

ARRECIFES ROCOSOS

PROGRAMA DE MONITOREO

CAMPAÑA 2023



**PREPARADO POR:****Catalina López-Sagástegui**

Programa Marino del Golfo de California
Institute of the Americas

Octavio Aburto Oropeza**Fabio Favoretto**

Scripps Institution of Oceanography

Magali Alejandra Ramírez Zuñiga**Melissa Salgado Castrejón****Eduardo León Solórzano****Alexandro Rodríguez De La Peña****Odman Oziel Ortiz Ortiz****Benigno G. Guerrero Martínez****Yamili Alexandra Carmona Ruiz****Valentina Platzgummer****Ariadne Molina Alonso****Marisol Plascencia de la Cruz**

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

**DISEÑO**

dataMares

ENERO 2024

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).





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. Este esfuerzo colaborativo reúne a científicos, jóvenes profesionales y a estudiantes de instituciones de investigación y organizaciones de conservación de los Estados Unidos y México. Bajo la dirección del Dr. Octavio Aburto del Instituto de Oceanografía Scripps (SIO por sus siglas en inglés) de la Universidad de California en San Diego, y con el apoyo del Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación A.C. (CBMC) en La Paz, B.C.S., las campañas anuales han permitido a los científicos rastrear y evaluar la salud de los arrecifes rocosos en el Golfo de California. Además, estos viajes de trabajo en campo brindan oportunidades para que jóvenes y científicos iniciando sus carreras sigan desarrollando habilidades y adquiriendo experiencia.

El Programa de Monitoreo Ecológico se estableció en 1998 cuando un grupo de científicos y estudiantes del SIO, el Acuario Birch en Scripps y la Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS) se propusieron estudiar arrecifes rocosos costeros a lo largo del Golfo de California con el objetivo de aumentar el conocimiento y comprensión de estos ecosistemas submarinos. Recopilando datos sobre la composición de especies, abundancia, nivel trófico, tamaño y otros indicadores ecológicos, este pequeño grupo de científicos comenzó a construir una línea base de conocimiento para las comunidades de invertebrados y peces en los arrecifes rocosos. Durante estos 25 años de trabajo ininterrumpido, el programa ha evolucionado para dar cabida a nuevos colaboradores, ideas, hipótesis de investigación, metodologías y herramientas que nos permiten llegar a ecosistemas poco estudiados y recopilar más datos.

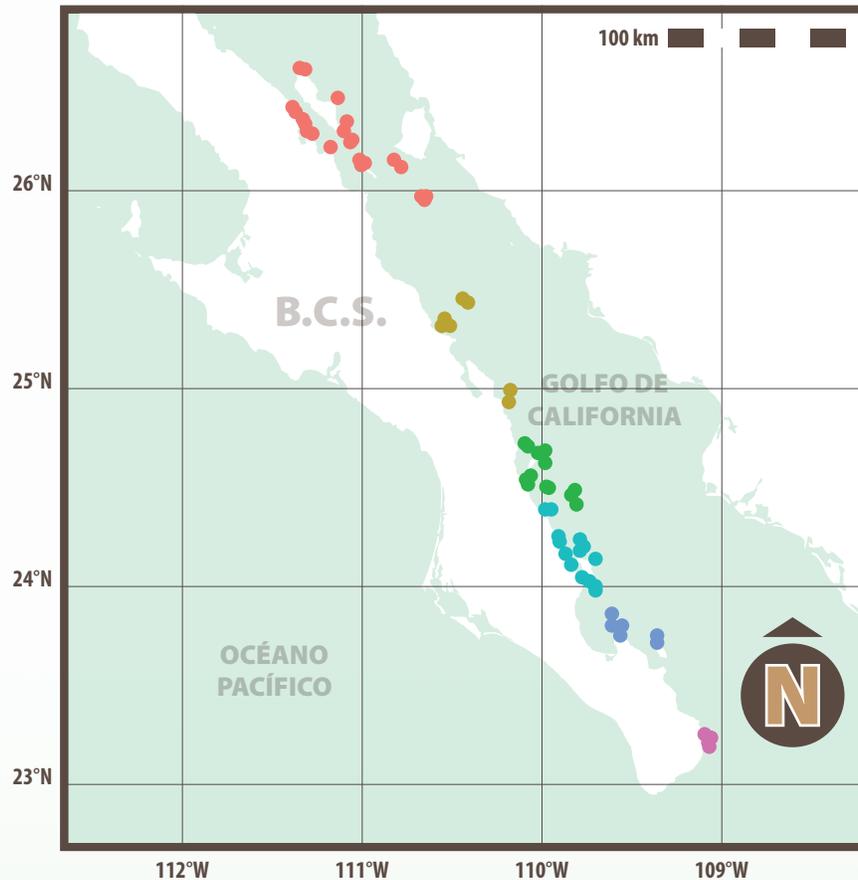
Quizás el mayor beneficio derivado de este programa de monitoreo de largo plazo es que proporciona la información necesaria para evaluaciones ambientales y mejora nuestra comprensión colectiva de cómo ecosistemas marinos sostienen economías locales y regionales. A lo largo de los años, la información que hemos generado se ha utilizado en estudios que evalúan amenazas ambientales y desafíos de conservación, además de permitir monitorear cambios debido a factores naturales y antropogénicos. Este programa también ha brindado oportunidades de capacitación y creación de redes para estudiantes y científicos que buscan obtener experiencia práctica mientras deciden el camino que quisieran tomar en sus carreras académicas y profesionales.

Para celebrar el 25 aniversario del programa de monitoreo de arrecifes rocosos, un grupo de 10 científicos, 3 fotógrafos y 8 estudiantes abordaron el barco Quino el Guardián para recrear la campaña de monitoreo original de 1998. Durante 30 días, el equipo documentó el estado de las comunidades de arrecifes rocosos, exploró ecosistemas profundos y pelágicos con la última tecnología, estudió ecosistemas de carbono azul a lo largo de la costa y recopiló material fotográfico y de video. Este informe incluye algunos de los hallazgos más relevantes de 2023 y una visión general de lo que este programa de investigación ha logrado en sus primeros 25 años de existencia.



REGIONES Y SITIOS DE MONITOREO DE ARRECIFES ROCOSOS

La campaña de monitoreo de 2023 incluyó 83 arrecifes rocosos que han sido monitoreados a lo largo de estos 25 años. Los sitios están agrupados por región según sus características ecológicas generales.



NÚMERO DE ARRECIFES ROCOSOS

83



NÚMERO DE TRANSECTOS

1128



INVERTEBRADOS

564



PECES

564



ÁREA TOTAL MONITOREADA

142,800 m²



TIEMPO TOTAL BAJO EL AGUA

131 HORAS/PERSONA



PUNTOS DE CONTACTO

720,280



ESPECIES DE INVERTEBRADOS

102



NÚMERO DE ESPECIES REGISTRADAS

255



INVERTEBRADOS

128



PECES

127



NÚMERO DE ORGANISMOS

CONTADOS Y MEDIDOS

131,146



INVERTEBRADOS

50,616

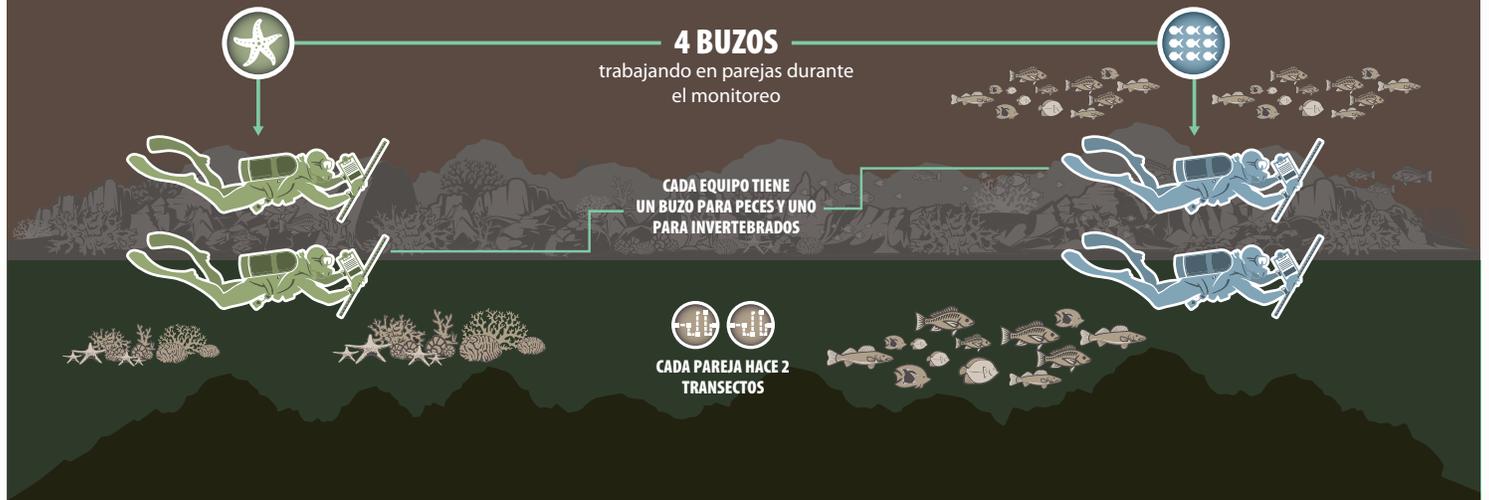


PECES

80,530

Los buzos siguen la metodología de monitoreo establecida hace 25 años (Rodríguez et al., 2014) que incluye dos parejas de investigadores monitoreando cada sitio. Cada equipo incluye un buzo que se enfoca en estudiar peces, mientras que el otro en invertebrados.

MONITOREO DE ARRECIFES ROCOSOS: EQUIPO DE BUZOS



MONITOREO DE ARRECIFES ROCOSOS: METODOLOGÍA





MONITOREO DE LA SALUD DE ARRECIFES ROCOSOS EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

La abundancia de especies, la riqueza, la biomasa y la biomasa relativa son algunas de las métricas que hemos utilizado para evaluar la salud de un ecosistema arrecifal a lo largo del tiempo. Una forma de medir la diversidad es a través de la riqueza de especies ya que muestra el número de especies diferentes presentes en cada sitio monitoreado (Figura 1). Sin embargo, para evaluar la salud de un ecosistema debemos considerar indicadores adicionales como la biomasa y la biomasa relativa, las cuales solo calculamos para los peces. La biomasa se refiere a la masa total de organismos vivos y se calcula combinando dos variables: el número de individuos y su tamaño (Figura 2). La biomasa relativa es la comparación de la biomasa entre grupos tróficos (piscívoros, carnívoros, herbívoros y zooplanctívoros) (Figura 3).

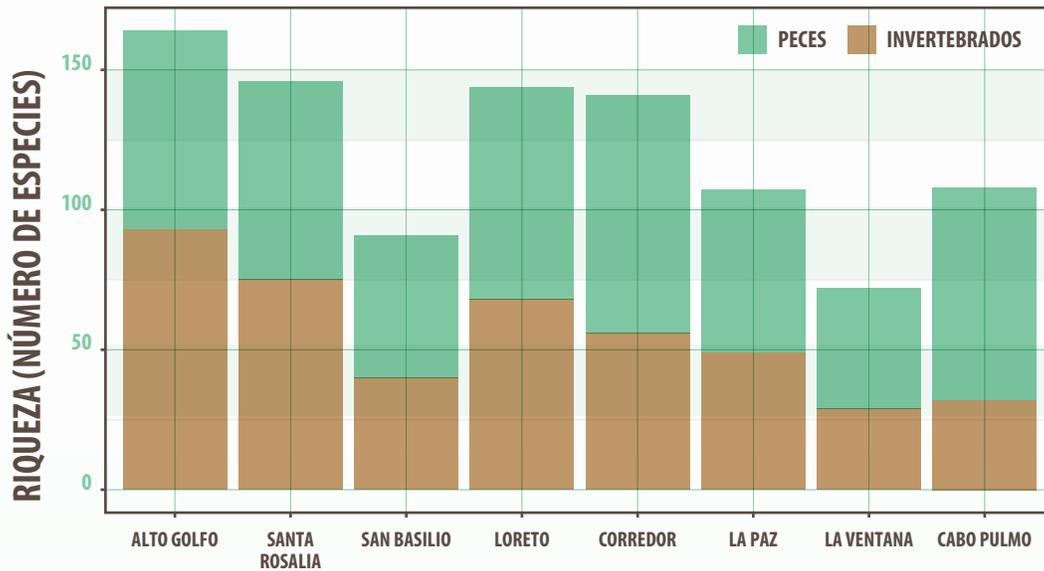


Figura 1. Número de especies de invertebrados y peces registrados durante el 2023 en las distintas regiones que se visitaron.

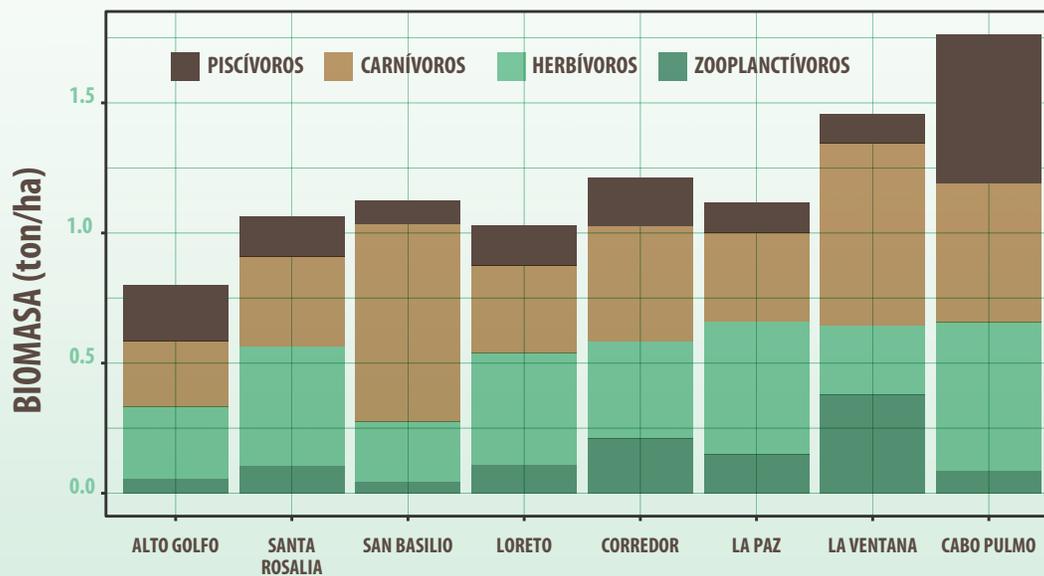


Figura 2. Estimaciones de biomasa de peces para cada grupo trófico en cada región del Golfo de California.





Cuanto mayor sea la biomasa y la riqueza en un ecosistema, más saludable podemos considerarlo ya que estas dos variables indican que el buen funcionamiento del ecosistema. Si estas métricas aumentan o se mantienen a lo largo del tiempo, podemos concluir que los ecosistemas están prosperando, creciendo o recuperándose activamente de cualquier impacto negativo. Sin embargo, si estos indicadores muestran una tendencia decreciente en el tiempo, podemos asumir que el ecosistema se está deteriorando o ha sido alterado de alguna manera. Los datos recopilados en 2023 muestran que tanto la riqueza como la biomasa han permanecido similares, lo cual se puede considerar como una señal positiva. A pesar de esto, debemos examinar la información más de cerca para obtener una visión más completa de lo que pudiera estar sucediendo.

Las estimaciones de biomasa relativa brindan información sobre la función del ecosistema al mostrar la contribución de cada grupo trófico a la biomasa (Figura 3). En un ecosistema saludable, esperamos ver una gran proporción de depredadores tope (piscívoros) en comparación con los niveles tróficos más bajos (Aburto et al., 2015; Graham et al., 2017). Por ejemplo, en San Basilio y La Ventana, los carnívoros contribuyen en su mayoría a la biomasa; sin embargo, estas son áreas donde la presión pesquera parece estar actuando de manera desproporcionada sobre los peces más grandes. Esta alta abundancia de carnívoros puede ser el resultado de la eliminación de depredadores tope (es decir, piscívoros) que mantienen las poblaciones de carnívoros bajo control. De esta manera, una alta proporción de la biomasa de peces de grupos tróficos más altos (piscívoros) puede ser un indicio de una baja presión pesquera, como se observa en Cabo Pulmo, en donde las proporciones entre grupos tróficos son similares (excepto los zooplanctívoros, los cuales tienen un ciclo de vida más corto).

BIOMASA RELATIVA (%)

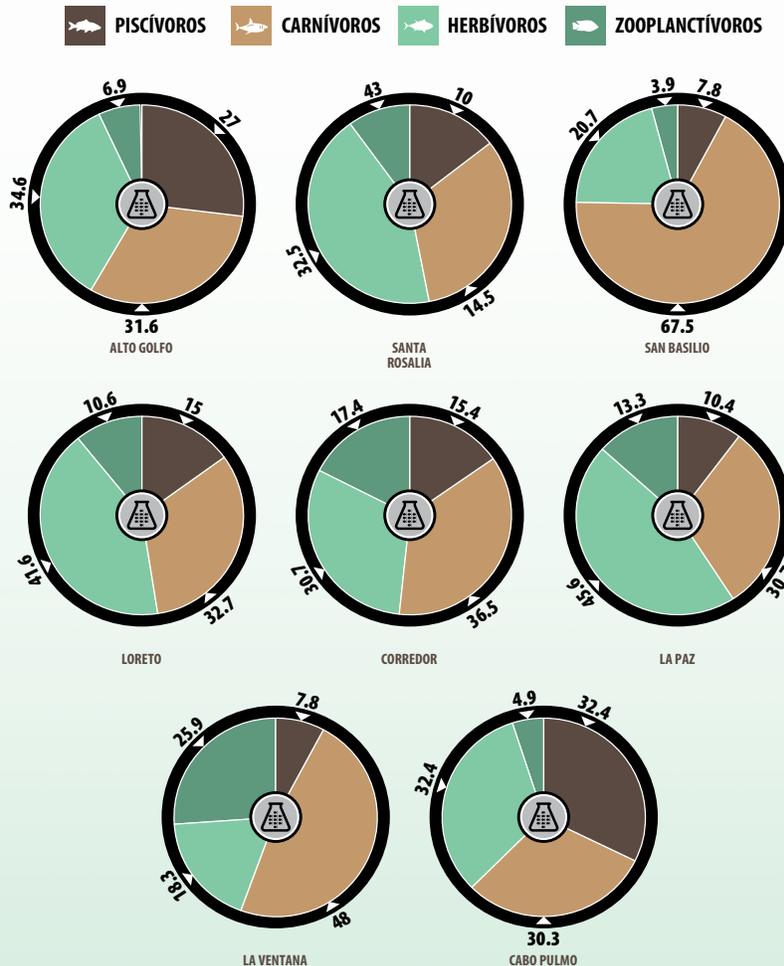


Figura 3. Biomasa relativa estimada para las regiones monitoreadas en 2023.





Los datos recopilados durante los 25 años de monitoreo nos permiten evaluar los cambios en la biomasa a lo largo del tiempo dado que estos suelen ser un reflejo de anomalías a gran escala (Figura 4). Cabo Pulmo, la única área donde no se permite la pesca, es la única región donde consistentemente se registra una gran proporción de piscívoros en sus arrecifes. En contraste, la falta de depredadores en el Corredor y La Paz sugiere que la presión pesquera es alta. Los datos muestran que en Loreto la biomasa se mantiene consistente, pero existe poca biomasa de depredadores en comparación con otros niveles tróficos, lo cual también se puede interpretar como el resultado de una presión pesquera constante. La baja biomasa registrada en 2011 y 2013 se puede atribuir a un fenómeno de variabilidad natural que afectó a todo el Golfo de California.

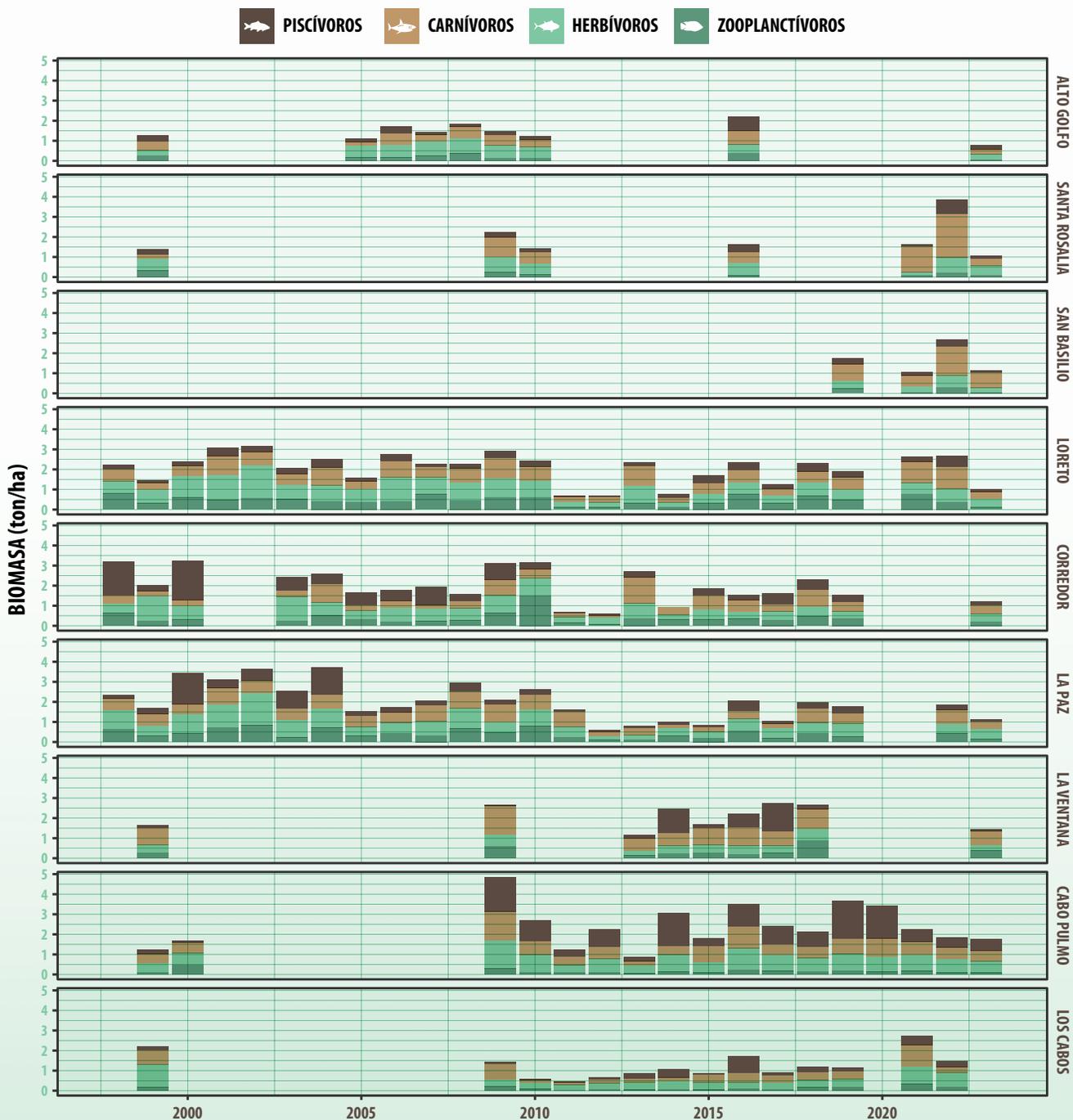


Figura 4. Biomasa estimada en las regiones monitoreadas a lo largo de los años. Cabo Pulmo fue la única región monitoreada en el 2020 después de obtener permiso para entrar al Parque Nacional mientras las actividades estaban restringidas por la pandemia provocada por el COVID-19.





CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS ARRECIFES ROCOSOS EN EL GOLFO DE CALIFORNIA

Las olas marinas de calor (MHWs, por sus siglas en inglés) son períodos prolongados de temperaturas elevadas en la superficie del mar que catalizan cambios ecológicos con implicaciones significativas en los paradigmas del cambio climático (Wernberg et al., 2013). En el 2023 se registraron múltiples olas en los arrecifes rocosos del Golfo de California (Figura 5). Estas anomalías térmicas pueden provocar alteraciones biológicas en los ecosistemas marinos, especialmente en regiones con una alta biodiversidad y redes ecológicas complejas (Filbee-Dexter et al., 2020). Favoretto et al. (2022) resaltan el papel que las olas de calor marinas juegan en el fenómeno de tropicalización de los arrecifes rocosos y sugieren que estos eventos térmicos promueven la dominancia de especies adaptadas a aguas cálidas sobre sus contrapartes adaptadas a ambiente templados, lo cual cataliza una homogeneización ecológica a través de distintas zonas climáticas.

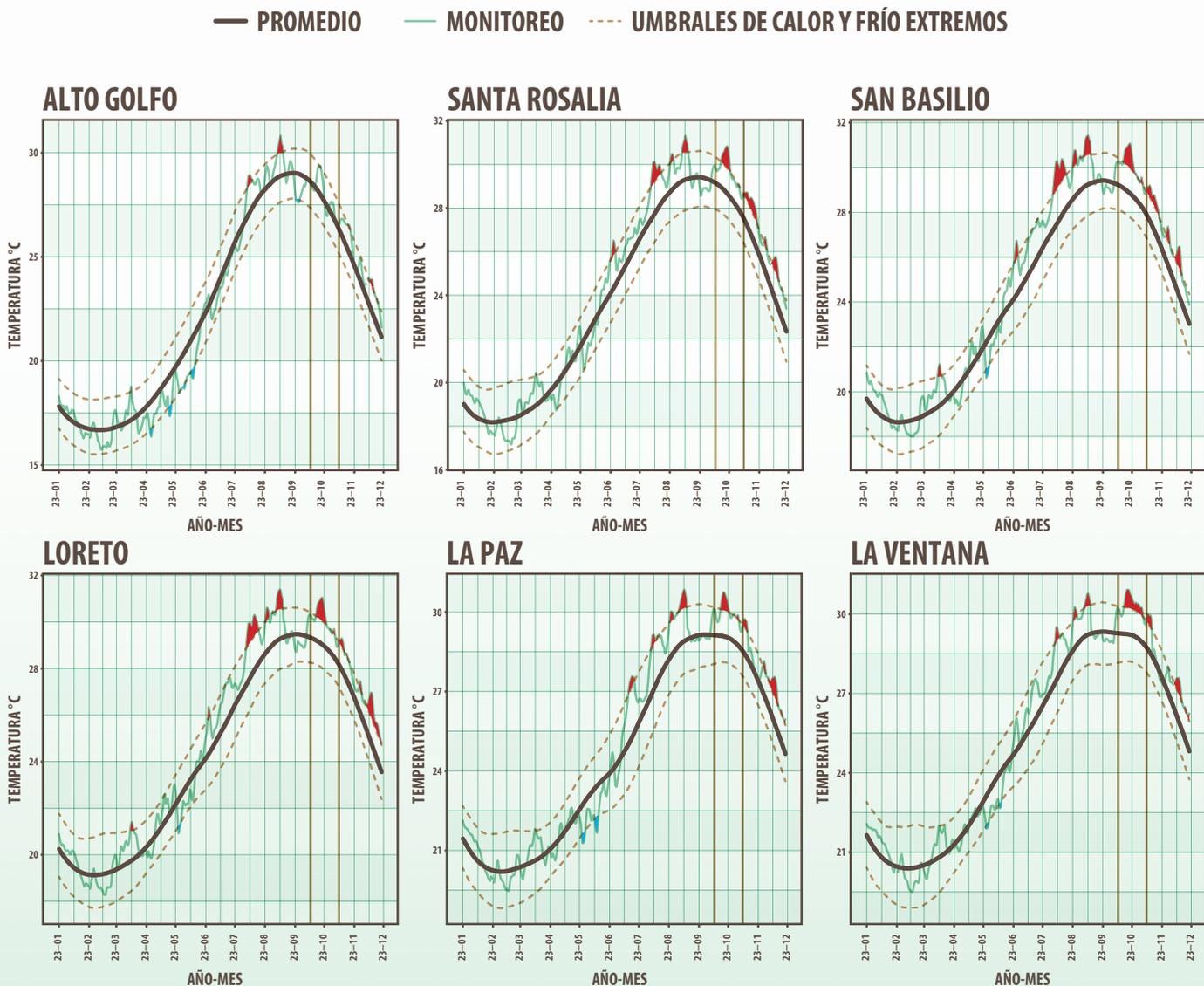


Figura 5. Olas marinas de calor detectadas durante 2023. La línea café oscura representa la condición climatológica promedio, las líneas punteadas café representan los umbrales del percentil 95 y 10 que definen eventos de calor extremo y frío. La línea verde es la temperatura obtenida mediante teledetección satelital. Los días que registraron temperaturas por encima o por debajo del umbral están sombreados en rojo o azul, indicando olas de calor o períodos de frío respectivamente. Finalmente, las dos líneas verticales representan las fechas de nuestra expedición durante el 2023.





Mientras que las olas marinas de calor marino suelen ser monitoreadas mediante sensores de temperatura superficial (Reynolds et al., 2007), nuevos hallazgos destacan comportamientos térmicos complejos más allá de las capas superficiales, incluyendo anomalías que no se detectan (Wyatt et al., 2023; Zhang et al., 2023). Durante la campaña de monitoreo del 2023, detectamos una ola de calor en 30 arrecifes distribidos a través de 6 grados de latitud, por lo que analizamos registros de la temperatura en la columna de agua antes y después del evento.

Este análisis mostró alteraciones térmicas significativas, especialmente más allá de los 20 metros de profundidad, donde las anomalías térmicas fueron más intensas (Figura 6). Aunque seguimos corriendo el análisis, el aumento de las anomalías con la profundidad es evidente, sugiriendo que las olas de calor marino pueden tener un impacto en los arrecifes más profundos, potencialmente llevando a la redistribución de especies verticalmente y a efectos adversos en aquellas especies adaptadas a condiciones térmicas estables (Bates et al., 2018).

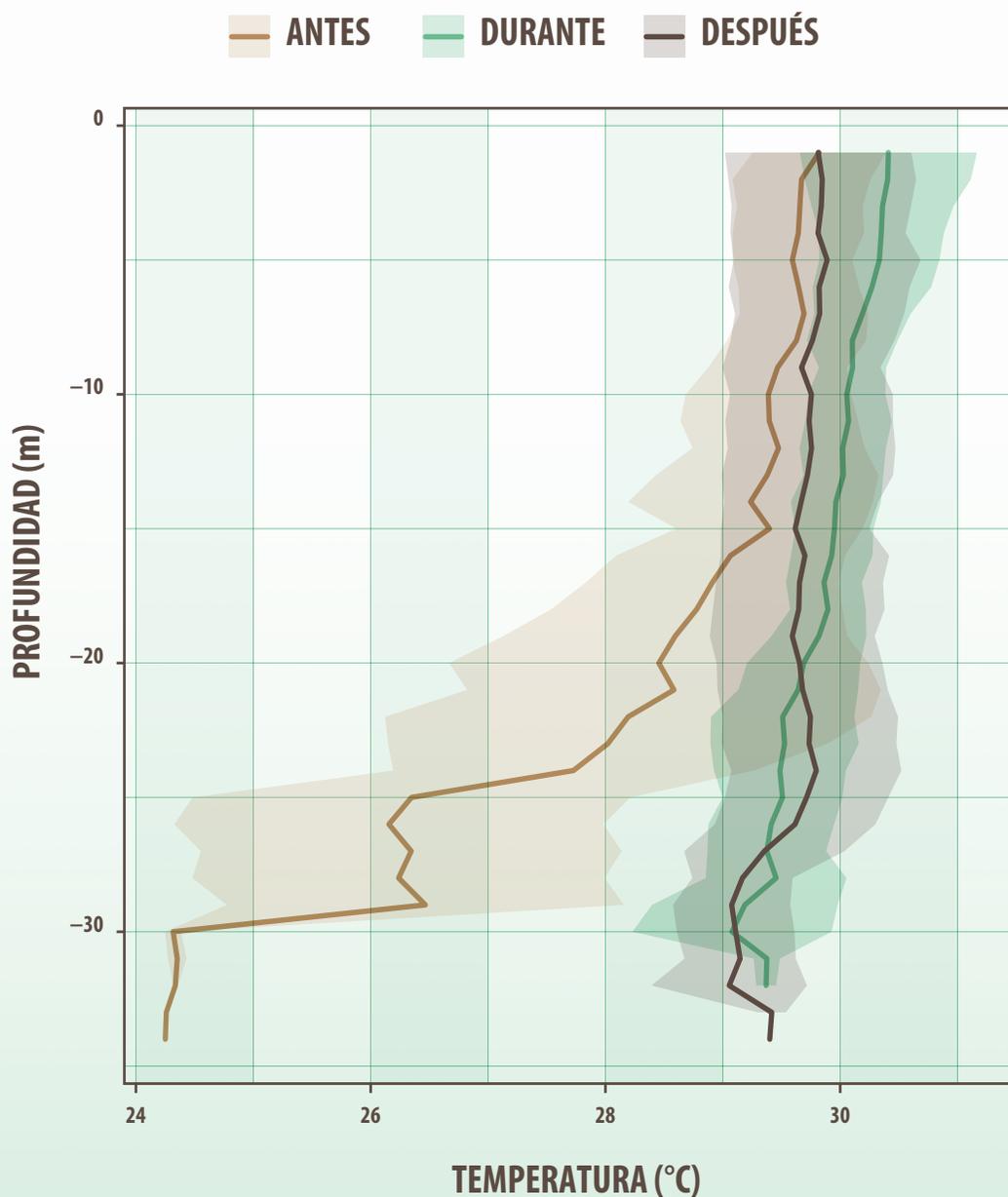


Figura 6. Variaciones en la temperatura de la columna de agua antes (café), durante (verde) y después (café oscuro) de una ola de calor marina. Las áreas sombreadas representan la variación de los perfiles de temperatura en cada etapa.



MATERIALES Y MÉTODOS

Datos del perfil de temperatura de arrecifes rocosos

Recopilamos perfiles de temperatura del agua en arrecifes rocosos utilizando computadoras de buceo con termómetro integrado. Este dispositivo registró la temperatura continuamente durante cada inmersión. Para garantizar consistencia, todas las inmersiones se realizaron en momentos similares cada día, específicamente alrededor de las 07:00, 09:00, 11:00 y 15:00 horas. Después de cada inmersión, se extrajeron los datos para procesarlos de manera estructurada. Inicialmente registradas en Kelvin, las mediciones de temperatura se convirtieron a grados Celsius, mientras que la profundidad se registró en metros. Todas las inmersiones superaron consistentemente los 20 metros de profundidad. La recopilación de datos formó parte de una expedición en barco desde el 16 de septiembre hasta el 15 de octubre de 2023. Para fines analíticos, categorizamos los sitios de buceo por grado de latitud para servir como un proxy neutral de variaciones ambientales de referencia entre los sitios en el Golfo de California, en concordancia con las regiones oceanográficas marinos delineados por Favoretto et al. (2022).

Datos de temperatura de la superficie

Obtuvimos la Temperatura de la Superficie del Mar (TSM) específicos para el Golfo de California del conjunto de datos de Interpolación Óptima de Reynolds. El conjunto de datos de TSM es una compilación global de temperaturas de la superficie del mar, organizada en intervalos de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, derivado del Radiómetro Avanzado de Alta Resolución (AVHRR) con una resolución temporal diaria que abarca desde 1982 hasta 2020. De aquí en adelante, nos referimos a los datos de TSM como SST. El conjunto de datos está disponible en el sitio web del Centro Nacional de Información Ambiental (NCEI): <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>. El código analítico se desarrolló utilizando el Entorno de Desarrollo Integrado (IDE) RStudio, ejecutándose en la versión 4.3.2 de R.

Eventos de Olas de Calor Marino

Para identificar eventos de olas de calor marinas, primero relacionamos las coordenadas de los arrecifes rocosos con la celda de rejilla de 0.25° de los datos de SST. Para cada sitio, establecimos una línea base climatológica calculando las características estadísticas de la serie temporal que incluyeron la media, la varianza, los patrones estacionales y los cuantiles de todo el conjunto de datos. La detección de olas de calor se realizó en el conjunto de datos diario de SST dentro de cada uno. La ocurrencia y duración de las olas de calor marinas se cuantificaron como secuencias de al menos cinco días consecutivos donde la SST diaria superó el percentil 90 del umbral climatológico derivado de nuestra serie temporal según lo descrito por (Hobday et al., 2016). Este análisis de olas de calor marinas se realizó utilizando el paquete R `heatwaveR` (Schlegel and Smit, 2018).



AGRADECIMIENTOS

La campaña de monitoreo ecológico de arrecifes rocosos de 2023 fue posible gracias al apoyo de la Fundación David y Lucile Packard, la Fundación Baum, la Fundación Mary Gard Jameson, Mary Ann Beyster, James Beyster, Alumbra Innovations, Builders Initiative, Courtney Nichols Gould y Gordon Gould. Gracias al equipo del Quino El Guardián por todo su apoyo antes y durante la expedición. También queremos expresar nuestro agradecimiento y reconocimiento a todos los que han apoyado y participado en este programa a lo largo de sus 25 años.

La logística de trabajo de campo y la expedición en barco fueron coordinadas por el Centro para la Biodiversidad Marina y la Conservación. El análisis de datos está a cargo del Laboratorio Aburto en la Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California en San Diego. El Programa Marino del Golfo de California en el Instituto de las Américas coordina al equipo binacional de científicos que participan en la investigación derivada de este programa.



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.

Bates, A. E., Helmuth, B., Burrows, M. T., Duncan, M. I., Garrabou, J., Guy-Haim, T., et al. (2018). Biologists ignore ocean weather at their peril. *Nature* 560, 299–301. doi: 10.1038/d41586-018-05869-5.

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.

Filbee-Dexter, K., Wernberg, T., Grace, S. P., Thormar, J., Fredriksen, S., Narvaez, C. N., et al. (2020). Marine heatwaves and the collapse of marginal North Atlantic kelp forests. *Scientific Reports* 10, 13388. doi: 10.1038/s41598-020-70273-x.

Graham, N. A., McClanahan, T. R., MacNeil, M. A., Wilson, S. K., Cinner, J. E., Huchery, C., & Holmes, T. H. (2017). Human disruption of coral reef trophic structure. *Current Biology*, 27(2), 231-236.

Hobday, A. J., Alexander, L. V., Perkins, S. E., Smale, D. A., Straub, S. C., Oliver, E. C. J., et al. (2016). A hierarchical approach to defining marine heatwaves. *Progress in Oceanography* 141, 227–238. doi: 10.1016/j.pocean.2015.12.014.

Reynolds, R. W., Smith, T. M., Liu, C., Chelton, D. B., Casey, K. S., and Schlax, M. G. (2007). Daily High-Resolution-Blended Analyses for Sea Surface Temperature. *J. Clim.* 20, 5473–5496. doi: 10.1175/2007jcli1824.1.

Rodriguez, A. S, Báez, M. M, Aburto-Oropeza, O., Arango, G. H, Mascareñas-Osorio, I., & Erisman, B. (2014). Protocolo de Monitoreo: Para Ambientes Marinos Costeros. UC San Diego: Aburto Lab. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/23f1404c>

Schlegel, R. W., and Smit, A. J. (2018). A central algorithm for the detection of heatwaves and cold-spells. *Journal of Open Source Software* 27, 821.

Wernberg, T., Smale, D. A., Tuya, F., Thomsen, M. S., Langlois, T. J., Bettignies, T. de, et al. (2013). An extreme climatic event alters marine ecosystem structure in a global biodiversity hotspot. *Nature Climate Change* 3, 78–82. doi: 10.1038/nclimate1627.

Wyatt, A. S. J., Leichter, J. J., Washburn, L., Kui, L., Edmunds, P. J., and Burgess, S. C. (2023). Hidden heatwaves and severe coral bleaching linked to mesoscale eddies and thermocline dynamics. *Nat. Commun.* 14, 25. doi: 10.1038/s41467-022-35550-5.

Zhang, Y., Du, Y., Feng, M., and Hobday, A. J. (2023). Vertical structures of marine heatwaves. *Nat. Commun.* 14, 6483. doi: 10.1038/s41467-023-42219-0.





