



**Genotipos de coral
resistentes:
el santo grial de la
restauración coralina**

Dr. Sergio D. Guendulian García

Unidad Académica de Sistemas Arrecifales,
(UNAM), Puerto Morelos, Quintana Roo, México.

Dr. Luis P. Suescún Bolívar

Programa de Licenciatura en Educación con
Énfasis en Ciencias Sociales y Ambientales.
Universidad de Cartagena, Colombia.

Mtra. Rita Sellares Blasco

Fundación Dominicana de Estudios Marinos,
República Dominicana.

Dr. Aldo Croquer

The Nature Conservancy, Dominican Republic.

Abstract

Coral reefs are one of the most important ecosystems on the planet. However, in recent decades coral reefs have been one of the most affected ecosystems due local pressures, such as poor water quality, overfishing and coastal development, as well as, global pressures, such as global warming, responsible for coral bleaching. These pressures have reduced coral populations worldwide, particularly in the Caribbean region. In this context, coral restoration emerged as a strategy that seeks to compensate for these losses. These strategies have used different tools (including molecular ones) to reproduce and transplant corals to target sites. In recent years, one of the most popular strategies has been the identification of high temperature tolerant coral genotypes. In this work, we describe and discuss the use of molecular biology for the identification of coral genotypes as a strategy to face the changing environment.

Keywords: Coral reefs, Molecular biology, Climate change

Resumen

Los arrecifes de coral, uno de los ecosistemas más importantes del planeta, se forman principalmente a partir del crecimiento de diferentes especies de coral. En las últimas décadas también han sido uno de los ecosistemas más afectados por presiones tanto locales como la mala calidad del agua, la sobre pesca y el desarrollo costero, así como globales como el calentamiento global de los océanos que ha desencadenado los tan alarmantes eventos de blanqueamiento. Estas presiones han mermado las poblaciones de coral a nivel mundial y en particular en la Región del Caribe. En este contexto, surge la restauración de corales, como un conjunto de estrategias

que buscan compensar las pérdidas. Estas estrategias se han valido de diferentes herramientas (incluyendo las moleculares) que ayuden en la reproducción de corales y trasplante de estas en sitios objetivo. En los últimos años, una de las tendencias de restauración ha sido la identificación de corales (genotipos) capaces de resistir temperaturas altas. En este trabajo, se describe en un contexto amplio el empleo de la biología molecular para la identificación de genotipos de coral como herramienta de conservación de arrecifes. Así mismo, invita a la discusión respecto a las implicaciones de la selección de genotipos de coral como estrategia para enfrentar la situación medioambiental actual.

Palabras clave: Arrecifes de coral, Biología Molecular, Cambio climático.

Introducción

Irene Cassini toma uno de sus cabellos rubios y se lo ofrece a Vincent Freeman para que este pueda decodificar el ADN de la joven y así validar su perfección, pues fue concebida mediante selección genética artificial, lo que le confiere una “superioridad” sobre aquellos que son engendrados de forma natural, así como acceso a una “mejor vida y estatus social”. Esta es la primicia de “GATTACA”, una película de ciencia ficción de 1997 que presenta un futuro distópico en donde la selección genética define la perfección de la humanidad, generando discriminación hacia aquellos seres humanos cuyo código genético es producto del azar.

En 1997, los más afortunados jugaban con su recién lanzada consola Nintendo 64, se estrenaba South Park, Soda stereo brindaba su último concierto, se firmaba el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático y se anunciaba la clonación de

la oveja Dolly. Este alarmante último evento, ponía en claro el poder de las herramientas moleculares, a la vez que levantaba alarmas sobre las implicaciones éticas, morales y religiosas que podrían derivarse de esta tecnología emergente. Aun con estos avances, en 1997, resultaba revelador e increíble que se pudiera por medio del análisis de células cutáneas, sangre o incluso un cabello, determinar el mapa genético de una persona. Las siglas ADN se asumen hoy en día con naturalidad, pero la ciencia ha recorrido un largo camino desde que un monje Agustino Checo de nombre Gregor y apellido Mendel, realizó cruces entre plantas de guisantes, formulando las bases de lo que hoy se conoce como herencia.

El empleo del ADN resulta común en nuestros días, es parte casi obligada de nuestra cotidianidad. Lo vemos continuamente en pruebas forenses en series de televisión o en las noticias, relacionado con tratamientos para curar enfermedades, o con la aparición de nuevas alteraciones fisiológicas o anatómicas. Por lo tanto, ahora resulta poco sorprendente que con solo depositar saliva en un tubo y mandarla a un laboratorio especializado, puedes conocer la composición porcentual de tus antepasados, encontrar parientes lejanos, determinar la paternidad de hijos o padres “perdidos”, y saber si se es propenso a enfermedades, entre otras cosas. ¿Pero exactamente qué es el ADN y donde se encuentra?

El ADN o ácido desoxirribonucleico, es una molécula formada por una doble cadena de nucleótidos estabilizadas por puentes de hidrógeno, donde cada nucleótido dentro de la cadena se une a través de enlaces de fosfato y azúcar. El ADN se encuentra presente en cada célula de los seres vivos,

específicamente en un compartimiento llamado núcleo (a excepción de las bacterias, pero de esas se hablará en otra ocasión). Mediante mecanismos moleculares que suceden a nivel celular, cada componente del ADN se traduce. En este sentido, el ADN es particular para cada organismo, se encuentra organizado en genes y funciona como un sistema de almacenamiento de información, es la unidad básica de la herencia que permaneció oculta para Mendel. El almacenaje de la información de los organismos se genera de manera análoga a una biblioteca, donde cada libro representa una unidad de almacenamiento que contiene muchas huellas específicas que permiten caracterizar (genotipificar) y predecir el funcionamiento de organismos de manera inequívoca. Esto es posible porque en el ADN se guarda toda la información del pasado, y sobre ella se escribe el presente y el futuro de cada uno de los organismos vivos.

Por esta razón, el estudio del ADN ha resultado una herramienta poderosa, empleada en las ciencias médicas y forenses, así como en investigaciones de diversos grupos de organismos e incluso ecosistemas. En tiempos relativamente recientes, estas herramientas moleculares han resultado de gran utilidad en el estudio de diversos organismos y ecosistemas tales como los corales y los arrecifes que estos forman.

Los arrecifes de coral en los tiempos del cambio climático

Sobre los continentes, los bosques y selvas son conocidos por presentar una alta complejidad estructural generada principalmente por los árboles que habitan estos ecosistemas, lo que permite generar una alta abundancia y diversidad de organismos. En el ambiente marino en las zonas poco

profundas y tropicales (regiones que se encuentran entre el trópico de Cáncer y el de Capricornio), los arrecifes de coral generan un hábitat análogo a los bosques, con la gran diferencia en que las estructuras fundacionales de estos ecosistemas, las componen los corales duros, organismos pertenecientes al reino Animal, y no Plantae.

Los arrecifes de coral son ecosistemas de suma importancia que sostienen una gran cantidad de especies marinas; además, poseen importantes funciones como el brindar protección a las costas y generan una gran derrama económica por parte del turismo. Estos ecosistemas se forman mediante el depósito de carbonato de calcio, principalmente a través del crecimiento de los corales, los cuales funcionan como una especie

de bloque que forma la estructura de la matriz arrecifal, por lo que se han ganado el título nobiliario “ingenieros del arrecife”. Los corales observados a simple vista son colonias formadas por un conjunto de individuos denominados pólipos (Figura 1 B), cada uno con la misma información genética que su par. Estos a su vez establecen una asociación simbiótica con algas unicelulares (i.e., zooxantelas), las cuales, por medio de la fotosíntesis, pueden generar nutrientes para el coral. Es por ello por lo que, de forma genérica, a las zooxantelas se les conoce como foto simbiontes, un grupo extremadamente diverso que se asocia a múltiples especies de corales, e incluso a otros organismos marinos. Esta asociación es tan importante que, sin los simbiontes, los corales pueden llegar a morir.

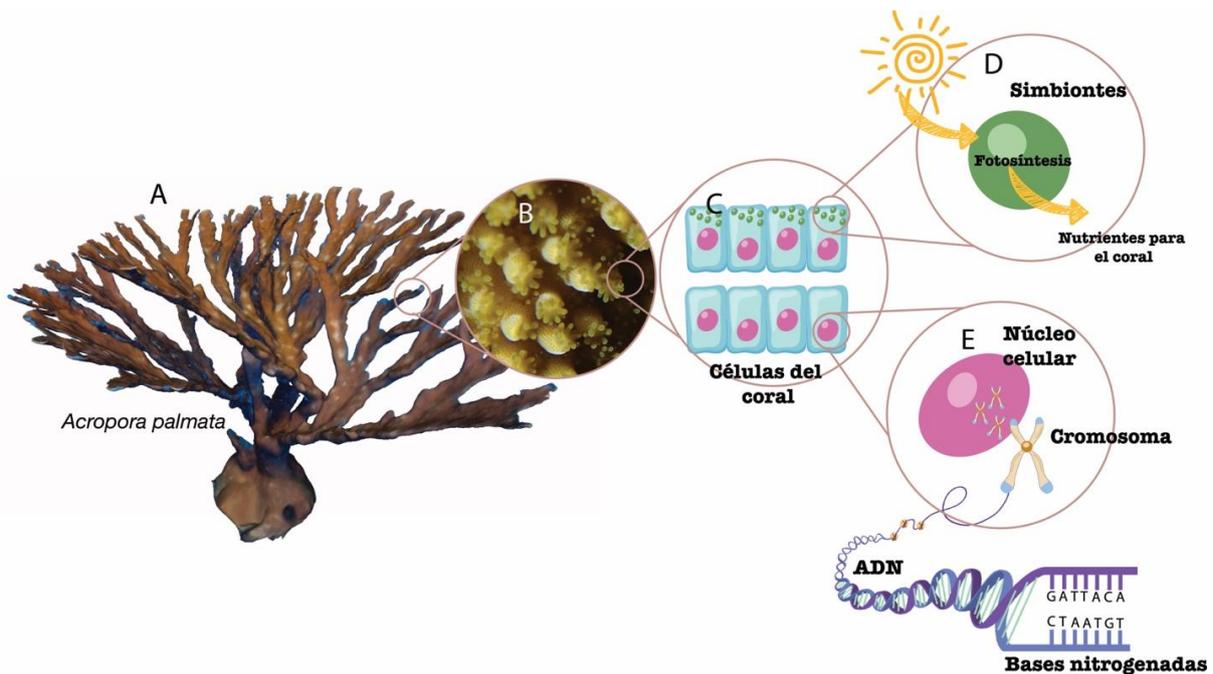


Figura 1: Localización del ADN en un coral. A) Colonia del coral *Acropora palmata*. B) Amplificación de un pedazo de colonia. Muestra que está formada por individuos llamados pólipos con la misma información genética. C) Representación del tejido celular de los corales. D) Representación de la función de los simbiontes dentro del coral. E) Representación del núcleo, el cual contiene el ADN empaquetado (cromosomas).

Actualmente, debido a distintos estresores locales y globales, tales como la contaminación, sobrepesca, y cambio climático, las poblaciones de corales se han reducido de forma considerable a escala mundial. De forma particular, las poblaciones de corales en la región del Caribe han experimentado repercusiones negativas importantes debido principalmente a los constantes eventos de blanqueamiento, así como la aparición de distintas enfermedades de pérdida de tejido rápido (ej. enfermedad de banda blanca, enfermedad de plaga blanca y enfermedad de pérdida de tejido rápido “SCTLD”).

Bajo este escenario, ha resultado necesario el establecimiento de diversos programas y esfuerzos de conservación y restauración de corales (Bayraktarov *et al.* 2019; Boström-Einarsson *et al.* 2020).

La estrategia de la mayoría de los esfuerzos de restauración ha consistido en la reproducción de corales y la introducción de estos a sitios degradados. Los corales poseen dos estrategias de reproducción; asexual y sexual. La primera se debe a la característica colonial, es decir, que cuando una colonia

se rompe (proceso común en aquellos corales con morfologías similares a las ramas de los árboles) el fragmento tiene la capacidad de producir una nueva colonia, esto forma un clon, ósea una colonia con la misma información genética que la “colonia madre”. La segunda, involucra la combinación de espermatozoides y óvulos de colonias diferentes (Figura 2), es decir produce un organismo genéticamente diferente a los padres.

Debido a la practicidad, y la relativa facilidad, la reproducción asexual por fragmentación es una de las estrategias más empleadas a nivel mundial. No obstante, se le atribuye a la población de corales producida, una reducida variabilidad genética, lo que resulta cierto siempre que se emplee un número limitado de colonias donadoras con diferente genotipo.

Por lo que el empleo de herramientas moleculares como la caracterización del ADN de las poblaciones de coral han resultado de gran utilidad para detectar los distintos genotipos que componen a las colonias donantes.

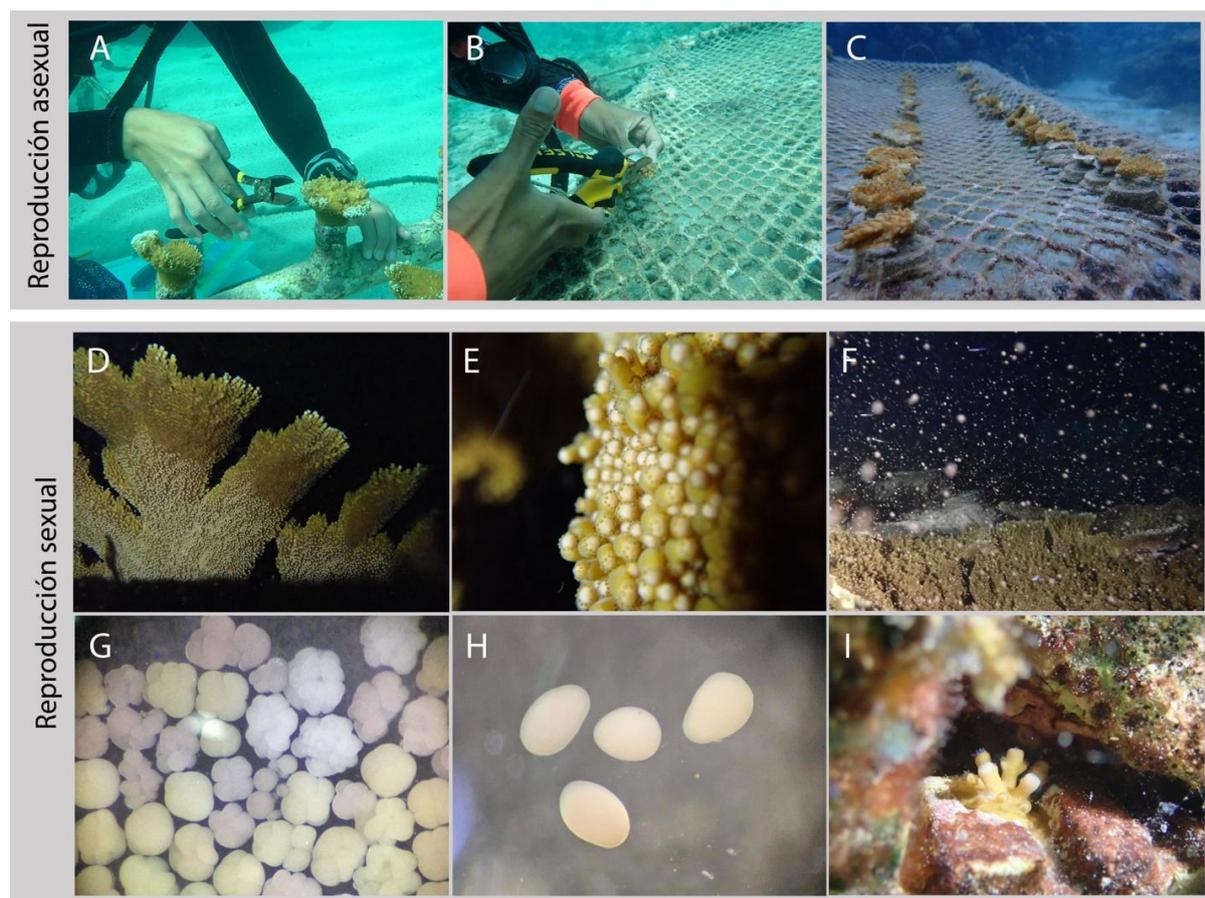


Figura 2: Estrategias asistidas de reproducción de corales. A) Fragmentación de una colonia donante (este evento también puede ocurrir de forma natural). B) Sub-fragmentación de la colonia donante. C) Ejemplo de fragmentos con el mismo ADN, pues provienen de la misma colonia donante. D) Colonia del coral *Acropora palmata* preparada para desovar. E) Detalle de los pólipos sosteniendo gametos. F) Desove de coral, cada “esfera” observada corresponde a un paquete de gametos. G) Divisiones celulares (desarrollo embrionario) después de la fecundación, similar a lo que sucede en humanos. H) Larva de coral a punto de buscar un sustrato duro para establecerse. I) Primeros pólipos de una colonia de coral, cada uno guarda la misma información genética, pero diferente a otra colonia producida sexualmente.

El ADN como herramienta en los esfuerzos de conservación y rehabilitación

Hoy en día los corales son reconocidos como meta-organismos, debido a que en sus tejidos se alberga una multiplicidad de microorganismos que establecen diferentes relaciones simbióticas con el animal, esto se conoce como el microbioma coralino.

La caracterización del ADN de los corales posee distintas aplicaciones en el estudio y conservación de los

arrecifes de coral. Por ejemplo, se puede saber la diversidad genética de las poblaciones de coral, es decir, el número de colonias con distinto genotipo, así como de la población de microalgas simbiotas, ver el grado de parentesco entre distintas poblaciones de coral, estudiar el microbioma, estudiar las enfermedades que afectan a los corales, o la reacción de los corales ante distintos escenarios de estrés como el incremento de la temperatura, enfermedades y reproducción, entre otras.

Independientemente de la aplicación, estas técnicas moleculares inician con la extracción del ADN, en el caso de los corales, esta extracción corresponde a todos los organismos que viven en asociación con el coral, desde el mismo coral, las algas simbiotas, hasta bacterias que se encuentran asociadas al tejido o mucus de estos organismos. Posteriormente, se realiza una codificación de las piezas y el orden en que lo conforman para cada uno de los organismos de interés (en este caso particular del coral). Para lograr esta caracterización o genotipificación en corales, primero es necesario la toma de una pequeña muestra de tejido de la colonia objetivo (Figura 3A), posteriormente se emplean una serie de procedimientos que incluyen la ruptura de los tejidos y células, con el fin de “liberar” el material genético agregando una serie de soluciones que ayudan a estabilizar y a proteger la integridad de las moléculas de ADN (Figura 3B-C), (Fig. 3D) y la evaluación de su calidad por medio de técnicas como la electroforesis (Figura 3E-F). Finalmente, los extractos de ADN son enviados a un laboratorio especializado en donde se determina por medio de marcadores específicos, la composición y orden de cada una de las piezas de la cadena de ADN.



Figura 3: Extracción de ADN en corales. A) Recolecta de un pequeño fragmento con tejido de coral en los viveros de *Acropora cervicornis*. B) Inicio del proceso de ruptura de tejido. C) Inspección de la muestra. D) Extracto final. E-F) detección de ADN mediante electroforesis. Créditos fotográficos: Marvin del Cid

Indiana Jones y la última cruzada

En la creencia cristiana, El Santo Grial, la copa en donde Cristo bebió “el vino” antes de ser crucificado para la salvación de los pecados de la humanidad, ha sido fuente de inspiración generando diversas leyendas y mitos antiguos, así como recientes. Quizás una de las referencias más populares (al menos para la corte de edad de los nacidos entre 1980 y el 1995), sea la película Indiana Jones y la última cruzada, en donde Indiana Jones, un Profesor de Historia, arqueólogo y aventurero, se enfrenta a una serie de adversidades y a un ejército Nazi, para conseguir el Santo Grial y evitar que Hitler se apodere de él, pues este se cree que posee el secreto de la vida eterna. En este y muchos sentidos, el Santo Grial se ha empleado como símbolo de una búsqueda de un objeto valioso pero inalcanzable.

En la conservación de arrecifes, la identificación y selección de genotipos que sean resistentes a diferentes estresores, por ejemplo, a las altas temperaturas, es un objetivo anhelado y perseguido (Baums *et al.* 2005; Baums 2008; Drury *et al.* 2019). Similar a la búsqueda de un Santo Grial, encontrar a un coral resistente o “super coral” mediante la selección de genotipos, se ha vuelto el quehacer principal de muchos. El principio de la selección de genotipos resulta relativamente sencillo. Por ejemplo, existen corales que resisten a la temperatura, y otros que presentan blanqueamiento que resulta en la muerte de las colonias (West and Salm 2003), por lo que se le da “prioridad” a reproducir y cultivar colonias de coral que muestren resistencia.

El primer problema natural de este principio es asumir que la resistencia es debida enteramente al coral, es decir,

asumir al coral como un individuo particular, sin considerar que en realidad se trata de un organismo que vive en asociación con una serie de microorganismos que trabajan en conjunto y cuya delicada interacción es fundamental para el funcionamiento y supervivencia del hospedero. A este conjunto de organismos se le conoce como el microbioma, lo conforman además de las microalgas simbiotes, una serie de bacterias, protozoarios, hongos, etc. Por lo que la búsqueda de este santo grial sólo tendría sentido si se considera al coral como esta unidad, es decir considerar al coral como un meta organismo.

Por otra parte, la selección de genotipos que sean resistentes a las temperaturas altas, no significa necesariamente, que sean resistentes a otras presiones como a las enfermedades actuales o futuras. Es decir, el desempeño de un individuo es individual, pero no invariada. De acuerdo con la evolución, la selección natural actual sobre diferentes atributos de un individuo. En otras palabras, no tiene sentido buscar un meta organismo (coral) que sea resistente a altas temperaturas, pues esto no necesariamente es sinónimo de un alto desempeño por parte de este super coral, ya que naturalmente habrá otras presiones que actúen sobre diversos atributos de ese meta organismo, que determinarán si es seleccionado o no. Obviando las dos posturas anteriores, el tercer problema surge al asumir que de conseguir un organismo resistente este pasará de forma automática esta resistencia a su progenie. Es decir, supongamos que conseguimos al santo grial, ¿cómo nos aseguramos de que lo que introducimos, modificamos, manipulamos en ese organismo para que sea santo y grial?, ¿cómo logramos que esta resistencia termine siendo pasada a

su progenie? Y de ser pasado, ¿cómo nos aseguramos de que ese atributo sea seleccionado de manera que el atributo deseado, termine fijándose en la población?, ¿son siempre los genes que dan ventaja los que se fijan en la población? si es así, cómo explicamos la presencia de genes letales que activan el cáncer o la leucemia en poblaciones humanas.

La eugenesia, es el principio que aboga por el mejoramiento de los rasgos hereditarios no solo físicos sino también intelectuales, analógicamente a la “mejora” de otros organismos como caballos o perros, mediante el control de los entrecruzamientos. En la película GATTACA, la ingeniería genética no solo es empleada para conocer con exactitud el ADN de un recién nacido, saber si es propenso a enfermedades, adicciones o hasta su tiempo de vida, sino que además es empleada para seleccionar los mejores genes pudiendo escoger las características físicas e intelectuales del no nacido.

GATTACA invita a cuestionar ética, moral y biológicamente a la selección artificial; ¿hasta qué punto se considera adecuado el empleo de estas herramientas?, ¿hasta qué punto la selección artificial determina en el caso del protagonista de la película su destino?

Similar a lo que sucede en GATTACA, la selección de genotipos en corales debería invitar a la reflexión, y a generar una discusión respecto a la búsqueda del “super coral” mediante la selección de genotipos específicos como la panacea de la conservación de los arrecifes, o a la conservación de la diversidad como fuente y preservación de pozas genéticas que permitan la selección y diversificación adaptativa

de las poblaciones existentes.

Conclusión

Los arrecifes de coral han existido en el planeta por millones de años; se estima la aparición de los corales hace 700 millones de años, hace 3500 veces el tiempo en el que apareció el ser humano, quienes surgieron hace apenas 200 mil años. Sin embargo, diversos autores señalan que la condición de estos ecosistemas se ha visto seriamente afectada, sobre todo a partir de la revolución industrial, evidenciando a los hábitos de producción y de consumo de la humanidad como el principal causante de este deterioro. Lo cierto es que los arrecifes de coral han dejado de ser lo que eran y este cambio se ha producido en una escala temporal relativamente corta.

No se puede seguir viendo a la restauración como la panacea que salvará a los corales, si bien es una actividad loable, no puede ser la única solución que podemos implementar ante la situación actual de los arrecifes de coral. Este planteamiento naturalmente lleva a repensar la forma en la que se ha abordado el problema, así como las soluciones propuestas. Los autores de este trabajo creemos que es importante siempre y cuando se persigan objetivos específicos y a largo plazo, se empleen herramientas y diseños que permitan ver el efecto de las intervenciones realizadas. Es indudable que cada uno de estos esfuerzos de restauración plantean un escenario y oportunidad única de estudio para responder preguntas elementales que nos ayuden a entender las dinámicas en los sitios de restauración y a realizar mejores prácticas.

El problema de la condición actual de los arrecifes es multidimensional

y sucede a escalas globales, por lo cual, la solución no puede ser tan simple como reproducir corales y plantarlos en arrecifes degradados, requiere un replanteamiento de los hábitos globales de producción; como bien decían nuestros abuelos “a grandes problemas grandes soluciones”. Esta es una batalla que se debe pelear en diferentes trincheras a nivel global y a nivel personal, desde la investigación científica, desde las donaciones económicas, desde nuestros cambios de consumo. Pero, sobre todo, lo más importante es estar conscientes de cada acto de nuestras vidas por muy pequeño que parezca, como en el momento en el que nos despertamos por la mañana y encendemos la luz, el desayuno que nos comemos, el trayecto al trabajo, etc. posee un efecto en el ambiente que nos rodea y a una explotación o contaminación de los recursos naturales de los cuales dependemos.

Agradecimientos

Este artículo de divulgación surge como un producto generado a partir de una serie de talleres y capacitaciones financiadas por el proyecto MONITOREA, cuyos fondos provienen de la Embajada Francesa en República Dominicana. Agradecemos la coordinación de Someira Zambrano para la organización e impartición de estos talleres. Asimismo, agradecemos a la Dra. Natalia Carabantes por su apoyo en la parte práctica del taller de extracción de ADN de corales impartido por la Fundación Dominicana de Estudios Marinos (FUNDEMAR). Agradecemos a Marvin del Cid por el aporte del material fotográfico y a todo el EQUIPO DE FUNDEMAR para la recolecta y procesamiento de muestras de ADN.

Referencias

- [1] Baums IB (2008) A restoration genetics guide for coral reef conservation. *Mol Ecol* 17:2796–2811
- [2] BAUMS IB, MILLER MW, HELLBERG ME (2005) Regionally isolated populations of an imperiled Caribbean coral, *Acropora palmata*. *Mol Ecol* 14:1377–1390
- [3] Bayraktarov E, Stewart-Sinclair PJ, Brisbane S, Boström-Einarsson L, Saunders MI, Lovelock CE, Possingham HP, Mumby PJ, Wilson KA (2019) Motivations, success, and cost of coral reef restoration. *Restor Ecol* 27:981–991
- [4] Boström-Einarsson L, Babcock RC, Bayraktarov E, Ceccarelli D, Cook N, Ferse SCA, Hancock B, Harrison P, Hein M, Shaver E, Smith A, Suggett D, Stewart-Sinclair PJ, Vardi T, McLeod IM (2020) Coral restoration – A systematic review of current methods, successes, failures and future directions. *PLoS One* 15:e0226631
- [5] Drury C, Greer JB, Baums I, Gintert B, Lirman D (2019) Clonal diversity impacts coral cover in *Acropora cervicornis* thickets: Potential relationships between density, growth, and polymorphisms. *Ecol Evol* 9:4518–4531
- [6] Van Oppen MJH, Gates RD (2006) Conservation genetics and the resilience of reef-building corals. *Mol Ecol* 15:3863–83
- [7] West JM, Salm R V. (2003) Resistance and Resilience to Coral Bleaching: Implications for Coral Reef Conservation and Management. *Conservation Biology* 17:956–967