



Universidad
Complutense
Madrid



Universidad
Rey Juan Carlos



ANÁLISIS DE LA RESTAURACIÓN DE LOS CORALES EN EL CARIBE

Máster Universitario en Restauración de Ecosistemas

Presentado por:

D^a EMMA RODRÍGUEZ CUESTA

Tutor académico:

Dr. JUAN JUNOY

En Madrid a 28 de Septiembre de 2021

Índice

Resumen.....	3
Abstract	3
Introducción	5
Características de los corales	8
Métodos de restauración.....	9
Descripción del medio natural	10
La restauración ecológica y su relación con los servicios ecosistémicos	12
Objetivos	13
Materiales y métodos	14
Limitaciones del estudio.....	17
Resultados	19
Datos generales.....	19
Variables de interés.....	21
Mortalidad.....	21
Crecimiento	22
Métodos de restauración.....	23
Discusión	24
Conclusión	28
Bibliografía	29
Anexos	37
Anexo 1.....	37
Anexo 2.....	37
Anexo 3.....	40
Anexo 4.....	41

Resumen

Los ecosistemas coralinos están considerados como unos de los más diversos y productivos que existen, albergando más del 30 % de las especies marinas conocidas. Sin embargo, en las últimas décadas los arrecifes del Caribe han sufrido una regresión de hasta un 95 %, causado en gran medida por la influencia antrópica que ha supuesto la sobreexplotación pesquera, el cambio climático o la descarga de aguas residuales al medio marino. Dado su incalculable valor ecológico y la multitud de servicios ecosistémicos que ofrece a la sociedad, se hace necesario establecer programas de restauración ecológica que amortigüen la pérdida experimentada hasta ahora.

No obstante, las inversiones para este tipo de proyectos son en la mayoría de los casos limitadas. Por este motivo, en este trabajo se lleva a cabo un análisis de la eficacia de algunas experiencias reportadas en el Caribe en las que se han utilizado técnicas de guardería y trasplante de corales. Los resultados obtenidos arrojan que no existen diferencias significativas entre dichos métodos. En las experiencias reportadas, se da una supervivencia general de los corales en un 40.9 % con p valor < 0.001 para ambas técnicas. En cuanto al crecimiento, se constata que las tasas extraídas son similares respecto de las reportadas por distintos autores en el medio natural. Dicho de otro modo, desde una perspectiva económica y de manejo, resultaría más eficaz promover acciones que contemplaran el trasplante directo al medio natural a restaurar. En este marco, las guarderías de coral podrían adquirir un papel fundamental concentrando sus esfuerzos en la investigación de la adaptación de los corales ante el cambio climático global.

Palabras clave: ecosistemas coralinos, restauración, trasplante, guardería, cambio climático.

Abstract

Coral ecosystems are considered one of the most diverse and productive ecosystems in the world, hosting more than 30% of known marine species. In recent decades, however, Caribbean reefs have lost over 95% of their coral cover, caused by anthropic activities such as overfishing, climate change or the discharge of wastewater into the marine environment. Given its outstanding ecological value and the multitude of ecosystem services the coral reefs offer to society, it is necessary to implement ecological restoration programs to slow further decline.

However, the investment for such projects are, in most cases, limited. For this reason, this paper analyses the effectiveness of some studies conducted in the Caribbean Sea using nursery and outplanting techniques. The results obtained show that there are no significant differences between these techniques. In the reported studies, there is a general survival of the corals of 40.9% (p value 0.001). In terms of growth rates, the results are similar with respect to the rates of growth reported by other authors in natural conditions. In other words, from an economic and management perspective, it is more effective to promote actions that consider direct transplantation to the natural environment to be restored. In this context, greater focus on research on coral nurseries could play a key role in finding solutions for coral adaptation to global climate change.

Keywords: coral ecosystems, restoration, transplant, nursery, climate change.

Introducción

Los ecosistemas coralinos están considerados como unos de los más diversos y productivos que existen, albergando más del 30 % de las especies marinas conocidas en tan sólo un 0,2 % del área total de los océanos (Álvarez-Filip, 2015).

A su vez, los arrecifes coralinos proveen una serie de bienes y servicios ecosistémicos a la sociedad. Según Edwards y Gómez (2007), su gran valor ecológico radica en que cumplen varias funciones vitales, tanto para los océanos como para zonas terrestres cercanas. Protegen de la erosión en la franja litoral frente a eventos meteorológicos con alto poder destructivo, como pueden ser tormentas, temporales, ciclones o *tsunamis*. Otra de sus aportaciones es la fijación del CO₂ atmosférico, que los corales utilizan para formar estructuras esqueléticas calcáreas, ayudando a reducir las consecuencias del efecto invernadero y, por extensión, del cambio climático. Asimismo, contribuye a mejorar el sector económico local, suponiendo una importante fuente de ingresos para sectores como el turismo o el farmacéutico. Por último, y no menos importante, proporciona un entorno idóneo de abundancia alimenticia fomentando la complejidad de la red trófica característica de este ecosistema, que es a su vez explotado por el sector de la pesca (Alva-Basurto y Arias-González, 2015).

Sin embargo, los ecosistemas coralinos se han visto reducidos drásticamente a escala mundial. Como ejemplo, merece la pena citar la pérdida de coral efectiva sufrida en el mar Caribe desde los años 70 del pasado siglo, donde en algunas zonas se han visto mermadas las poblaciones de corales hasta en un 90 % (Jackson et al., 2014), coincidiendo con eventos de mortalidad masiva asociados, según un informe publicado por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), a patógenos y especies invasoras (Wilkinson y Buddemeier, 1994). Otros factores que han contribuido a la regresión de los arrecifes son los huracanes, la variación de los patrones meteorológicos El Niño - Oscilación del Sur (ENSO), así como la modificación de los parámetros fisicoquímicos inducidos por el cambio climático. Desde una perspectiva antrópica, es importante destacar la influencia de la sobreexplotación pesquera y las descargas de aguas residuales provenientes de zonas urbanizadas del litoral costero. Asimismo, se debe mencionar la aportación de nutrientes y sedimentos recibidos por escorrentía de las zonas terrestres, contribuyendo a la eutrofización y a la turbidez y, en consecuencia, a la reducción de la calidad de las aguas por la que los corales se ven afectados (Mercado-Molina et al., 2013). Los arrecifes coralinos están sometidos a tan altas presiones que, a no ser que se tomen medidas inminentes, se predice que más de la mitad de ellos estarán severamente degradados en los próximos 50 años (Wilkinson y Souter, 2008). Dada su gran

importancia ecológica, económica y social, se han establecido programas en todo el mundo para recuperar la pérdida de cobertura coralina. Para ello, se han propuesto en diversos países acciones de restauración ecológica definidos por la *Society for Ecological Restoration* (SER de sus siglas en inglés) como “el proceso de ayudar a la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido”. Sin embargo, el éxito de las acciones propuestas se puede ver influenciado por la dificultad que supone lograr la obtención de un arrecife de coral totalmente funcional mediante la restauración ecológica. Como ejemplo de éxito se puede mencionar el caso de la restauración del arrecife de coral de la Isla Maiden en Antigua y Barbuda (SER, 2004), donde en 2003 se realizó la instalación de 5000 estructuras de moldes esféricos o *reef balls* utilizando las especies *Acropora palmata* (Lamarck, 1816) y *Acropora cerviconis* (Lamarck, 1816). Gracias al enfoque integrado que se aplicó en el diseño, en la actualidad el arrecife es completamente funcional y autosostenible.

Una limitación al conocimiento es el crecimiento lento de las especies de corales que se utilizan en la actualidad en la mayoría de las acciones de recuperación en el Caribe. De manera general, se emplean individuos pertenecientes al orden Scleractinia, también conocidos como corales pétreos o duros que suelen habitar en aguas cercanas a la superficie. Tienen un ciclo de vida que se da exclusivamente en estado pólipo y presentan un esqueleto calcáreo relativamente frágil. Uno de los géneros de uso más extendido correspondería a *Acropora*, cuyos representantes más notables son *Acropora palmata* y *Acropora cerviconis*,. *Acropora palmata* es una de las especies que presenta las mayores tasas de crecimiento, con valores crecimiento lineal de 6.8 cm al año (Bak, 1983; Padilla y Lara, 1996).

Otro factor a tener en cuenta es la pérdida de variabilidad genética. Aunque los corales se pueden reproducir sexual y asexualmente, la mayoría de proyectos que se llevan a cabo en la actualidad se hacen mediante reproducción asexual, utilizando fragmentos (*ramets*) pertenecientes a distintas poblaciones (*genets*), generalmente de colonias próximas a la zona a restaurar con objeto de facilitar la aclimatación de los corales. Sin embargo, excluir la alternativa de la reproducción sexual reduce la diversidad genética, lo que hace a las colonias restauradas más vulnerables ante enfermedades. También se limita la posibilidad de establecer comunidades adaptadas a los efectos del cambio climático y al “blanqueamiento del coral”.

Adicionalmente, es interesante mencionar la falta de recursos destinados a las actividades de restauración en general, y en particular las que se desarrollan en el medio marino, por ser especialmente costosas. Además de requerir personas que estén capacitadas para poder realizar inmersiones con equipo de buceo autónomo, se debe sumar el coste asociado que llevan

éstas en cuanto al equipo utilizado. También es necesario asignar al frente del proyecto personas con la cualificación necesaria para poder llevar a cabo las acciones con éxito. El precio se encarece aún más cuando se tienen en cuenta las visitas necesarias para realizar los mantenimientos correspondientes en las zonas restauradas. Como se ha comentado anteriormente, el crecimiento del coral es bajo en comparación con otros tipos de restauraciones en las que se utilizan, por ejemplo, especies arbóreas. Por consiguiente, requiere un seguimiento más exhaustivo, lo que en definitiva aumenta el número de visitas realizadas, especialmente en los primeros meses del proyecto. En el caso en el que no se realice un trasplante directo al medio, se le deben sumar las inversiones necesarias relativas al criadero al presupuesto, haciendo más inaccesible este tipo de proyectos, especialmente a países con recursos limitados.

Otra consecuencia que deriva de la limitación de recursos económicos es el grado de concienciación social en los distintos países en los que existen los arrecifes, especialmente en los temas relacionados con la conservación de sistemas naturales. Autores como Bowden-Kerby (2008) o Goreau y Hilbertz (2005) consideran la integración de los elementos que componen la perspectiva socioeconómica un factor clave para el éxito en la restauración de corales. También Yeemin et al. ya resaltaban en 2006 la importancia de la concienciación social, destacándola como uno de los factores más influyentes en el éxito de un proyecto de conservación. Sostienen que gracias al apoyo social, se aumenta la eficacia de las acciones y a la larga se reduce la destrucción de ecosistemas por factores antrópicos.

Una iniciativa interesante es la propuesta por Colombia, donde se han establecido directrices para la conservación de los arrecifes con la Ley 99 de 1993, cuyo resultado fue la creación del Sistema Nacional Ambiental (SINA), incluido dentro de la Unidad Administrativa Especial del Sistema de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN). También en 1997 se constituyó la Sociedad Colombiana para el Estudio y Conservación de los Arrecifes Coralinos (SCCAR), contando con el Sistema Nacional de Monitoreo de Arrecifes Coralinos (SIMAC) (Díaz et al., 2000). Otro ejemplo se encuentra en Estados Unidos, que cuenta con la Asociación de Protección de los Arrecifes de Coral en el Caribe (CCRP, por sus siglas en inglés de *Caribbean Coral Reef Partnership*). Se trata de una iniciativa común entre distintas agencias con el objetivo de preservar las formaciones coralinas de Puerto Rico y las Islas Vírgenes en Estados Unidos. El fin de la asociación es facilitar las acciones llevadas a cabo entre las agencias y coordinar estrategias con organismos oficiales relacionadas con la protección de los arrecifes de coral del Caribe (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, 2017). También cabe destacar el papel de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en

inglés de *National Oceanic and Atmospheric Administration*) con el “Plan de Manejo Estratégico de los Arrecifes de Coral de Puerto Rico” entre otros, cuyo fin es promover la conservación de las formaciones coralinas (Ortiz-Sotomayor, 2014).

Características de los corales

Los corales son invertebrados marinos caracterizados por poseer un esqueleto protector de carbonato de calcio. Pertenecen al Filo de los Cnidarios y dentro de ellos a la Clase Antozoa, y poseen un grado de organización tisular. Se trata de pólipos que carecen de la fase de medusa. Son exclusivamente marinos y pueden asentarse en colonias o de forma solitaria. Dado que se tratan de organismos sésiles, viven adheridos a un sustrato duro por el extremo opuesto a la boca. Poseen una faringe o estomodeo que se abre a la cavidad gastrovascular, la cual está dividida radialmente en compartimentos por medio de tabiques completos o incompletos (mesenterios), que son típicos de cada grupo de corales. Segregan esqueletos externos masivos de carbonato cálcico que pueden formar grandes arrecifes (Sheppard et al., 2018).

Estos animales se reproducen sexual y asexualmente (Figura 1). Las larvas de coral, llamadas plánulas, se fijan al sustrato dando paso al pólipo. El pólipo posee tentáculos que les sirven para capturar su alimento con células urticantes especializadas llamadas nematocistos, que usan como defensa o para cazar. El pólipo crece convirtiéndose en un coralito. La acreción de coralitos forma un coral, que posteriormente, da lugar a colonias y arrecifes de coral de diferentes especies. Los corales se alimentan principalmente de plancton (Ávila-Morales y Domínguez-Domínguez, 2020).

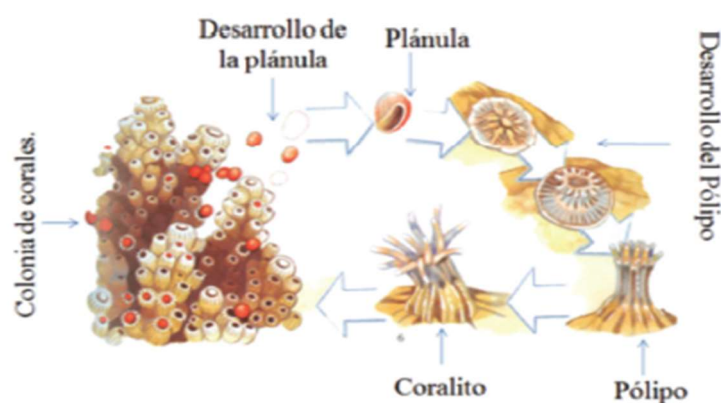


Figura 1. Representación del ciclo de reproducción de los corales hermatípicos. Fuente: Ávila-Morales y Domínguez-Domínguez (2020).

Cabe destacar que los corales hermatípicos son los que se caracterizan por contener zooxantelas simbióticas. En determinadas ocasiones en las que las condiciones fisicoquímicas

del ambiente cambian ligeramente esta asociación puede romperse. Los corales son especialmente sensibles a modificaciones de turbidez en el agua, limitando la capacidad fotosintética de las zooxantelas y, por tanto, la acreción del esqueleto calcáreo (Romero-Hernández, 2018). Esta simbiosis puede verse afectada haciendo que las zooxantelas abandonen los corales produciendo el blanqueamiento del coral y su muerte.

Aunque pueden llegar a vivir a grandes profundidades, los corales que forman los arrecifes en el Caribe viven típicamente entre 1.5 a 25 metros de profundidad (Sheppard et al., 2018), lo que garantiza la llegada de radiación solar necesaria para que las zooxantelas simbióticas de los corales puedan realizar la fotosíntesis. Por este motivo, los corales se ven afectados enormemente por eventos que eleven la turbidez del agua como pueden ser eventos de precipitación extrema, oleaje intenso o huracanes.

Métodos de restauración

Los métodos de restauración de corales se pueden clasificar de distintas formas, basadas en el tipo de reproducción, lugar de cría y estructuras utilizadas.

- Reproducción sexual: implica que los gametos de coral se liberen en la columna de agua. Una vez realizada la fecundación de gametos, las larvas resultantes crean colonias de coral cuya característica principal es la variabilidad genética.
- Reproducción asexual de corales: implica la obtención de partes o fragmentos de los corales ya sea por búsqueda de fragmentos de oportunidad o de colonias donadoras. Una vez obtenidos, pueden realizarse las siguientes acciones:

- el trasplante directamente a arrecifes de coral degradados, cuya técnica en inglés es denominada *outplanting*.
- fomentar el crecimiento de estos fragmentos mediante la cría en guarderías o también denominados viveros. Este método se denomina *nursery* en inglés. En el caso que las estructuras donde se depositen los corales se encuentren ubicadas en el medio natural donde se va a trasplantar una vez alcanzado el tamaño óptimo, se puede hablar de guarderías *in situ*. En la Figura 2 se muestran las estructuras más populares.

Por el contrario, si este proceso se realiza en instalaciones alejadas del lugar objeto de restauración, se hablaría de guarderías *ex situ*. El objetivo de este método es que los corales alcancen un tamaño óptimo que propicie la aclimatación, aumentando en consecuencia, la probabilidad de supervivencia (Rinkevich, 2000; Shafir et al., 2010). Asimismo, garantiza un medio seguro en el

que se reduce la competencia con otros organismos y depredadores, proporcionando la producción masiva de corales en un entorno controlado (Pizarro et al., 2014).

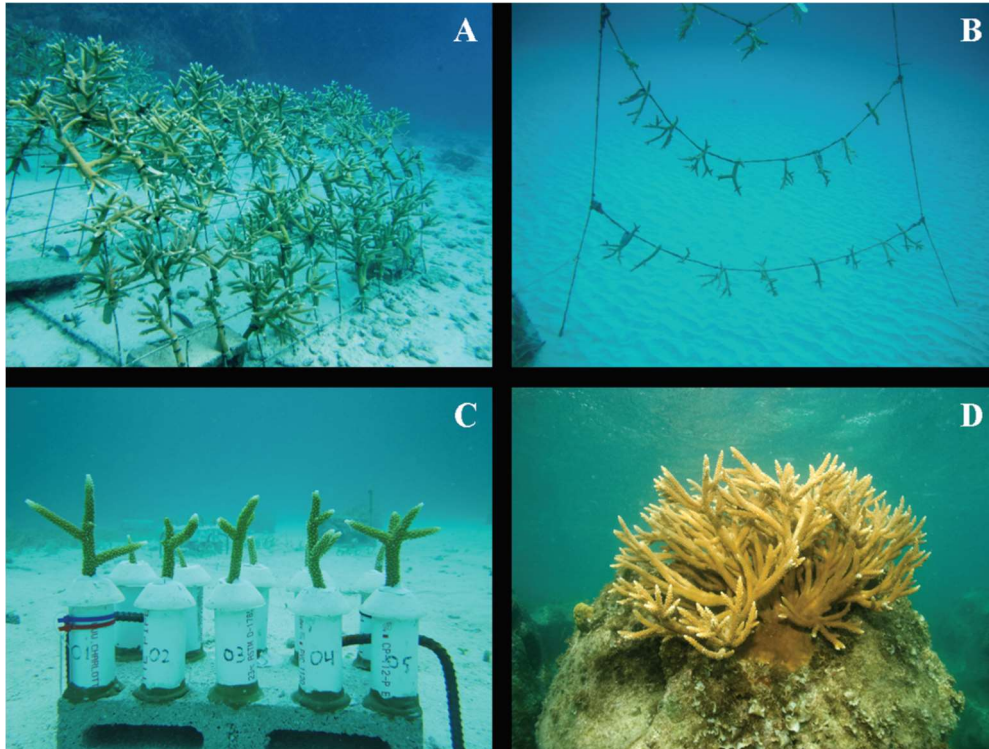


Figura 2. Estructuras utilizadas en la restauración de corales. (A) Estructura en marcos, (B) en línea o tendadero, (C) de bloques y (D) reef balls. Fuente: (Pineda Martínez (2021).

Descripción del medio natural

El Caribe es una región conformada por el mar Caribe, sus islas y las costas que lo rodean. Se trata de una cuenca suboceánica del Atlántico en la región tropical, ubicado al sureste del Golfo de México y al oeste del océano Atlántico, entre las latitudes 9 ° y 22 ° Norte y las longitudes 89 ° y 60 ° Oeste. Sus límites, según la Organización Hidrográfica Internacional (IHO, por sus siglas en inglés *International Hydrographic Organization*), son el Canal de Yucatán, Cuba y el Paso de los Vientos (estrecho situado entre las islas de Cuba y La Española) que conecta el Atlántico con el Caribe y las Antillas Menores (GeoEnciclopedia, 2021).

El clima se ve influenciado principalmente por la corriente oceánica del golfo de México (Figura 3). La temperatura media anual de la atmósfera es de 24 °C, con poca oscilación térmica, y las precipitaciones son, en general abundantes. Por ejemplo, uno de los países situados dentro de esta región, Cuba, tiene una temperatura media de 25 °C y una precipitación media anual de unos 1320 mm, donde más del 60 % de las precipitaciones se produce durante la estación lluviosa, que se extiende de mayo a octubre (Cuba Tiempo, 2021).



Figura 3. Interpretación de las corrientes marinas del Atlántico. Fuente: modificado de Fernández-López (2021)

Una característica a resaltar del clima de esta zona son los huracanes, que se dan entre los meses de junio a diciembre. Cada año se forman alrededor de nueve tormentas tropicales importantes que tienen probabilidad de evolucionar a huracanes, especialmente en verano. Entre los huracanes más destructivos de los últimos años se encuentran Irma (2017), María (2017) y Dorian (2019), todos ellos con velocidades superiores a 270 km/h, alcanzando los 350 km/h para el huracán Dorian. Todos fueron clasificados como categoría 5, la máxima en la escala Saffir-Simpson (Muñoz-Lima, 2020).

A continuación, se muestra el climograma que recoge los datos de los últimos 30 años del Caribe colombiano, el cual es representativo para el resto de países que conforman la región (Figura 4).

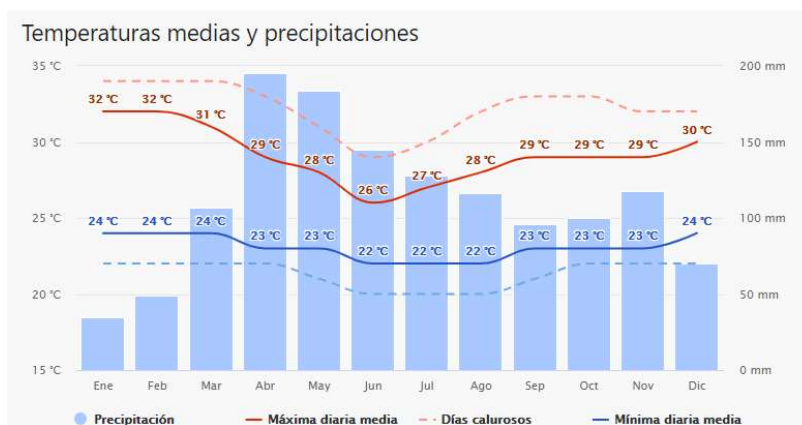


Figura 4. Climograma del Caribe Colombiano. Fuente: Meteoblue (2021)

Descripción del mar Caribe

El mar Caribe cuenta con una superficie aproximada de 2.7 millones de km² y una profundidad media de 2200 metros. El punto con mayor profundidad es la Fosa de las Caimán, alcanzando 7686 metros por debajo del nivel del mar (GeoEnciclopedia, 2021).

Cuenta con una salinidad que asciende a 36 Unidades Prácticas de Salinidad (UPS). La temporada de enero a mayo es la que registra mayor salinidad. La temperatura media registrada es de 27 °C con oscilaciones máximas de 3 °C a lo largo del año.

La restauración ecológica y su relación con los servicios ecosistémicos

Dado el elevado coste económico, técnico y humano de este tipo de restauraciones en comparación con otros métodos, es de vital importancia que los recursos invertidos sean empleados eficientemente con el fin de garantizar el éxito de las acciones acometidas. Con ello, se consigue obtener un ecosistema altamente funcional que provee de bienes y servicios a la sociedad. Una correcta gestión de los proyectos implica, en consecuencia, el compromiso de los actores locales y el mantenimiento y disfrute a largo plazo de los arrecifes de coral. Por ejemplo, ya en el 2009 se advertía en el informe de *“The Economics of Ecosystems and Biodiversity”* (TEEB, 2009) que dos de las cuatro prioridades establecidas, estaban relacionadas directa o indirectamente con los sistemas coralinos. Por un lado, se determinaba proteger los arrecifes de coral tropicales, que ofrecen los medios necesarios para la subsistencia de al menos 500 millones de personas y por otro, garantizar la explotación pesquera mundial de una forma sostenible, dado que actualmente es una actividad con bajo rendimiento y en peligro de agotarse. Como instrumento para alcanzar dicho objetivo nombraban, entre otras acciones, invertir en infraestructura ecológica.

No obstante, como recomendación inicial se recalca la importancia de la prevención como la alternativa más eficaz en términos económicos y ecológicos. Se proponía que las inversiones debían ir encaminadas a mantener y conservar los sistemas naturales siempre que sea posible, ya que en la gran mayoría de los casos es más económico que intentar restaurar los ecosistemas dañados. Sin embargo, en las ocasiones en las que el ecosistema se ha visto profundamente dañado, se hace necesario acometer actividades de restauración ecológica. En esos casos, el TEEB señala que *“las ventajas sociales que se derivan de la restauración pueden ser varias veces superiores a los costes que conllevan”*. Estas afirmaciones se sustentan en las valoraciones de servicios ecosistémicos realizadas en términos monetarios. Así, los arrecifes de coral prestaban una variedad de servicios ecosistémicos, que pasaban por:

- la gestión de riesgos (hasta 189.000 dólares de EE. UU. por hectárea y año).
- los materiales genéticos y la bioprospección (hasta 57.000 dólares de EE. UU. por hectárea y año).
- la pesca (hasta 3.818 dólares de EE. UU. por hectárea y año).
- el turismo (hasta 1 millón dólares de EE. UU. por hectárea y año).

Por todos los motivos expuestos anteriormente, se pretende mediante este estudio proporcionar una visión general de las técnicas con mayor éxito desde un punto de vista de crecimiento y mortalidad mediante el reporte de experiencias realizadas en el mar del Caribe. Para ello, se ha realizado un análisis de la información compilada en este campo con el fin de mostrar las experiencias que han reportado los mejores resultados para que sirvan de guía a cualquier parte interesada en futuros planes de restauración.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es realizar una valoración de la eficacia de las técnicas más representativas de restauración de coral mediante propagación asexual.

Como objetivos secundarios se proponen: (1) realizar un análisis respecto del crecimiento y mortalidad de los corales restaurados así como establecer la repercusión que tienen en estos parámetros las técnicas de guardería o *nursery* vs trasplante o *outplanting* y (2) valorar la repercusión en la calidad general de los estudios respecto de los países de origen.

Materiales y métodos

Para alcanzar el objetivo principal y los secundarios propuestos en este trabajo, se ha realizado un análisis de la literatura científica existente relacionada con la restauración de corales en el Caribe.

Como punto de partida, se ejecutó una búsqueda de artículos que contemplaran proyectos de restauración de corales llevados a cabo en el mar Caribe. Dado que existen países hispano y angloparlantes en el Caribe, se tuvieron en cuenta trabajos publicados en español e inglés, en concreto entre los años 2011 a 2021. La extracción de información se hizo a través de los buscadores que proporcionan fuentes de información fiables, *Web of Science* y *Google Academic*. Se determinaron palabras clave para el rastreo y búsqueda de información, que en este caso fueron: Coral, restauración y Caribe. En los sitios web que ofrecían búsqueda avanzada como *Web of Science*, se aplicó el siguiente *booleano*:

Coral AND restaura AND Carib**

Posteriormente, se ejecutó una primera selección en base a los títulos. En esta parte, se descartaron aquellos trabajos que no describieran específicamente los fines perseguidos en este trabajo. Una vez realizada esta clasificación, se hizo un cribado mediante la lectura de los resúmenes o *abstracts* donde se describe, de manera general, el objetivo de los trabajos y los resultados obtenidos. Esta fase redujo sustancialmente la cantidad de trabajos a revisar, acotando el número de artículos de 2099 artículos a 90.

Finalmente, se concluyó la clasificación mediante la lectura del resto de artículos en profundidad, prestando especial atención a las secciones de materiales y métodos así como a la de resultados. En esta última fase, se obtuvieron 17 artículos finales para la realización del análisis estadístico (Tabla 1).

Tabla 1. Relación de los estudios utilizados para el análisis.

Referencia	Lugar	Enfoque	Contexto	Especie	Objetivo	Peculiaridad	Instrumentos
Casas-Figueroa, D. C. (2017)	Isla Fuerte – Bolívar - Colombia	Técnicas de restauración	Crecimiento y supervivencia	AP	Crecimiento volumen	N // O	Galletas de cemento // Cuerdas
García-Rueda, A. L. (2013)	Parque Nacional Natural de Tayrona Bahía de Gayraca - Colombia	Técnicas de restauración	Crecimiento y supervivencia	AP // MC	Crecimiento volumen	O	Estructuras de PVC y galletas de cemento
Lohr, K. E & Patterson, J. T. (2017)	Tavernier, Florida	Genotípica	Respuesta a estresores en general	AC	Respuesta a estresores por genotipos	O	Monofilamentos y arandelas de aluminio
Lohr, K. E et al. (2017)	Cayman Islands	Aclimatación	Crecimiento y supervivencia	AC	Crecimiento longitudinal	O	<i>Nails and cables</i>
Lohr, K. E et al. (2020)	Florida Keys National Marine Sanctuary	Genotípica	Crecimiento y supervivencia	AC	Plasticidad fenotípica	O	<i>Clipped</i>
Lustic, C. et al. (2020)	Lower Florida Keys	Interacción interespecífica	Crecimiento y supervivencia	AC // MC // OF	Competición	O	<i>Nails and zipties</i>
O'Donnell, K. E. et al (2016)	Florida Keys	Técnicas de restauración	Blanqueamiento	AC	Crecimiento lineal	N	Discos de cemento con tubos PVC // Monofilamentos y arandelas de aluminio
O'Donnell, K. E. et al (2018)	Florida Keys	Simbiontes	Crecimiento y supervivencia	AC	Crecimiento simbiosis	O	<i>Nails and cables</i>
Oviedo, M. E. (2011)	Parque Nacional Natural de Tayrona Bahía de Gayraca, Chengue y Nenguange - Colombia	Genotípica	Crecimiento y supervivencia	AP	Supervivencia	O	Bridas
Pineda-Martínez, L. F. (2021)	Acuario y museo del mar El Rodadero. Santa Marta - Colombia	Técnicas de restauración	Crecimiento y supervivencia	AC // AP	Crecimiento longitudinal	N	Tipo árbol- líneas de nylon, tubos de fibra de vidrio y PVC, boyas
Pizarro, V. et al. (2012)	Parque Nacional Natural de Tayrona - Colombia	Especies	Crecimiento y supervivencia	AP // PP	Crecimiento volumen	N	Cuerdas a media agua ancladas
Rodríguez-Goenaga, L. S. (2018)	Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo (PNNCRSB) - Colombia	Genotípica	Crecimiento y supervivencia	AP	Crecimiento lineal	N // O	Tipo árbol- líneas de nylon, tubos de fibra de vidrio y PVC, boyas
Schopmeyer, S. A. et al. (2017)	Broward // Miami Dade // Middle Keys // Lower Keys // Dry Tortugas // Puerto Rico	Genotípica	Crecimiento y supervivencia	AC	Éxito según subregiones	N // O	Cement blocks
Smith, K. M et al. (2019)	Florida Keys	Especies	Blanqueamiento	PA // SS	Respuesta al blanqueamiento	O	Marco PVC 50x50
Van Woesik, R. et al. (2020)	Broward-Miami // Dry Tortugas // Lower Keys // Marquesas // Middle Keys // Upper Keys	Subregiones	Crecimiento y supervivencia	AC	Éxito según subregiones	O	<i>Nail with cable ties // Epoxy</i>
Young, C. N. et al. (2012)	N/A	Técnicas de restauración	Crecimiento y supervivencia	A	N/A	N	Estructuras de metal
Zarza, E. et al. (2014)	Parque Nacional Natural Corales del Rosario y de San Bernardo, Caribe colombiano	Especies	Crecimiento y supervivencia	AC	Crecimiento longitudinal	N // O	Tendedero

A: *Acropora* sp.; AC: *Acropora cervicornis*; AP: *Acropora palmata*; MC: *Montastraea cavernosa*; PP: *Porites porites*; SS: *Siderastrea siderea*; OF: *Orbicella faveolata*; N: Nursery; O: Outplanting.

Después, se codificó la información en una base de datos utilizando una hoja de cálculo (Anexo 1) donde se volcaron los datos de creación de los artículos y las variables relacionadas con la mortalidad y el crecimiento de los proyectos de restauración de coral. Se realizó una subdivisión de los artículos que contemplaran las técnicas de restauración de guardería y trasplante así como el número de experiencias realizadas en cada uno de los trabajos con el fin de valorar la efectividad de ambos métodos. En el caso en que se diese esta diferenciación, el ID de artículo se parametrizó con el número identificativo asociado al estudio seguido de letras correlativas. Así, si un trabajo mostraba dos experiencias distintas en las que, en una se ha utilizado el método de guardería y en otra la de trasplante con 1 colonia cada una, se codificaría de la siguiente forma:



- 1: Campo ID.
- 2: Título del artículo.
- 3: Número: identifica al artículo, en este caso es el 4.
- 4: Letra: cuántas veces se ha reproducido el método o experiencia.

Donde “17” es el número asignado al trabajo, “a” correspondería a la técnica de guardería y “b” al trasplante.

Seguidamente, se homogeneizaron los datos de crecimiento y mortalidad con el fin de obtener resultados coherentes en el análisis estadístico, cuyo proceso está explicado en mayor detalle en el apartado “Limitaciones del estudio”. Para realizar la comparativa con las condiciones que se dan en el medio natural, se extrajeron datos de crecimiento y mortalidad de las distintas especies reportadas en este trabajo de artículos científicos independientes a este estudio. Se realizó la media de tres datos y se compararon con los resultados obtenidos en este análisis (Tabla 10). Las cifras se expresaron en % sobre la media para facilitar la comprensión y el tratamiento de datos posterior.

Una vez realizada la extracción y unificación de datos, se utilizó el *software* estadístico “R”. En esta fase, se utilizaron las distintas librerías y códigos reflejados en el Anexo 2. Se aplicó un modelo lineal mixto para ambas variables: crecimiento y mortalidad. Con ello, se pretendía garantizar la objetividad de los resultados aplicando el factor aleatorio y por consiguiente,

contrarrestando la diferencia de peso que tiene cada uno de los artículos en cuanto a los datos reportados a los que se refiere en el campo ID. En los modelos aplicados, se tuvo en cuenta el valor de significancia “*p*” y el grado de éxito de las restauraciones de coral mediante técnicas de reproducción asexual llevadas a cabo en el Caribe teniendo en cuenta los siguientes enfoques:

- El del crecimiento general respecto de la media reportada en la literatura científica.
- El de la mortalidad general respecto de la media reportada en la literatura científica.
- El de la diferencia entre las técnicas de guardería o *nursery* vs trasplante o *outplanting*.

Limitaciones del estudio

Una de las limitaciones detectadas en este estudio fue la alta dominancia de publicaciones de ciertos países, en concreto de Estados Unidos y Colombia, que cumplían los criterios de búsqueda iniciales. Si se contrasta con el total de países y dependencias administrativas cuyos territorios se encuentran dentro del mar del Caribe, se obtiene que tan sólo el 10 % están aquí representados. No obstante, se recabaron trabajos relacionados con el coral publicados en países distintos a los reportados en este estudio, aunque las perspectivas abarcaban temas no relacionados con la restauración como pueden ser el estado actual de los arrecifes, reproducción sexual, simbiosis con zooxantelas, estudios genéticos a nivel molecular, relaciones interespecíficas y enfoque socioeconómico entre otros. Al no incluirse este tipo de estudios en el marco de este análisis, la representación de otros países se vio reducida en esta fase de la investigación.

Se debe mencionar también el bajo número muestral utilizado para el análisis estadístico. La razón por la cual no se obtuvo una mayor cantidad de datos se debe a que, en general, las variables de crecimiento y mortalidad estaban relacionadas con estudios que (1) medían estos parámetros en colonias ya existentes, es decir, en arrecifes donde no se han realizado acciones de restauración y (2) aquellos que reportaban dichas variables modificando parámetros físicos, químicos o biológicos como pueden ser radiación solar, pH o exclusión de depredadores con mecanismos como jaulas desde una perspectiva experimental .

Otra barrera que se tuvo que afrontar fue la variabilidad de los datos relacionados con el crecimiento. Dado que las especies analizadas en este estudio no tienen la misma morfología y por ende el mismo desarrollo, las unidades de crecimiento reportadas fueron distintas, lo que hizo necesario adaptar los resultados reflejados en los estudios aplicando una homogeneización

de datos con el fin de facilitar el tratamiento de la información. Las unidades a las que se hace mención fueron las siguientes:

- Tasa de crecimiento lineal, típicamente expresado en mm o cm por unidad de tiempo, generalmente mes o año. Esta variable es utilizada para especies que crecen en altura y ramificadas, como puede ser *Acropora palmata*.
- Tasa de crecimiento del área, típicamente expresado en mm² o cm² por unidad de tiempo, generalmente mes o año. Esta variable es utilizada para especies que crecen siguiendo una tendencia eminentemente radial desde su eje, como por ejemplo *Siderastrea siderea* (Ellis y Solander, 1786).
- Tasa de crecimiento de volumen, típicamente expresado en mm³ o cm³ por unidad de tiempo, generalmente mes o año. Como ejemplo de este crecimiento se puede encontrar *Acropora cervicornis*.

Aunque ya ha sido descrito someramente con anterioridad, este problema se solventó realizando una búsqueda de literatura científica independiente a este estudio. De esta manera, se escogieron tres artículos distintos donde se reportara el crecimiento para cada una de las especies analizadas en este trabajo teniendo en cuenta las unidades de crecimiento detalladas en el párrafo anterior. Posteriormente, se calculó la media de los tres datos y se cruzó con los resultados extraídos en el análisis de este trabajo. La información obtenida fue expresada en % respecto de la media, donde un valor del 100 % suponía el mismo crecimiento que la media, valores menores se asociarían, consecuentemente a desarrollos inferiores en tanto que valores superiores al 100 % constatarían crecimientos superiores.

No se incluyeron en el cálculo valores que supusieran el doble (200 %) o más de los valores de referencia, siendo tratados para el análisis estadístico como *outliers*. Sin embargo, sí se tuvieron en cuenta aquellos resultados que reflejaban una tendencia negativa respecto de la media reportada. Las razones por las cuales el resultado puede ser negativo son las siguientes:

- El individuo no ha crecido lo suficiente con respecto a la media reportada.
- El individuo ha sufrido depredación. Por ejemplo, un depredador directo de los corales es el gusano de fuego (*Hermodice carunculata*) o el gasterópodo coralívoro *Coralliophila caribaea* (Rodríguez-Goenaga, 2018).
- El individuo ha sufrido rotura o fragmentación. Como ejemplo se pueden nombrar el efecto de eventos meteorológicos adversos como ciclones o la influencia de algunos peces herbívoros que con su acción, crean huecos para que las algas proliferen.

- Muerte del individuo por enfermedades como “banda blanca” y blanqueamiento.

No obstante, ninguno de los valores implicó un crecimiento negativo inferior al -200 %, por lo que no se determinó ningún *outlier* en este caso.

Por último, se detectó que no todos los estudios analizaban las dos variables principales, esto es crecimiento y mortalidad, indistintamente. En los casos en los que se constató que no se reportaban ambas, se tuvo en cuenta la variable que se describía y, en consecuencia, no se rechazó del análisis incluyéndose dentro de los cálculos pertinentes.

Resultados

Datos generales

La mayoría de las restauraciones realizadas en el Caribe estaban concentradas en Colombia y Florida. Así, de los 17 estudios analizados, 8 (47 %) corresponden a Florida (EE. UU.), 7 (41 %) a Colombia y 1 a Islas Caimán y Puerto Rico (EE. UU.) respectivamente (12 %), existiendo un gran sesgo en cuanto a publicaciones por país o divisiones administrativas.

A continuación, se muestra un mapa de las ubicaciones donde se llevaron a cabo los proyectos de restauración de corales que se han tenido en consideración para este estudio (Figura 5). En esta representación, se ha diferenciado entre los proyectos en los que se han utilizado técnicas relacionadas con la guardería (*nursery*) y trasplante (*outplanting*).

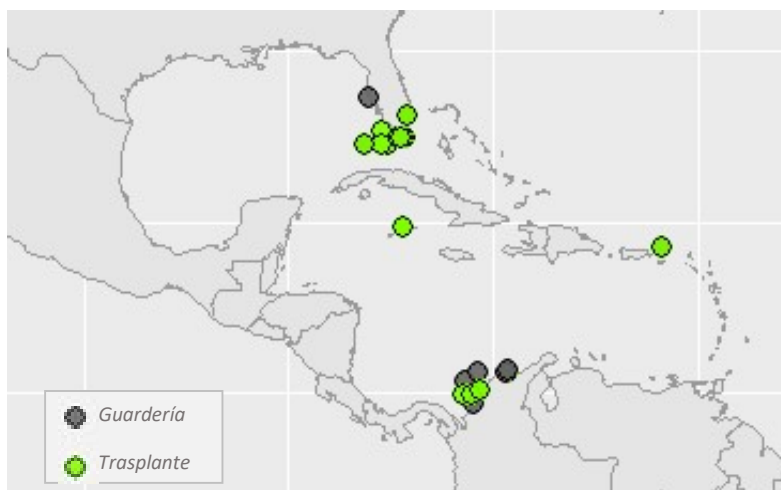


Figura 5. Mapa de las ubicaciones de los estudios utilizados.

Otro aspecto reportado en los proyectos de restauración fue la duración. Se constata que de forma general las experiencias tienen una duración inferior a dos años. Del total de

reportes realizados, en concreto 31, 15 (48 %) tienen una duración menor o igual a un año, 11 (36 %) entre uno y dos años y 5 (16 %) de más de dos años (Tabla 2). Destacar que las restauraciones con seguimientos de duración superior a dos años corresponden a experiencias reportadas por EE.UU.

Tabla 2. Duración de los estudios analizados.

Duración	Número de experiencias reportadas	% del total de experiencias
Hasta 1 año	15	48 %
Entre 1 año y 2 años	11	36 %
Más de 2 años	5	16 %

Asimismo, cabe destacar la variabilidad de especies y la frecuencia con las que se utilizaron. En la Tabla 3 se muestra la relación de especies y el número de veces utilizadas en los diferentes estudios. Por ejemplo, *Acropora cervicornis* fue la de uso más extendido, siendo utilizada en un total de 11 experiencias de las 24 analizadas. Sin embargo, especies como *Porites astreoides* (Lamarck, 1816), *Porites porites* (Pallas, 1766), *Siderastrea siderea* y *Orbicella faveolata* (Ellis y Solander, 1786) son utilizadas una sola vez, lo que supone un 4 % de las experiencias analizadas frente al 46 % de *Acropora cervicornis*. En consecuencia, se puede afirmar que hay una tendencia al uso de las especies *Acropora cervicornis* y *Acropora palmata* en restauraciones de coral en el Caribe.

Tabla 3. Frecuencia de utilización de las especies.

Especie	Número de experiencias reportadas	% del total de experiencias
<i>Acropora cervicornis</i>	11	46 %
<i>Acropora palmata</i>	7	30 %
<i>Montastraea cavernosa</i>	2	8 %
<i>Porites astreoides</i>	1	4 %
<i>Porites porites</i>	1	4 %
<i>Siderastrea siderea</i>	1	4 %
<i>Orbicella faveolata</i>	1	4 %

Respecto de la profundidad, mencionar que acorde a las características biológicas de los corales utilizados en las experiencias, los metros a los que se realizaron las restauraciones van desde los 2 hasta los 16 metros. La mayoría de acciones se concentran entre los 4 a 8 metros de profundidad. En la Tabla 4, se representan el número de actuaciones y el % asociado. Sin embargo, en muchos trabajos no se indica la profundidad exacta a la que se realizaron las restauraciones, lo que supone una tercera parte de los reportes.

Tabla 4. Profundidad de los estudios analizados.

Profundidad	Número de experiencias reportadas	% del total de experiencias
1	0	0
2	1	2
3	0	0
4	21	39
5	7	13
6	11	20
7	2	4
8	10	19
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	1	2
13	0	0
14	0	0
15	0	0
16	1	2
Total	54	100 %

Variables de interés

Para una mejor comprensión de los resultados, en el Anexo 3 se hace una breve descripción del significado de los estadísticos analizados en esta sección.

Mortalidad

En cuanto a los datos de interés, para la mortalidad se aplicó un modelo generador de patrones basado en la aleatorización de los datos, o comúnmente llamado modelo nulo. Con la aplicación de este código, ciertos datos se mantienen fijos mientras que otros no. Los resultados obtenidos sustentan que se da una supervivencia general de los corales en un 40.9 % con un alto nivel de significancia (p valor < 0.001). Teniendo en cuenta que de manera general se acepta que una $p < 0,05$ significa que la hipótesis nula es falsa, se puede decir que los datos obtenidos apoyan la fiabilidad de los resultados. En las Tablas 5 y 6 se muestran los valores obtenidos cuya interpretación se detalla en el Anexo 4:

Scaled residuals: muestra una distribución normal de los datos.

Tabla 5. Estadísticos de mortalidad

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.871	-0.421	-0.054	0.050	1.535

Fixed effects:

Tabla 6. Estadísticos de mortalidad

Estimate	Std Error	df	t value	p value
40.94	-0.421	34.174	8.87	2.19.10⁻¹⁰

A continuación, se reflejan los valores medios extraídos de la literatura en la Tabla 7.

Tabla 7. Valores medios de mortalidad de literatura científica independiente.

Especie	% Mortalidad	Estudios utilizados para el cálculo medio
<i>Acropora cervirconis</i>	25.67	Calle-Triviño et al. (2021); Drury et al. (2017); Garzón-Ferreira et al. (2004)
<i>Acropora palmata</i>	31.61	Hernández-Zárate et al. (2011); Highsmith et al. (1980); Miller (2014);
<i>Montastraea cavernosa</i>	48.73	Gómez-Soto y Rico-Buitrago (2006); López-Londoño et al. (2011)
<i>Porites astreoides</i>	38.00	Acosta-Santos y Martínez-Martínez (2005); Evans y Lasker (2013)
<i>Siderastrea siderea</i>	25.83	Irizarry-Soto y Weil (2009); Mantilla-Galindo (2015); Salazar-Salamanca (2007)
Media	33.97	

De esta manera se observa que los datos obtenidos en este estudio son similares a los tenidos en cuenta para calcular los valores medios, apoyando la tendencia de los resultados reportados en el análisis estadístico.

Crecimiento

Al aplicar el modelo nulo sobre los datos de crecimiento, se puede inferir que los valores registrados en este estudio son similares al propuesto como media general con una significancia alta (p valor < 0.005). Se acepta que una $p < 0,05$ significa que la hipótesis nula es falsa, por lo que los resultados obtenidos apoyan, de nuevo, la fiabilidad de los datos. En algunos casos puntuales, en concreto en el 6 %, la significancia es incluso superior al valor propuesto como media independiente en la literatura científica (Tablas 10, 11 y 12). En las tablas 8 y 9 se muestran los estadísticos obtenidos cuya interpretación se detalla en el Anexo 4:

Scaled residuals: muestra una distribución normal de los datos.

Tabla 8. Estadísticos crecimiento

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.402	-0.404	-0.073	0.293	2.723

Fixed effects:

Tabla 9. Estadísticos crecimiento

Estimate	Std. Error	df	t value	P value
56.11	-0.404	29.318	7.432	3.21.10⁻⁸

A continuación, se muestran en las Tablas 10, 11 y 12, los crecimientos medios calculados para este trabajo extraídos de literatura científica independiente al estudio. En la Tabla 10 se reporta la tasa de crecimiento lineal cuya unidad es cm.mes^{-1} , en la Tabla 11 la tasa de crecimiento de área en $\text{cm}^2.\text{mes}^{-1}$ y la tasa de crecimiento en volumen que representa el volumen de agua desplazada cuyas unidades son $\text{cm}^3.\text{mes}^{-1}$ (Tabla 12).

Tabla 10. Valores medios de crecimiento de literatura científica independiente.

Especie	TCL media (cm.mes^{-1})	Estudios utilizados para el cálculo medio
<i>Acropora cervicornis</i>	0.60	Calle-Triviño et al. (2021); Drury et al. (2017); Gladfelter et al. (1978)
<i>Acropora palmata</i>	1.67	Bak et al. (2009); Gladfelter et al. (1978); Padilla y Lara (1996)
<i>Montastraea cavernosa</i>	1.53	Chetumal et al (2009); Iztacala y California (2008); Manzello et al. (2015)
<i>Porites astreoides</i>	0.10	Elizalde-Rendón et al. (2010); Gladfelter et al. (1978); Manzello et al. (2015)

Tabla 11. Valores medios de crecimiento de literatura científica independiente.

Especie	TCA media ($\text{cm}^2.\text{mes}^{-1}$)	Estudios utilizados para el cálculo medio
<i>Montastraea cavernosa</i> *	29.49	Kelley et al. (2021); Page et al. (2018)
<i>Orbicella faveolata</i> *	89.52	Enzor et al. (2019); Page et al. (2018)

*Nota: se ha hecho el cálculo con dos datos.

Tabla 12. Valores medios de crecimiento de literatura científica independiente.

Especie	TCV media ($\text{cm}^3.\text{mes}^{-1}$)	Estudios utilizados para el cálculo medio
<i>Acropora cervicornis</i>	1.75	Becker y Mueller (2001); Camilo et al (2019); Enochs et al. (2014)
<i>Acropora palmata</i>	1.32	Arias-González et al. (2015); Camilo et al (2019); Pizarro et al. (2014)
<i>Porites porites</i> *	1.58	Díaz-Romero, P.A. (2019); Marubini y Thake (1999)

*Nota: se ha hecho el cálculo con dos datos.

Métodos de restauración

Además, se tuvo en cuenta en el análisis el tipo de método de restauración en términos de mortalidad y crecimiento. Se detectó que los tipos de manejo no arrojaban diferencias significativas entre ambos tratamientos.

Para comprobar si en el tipo de manejo existía variabilidad respecto de la mortalidad y el crecimiento, se eligió aplicar un modelo lineal mixto. En el contexto de este trabajo, la aplicación de este método se realizó para cuantificar el efecto del tratamiento sobre las variables de interés teniendo en cuenta el tamaño muestral, es decir, se pretendió determinar si existían diferencias significativas entre tratamientos respecto del crecimiento y la mortalidad de corales evitando sobreestimar o subestimar la distribución de los datos. Para el cálculo, se parametrizaron la mortalidad y el crecimiento como variables respuesta, tipo de manejo como factor fijo, esto es *nursery vs outspalnting* y, por otro lado, ID como factor aleatorio.

$$Y \sim X\beta + Zu + \varepsilon.$$

Donde:

Y: variable respuesta. Esto es, mortalidad y crecimiento

Xβ: factor fijo. Esto es, tipo de manejo

Zu: factor aleatorio. Esto es, ID

ε: errores aleatorios (no se incluye en este estudio).

Una vez aplicado el modelo, se infiere de los resultados obtenidos que no existen diferencias significativas en la elección del método. Dicho de otro modo, la elección de cualquier método no arrojaría diferencias significativas entre los resultados.

En las Tablas 13 y 14 se muestran los estadísticos obtenidos cuya interpretación se detalla en el Anexo 4:

Modelo lineal mixto mortalidad vs método de restauración

Tabla 13. Estadísticos mortalidad vs método de restauración

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.856	-0.404	-0.030	0.052	1.540

Estimate	Std Error	df	t value	p value
42.98	7.790	37.768	5.511	2.71.10⁻⁶

Modelo lineal mixto crecimiento vs método de restauración

Tabla 14. Estadísticos crecimiento vs método de restauración

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.457	-0.360	-0.077	0.310	2.653

Estimate	Std Error	df	t value	p value
45.82	11.37	37.070	4.031	2.66.10⁻⁴

Discusión

En la actualidad, los esfuerzos de investigación y restauración están centralizados en dos países en el Caribe, Estados Unidos y Colombia que, probablemente, cuenten con más fondos para destinar a la restauración que el resto de países del Caribe. No obstante, podrían darse otros factores que limitaran el número de publicaciones realizadas como puede ser la existencia de la literatura gris, la no publicación de estudios fallidos o la reciente incorporación de otros

países a proyectos de restauración coralina que hasta ahora no habían incluido en sus planes de investigación y desarrollo. Si se analizan los datos de Índice de Desarrollo Humano (I.D.H) (Expansión, 2019) se observa una gran disparidad en cuanto al ranking reportado. Mientras que Estados Unidos se encuentra en el puesto número 17, países como Haití están en el 170, Guatemala en el 127 o Nicaragua en el 128. Cabe esperar que aquellos países con más recursos económicos sean los que más puedan invertir en proyectos de restauración de coral de cierto alcance. Se ha detectado, además de un fuerte sesgo en el número de publicaciones, grandes diferencias con los planteamientos aportados. Mientras que los artículos llevados a cabo en Estados Unidos implican en muchos casos una perspectiva genética y/o epigenética enfocado a la adaptación de especies al cambio climático, otros trabajos aportan una visión más limitada describiendo únicamente variables como el crecimiento, mortalidad o blanqueamiento reportadas en un tiempo determinado mientras se lleva a cabo el estudio experimental.

Otro de los aspectos fundamentales detectados en este estudio es la alta incidencia con la que se utilizan ciertas especies en la restauración. Esto se explica fácilmente por los siguientes factores. Para empezar, se constata que ciertas especies coralinas son escogidas con mayor frecuencia debido a los buenos resultados reportados en los proyectos de restauración. En esta línea, variables como el crecimiento y la resistencia al blanqueamiento son valoradas muy positivamente a la hora de elegir la especie objeto de la restauración. Por ejemplo, los resultados obtenidos en este estudio muestran una supervivencia general del 40.9 %, aunque si comparamos esta cifra con la mortalidad media de *Acropora cervicornis* del 25.67 %, es comprensible que exista un sesgo en la elección de especies, pues una tasa de mortalidad baja es un factor que ayuda a garantizar el éxito de las actividades de restauración. Sin embargo, este enfoque reduce la diversidad tan característica de los ecosistemas coralinos, lo que conlleva la pérdida de un enfoque holístico en el cual debe estar basado la restauración de ecosistemas. Por ello, se considera la inclusión de especies un área de mejora en los trabajos experimentales en cuanto a la restauración de corales, con el fin generar un ecosistema autosostenible que simule la alta riqueza de los arrecifes que actualmente existen en la naturaleza. Otro factor relacionado con lo mencionado anteriormente es la literatura científica disponible para determinadas especies. Por ejemplo, se ha observado un alto sesgo en la búsqueda de artículos en las bases de datos disponibles, donde por ejemplo, existe una dominancia de trabajos para el género *Acropora* en comparación con el resto de géneros. Si se realiza una búsqueda similar a nivel global como la ejecutada en *Web of Science*, se percibe la misma tendencia. Tras una primera criba se obtiene que de un total de 101 trabajos, 73 corresponden al género *Acropora*, 15 al género *Porites*, para *Orbicella* se contabilizan 6 publicaciones y para los géneros

Montastraea y *Siderastrea* los estudios se reducen a 4 y 3 respectivamente. Ciertamente es que de forma natural existe una distribución desequilibrada de especies en los arrecifes de coral. No obstante, se considera que se deben hacer esfuerzos por realizar estudios con distintas especies, aun siendo minoritarias en los sistemas naturales. Dicho enfoque ofrecerá una visión integrada de los mecanismos que controlan la formación y el mantenimiento de arrecifes de coral, lo que en consecuencia aumentará la eficacia de futuras acciones emprendidas para reforzar las poblaciones presentes en los arrecifes de coral de las cuales dependen innumerables especies animales así como muchas poblaciones asentadas en los litorales más cercanos cuyo recurso fundamental es la pesca.

No se debe olvidar que en la actualidad se están realizando los primeros avances en cuanto a la restauración mediante propagación sexual con especies en el Caribe. No obstante, los trabajos publicados son escasos y carecen de una trayectoria temporal suficiente para determinar el grado de éxito de estas acciones. Al realizar una búsqueda en *Web of Science* diferenciando entre trabajos que utilicen métodos de reproducción sexual y asexual en el Caribe, se encuentra que la restauración mediante gametos cuenta con 8 publicaciones entre 2015-2021. En contraposición, los resultados de la búsqueda de restauraciones por fragmentos devuelven 24 publicaciones entre 2011-2021. El motivo por el cual quizás no se realizan mayores esfuerzos de restauración utilizando gametos pueden deberse a que las tasas de crecimiento son lógicamente menores, los periodos de monitorización mayores y la supervivencia general reducida. En consecuencia, el Retorno de Inversión es superior en experiencias donde se utilicen técnicas de reproducción asexual. Sin embargo, es interesante tener en cuenta que en la actualidad las temperaturas del mar tienen una tendencia al alza causadas por el cambio climático, contribuyendo a la pérdida de la relación simbiótica entre corales y zooxantelas. Por ello, se considera de vital importancia destinar más recursos a los estudios basados en técnicas de reproducción sexual, favoreciendo la riqueza genética y, en consecuencia, la aparición de genotipos que se adapten a la variabilidad climática actual.

Un enfoque que puede resultar interesante pasa por realizar estudios experimentales analicen el éxito del crecimiento y especialmente de supervivencia desde el punto de vista de la profundidad. Es sabido que en el agua, la temperatura disminuye con la profundidad. Asumiendo que la temperatura del mar está subiendo de manera generalizada, un planteamiento interesante hipotetiza que, tanto en medios marinos como terrestres, las especies migrarán de profundidad o altitud según sus requerimientos térmicos. Por ejemplo, autores como Lohr et al. (2017) realizaron un trabajo experimental aplicando este enfoque. Los resultados, incluidos en este análisis, reportaron un crecimiento claramente superior para

profundidades intermedias, es decir entre 8 y 15 metros, frente a las ubicaciones típicas reportadas en la mayoría de trabajos de restauración, que de manera general, oscilan entre los 3 a 8 metros. A pesar de que el dato de crecimiento a profundidad intermedia se consideró un *outlier* en este trabajo, estos resultados junto con la influencia del cambio climático en el desarrollo de arrecifes de coral arrojan argumentos a favor para apoyar y promover nuevas líneas de investigación donde se aplique esta perspectiva.

De este estudio también se extrae que el seguimiento realizado en los proyectos de restauración de corales no supera en la mayoría de los casos los dos años. Si se tiene en cuenta la baja tasa de crecimiento de los corales en general, se hace evidente que es necesario ampliar el tiempo de seguimiento con el fin de conocer la verdadera evolución de las colonias. Como factores limitantes que se pueden destacar en este trabajo para ampliar el tiempo de seguimiento se encuentran:

- El factor económico: generalmente los proyectos tienen un presupuesto estipulado con una asignación determinada para cada actividad. Como cabe esperar, la mayor parte de las cantidades percibidas se dirigen a las propias actividades de restauración, reduciendo o eliminando el seguimiento de las acciones.
- Las acciones de restauración en general, y de coral en particular, son bastante innovadoras y no disponen de una trayectoria elevada en número de años.
- La alta incidencia de eventos meteorológicos extremos que destruyen las colonias. No obstante, en esta situación se crean fragmentos de oportunidad que se pueden establecer satisfactoriamente en otras zonas aledañas. Una línea de investigación interesante podría ampliar la información de la que dispone la comunidad científica sobre este tema.

Por ello, se considera un área de mejora fundamental la ampliación de la ventana temporal propuesta en los proyectos de restauración ecológica de corales que evalúe de forma real el éxito de las acciones propuestas.

Otro dato interesante obtenido en este estudio sostiene que las diferencias de manejo no arrojan diferencias significativas respecto a la mortalidad y el crecimiento, lo que significa que la fase de guardería, desde una perspectiva económica, podría ser suprimida con el fin de aumentar la eficacia de los proyectos de restauración. Sin embargo, como ya se ha mencionado en el capítulo de “Limitaciones del estudio”, existe un número muestral bastante bajo, por lo que se recomienda ampliar la investigación relacionada con estos resultados con el fin de

obtener resultados más sólidos y fiables. De ser cierto, se podría sugerir reducir la utilización de recursos proporcionados en guarderías con el objetivo de invertirlos en incrementar las zonas tratadas en futuros proyectos de restauración en el medio natural. No obstante, no se pretende en este estudio recomendar el cese de actividades relacionadas con las guarderías, si no que la financiación recibida sea invertida para promover la investigación relacionada, por ejemplo, con la adaptación frente al cambio climático de los corales desde una perspectiva genética y epigenética y que además sirva como reservorio genético de ADN.

Conclusión

Es indiscutible que en la actualidad existe una clara regresión de los arrecifes de coral, no tan sólo en el Caribe sino a nivel mundial. Dado su alto valor ecológico, económico y social se hace necesario tomar acciones que frenen la disminución de la superficie coralina mundial. Con el fin de alentar a los gobiernos a todos los niveles administrativos, las instituciones y a la sociedad, se muestran a continuación las conclusiones extraídas en este trabajo.

- Se aconseja realizar un mayor esfuerzo en la investigación sobre el éxito de las acciones de *nursery vs outplanting*. La información obtenida en este trabajo arroja que ambos tratamientos reportan los mismos resultados. Sin embargo, y como ya se ha mencionado anteriormente, el tamaño muestral de este trabajo es relativamente bajo. De ser así, suprimir la fase de guardería en los proyectos abarataría considerablemente los costes y, en consecuencia, haría que las acciones de restauración fueran más atractivas para las partes interesadas.
- Otro punto importante para destacar de este trabajo sería el de la necesidad de incluir la eficacia de las acciones. Cierto es que existen publicaciones con un enfoque orientado a la eficiencia de las restauraciones de coral pero se ha constatado una fuerte carencia de trabajos con un planteamiento económico. Por lo tanto, se recomienda enfocar los proyectos de restauración desde una perspectiva económica con el fin de captar la atención de los inversores. Esto pasaría por valorizar el coste de los recursos empleados y beneficios reportados, es decir, incluir de qué manera se mejoran los servicios ecosistémicos.
- Se sugiere incrementar los esfuerzos en investigación en cuanto a la reproducción sexual con el fin de promover la adaptación al cambio climático de los corales y la riqueza genética.

- Siguiendo la línea del cambio climático, podría resultar interesante valorar los resultados de las experiencias de restauración a diferentes profundidades y temperaturas.
- Se propone utilizar los distintos tipos de especies que se encuentren de manera natural en los arrecifes de coral de la zona a restaurar. Con ello, se aumenta la diversidad y se tiende a crear ecosistemas autosostenibles en el tiempo.

Bibliografía

Acosta-Santos, A., Martínez-Martínez, C. 2005. *Interacciones entre el coral Porites astreoides, las macroalgas y los peces en la isla de San Martín de Pajarales. Archipiélago Corales del Rosario, Caribe colombiano, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia*. Trabajo de Grado, Universidad Tadeo Lozano, Colombia.

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. 2017. Arrecifes de coral en los Estados Unidos. Estados Unidos: EPA. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/arrecifes-de-coral-en-los-estados-unidos> [Accedido 1 de julio de 2021].

Álvarez Filip, L. 2015. El arrecife mesoamericano, un paraíso que peligra por su belleza. México. La Jornada ecológica. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2015/06/01/eco-c.html> [Accedido 20 de junio de 2021].

Alva-Basurto, J. C., Arias-González, J. E. 2015. Arrecifes de coral, servicios ecosistémicos y cambio climático. México. La Jornada ecológica. Disponible en: <https://www.jornada.com.mx/2015/06/01/eco-c.html> [Accedido 20 de junio de 2021].

Arias-González, J.E., Calle-Triviño, J., Cortés-Useche, C., Cabrera-Pérez, J.L., Auxiliar, Muñiz-Castillo, A.I. 2015. Restauración y manejo de sitios arrecifales impactados por fenómenos naturales y antrópicos en el Parque Nacional Arrecife Alacranes *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional - Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas* DOI: 10.13140/RG.2.2.28680.75523

Ávila-Morales, O.G., Domínguez-Domínguez, O. 2020. Peces arrecifales del mar Caribe. México. Saber más. Disponible en: <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/articulos/259-numero-30/469-peces-arrecifales-del-mar-caribe.html> [Accedido 15 de julio de 2021].

- Bak, R.P.M. 1983. Neoplasia, regeneration and growth in the reef-building coral *Acropora palmata*. *Marine Biology*. <https://doi.org/10.1007/BF00395810>
- Bak, R.P.M., Nieuwland, G., Meesters, E.H. 2009. Coral growth rates revisited after 31 years: What is causing lower extension rates in *Acropora palmata*? *Bulletin of Marine Science*, 84(3): 287–294
- Becker, L.C., Mueller, E. 2001. The culture, transplantation and storage of *Montastraea faveolata*, *Acropora cervicornis* and *Acropora palmata*: What We Have Learned So Far. *Bulletin of Marine Science*, 69(2): 881–896
- Bowden-Kerby, A. 2008. Restoration of threatened *Acropora cervicornis* corals: intraspecific variation as a factor in mortality, growth, and self-attachment. *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium* 7-11.
- Calle-Triviño, J., Muñoz-Castillo, A.I., Cortés-Useche, C., Morikawa, M., Sellares-Blasco, R., Arias-González, J.E. 2021. Approach to the functional importance of *Acropora cervicornis* in outplanting sites in the Dominican Republic. *Frontiers in Marine Science* 8: 1-12.
- Camilo, J., Arévalo, Z., Alberto, J., Ruíz, R. 2019. *Acropora cervicornis* en guarderías colgantes para restauración Evaluation of *Acropora cervicornis* Morphotypes in Hanging Nurseries for Restoration. *Mutis* 9: 9-19. <https://doi.org/10.21789/A22561498.1452>
- Casas-Figueroa, D.C. 2017. *Supervivencia y crecimiento de esquejes de Acropora palmata en dos técnicas de restauración, in situ y ex situ en isla fuerte (Caribe colombiano)*. Trabajo Profesionalizante, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
- Chetumal, U., Roo, Q., Marinas, C.D.I. 2009. Growth characteristics of skeletons of *Montastraea annularis* (Cnidaria : Scleractinia) from the northwest coast of Cuba Características del crecimiento de los esqueletos de *Montastraea annularis* (Cnidaria : Scleractinia). *Ciencias marinas* 35: 237-243.
- Colombia 1993. Ley 99 de 1993, de 22 de diciembre, del Fundamento de la política ambiental colombiana. *Diario Oficial*, núm 41.146.
- Cuba Tiempo. 2021. Clima cubano. Cuba. Disponible en: <http://www.cubatiempo.com/es/climate.php> [Accedido 3 de agosto de 2021].

- Díaz, J. M. , L. M. Barrios, M. H. Cendales, J. Garzón-Ferreira, J. Geister, M. López-Victoria, G. H. Ospina, F. Parra-Velandia, J. Pinzón, B. Vargas-Angel, F. A. Zapata, S. Zea. 2000. Áreas coralinas de Colombia. Santa Marta: INVEMAR. Disponible en: http://www.invemar.org.co/documents/10182/14479/Areas_coralinas_de_Colombia.pdf/83c2c3e9-d1eb-42a5-bead-575951f23e28?version=1.0 [Accedido 1 de mayo de 2021].
- Díaz-Romero, P.A. 2019. Carbono azul y su acumulación en 5 especies de coral del Caribe colombiano. *Pontificia Universidad Javeriana* Disponible en: <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/43210/Carbono%20azul%20y%20su%20acumulaci%3bn%20en%205%20especies%20de%20coral%20del%20Caribe%20colombiano.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [Accedido 13 de agosto de 2021].
- Drury, C., Manzello, D., Lirman, D. 2017. Genotype and local environment dynamically influence growth, disturbance response and survivorship in the threatened coral, *Acropora cervicornis*. PLoS ONE 12(3): e0174000. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174000>
- Edwards A.J., Gómez E.D. 2007. Reef Restoration Concepts & Guidelines: making sensible management choices in the face of uncertainty. Australia. Coral Reef Targeted Research & Capacity Building for Management program. Disponible en: https://ccres.net/images/uploads/publications/5/reef_restoration_guidelines_spanish.pdf [Accedido 29 de noviembre de 2019].
- Elizalde-Rendón, E. M., Horta-Puga, G., González-Díaz, P., Carricart-Ganivet. J. P. 2010. Growth characteristics of the reef-building coral *Porites astreoides* under different environmental conditions in the Western Atlantic. *Coral Reefs* 29:607–614
- Enochs, I., Manzello, D.P., Carlton, R., Bin, Schopmeyer, S., van Hooijdonk, R., Lirman. D. 2014. Effects of light and elevated pCO₂ on the growth and photochemical efficiency of *Acropora cervicornis*. *Coral Reefs* DOI 10.1007/s00338-014-1132-7
- Enzor, L.A., Hankins, C., Vivian, D.N., Fisher, W.S., Barron, M.G. 2019. Calcification in Caribbean reef-building corals at high pCO₂ levels in a recirculating ocean acidification exposure system. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 499: 9–16. doi:10.1016/j.jembe.2017.12.008

- Evans, M., Lasker, H. 2013. Effects of predator exclusion on recruit survivorship in an octocoral (*Briareum asbestinum*) and a scleractinian coral (*Porites astreoides*). *Coral Reefs* 32:597–601
- Expansión. 2019. Índice de Desarrollo Humano – IDH. Madrid: expansion.com. Disponible en: <https://datosmacro.expansion.com/idh> [Accedido 15 de julio de 2021].
- Fernández-López, J. 2021. Corrientes oceánicas en el continente americano las corrientes marinas. Hispanoteca. Disponible en: <http://hispanoteca.eu/Hispanoam%C3%A9rica/Mapas/Corrientes%20oce%C3%A1nicas.htm> [Accedido 25 de septiembre de 2021].
- García-Rueda, A.L. 2020. *Cría de fragmentos de Acropora palmata y Montastraea cavernosa en una guardería a media agua en la Bahía De Gayraca (Parque Nacional Natural Tayrona) como aproximación hacia la restauración coralina*. Trabajo de Grado, Universidad De Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia.
- Garzón-Ferreira, J., Moreno-Bonilla, M., Vásquez, J.M.V. 2004. Condición actual de las formaciones coralinas de *Acropora palmata* y *A. cervicornis* en el Parque Nacional Natural Tayrona (Colombia). *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 33: 117-136.
- Gladfelter, E.H., Monahan, K., Gladfelter, W.B. 1978. Growth rates of five reef-building corals in the northeastern caribbean. 28: 728-734.
- GeoEnciclopedia. 2021. Mar Caribe. Wordpress. Disponible en: <https://www.geoenciclopedia.com/mar-caribe/> [Accedido 1 de julio de 2021].
- Gómez-Soto, C.E., Rico-Buitrago, V.T. 2006. *Estructura de la comunidad de macroinvertebrados bioerosionadores y fauna asociada a esqueletos de corales masivos*. Trabajo de Grado. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Colombia.
- Goreau, T., Hilbertz, W. 2005. Marine ecosystem restoration: costs and benefits for coral reefs. *World resource review* 17: 375-409.
- Hernández-Zárate, G., Lango-Reynoso, F., Castañeda-Chávez, M. del R., Zamora-Castro, J.E., Maldonado-Hernández, J.R. 2011. Culture of elkhorn coral *Acropora palmata* in a recirculating system using synthetic seawater. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 46: 477-482.

- Highsmith, R.C., Riggs, A.C., D'Antonio, C.M. 1980. Survival of hurricane-generated coral fragments and a disturbance model of reef calcification/growth rates. *Oecologia* 46: 322–329.
- Irizarry-Soto, E., Weil, E. 2009. Spatial and temporal variability in juvenile coral densities, survivorship and recruitment in La Parguera, southwestern Puerto Rico. *Caribbean Journal of Science* 45: 269-281.
- Iztacala, R., California, B. 2008. Growth of the hermatypic coral *Montastraea cavernosa* in the Veracruz Reef System Crecimiento del coral hermatípico *Montastraea cavernosa* en el Sistema Arrecifal Veracruzano. *Ciencias marinas* 34: 107-112.
- Jackson, J., Donovan, M., Cramer, K., Lam, V. 2014. Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970 - 2012. Switzerland: UICN. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/efiles/documents/2014-019.pdf> [Accedido 1 de mayo de 2021].
- Kelley, E.R., Sleith, R.S., Matz, M. V, Wright, R.M., Wright, R.M. 2021. Gene expression associated with disease resistance and long-term growth in a reef-building coral. *Royal Society Open Science*. <https://doi.org/10.1098/rsos.210113>
- Lohr, K.E., McNab, A.A.C., Manfrino, C., Patterson, J.T. 2017. Assessment of wild and restored staghorn coral *Acropora cervicornis* across three reef zones in the Cayman Islands. *Regional Studies in Marine Science* 9: 1-8.
- Lohr, K.E., Patterson, J.T. 2017. Intraspecific variation in phenotype among nursery-reared staghorn coral *Acropora cervicornis* (Lamarck, 1816). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 486: 87-92.
- Lohr, K.E., Patterson, J.T., Ripple, K. 2020. Differential disturbance effects and phenotypic plasticity among outplanted corals at patch and fore reef sites. *Journal For Nature Conservation* 55: 125827
- López-Londoño, T., Navas-Camacho, R., Gil-Agudelo, D.L. 2011. Juvenile scleractinian coral mortality at Nuestra Señora Del Rosario Archipelago , colombian Caribbean. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras* 40: 2007-2010.

- Lustic, C., Maxwell, K., Bartels, E., Reckenbeil, B., Utset, E., Schopmeyer, S., Zink, I., Lirman, D. 2020. The impacts of competitive interactions on coral colonies after transplantation: A multispecies experiment from the Florida Keys, US. *Bulletin of Marine Science* 96: 805-818.
- Mantilla-Galindo, M.A. 2015. *Descripción de la etiología de las enfermedades coralinas presentes en Siderastrea siderea en el arrecife de Punta Cebolleta en Isla Fuerte, Caribe colombiano*. Trabajo de Maestría, Pontificia Universidad Javeriana, Colombia.
- Manzello, D.P., Enochs, I.C., Kolodziej, G., Carlton, R. 2015. Journal of experimental marine biology and ecology coral growth patterns of *Montastraea cavernosa* and *Porites astreoides* in the Florida Keys: The importance of thermal stress and inimical waters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 471: 198-207.
- Marubini, F, Thake, B 1999. Bicarbonate addition promotes coral growth. *Limnology and Oceanography*, 44 (3): 716-720 doi:10.4319/lo.1999.44.3.0716
- Mercado-Molina, A., Hernández-Delgado, E.A. Rivera-Rivera J.E., Rivera-Rivera, M., Suleimán Ramos, S.E., Olivo-Maldonado I., Jaime S. Fonseca Miranda, Rodríguez Inoa E.A. 2013. Protocolo para la propagación y la restauración de poblaciones del coral cuerno de ciervo, *Acropora cervicornis*: estrategias de bajo costo de la Sociedad Ambiente Marino Puerto Rico: Sociedad Ambiente Marino. Disponible en: http://sampr.org/wp-content/uploads/2015/02/Protocolo_Final_SAM_2013-libre1.pdf [Accedido 25 de mayo de 2021].
- Meteoblue. 2021. Clima el Caribe. Colombia: Meteoblue. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/443235/PACEAcropora.pdf> [Accedido 15 de julio de 2021].
- Miller, M.W. 2014. Post-settlement survivorship in two Caribbean broadcasting corals. *Coral Reefs* 33: 1041-1046.
- Muñoz-Lima, R. 2020. Los más devastadores huracanes de este siglo en Centroamérica y el Caribe. DW. Disponible en: <https://p.dw.com/p/3l4da> [Accedido 1 de julio de 2021]
- O'Donnell, K.E., Lohr, K.E., Bartels, E., Patterson, J.T. 2017. Evaluation of staghorn coral (*Acropora cervicornis*, Lamarck 1816) production techniques in an ocean-based nursery

with consideration of coral genotype. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 487: 53-58.

O'Donnell, K.E., Lohr, K.E., Bartels, E., Baums, I.B., Patterson, J.T. 2018. *Acropora cervicornis* genet performance and symbiont identity throughout the restoration process. *Coral Reefs* 1109-1118.

Ortiz-Sotomayor, A. 2014. Plan de Manejo Estratégico de los Arrecifes de Coral de Puerto Rico. Puerto Rico: National Oceanic and Atmospheric Administration. Disponible en: https://www.ncei.noaa.gov/data/oceans/coris/library/NOAA/CRCP/other/grants/NA11NOS4820005/PR_Coral_Reef_Strategic_Plan.pdf [Accedido 25 de mayo de 2021].

Oviedo, M.E. 2011. *Viabilidad de trasplantes de coral cuerno de alce Acropora palmata (Lamarck, 1816) en el Parque Nacional Natural Tayrona, caribe Colombiano*. Trabajo de Maestría, Universidad Nacional De Colombia, Colombia.

Padilla, C., Lara, M. 1996. Efecto del tamaño de las colonias en el crecimiento de *Acropora palmata* en Puerto Morelos. Quintana Roo, México. *Hidrobiológica* 6: 17-24.

Page, C.A., Muller, E.M., Vaughan, D.E. 2018. Microfragmenting for the successful restoration of slow growing massive corals. *Ecological Engineering* 123: 86-94.

Pineda-Martínez, L.F. 2021. *Restauración ecológica mediante la implementación de guarderías de coral de las especies Acropora cervicornis Y Acropora palmata, en el acuario y museo del mar El Rodadero, Santa Marta – Colombia*. Trabajo de Maestría, Universidad De Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Colombia.

Pizarro, V. Carrillo, V. García-Rueda, A. 2014. Revisión y estado del arte de la restauración ecológica de arrecifes coralinos. *Biota Colombiana*, 15 (2): 132-149

Rinkevich, B. 2000. Steps towards the evaluation of coral reef restoration by using small branch fragments. *Marine Biology*. <https://doi.org/10.1007/s002270000293>

Rodríguez-Goenaga, L.S. 2018. *Evaluación del cultivo y trasplante de fragmentos del coral Acropora palmata provenientes de guarderías en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo*. Trabajo de Maestría, Universidad del Magdalena, Colombia.

- Romero Hernández, Y. 2018. Efecto de la sedimentación en el desarrollo de los arrecifes coralinos. *Revistas De Investigación Agropecuaria Y Desarrollo Sostenible* 3(2): 42–49
- Salazar-Salamanca, D. 2007. Distribución, abundancia, estructura de tallas y estado de salud de *Siderastrea siderea* (Ellis y Solander 1786) (Scleractinia: siderastreidea) en el área Marina Protegida (AMP) «Parque Nacional Natural Corales del Rosario y San Bernardo» (PNNCRSB). *Journal of Chemical Information and Modeling* 1-101.
- Schopmeyer, S.A., Lirman, D., Bartels, E., Gilliam, D.S., Goergen, E.A., Griffin, S.P., Johnson, M.E. et al. 2017. Regional restoration benchmarks for *Acropora cervicornis*. *Coral Reefs* 36: 1047-1057.
- Shafir, S., Edwards, A., Rinkevich, B., Bongiorno, L., Levy, G., Shaish, L. 2010. Constructing and managing nurseries for asexual rearing of corals. *Reef rehabilitation manual* 49-71.
- Sheppard, C. R. C., Davy, S. K., Pilling, G. M., Graham, N. A. J. 2018. *The Biology of Coral Reefs*. 2.a ed. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
- Smith, K.M., Payton, T.G., Sims, R.J., Stroud, C.S., Jeanes, R.C., Hyatt, T.B., Childress, M.J. 2019. Impacts of consecutive bleaching events and local algal abundance on transplanted coral colonies in the Florida Keys. *Coral Reefs* 38: 851-861.
- Society for Ecological Restoration. 2004. *Antigua: Maiden Island Total Reef Restoration* Disponible en: <https://www.ser-rrc.org/project/antigua-maiden-island-total-reef-restoration/> [Accedido 25 de septiembre de 2021]
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity. 2009. *La economía de los ecosistemas y la biodiversidad para los responsables de la elaboración de políticas nacionales e internacionales*. Disponible en: http://www.teebweb.org/media/2009/11/National-Executive-Summary_Spanish.pdf [Accedido 30 de mayo de 2021]
- Van Woesik, R., Banister, R.B., Bartels, E., Gilliam, D.S., Goergen, E.A., Lusic, C., Maxwell, K. 2021. Differential survival of nursery-reared *Acropora cervicornis* outplants along the Florida reef tract. *Restoration Ecology* 29: 1-10.

Wilkinson, C.R., Buddemeier, R.W. 1994. *Global Climate Change and Coral Reefs: Implications for People and Reefs. Report of the UNEP-IOC-ASPEI-IUCN Global Task Team on the implications of climate change on coral reefs.* IUCN, Gland, Switzerland.

Wilkinson, C., Souter, D. 2008. Status of Caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005. Townsville: UICN. Global Coral Reef Monitoring Network, and Reef and Rainforest Research Centre. Disponible en: https://coralreefwatch.noaa.gov/caribbean2005/docs/Status_of_Caribbean_Reefs_after_Bleaching_and_Hurricanes_2005.pdf [Accedido 25 de mayo de 2021].

Yeemin, T., Sutthacheep, M., Pettongma, R. 2006. Coral reef restoration projects in Thailand. *Ocean and Coastal Management* 49: 562-575.

Zarza, E., Vargas, A., Londoño, L., Pacheco, A., Duque, D. 2014. Ensayo preliminar de crecimiento de fragmentos del coral amenazado *Acropora cervicornis* en una guardería colgante y experiencia piloto de trasplante en el Parque Nacional Natural Corales del Rosario y de San Bernardo, Caribe colombiano. *Biota Colombiana* 15: 102-113.

Anexos

Anexo 1



metaanálisis -
tfm.xlsx

Anexo 2

Código utilizado en "R"

library(lme4)

library(tidyverse)

library(GGally)

library(MuMIn)

library(broom.mixed)

library(visreg)

library(lmerTest)

```
library(emmeans)
library(standardize)
library(sjPlot)
library(ggplot2)
library(readr)
library(googledrive)
library(ggpubr)
library(broom)
library(tidyr)
library(lme4)
```

```
cora <- read_delim("~/cora2.csv", ";", escape_double = FALSE,
  trim_ws = TRUE)
```

```
cora$lat_or <- ifelse(cora$lat_or == "N", 1,-1)
cora$log_or <- ifelse(cora$log_or == "O", -1,1)
cora$logOK<- cora$log * cora$log_or
cora$latOK<- cora$lat * cora$lat_or
##map####
```

```
library(maps)
library(mapdata)
```

```
#load a map of the world:
```

```
world <- map_data("world", xlim= c(-90, -50), ylim = c(-15, 40))
```

```
sites <- data.frame(cora$logOK, cora$latOK, cora$ID, cora$management)
```

```
names(sites)[1] <- "longitude"
```

```

names(sites)[2] <- "latitude"
sites<- unique(sites)

gg2 <- ggplot() +
  geom_polygon(data = world, aes(x=long, y = lat, group = group),
    fill = "grey90", color = "grey60") +
  coord_equal() +
  theme(axis.title = element_blank())

gg2 + geom_point(data = sites, #Opcion 2a
  aes(x = longitude, y = latitude, fill=cora.management),
  shape=21, size = 3.2, alpha=0.9) +
  scale_fill_manual(values = c("grey40", "chartreuse1"))
#modelos cora mortalidad

mortG <- lmer(mortality ~ (1|ID),
  data = cora, na.action = "na.omit", REML = FALSE)
summary(mortG)

mortM <- lmer(mortality ~ management +(1|ID),
  data = cora, na.action = "na.omit", REML = FALSE)
summary(mortM)
anova(mortM)

#Modelos Crecimiento

#reducimos solo a Acropora

coraAcropora <- cora %>% subset(cora$genus=="Acropora")
coraAcroporaCorrected<- coraAcropora %>%
subset(compared_growth<200&compared_growth>0)

```

```
growthG <-lmer(compared_growth ~ (1|ID),  
              data = coraAcroporaCorrected, na.action = "na.omit")
```

```
summary(growthG)
```

```
growthM <-lmer(compared_growth ~ management + (1|ID),  
              data = coraAcroporaCorrected, na.action = "na.omit")
```

```
summary(growthM)
```

```
anova(growthM)
```

Anexo 3

Interpretación campos summary

AIC: es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico, para un conjunto dado de datos.

BIC: corresponde a un test error bajo, por lo que el mejor modelo será aquel con menor BIC.

logLik: sirve para obtener el valor de log-verosimilitud de un modelo y la función AIC entrega el Akaike Information Criterion.

Deviance: es una medida de la bondad del ajuste de un modelo lineal generalizado.

Df. Resid: devuelve los grados de libertad residuales.

Scaled residuals.

Devuelve cinco estadísticos sobre la distribución de los residuos del modelo: valores mínimos, 1Q, 2Q y 3Q cuartil y valor máximo. La media de los residuos siempre es cero. Si los residuos se distribuyen conforme a una distribución normal deberíamos esperar que la mediana sea 0 o muy cerca de 0, y que el 1Q y 3Q, primer y tercer cuartil, sean simétricos. Lo que es aplicable para los valores mínimos o máximos. Si hay desviaciones notables de media y mediana y no hay simetría entre cuartiles es muy probable que no se cumpla con algunos de los supuestos de los modelos lineales.

Random effects

considera a la varianza explicada y la no explicada

Fixed effects

- **Estimate:** muestra los coeficientes estimados por el modelo. Estas son la ordenada al origen (Intercept) y las pendientes estimadas para cada variable.
- **Std. Error:** es el valor que cuantifica cuánto se apartan los valores de la media de la población.
- **df:** grados de libertad del estadístico F.
- **T value:** estadístico t de cada parámetro estimado, obtenido dividiendo la estimación del parámetro entre su desviación estándar.
- **Pr(>|t|):** p-value que de manera extendida se acepta que una $p < 0,05$ significa que la hipótesis nula es falsa.

Correlation of Fixed Effects: valora la dependencia-independencia entre los efectos fijos.

Anexo 4

Summary de las variables de interés

Mortalidad (modelo nulo)

```
> summary(mortG)
Linear mixed model fit by maximum likelihood . t-tests use Satterthwaite's method ['lmerModLmerTest']
Formula: mortality ~ (1 | ID)
Data: cora

      AIC      BIC    logLik deviance df.resid
 752.8    759.9   -373.4    746.8      76

Scaled residuals:
   Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.87144 -0.42124 -0.05357  0.49763  1.53538

Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
 ID      (Intercept) 400.9    20.02
 Residual                    504.7    22.47
Number of obs: 79, groups: ID, 33

Fixed effects:
      Estimate Std. Error   df t value Pr(>|t|)
(Intercept)  40.940     4.615 34.174   8.87 2.19e-10 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

> |
```

Scaled residuals

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.871	-0.421	-0.054	0.050	1.535

Fixed effects

Estimate	Std Error	df	t value	p value
40.94	-0.421	34.174	8.87	2.19.10⁻¹⁰

Summary crecimiento (modelo nulo)

```
> summary(growthG)
Linear mixed model fit by REML. t-tests use Satterthwaite's method ['lmerModLmerTest']
Formula: compared_growth ~ (1 | ID)
Data: coraAcroporaCorrected

REML criterion at convergence: 661.6

Scaled residuals:
    Min      1Q   Median      3Q      Max
-2.40196 -0.40413 -0.07368  0.29392  2.72361

Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
  ID      (Intercept) 1235.5   35.15
 Residual                668.6   25.86
Number of obs: 67, groups: ID, 30

Fixed effects:
              Estimate Std. Error    df t value Pr(>|t|)
(Intercept)    56.108      7.549 29.318   7.432 3.21e-08 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
>
```

Scaled residuals

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.402	-0.404	-0.073	0.293	2.723

Fixed effects

Estimate	Std. Error	df	t value	P value
56.11	-0.404	29.318	7.432	3.21.10⁻⁸

Modelo lineal mixto mortalidad vs método de restauración

```
Linear mixed model fit by maximum likelihood . t-tests use Satterthwaite's method ['lmerModLmerTest']
Formula: mortality ~ management + (1 | ID)
Data: cora

      AIC      BIC    logLik deviance df.resid
 754.7    764.1   -373.3   746.7     75

Scaled residuals:
    Min      1Q   Median      3Q      Max
-2.85550 -0.40432 -0.02982  0.52153  1.53921

Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
  ID      (Intercept) 391.8   19.79
 Residual                507.5   22.53
Number of obs: 79, groups: ID, 33

Fixed effects:
              Estimate Std. Error    df t value Pr(>|t|)
(Intercept)    42.979      7.798 37.768   5.511 2.71e-06 ***
managementOutplanting -2.932      9.258 42.905  -0.317  0.753
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Scaled residuals

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.856	-0.404	-0.030	0.052	1.540

Fixed effects

Estimate	Std Error	df	t value	p value
42.98	7.790	37.768	5.511	2.71.10⁻⁶

Modelo lineal mixto crecimiento vs método de restauración

```
> summary(growthM)
Linear mixed model fit by REML. t-tests use Satterthwaite's method ['lmerModLmerTest']
Formula: compared_growth ~ management + (1 | ID)
Data: coraAcroporaCorrected

REML criterion at convergence: 653.1

Scaled residuals:
  Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.46692 -0.35935 -0.07664  0.30942  2.65308

Random effects:
 Groups Name      Variance Std.Dev.
 ID      (Intercept) 1380.6   37.16
 Residual                628.2   25.06
Number of obs: 67, groups: ID, 30

Fixed effects:
              Estimate Std. Error   df t value Pr(>|t|)
(Intercept)      45.82     11.37 37.07  4.031 0.000266 ***
managementOutplanting 17.32     13.89 46.74  1.247 0.218682
---
signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Scaled residuals

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2.457	-0.360	-0.077	0.310	2.653

Fixed effects

Estimate	Std Error	df	t value	p value
45.82	11.37	37.070	4.031	2.66.10⁻⁴