructural del fondo en zonas destruidas por actividades relacionadas con bombardeos militares en el pasado. Esto ha convertido a la isla de Culebra en un modelo alternativo sostenible de manejo de sus recursos marinos para enfrentar los retos del cambio clim3tico en el futuro.

El uso de m3todos de baja tecnolog3a tambi3n ha resultado efectivo en la propagaci3n de fragmentos del coral cuerno de alce, *Acropora palmata*. En este caso, los fragmentos se adhieren a una base de concreto utilizando l3neas de pesca o amarras pl3sticas. A su vez, las bases se amarran a una rejilla pl3stica o de alambre revestido de pl3stico adherido al fondo. Una vez el fragmento se adhiere a la base de concreto y comienza a producir ramificaciones nuevas, se desprende de la rejilla y se trasplanta directo al fondo (Foto: E.A. Hern3ndez Delgado).

