

ARRECIFES ROCOSOS

PROGRAMA DE MONITOREO

CAMPAÑA 2022



PREPARADO POR:

Catalina López-Sagástegui

Programa Marino del Golfo de California
Institute of the Americas

Octavio Aburto Oropeza

Fabio Favoretto

Scripps Institution of Oceanography

Benigno Martínez Guerrero

Ismael Mascareñas Osorio

Magali Ramírez Zúñiga

Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación A.C.



Diseño

dataMares

DICIEMBRE 2022

Este informe es un resumen de las actividades de investigación completadas durante 2022 relacionadas con el programa de monitoreo ecológico de arrecifes rocosos coordinado por el Programa Marino del Golfo de California. Todos los datos generados a través de este programa están disponibles previa solicitud a través de dataMares o contactando a Catalina López-Sagástegui (clopez@iamericas.org).



RESUMEN EJECUTIVO

La campaña de monitoreo de arrecifes rocosos de 2022 incluyó 76 arrecifes en el Golfo de California, donde un equipo de científicos completó 598 transectos que cubrieron 78.660 m². Este año, el equipo también registró 16.500 puntos de contacto para invertebrados. Se identificaron 156 especies (57 invertebrados y 99 peces) y el equipo midió y contó un total de 100.234 organismos (19.425 invertebrados y 99 peces).

Además de calcular la biomasa, la biomasa relativa y la riqueza de especies, los datos muestran cómo las comunidades de peces de los arrecifes monitoreados han cambiado a lo largo del tiempo. El uso de estos indicadores debe hacerse tomando en cuenta las condiciones ambientales, ya que esto nos permite comprender mejor lo que está sucediendo en estas comunidades. Por ejemplo, Cabo Pulmo sigue albergando comunidades de arrecifes saludables y estables, mientras que los arrecifes de La Paz siguen necesitando una mayor protección que permita la recuperación de estas comunidades.

En Loreto se registró la mayor riqueza de especies y biomasa; sin embargo, al observar la biomasa relativa vemos que los piscívoros constituyen la mayor parte de la biomasa. Esto nos lleva a pensar que estos arrecifes, si bien se encuentran en una posible senda de recuperación, aún pueden estar mostrando signos de sobreexplotación por la pesca. Este puede ser también el caso de los arrecifes de San Basilio, donde la pesca está en gran medida descontrolada, y los signos iniciales de degradación del ecosistema se están haciendo evidentes.


Determinar si un ecosistema, en este caso los arrecifes rocosos, se encuentra en buen estado requiere que analicemos cómo se han comportado los indicadores ecológicos a lo largo del tiempo, así como las condiciones ambientales a las que han estado sometidos los arrecifes. Esto proporcionará el contexto adecuado y una mejor línea de base sobre la cual realizar una evaluación del estado de salud.

NÚMERO DE ARRECIFES ROCOSOS  **598**

NÚMERO DE TRANSECTOS  **76**

Invertebrados  **313**

Peces  **285**

Puntos de contacto  **16,500**
(invertebrados)

NÚMERO DE ESPECIES IDENTIFICADAS  **156**

Invertebrados  **57**

Peces  **99**

NÚMERO DE ORGANISMOS CONTADOS Y MEDIDOS  **100,234**

Invertebrados  **19,425**

Peces  **80,809**

ÁREA TOTAL CUBIERTA POR BUZOS:



78,660 M²
(11 CAMPOS DE FÚTBOL)

TIEMPO TOTAL DEBAJO DEL AGUA:



160 HORAS
(PODRÍAS VER LA TRILOGÍA
DEL SEÑOR DE LOS ANILLOS
¡13 VECES!)



INTRODUCCIÓN

El programa de monitoreo de arrecifes rocosos ha sido una de las principales actividades de investigación del Programa Marino del Golfo de California (GCMP, por sus siglas en inglés) desde 1998. Esta larga colaboración entre el Scripps Institution of Oceanography (SIO) de la Universidad de California San Diego y el Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación A.C. (CBMC) en La Paz, B.C.S., no sólo ha permitido a los científicos seguir y evaluar la salud de los arrecifes rocosos en el Golfo de California (GdC), sino que también ofrece oportunidades de formación y desarrollo de capacidades para científicos jóvenes y principiantes. Además, a lo largo de estos 24 años, las innumerables colaboraciones con científicos y estudiantes de instituciones de investigación de México y Estados Unidos han dado lugar a una de las series cronológicas más largas de datos ecológicos disponibles.

Los datos se analizaron para determinar la densidad, riqueza, biomasa y nivel trófico de las comunidades de peces y macroinvertebrados en los arrecifes rocosos estudiados. La base de datos resultante permite a científicos identificar patrones ecológicos en el GdC y cuantificar los cambios debidos a factores naturales y antropogénicos. Por ejemplo, tras el huracán Odile de 2014, que afectó gravemente a la región sur del GdC, utilizamos los datos recopilados para determinar el impacto y estimar la recuperación de los ecosistemas marinos y su biodiversidad asociada. La información generada anualmente también permite a los colaboradores del GCMP contribuir a las evaluaciones ambientales y, como fue el caso de Isla Guadalupe, Islas Marías, Revillagigedo, Arrecife Alacranes y Banco Chinchorro, los datos se comparten con la CONANP para actualizar los planes de manejo de las áreas marinas protegidas.

Bajo el liderazgo del CBMC, un equipo de cinco investigadores y cuatro estudiantes viajaron a cinco regiones del sur del Golfo de California entre septiembre y octubre de 2022 para bucear y registrar datos sobre comunidades de peces e invertebrados en arrecifes rocosos costeros (Figura 1). El equipo incluyó científicos de Scripps Institution of Oceanography y del Institute of the Americas, y los estudiantes participantes están actualmente inscritos en la Universidad Autónoma de Baja California Sur. Mientras el equipo de investigación continúa analizando los datos, este informe incluye los resultados iniciales e información relevante para nuestros socios locales, incluida la CONANP.



REGIONES Y SITIOS DE MONITOREO DE ARRECIFES ROCOSOS

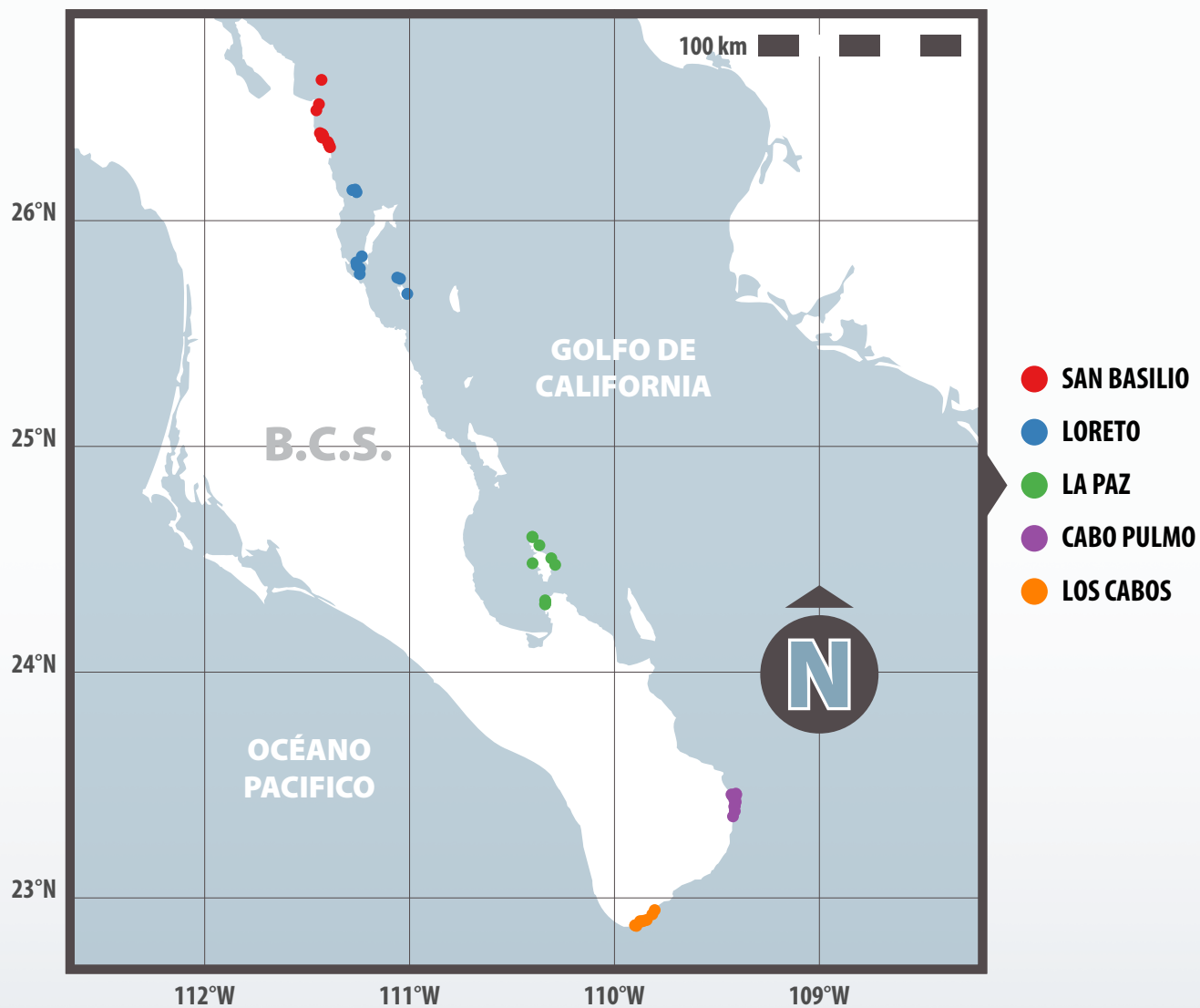


Figura 1. Arrecifes rocosos monitoreados durante la temporada de monitoreo 2022. Los arrecifes se agrupan por región con base en las características ecológicas generales del ambiente marino.



¿ESTÁN SANOS LOS ARRECIFES ROCOSOS O NOS FALTA INFORMACIÓN?

La recopilación de datos ecológicos nos permite calcular la abundancia, la riqueza, la densidad, la biomasa y la biomasa relativa de las especies, parámetros fundamentales para determinar y seguir la salud de los arrecifes a lo largo del tiempo. La riqueza, una medida de la diversidad, muestra cuántas especies diferentes están presentes en cada lugar estudiado (Figura 2). El indicador de biomasa es la masa total de organismos vivos obtenida mediante la combinación de dos variables: el número de individuos presentes y el tamaño de dichos individuos, mientras que la biomasa relativa es la comparación de la biomasa entre especies o grupos tróficos¹.



Un nivel elevado de biomasa, riqueza y biomasa relativa entre los grupos adecuados refleja un ecosistema sano. En términos generales, cuanto más altos sean estos indicadores para los peces piscívoros y carnívoros, más saludable podemos considerar una comunidad de arrecifes rocosos. Si estos indicadores aumentan a lo largo del tiempo, podemos concluir que los ecosistemas están prosperando, creciendo o recuperándose de cualquier impacto negativo. Sin embargo, si estos indicadores muestran una tendencia decreciente a lo largo del tiempo, podemos suponer que los ecosistemas están en deterioro o han sufrido alguna alteración.

Los datos de la campaña de monitoreo 2022 muestran que, en conjunto, los arrecifes de la región de Los Cabos tienen la biomasa de peces más baja, seguidos por los arrecifes rocosos de La Paz. Los arrecifes de Loreto alcanzaron los valores más altos de biomasa de peces, y Cabo Pulmo se situó en tercer lugar (Figura 3).

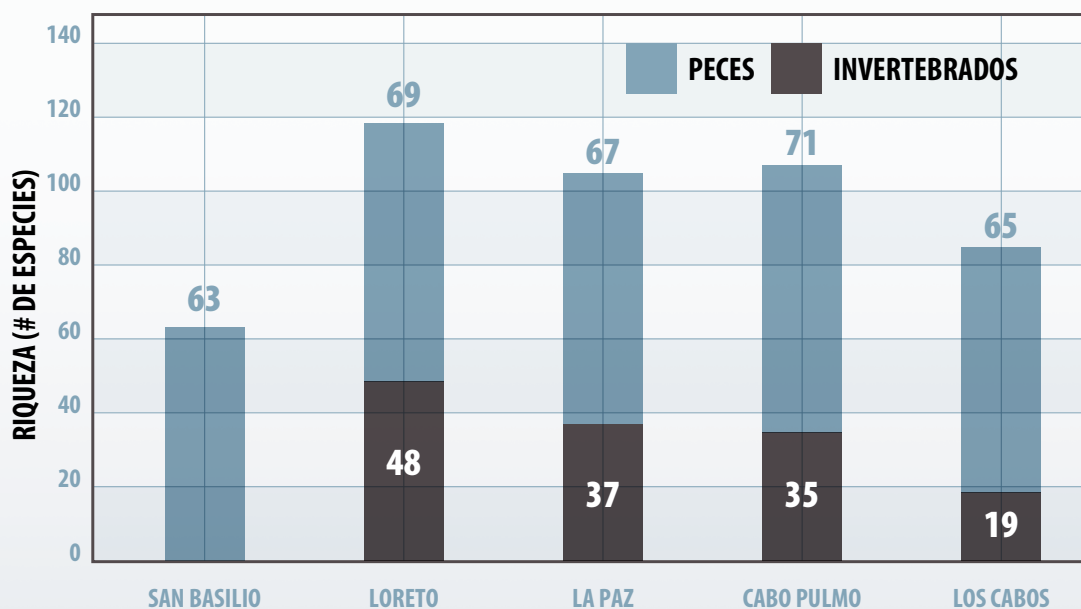


Figura 2. Número de especies de invertebrados y peces registradas durante la campaña de monitoreo de arrecifes rocosos 2022 en el Golfo de California.



¹ Un grupo trófico es un conjunto de especies con el mismo papel en una red trófica. Esta agrupación se basa en su dieta: los piscívoros son peces depredadores que se alimentan de otros peces; los carnívoros se alimentan de otros animales, pero también son presas; los herbívoros se alimentan principalmente de algas; y los zooplanctívoros se alimentan de plancton en la columna de agua.



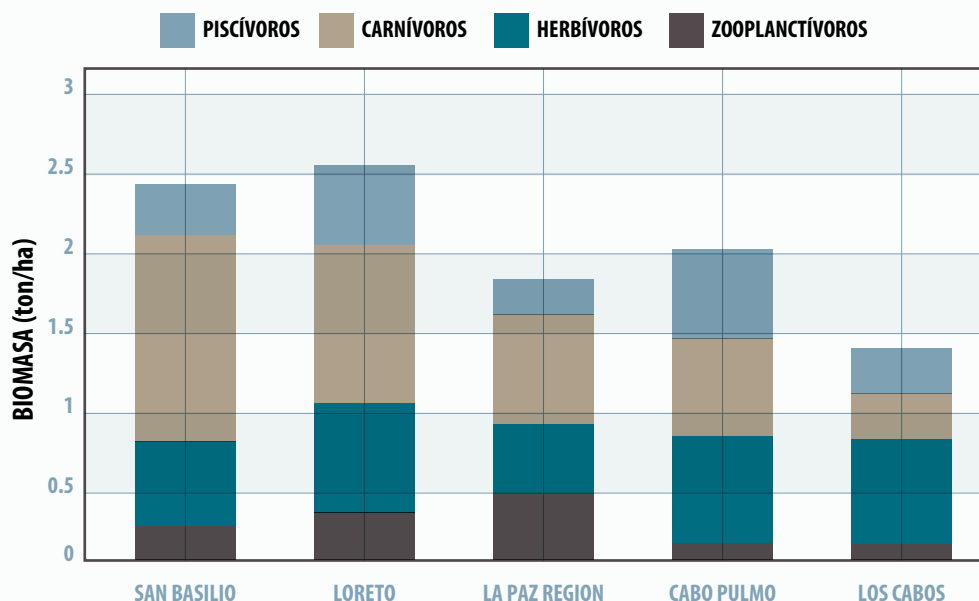


Figura 3. Estimaciones de biomasa de peces para cada grupo trófico en las regiones estudiadas durante el monitoreo de arrecifes rocosos en el 2022.



Sin embargo, observar la biomasa global por sí sola no es un buen indicador para evaluar el estado de salud de una comunidad de peces de un arrecife rocoso. Es fundamental interpretar correctamente el significado de los valores de biomasa de los distintos grupos tróficos. Si nos fijamos en qué grupo contribuye más a la elevada biomasa de San Basilio o Loreto, son los peces carnívoros, lo cual no es necesariamente un indicador de un arrecife saludable (Aburto et al., 2015). Dado que la presión pesquera actúa desproporcionadamente sobre los peces de mayor tamaño (es decir, los piscívoros), una elevada abundancia de carnívoros en el arrecife puede ser el resultado de la eliminación de depredadores más grandes que mantienen a raya a las poblaciones de carnívoros. Por el contrario, una elevada proporción de biomasa de peces de grupos tróficos superiores (piscívoros) puede ser señal de una baja presión pesquera.

Una gran proporción de depredadores tope hace que un arrecife se considere “saludable” (Aburto et al., 2015; Graham et al., 2017). Por ejemplo, los arrecifes de Cabo Pulmo no tienen los niveles más altos de biomasa global (Figura 3), pero las proporciones de los grupos tróficos que componen esa biomasa cuentan una historia diferente (Figura 4). Los depredadores tope (piscívoros) están presentes en más del 20% de los arrecifes de Cabo Pulmo. En la región de La Paz los arrecifes tienen, en mayor parte, pocos depredadores tope (Figura 4), lo que es un indicio de la continua presión pesquera sobre el arrecife o las áreas cercanas.



En Los Cabos, a pesar de que los arrecifes no tienen protección (no hay zonas totalmente protegidas), algunos de ellos están influenciados por un ambiente oceánico, ya que se encuentran entre diferentes ecorregiones formadas por la influencia de la corriente fría de California, las aguas cálidas tropicales del sur y las aguas subtropicales del Golfo de California. Esto explica que la biomasa de estos arrecifes muestre a veces una mayor proporción de piscívoros que visitan estos ecosistemas costeros desde ambientes pelágicos, atraídos por la alta productividad de la zona.

La gran proporción de herbívoros en Los Cabos también muestra que los arrecifes rocosos de esta región se asemejan a los arrecifes tropicales (como los arrecifes de coral) que pueden caracterizarse por una mayor diversidad de herbívoros (Graham et al., 2017) que han evolucionado para alimentarse de varias especies de algas. Esto difiere de los arrecifes subtropicales y semi templados que se encuentran en las regiones interiores del Golfo de California, donde los herbívoros suelen alimentarse de algas (Vergés et al., 2014, 2016; Bennett et al., 2015; Favoretto et al., 2022).

BIOMASA RELATIVA (%)

 PISCÍVOROS
  CARNÍVOROS
  HERBÍVOROS
  ZOOPLANCTÍVOROS

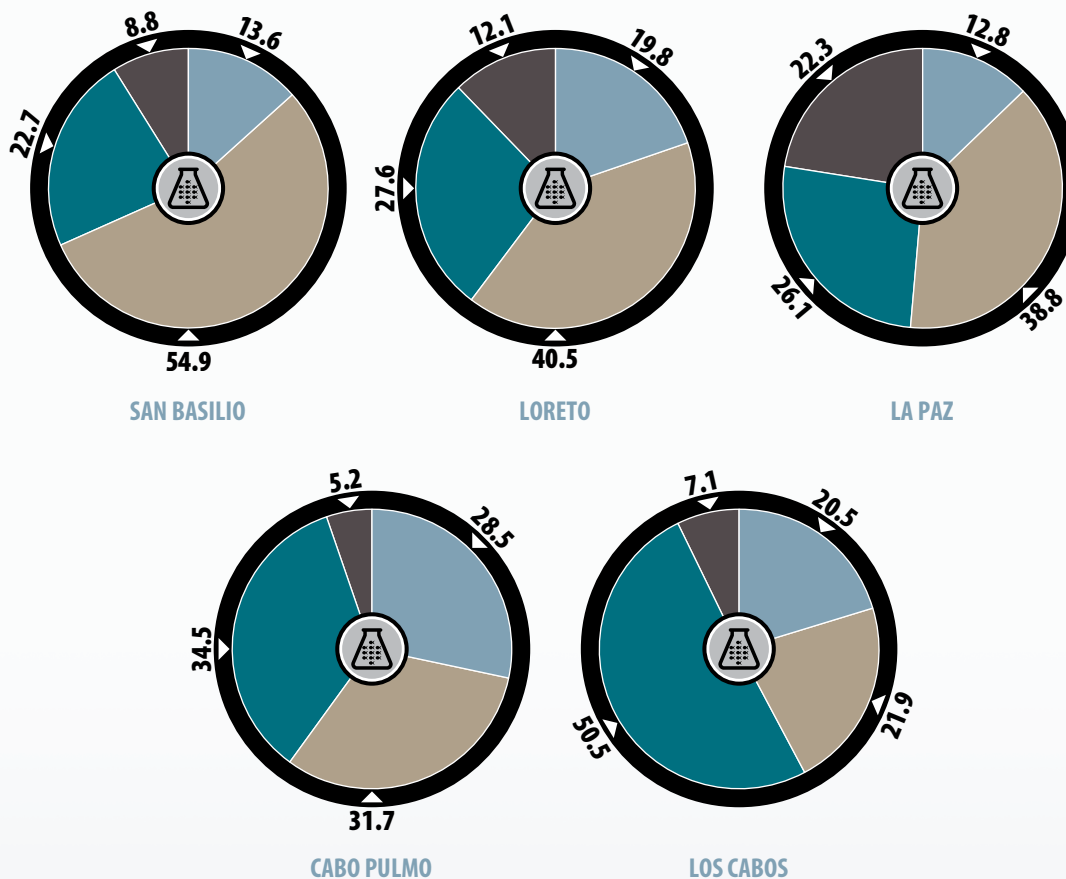


Figura 4. Biomasa relativa estimada para cada región monitoreada durante la temporada de monitoreo 2022.

Los cambios en la composición de la biomasa a lo largo del tiempo ofrecen una amplia perspectiva de cómo está cambiando la comunidad de un arrecife rocoso (Figura 5). Cabo Pulmo es la única región que muestra una biomasa global consistentemente superior a 2 ton/ha con una gran proporción de piscívoros tras la implementación de la reserva marina en 2007. Dos años de baja biomasa en 2011 y 2013 pueden atribuirse a la variabilidad natural, lo que subraya aún más la importancia de contextualizar las tendencias en el tiempo. Los arrecifes rocosos de Loreto muestran valores estables de biomasa, pero la mayor parte de esta biomasa está compuesta por peces carnívoros que, como se ha mencionado aquí y se conoce en la literatura, no refleja un estado saludable de la comunidad. La Paz muestra una tendencia decreciente en la biomasa total, principalmente debido a la disminución de la biomasa de piscívoros, lo que sugiere que la presión pesquera sobre los arrecifes y las áreas circundantes sigue siendo demasiado alta, obstaculizando la recuperación de la comunidad arrecifal.

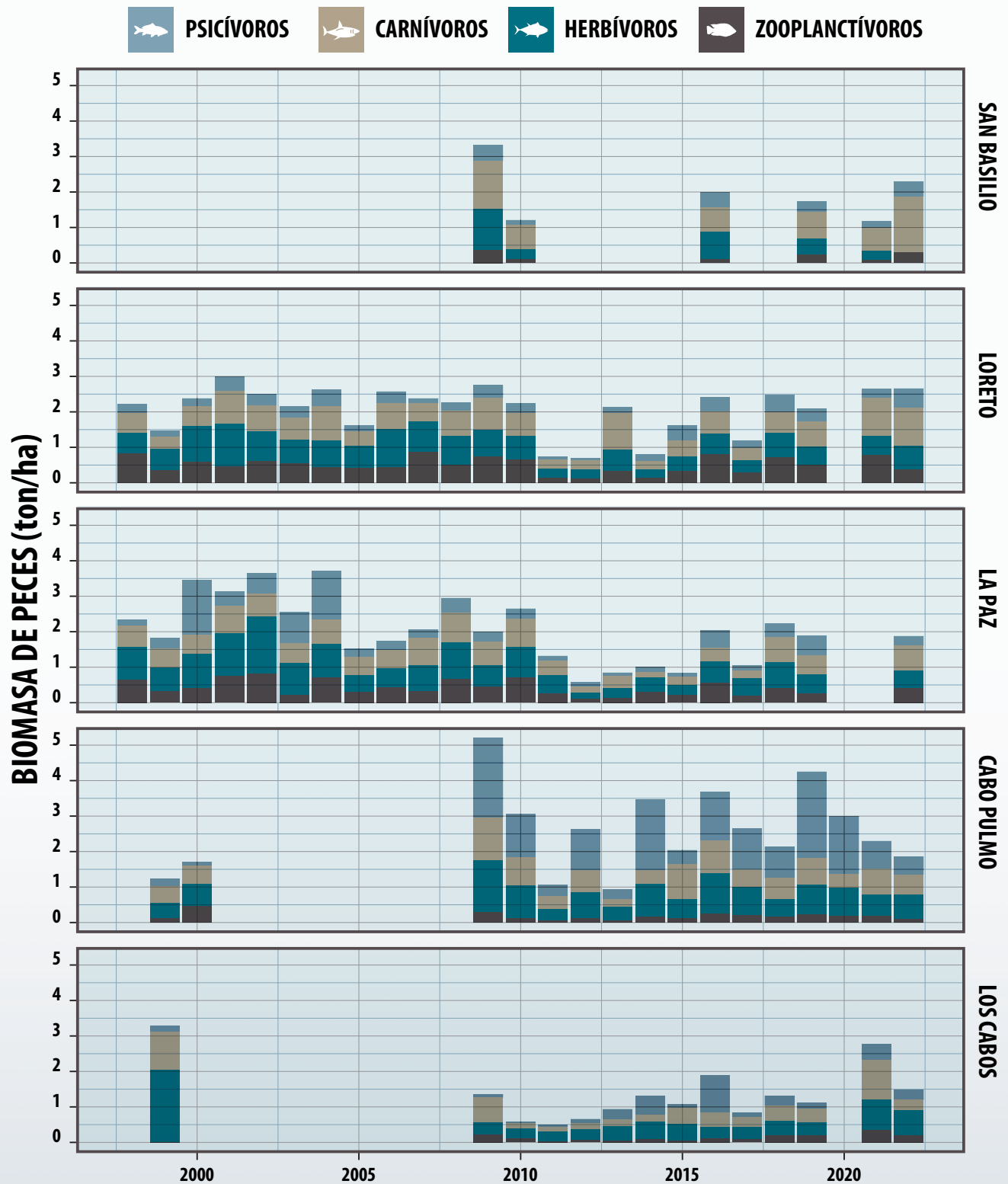


Figura 5. Biomasa total de peces registrada a lo largo de los años en cada región dividida por grupos tróficos.

Los arrecifes rocosos del GdC han estado bajo presión pesquera durante décadas (Sala et al., 2004; Rife et al., 2013b, 2013a; Aburto-Oropeza et al., 2015; Ulate et al., 2018; Girón-Nava et al., 2019), y a pesar de la implementación de áreas marinas protegidas (AMP) sólo el Parque Nacional Cabo Pulmo ha mostrado una gran recuperación de la biomasa de peces (Aburto-Oropeza et al., 2011) como resultado de la prohibición total de la pesca dentro de los límites de esta AMP. La interpretación de los datos ecológicos debe contextualizarse en el tiempo, pero también dentro del conocimiento actual de los sistemas. Por ejemplo, si la biomasa de peces herbívoros está aumentando, como se observa en los arrecifes de La Paz, pero la biomasa de otros grupos tróficos no aumenta proporcionalmente, es un indicio del desequilibrio del sistema y no debe considerarse un resultado positivo para la conservación.

Una comunidad de peces saludable tiene una mayor proporción de peces depredadores grandes, o bien, depredadores tope como tiburones o meros (Aburto-Oropeza et al., 2015; Graham et al., 2017). Por lo tanto, este es el mejor indicador para tener en cuenta cuando se intenta determinar si una comunidad arrecifal está en vías de recuperación o si puede considerarse saludable. El conocimiento del funcionamiento de una comunidad de arrecife rocoso solo ha sido posible gracias a la cobertura espacial y temporal de nuestro programa de monitoreo. Disponer de esta gran base de datos ha mejorado nuestra comprensión de cómo son las comunidades de arrecifes rocosos saludables, así como las líneas base y otros sistemas ecológicos con los que debemos compararlas (Aburto-Oropeza et al., 2015; Ulate et al., 2018).



¿CÓMO ESTÁ AFECTANDO EL CAMBIO CLIMÁTICO A LOS ARRECIFES ROCOSOS DEL SUR DEL GOLFO DE CALIFORNIA?

Las condiciones más cálidas que la media en el Golfo de California siguen manifestándose en los arrecifes rocosos desde que se comunicó recientemente (Favoretto et al., 2022) y no muestran signos de volver al mínimo histórico (Figura 6A). Las latitudes meridionales suelen ser $\sim 1^\circ\text{C}$ más cálidas que las del norte, pero durante el último El Niño, el calentamiento y las olas de calor homogeneizaron esta diferencia y aumentaron la temperatura media en más de 1°C . La actual fase de calentamiento es la más larga registrada desde 1982 e incluye intensas olas de calor marinas dentro de este periodo de calentamiento. Por ejemplo, el periodo de anomalía de calentamiento de 2021-2022 es tan fuerte y largo como El Niño de 1997, uno de los más fuertes jamás registrados (Figura 6A). Sin embargo, parece que los fenómenos extremos fueron menos frecuentes en 2022, ya que sólo se detectaron dos olas de calor (Figura 6B).

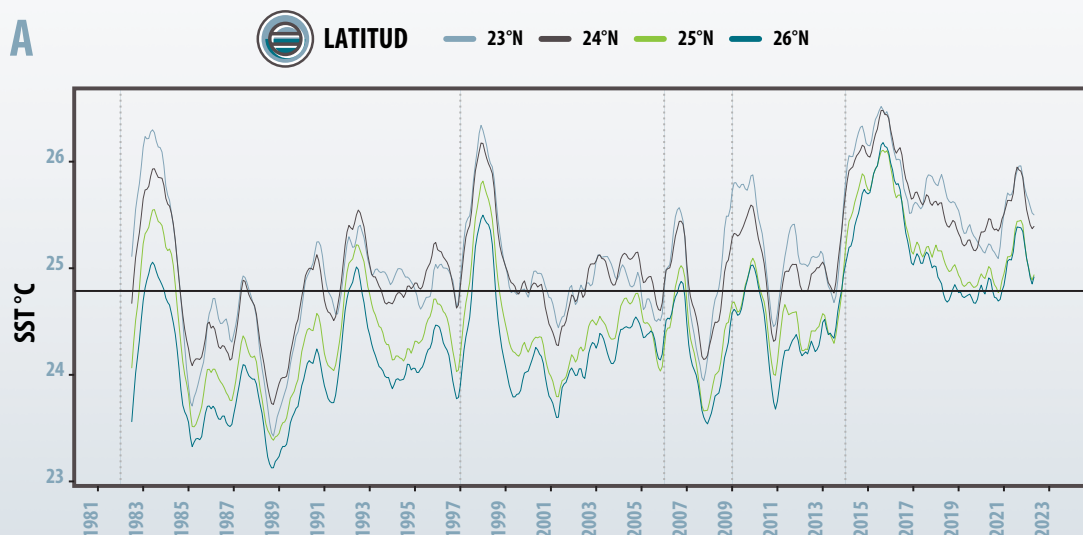


Figura 6. (A) Tendencia de la temperatura superficial del mar (TSM°C) en diferentes grados de latitud; la línea horizontal representa el promedio histórico.

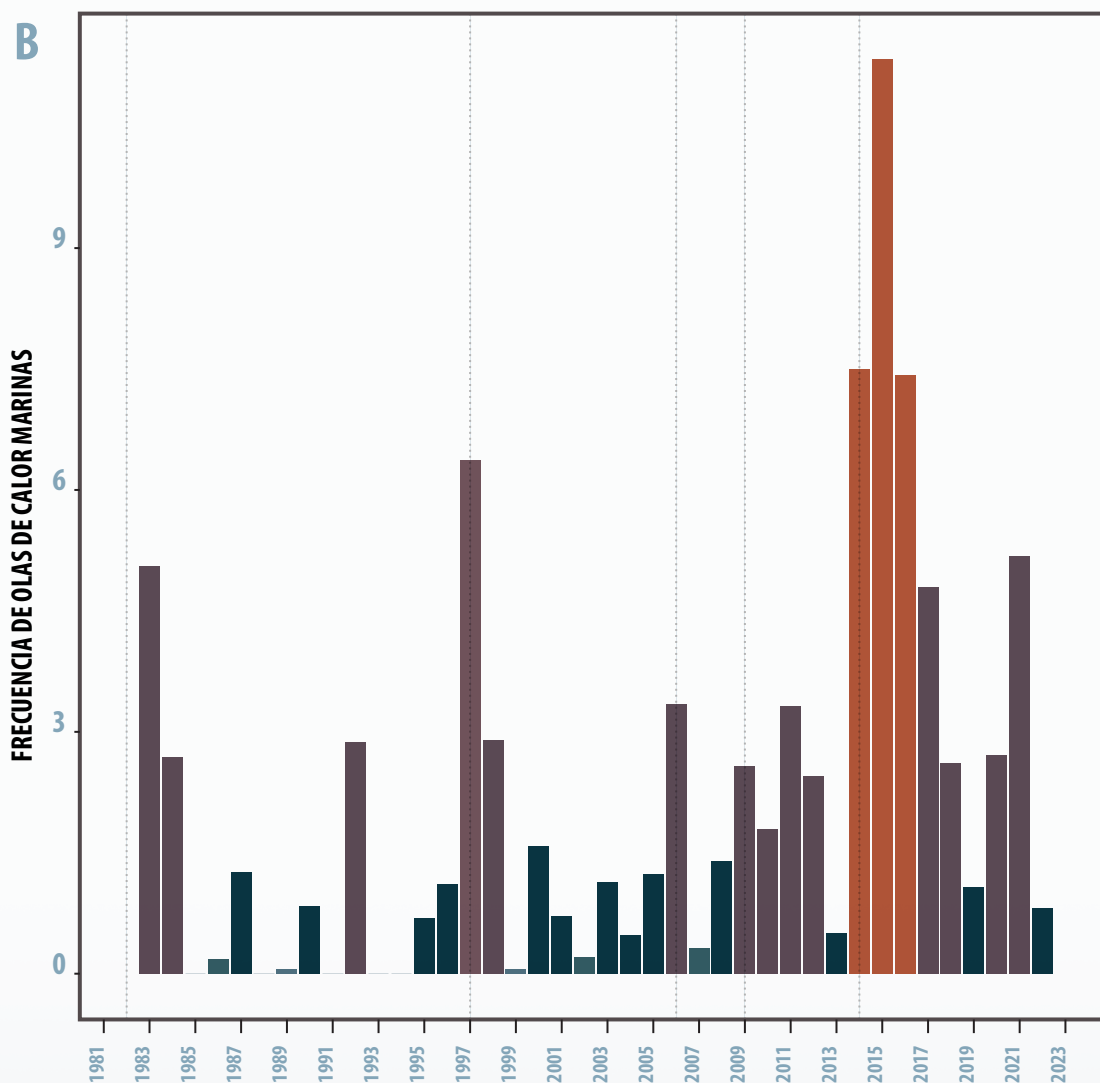


Figura 6. (B) Frecuencia anual de olas de calor marinas (ver métodos para más detalles sobre cálculos). Las líneas verticales punteadas indican los episodios de El Niño en ambos gráficos.

Estas tendencias al calentamiento tienen un efecto de tropicalización en los arrecifes rocosos y las comunidades que los habitan. Es decir, las especies con afinidades templadas disminuyen, mientras que aquellas con afinidades tropicales, o de mayor resistencia a las condiciones de calentamiento, aumentan. Este es el caso de los corales pétreos (*Hexacorallia*), que están limitados por las bajas temperaturas y el Golfo de California es uno de los puntos más al norte en su distribución mundial (Paz-García et al 2012; Favoretto et al, 2022). Los datos muestran que los corales pétreos están aumentando en La Paz y Loreto (Figura 7); ambas regiones pertenecientes a una zona de transición entre condiciones climáticas subtropicales y condiciones más templadas (Favoretto et al., 2022). Al mismo tiempo, en estas regiones se ha registrado una pérdida de especies con afinidades templadas como equinodermos (*Asterozoa* y *Echinozoa*) y corales blandos (*Octocorallia*) (Figura 7).

El efecto de tropicalización también se refleja en una tendencia decreciente en la riqueza de especies, excepto para los *Hexacorallia* cuya riqueza ha incrementado en la región de La Paz. Los datos muestran que no sólo está aumentando la abundancia de especies tropicales, sino que más especies están extendiendo su distribución hacia el norte. Las consecuencias globales de la tropicalización son todavía mayormente desconocidas y la investigación en ecosistemas como aguas más profundas y bosques de sargazo es necesaria para mejorar nuestra comprensión de sus impactos.



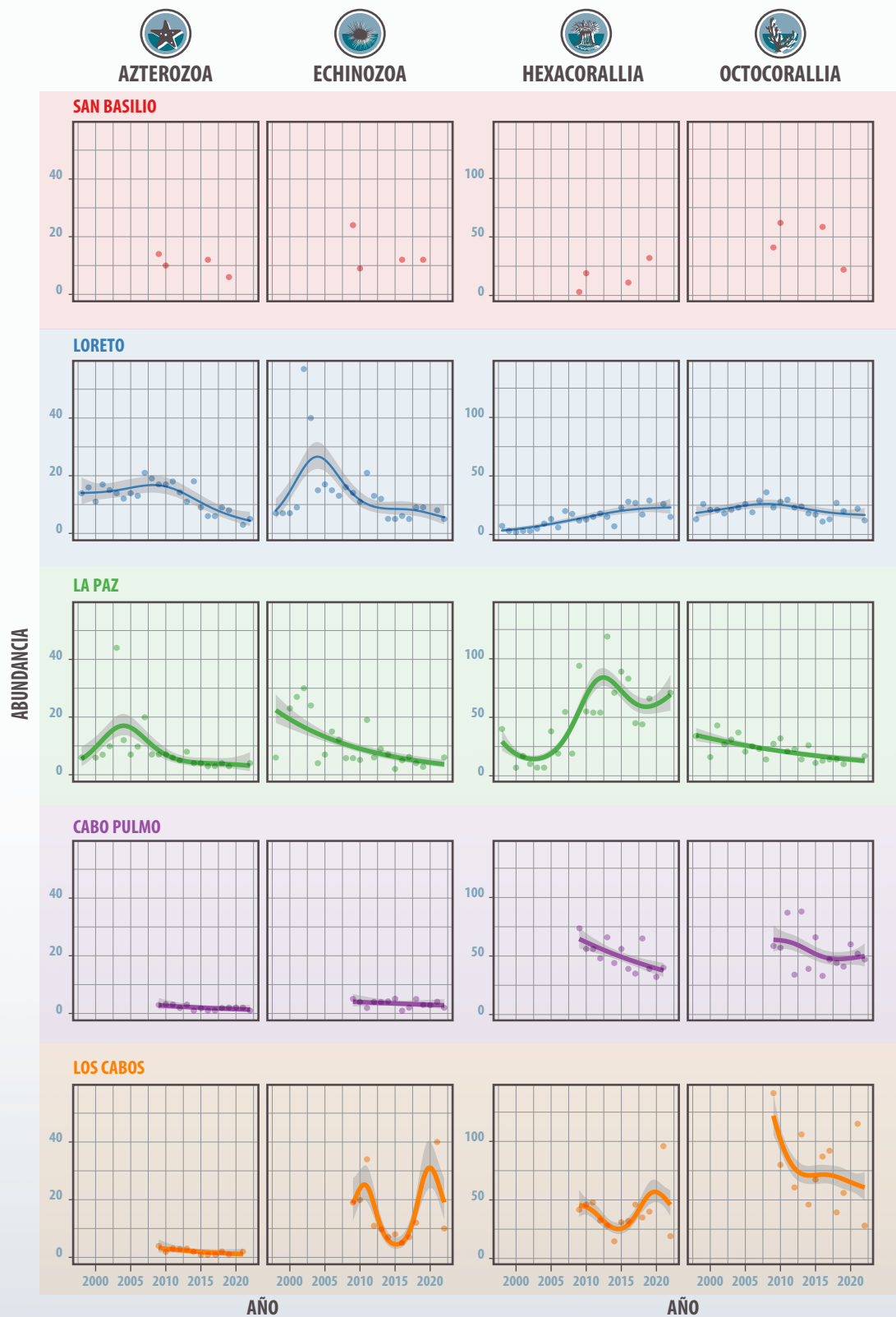


Figura 7. Tendencias de abundancia de grupos taxonómicos reconocidos como indicadores ecológicos críticos para los arrecifes rocosos del Golfo de California (Favoretto et al., 2022; Paz-García et al., 2012; Ulate et al., 2016). Asterozoa son estrellas de mar, Echinozoa son erizos de mar, Hexacorallia son corales pétreos y Octocorallia son corales blandos.



IMPACTO DEL HURACÁN ODILE EN LAS COMUNIDADES DE INVERTEBRADOS - UN ESTUDIO DE CASO.

Los arrecifes rocosos de Los Cabos son particularmente vulnerables a las tormentas tropicales y a los huracanes y, con el aumento de la frecuencia y la fuerza de estos fenómenos, es importante comprender su impacto en las comunidades de invertebrados de los arrecifes. Las comunidades de invertebrados epilíticos² tienen adaptaciones especiales que les permiten resistir los impactos físicos de la actividad de las olas. Sin embargo, cuando la fuerza de las olas se vuelve insoportable, la composición de las especies cambia como resultado de la eliminación de las especies fundacionales³ y de las especies pioneras de rápido crecimiento que colonizan más rápidamente la roca desnuda.

Después del huracán Odile, que azotó Baja California Sur en septiembre de 2014, grandes porciones de arrecifes rocosos anteriormente dominados por Octocorales (por ejemplo, *Leptogorgia rigida*) y Hexacorallia (por ejemplo, *Pocillopora* spp.) quedaron desnudos por el impacto de las olas. Tras estos daños tan extensos, unos poliquetos incrustantes (o gusanos segmentados) llamados *Idanthyrsus pennatus* colonizaron grandes porciones de las superficies rocosas (Figura 8). Durante varios años, *I. pennatus* fue la especie dominante, pero recientemente la cobertura de coral está empezando a aumentar lentamente a medida que *I. pennatus* disminuye (Figura 8). Este proceso se asemeja al proceso de sucesión de plantas que se produce en la roca desnuda en tierra firme y es indicativo de un estado estable alternativo. Las comunidades de los arrecifes cambian constantemente y se adaptan a su entorno.

A medida que cambian las condiciones ambientales y teniendo en cuenta el impacto del cambio climático, comprender la dinámica ecológica es crucial si queremos tener éxito en los esfuerzos de conservación y restauración de los ecosistemas. Este estudio de caso ofrece una visión de la recuperación de los corales y de la dinámica ecológica de los arrecifes rocosos del Golfo de California.

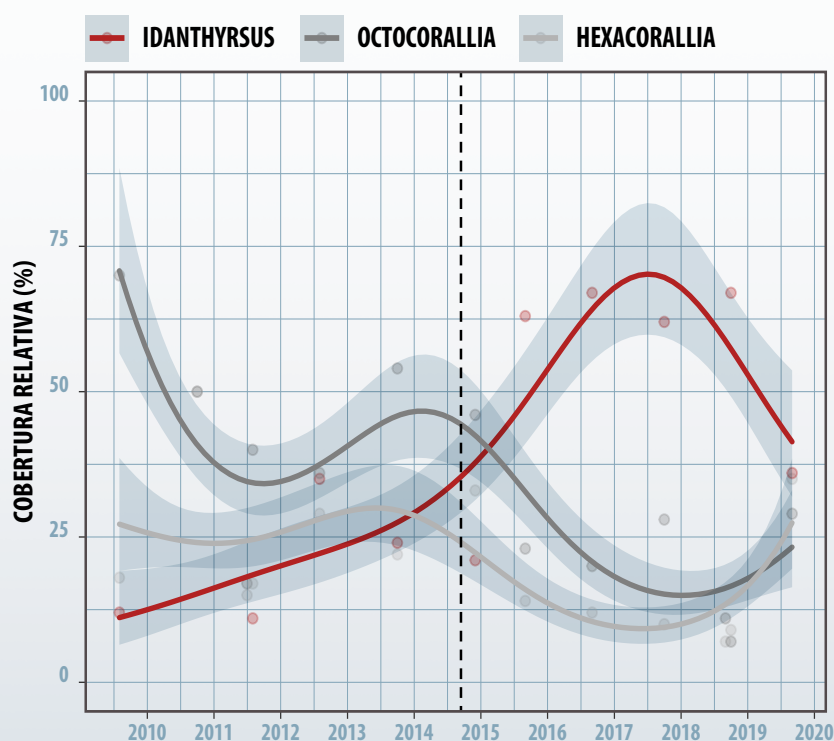


Figura 8. Cambios en el área de cobertura de especies dominantes en los arrecifes rocosos en Los Cabos, Baja California Sur, México. *Idanthyrsus pennatus* se volvió dominante después del impacto del huracán Odile en 2014 (línea negra vertical). Octocorallia y Hexacorallia son corales blandos y pétreos respectivamente.



² Se refiere a las especies que crecen en la superficie de las rocas.

³ En ecología, las especies fundacionales son aquellas que desempeñan un papel importante en la estructuración de una comunidad, por ejemplo, los corales, el kelp o las praderas marinas.





MÉTODOS

Datos de temperatura: Obtuvimos la temperatura superficial del mar óptimamente interpolada (OISST) de Reynolds para el sur del Golfo de California. El producto OISST es un conjunto de datos globales de $0,25 \times 0,25^\circ$ de las temperaturas de la superficie del mar derivadas del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) con una resolución diaria, desde 1982 hasta 2020. Más adelante en el texto, nos referiremos a los datos del OISST simplemente como TSM. Los datos de partida están actualmente disponibles en: <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>. El código se escribió en R studio IDE (v.1.4.1717) trabajando en R v.4.1.2. 2.2.

Olas de calor marinas: Para detectar eventos de olas de calor marinas, calculamos nuestro periodo climatológico (las propiedades estadísticas de la serie temporal, incluida la media, la varianza, el ciclo estacional y los cuantiles) sobre toda la serie temporal. A continuación, detectamos las olas de calor marinas a partir de los datos diarios de TSM dentro de cada cuadrícula de $0,25^\circ$ (es decir, cada píxel). Dado que el análisis se basa en píxeles, es independiente del tamaño del cuadro delimitador de la región seleccionada. El número y la duración de las olas de calor marinas se calcularon como períodos de cinco o más días consecutivos en los que la TSM diaria fue superior al percentil 90 de nuestro umbral climatológico basado en nuestras series temporales (Hobday et al, 2016). El análisis de las olas de calor marinas se completó utilizando el paquete R *heatwaveR* (Schegel et al., 2018).

Estudios sobre arrecifes rocosos: En este análisis se utilizaron datos sobre peces y macroinvertebrados recabados desde 1998. Estos datos se han recogido sistemáticamente mediante muestreos submarinos asistidos por SCUBA con métodos estándar para transectos visuales de banda. Cada buzo ha recibido una formación previa a los censos que consiste en la identificación de especies in situ y la estimación del tamaño y la distancia. En cada lugar, equipos de buceo de dos personas nadaron a lo largo de transectos de 50 m, con un observador registrando los peces y el otro los macroinvertebrados epibentónicos. Dentro de cada sitio, cuatro transectos se colocaron a 20 m y cuatro a 5 m de profundidad para un total de ocho transectos por sitio. Los buzos contaron y estimaron el tamaño de todos los peces en una franja de cinco metros de ancho a lo largo de cada transecto durante dos pasadas (250 m² de área total). Los distintos grupos de comportamiento (especies móviles frente a especies territoriales) se estudiaron en recorridos separados para garantizar que los individuos sólo se contaran una vez. Todos los macroinvertebrados se contaron e identificaron a lo largo de transectos de 30 m con un ancho de banda de un metro (30 m²). La longitud total de los peces se estimó al centímetro más próximo y las longitudes específicas individuales se convirtieron después en pesos corporales. La biomasa de los peces individuales se estimó utilizando la conversión alométrica longitud-peso $W = aTL^b$, donde los parámetros a y b son constantes específicas de la especie, TL es la longitud total en cm y W es el peso en gramos. Los parámetros de ajuste longitud-peso se obtuvieron de FishBase15. El producto cruzado de los pesos individuales y las densidades numéricas se utilizó para estimar la biomasa por especies convertida a toneladas/ha.

Análisis de series temporales: Se analizaron las tendencias temporales de la abundancia de invertebrados y la biomasa de peces, ya que son los principales indicadores para evaluar el estado de los arrecifes rocosos. Ajustamos modelos aditivos generalizados (GAM) al promedio de abundancia y biomasa para describir las tendencias en el tiempo. Para los efectos de Los Cabos antes/después del huracán calculamos la cobertura de Octocorales, Hexacorallia e *Idanthysus pennatus* siguiendo los métodos descritos en Ulate et al. (2016) multiplicando la abundancia por el tamaño estimado bajo el agua de las colonias.





RECONOCIMIENTOS

El programa de monitoreo ecológico de arrecifes rocosos cuenta con el apoyo de la Fundación David y Lucile Packard, la International Community Foundation, Los Cabos Coastkeeper y otros financiadores. Agradecemos todo el apoyo brindado por nuestros colaboradores durante las actividades de monitoreo: Dolphin Dive Center en Loreto, Cabo Pulmo Divers, Cirjaro Tours en Cabo San Lucas, Buzos y Pescadores Nativos de Sudcalifornia en La Paz, así como la comunidad de San Basilio y Casa La Marquesa.

El trabajo de campo fue coordinado por el Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación, mientras que el análisis de los datos está dirigido por el Aburto Lab del Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California en San Diego. El Programa Marino del Golfo de California del Instituto de las Américas coordina el equipo binacional de científicos que participan en este programa de investigación.



REFERENCIAS

Aburto-Oropeza, O., Ezcurra, E., Moxley, J., Sánchez-Rodríguez, A., Mascareñas-Osorio, I., Sánchez-Ortiz, C., et al. (2015). A framework to assess the health of rocky reefs linking geomorphology, community assemblage, and fish biomass. *Ecol Indic* 52, 353–361. doi: 10.1016/j.ecolind.2014.12.006.

Bennett, S., Wernberg, T., Harvey, E. S., Santana-Garcon, J., and Saunders, B. J. (2015). Tropical herbivores provide resilience to a climate-mediated phase shift on temperate reefs. *Ecol Lett* 18, 714–723. doi: 10.1111/ele.12450.

Favoretto, F., Sanchez-Ortiz, C., and Aburto-Oropeza, O. (2022). Warming and marine heatwaves tropicalize rocky reefs communities in the Gulf of California. *Prog Oceanogr*, 102838. doi: 10.1016/j.pocean.2022.102838.

Giron-Nava, A., Johnson, A. F., Cisneros-Montemayor, A. M., and Aburto-Oropeza, O. (2019). Managing at Maximum Sustainable Yield does not ensure economic well-being for artisanal fishers. *Fish Fish* 20, 214–223. doi: 10.1111/faf.12332.

Paz-Garcia, D. A., Balart, E. F., and García-de-Léon, F. J. (2012). Cold water bleaching of *Pocillopora* in the Gulf of California. in *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium* (Cairns, Australia).

Rife, A. N., Aburto-Oropeza, O., Hastings, P. A., Erisman, B., Ballantyne, F., Wielgus, J., et al. (2013a). Long-term effectiveness of a multi-use marine protected area on reef fish assemblages and fisheries landings. *J Environ Manage* 117, 276–283. doi: 10.1016/j.jenvman.2012.12.029.

Rife, A. N., Erisman, B., Sanchez, A., and Aburto-Oropeza, O. (2013b). When good intentions are not enough ... Insights on networks of “paper park” marine protected areas. *Conserv Lett* 6, 200–212. doi: 10.1111/j.1755-263x.2012.00303.x.

Sala, E., Aburto-Oropeza, O., Reza, M., Paredes, G., and López-Lemus, L. G. (2004). Fishing Down Coastal Food Webs in the Gulf of California. *Fisheries* 29, 19–25. doi: 10.1577/1548-8446(2004)29[19:fdcfw]2.0.co;2.

Ulate, K., Alcoverro, T., Arthur, R., Aburto-Oropeza, O., Sánchez, C., and Huato-Soberanis, L. (2018). Conventional MPAs are not as effective as community co-managed areas in conserving top-down control in the Gulf of California. *Biol Conserv* 228, 100–109. doi: 10.1016/j.biocon.2018.09.033.

Vergés, A., Doropoulos, C., Malcolm, H. A., Skye, M., Garcia-Pizá, M., Marzinelli, E. M., et al. (2016). Long-term empirical evidence of ocean warming leading to tropicalization of fish communities, increased herbivory, and loss of kelp. *Proc National Acad Sci* 113, 13791–13796. doi: 10.1073/pnas.1610725113.

Vergés, A., Steinberg, P. D., Hay, M. E., Poore, A. G. B., Campbell, A. H., Ballesteros, E., et al. (2014). The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts. *Proc Royal Soc B Biological Sci* 281, 20140846. doi: 10.1098/rspb.2014.0846.



