



Where are resilience-based management strategies appropriate for coral reefs? Mapping environmental conditions and trends in coral cover in Guam and American Samoa

¿Dónde son apropiadas las estrategias de gestión basadas en la resiliencia para los arrecifes de coral? Mapeo de las condiciones ambientales y las tendencias de la cubierta coralina en Guam y Samoa Americana

Monica M Moritsch^{1*}, Miranda Foley²

¹ U.S. Geological Survey, Western Geographic Science Center, Moffett Field, California,
United States of America.

² Ecologic Consulting, LLC, Kailua, Hawaii, United States of America.

* Corresponding author. E-mail: monicamoritsch@gmail.com

ABSTRACT. Resilience-based management strategies are gaining attention as tools to improve coral survival and recovery under increasingly stressful conditions. Prioritizing locations to implement these strategies depends on knowing where corals already show potential signs of resilience and how environmental conditions may shift with climate change. We synthesized environmental conditions and coral cover trends in Guam and American Samoa using present-day climate conditions and 2 future climate scenarios: Representative Concentration Pathways 4.5 and 8.5. We examined the spatial overlap between favorable and unfavorable environmental conditions and locations where coral reefs have maintained or increased coral cover over the past decade. Locations representing 4 combinations of the aforementioned characteristics may be subject to different management strategies: (1) conservation and restoration of robust corals, (2) restoration of declining corals, (3) conservation of genetic material of robust corals and stressor mitigation, and (4) no clear strategy for declining corals. We estimated areas in which multiple management actions could be performed based on these combinations. Under present-day climate conditions, the conservation of genetic material and stressor mitigation were overrepresented in Guam, comprising 23% of the study area; this declined to 15% in future climate scenarios. Coral restoration was at first underrepresented (0%). In American Samoa, the proportional area for each strategy remained consistent regardless of climate. Coral restoration was overrepresented, comprising 54% to 56% of the study area, whereas the conservation of genetic material and stressor mitigation were underrepresented (9% to 11%, respectively). Our approach offers a rapid way to assess where potential management actions could be applied based on data aggregated over large spatial extents, which can complement more detailed, labor-intensive assessments of reef community dynamics, particularly if distinct coral communities inform the boundaries of aggregation units. These results may guide managers in selecting ecologically suitable locations for implementing resilience-based management strategies for coral reefs.

Key words: resistance, recovery, resilience, coral bleaching, climate change.

RESUMEN. Las estrategias de gestión basadas en la resiliencia están ganando atención como herramientas para la supervivencia y recuperación de corales en condiciones crecientemente estresantes. La priorización de sitios para aplicar estrategias depende de dónde los corales muestran signos de resiliencia y cómo las condiciones ambientales pueden cambiar con el cambio climático. Sintetizamos las condiciones ambientales y tendencias de cobertura de coral en Guam y Samoa Americana utilizando condiciones climáticas actuales y 2 escenarios climáticos futuros: trayectorias de concentración representativas 4.5 y 8.5. Examinamos la superposición espacial entre condiciones ambientales favorables y desfavorables y lugares en los que arrecifes de coral mantuvieron o aumentaron su cobertura en la última década. Ubicaciones que representan 4 combinaciones de las características mencionadas pueden presentar diferentes estrategias de gestión: (1) conservación/restauración de corales robustos, (2) restauración de corales en declive, (3) conservación del material genético de corales robustos/mitigación de factores estresantes y (4) ninguna estrategia clara para corales en declive. En función de estas combinaciones, estimamos áreas potenciales para implementar múltiples acciones de gestión. Bajo condiciones climáticas actuales, la conservación del material genético/mitigación de factores estresantes estaban sobrerrepresentadas en Guam: 23% del área que disminuyó a 15% en escenarios futuros. La restauración del coral estaba inicialmente subrepresentada (0%). En Samoa Americana, la superficie proporcional para cada estrategia fue constante. La restauración del coral estaba sobrerrepresentada con 54-56% del área; la conservación del material genético y mitigación de factores estresantes estaban infrarrepresentadas (9% y 11%, respectivamente). Nuestro enfoque ofrece una forma rápida de evaluar dónde aplicar medidas de gestión con datos agregados sobre grandes extensiones para complementar evaluaciones detalladas y laboriosas de la dinámica de comunidades arrecifales, especialmente si las distintas comunidades coralinas delimitan las unidades de agregación. Estos resultados pueden orientar a gestores para seleccionar sitios ecológicamente adecuados para aplicar estrategias basadas en la resiliencia.

Palabras clave: resistencia, recuperación, resiliencia, blanqueamiento coralino, cambio climático.



©Monica M Moritsch, Miranda Foley.

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which allows you to share and adapt the work, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. Figures, tables, and other elements in the article are included in the article's CC BY 4.0 license, unless otherwise indicated. You must seek permission from the copyright holder for use of material not covered by this license. The journal title is protected by copyrights owned by Universidad Autónoma de Baja California, and the journal title and logo are not subject to this license.

INTRODUCTION

Coral reefs are critical providers of food, coastal protection, recreational opportunities, economic opportunities, and cultural value (Barbier et al. 2011, Reguero et al. 2021). Coral bleaching events in the past decade have inflicted severe mortality to reefs worldwide (Stuart-Smith et al. 2018, Raymundo et al. 2019, Raj et al. 2021). Chronic stress from land-based sources of pollution and sedimentation threaten the ability of reefs to continue providing these services (Bruno et al. 2003, Fabricius 2005). Increasingly frequent coral bleaching events represent an acute stressor overlaying chronic issues (Heron et al. 2016). As major disturbances become more frequent due to climate change, the probability of long-term ecosystem shifts increases, which may disrupt the provision of reef-based services to island communities (Norström et al. 2009, Pratchett et al. 2009).

Strategies that promote climate resilience are receiving attention as the consequences of bleaching events increasingly affect vast swaths of the ocean (Comte and Pendleton 2018). By focusing on resilience, defined as the ability to either resist shifting to a different ecosystem state or to recover quickly to the original state following disturbance-induced change (Holling 1973, Kennen et al. 2015), managers seek to maintain ecological processes that allow coral survival, growth, recovery, and recruitment. Resilience-based management (RBM) strategies include coral outplanting in climate refuges, conserving reefs with a history of low mortality during bleaching events, and maintaining healthy herbivore populations to reduce algal overgrowth (Graham et al. 2013, Maynard et al. 2015, Chung et al. 2019, Mcleod et al. 2019).

Resilience-based management is more likely to succeed when implemented under unstressful conditions or in stress-tolerant populations. Areas not subject to climate-related stress will become increasingly rare in the next century. Contrasting gradients in projected heat stress and acidification suggest that few locations will be true climate refuges maintaining twentieth-century conditions (van Hooijdonk et al. 2014). Strategies that manage and mitigate local stressors increase the ability of corals to withstand the consequences of global stressors. For example, reducing sediment and nutrient pollution from coastal watersheds is important for ensuring clear water and reducing algal overgrowth in coral reefs, particularly in the wake of damage from bleaching events or storms (Smith et al. 2010, Risk and Edinger 2011).

Coral species that experience high temperature variability or that are regularly exposed to high temperatures can evolve to increase their thermal tolerance, highlighting the importance of corals that survive under sub-optimal environmental conditions (Safaie et al. 2018, Schoepf et al. 2020). Likewise, coral and endosymbiont taxa differ in their tolerance to nutrient pollution and contaminants, resulting in variable spatial distributions of corals capable of adapting or acclimating to multiple stressors (Fox et al. 2021, Nalley et al. 2021). Thus, coral characteristics influence which RBM strategies

INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son proveedores críticos de alimento, protección costera, oportunidades recreativas, oportunidades económicas y valor cultural (Barbier et al. 2011, Reguero et al. 2021). Los eventos de blanqueamiento de corales de la última década han infligido una grave mortalidad a los arrecifes de todo el mundo (Stuart-Smith et al. 2018, Raymundo et al. 2019, Raj et al. 2021). El estrés crónico provocado por fuentes terrestres de contaminación y sedimentación amenaza la capacidad de los arrecifes para seguir prestando estos servicios (Bruno et al. 2003, Fabricius 2005). Los episodios cada vez más frecuentes de blanqueamiento del coral representan un factor de estrés agudo que se superpone a los problemas crónicos (Heron et al. 2016). A medida que las grandes perturbaciones se hacen más frecuentes debido al cambio climático, la probabilidad de que se produzcan cambios en el ecosistema a largo plazo aumenta, lo que puede alterar la prestación de servicios de los arrecifes a las comunidades insulares (Norström et al. 2009, Pratchett et al. 2009).

Las estrategias que promueven la resiliencia climática están recibiendo atención a medida que las consecuencias de los eventos de blanqueamiento afectan cada vez más a vastas franjas del océano (Comte y Pendleton 2018). Al centrarse en la resiliencia, definida como la capacidad de resistir el cambio a un estado diferente del ecosistema o de recuperarse rápidamente al estado original tras un cambio inducido por una perturbación (Holling 1973, Kennen et al. 2015), los gestores tratan de mantener los procesos ecológicos que permiten la supervivencia, el crecimiento, la recuperación y el reclutamiento de corales. Las estrategias de gestión basadas en la resiliencia (GBR) incluyen el trasplante de corales en refugios climáticos, la conservación de arrecifes con un historial de baja mortalidad durante episodios de blanqueamiento y el mantenimiento de poblaciones de herbívoros saludables para reducir el crecimiento excesivo de algas (Graham et al. 2013, Maynard et al. 2015, Chung et al. 2019, Mcleod et al. 2019).

Es más probable que la gestión basada en la resiliencia tenga éxito cuando se implementa en condiciones no estresantes o en poblaciones tolerantes al estrés. Las zonas que no estén sujetas a tensiones relacionadas con el clima serán cada vez más raras en el próximo siglo. Los gradientes contrastantes en el estrés por calor y la acidificación proyectados sugieren que pocos lugares serán verdaderos refugios climáticos que mantengan las condiciones del siglo XX (van Hooijdonk et al. 2014). Las estrategias que gestionan y mitigan los factores estresantes locales aumentan la capacidad de los corales para resistir las consecuencias de los factores estresantes globales. Por ejemplo, reducir la contaminación por sedimentos y nutrientes de las cuencas costeras es importante para garantizar agua clara y reducir el crecimiento excesivo de algas en los arrecifes de coral, particularmente después de daños causados por eventos de blanqueamiento o tormentas (Smith et al. 2010, Risk y Edinger 2011).

are appropriate for each coral species or population. Indeed, populations exhibiting tolerance to stressful conditions over time may be good candidates for additional conservation measures and can provide genetic material to restore corals elsewhere (Oliver and Palumbi 2011, Safaie et al. 2018). In addition, sites not subject to stressful or extreme environmental conditions may be good locations for restoration measures (Foo and Asner 2020; Table 1).

Geographic assessments that identify either resilient coral populations or favorable environmental conditions are used to inform management recommendations throughout the Pacific Islands region, including those in Guam, Hawaii, and the Commonwealth of the Northern Mariana Islands (Maynard et al. 2015, 2018; Chung et al. 2019a, b). Thus, the objective of this study was to identify locations in Guam and American Samoa where reef managers could implement RBM strategies under present-day conditions and in future climate scenarios.

MATERIALS AND METHODS

Study areas

Guam (13.4255° N, 144.7471° E) and American Samoa (14.3191° S, 170.7586° W) are volcanic islands surrounded by nearshore coral reefs. Both locations experienced multiple coral bleaching events over the last decade, sometimes in consecutive years. The decline in coral cover following a bleaching event has not occurred uniformly around the islands (Raymundo et al. 2017, 2019; NOAA 2018). Both locations also experience water quality problems due to land management practices and land-based sources of pollution (Houk et al. 2005, Shuler and Comerros-Raynal 2020). Geologically, Guam is comprised of limestone in the north and steep volcanic hillsides in the south that burn seasonally, generating large amounts of sediment runoff. Development and land clearing are also associated with high sedimentation rates (Kottermair 2012, Prouty et al. 2014). In the volcanic archipelago of American Samoa, most human activity occurs on the island of Tutuila, whereas the Manu'a Islands (Ofu, Olosega, and Ta'ū) to the east are lightly inhabited and are largely protected as part of the National Park of American Samoa. The remote Swains Island and Rose Atoll of American Samoa were not considered in this study due to data limitations.

Scoring environmental favorability

We assessed geographic patterns in environmental conditions to identify areas favorable for coral growth and survival. We gathered spatial data layers with sufficient resolution (≤ 10 km) to evaluate environmental variation around the islands (Table S1). We divided environmental conditions into 2 categories, “managed” and “globally influenced,” to differentiate conditions either under management or outside its control. Managed environmental conditions were

Las especies de coral que experimentan una alta variabilidad de temperatura o que están expuestas regularmente a altas temperaturas pueden evolucionar para aumentar su tolerancia térmica, lo que destaca la importancia de los corales que sobreviven en condiciones ambientales subóptimas (Safaie et al. 2018, Schoepf et al. 2020). Asimismo, los taxones de coral y endosimbiontes difieren en su tolerancia a la contaminación por nutrientes y contaminantes, lo que da como resultado distribuciones espaciales variables de corales capaces de adaptarse o aclimatarse a múltiples factores estresantes (Fox et al. 2021, Nalley et al. 2021). Por lo tanto, las características de los corales influyen en qué estrategias de GBR son apropiadas para cada especie o población de coral. De hecho, las poblaciones que muestran tolerancia a condiciones estresantes a lo largo del tiempo pueden ser buenos candidatos para medidas de conservación adicionales y pueden proporcionar material genético para restaurar corales en otros lugares (Oliver y Palumbi 2011, Safaie et al. 2018). Además, los sitios que no están sujetos a condiciones ambientales estresantes o extremas pueden ser buenos lugares para medidas de restauración (Foo y Asner 2020; Tabla 1).

Las evaluaciones geográficas que identifican poblaciones de coral resilientes o condiciones ambientales favorables se utilizan para informar las recomendaciones de gestión en toda la región de las islas del Pacífico, incluidas aquellas en Guam, Hawaii y la Mancomunidad de las Islas Marianas del Norte (Maynard et al. 2015, 2018; Chung et al. 2019a, b). Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue identificar lugares en Guam y Samoa Americana donde los gestores de arrecifes podrían implementar estrategias de GBR en las condiciones actuales y en escenarios climáticos futuros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Áreas de estudio

Guam (13.4255° N, 144.7471° E) y Samoa Americana (14.3191° S, 170.7586° W) son islas volcánicas rodeadas de arrecifes de coral cercanos a la costa. Ambos lugares experimentaron múltiples eventos de blanqueamiento de corales durante la última década, a veces en años consecutivos. La disminución de la cubierta de coral después de un evento de blanqueamiento no se ha producido de manera uniforme en todas las islas (Raymundo et al. 2017, 2019; NOAA 2018). Ambos lugares también experimentan problemas de calidad del agua debido a las prácticas de gestión de la tierra y a las fuentes terrestres de contaminación (Houk et al. 2005, Shuler y Comerros-Raynal 2020). Geológicamente, Guam está compuesta de piedra caliza en el norte y laderas volcánicas abruptas en el sur que se queman estacionalmente, generando grandes cantidades de escorrentía de sedimentos. El desarrollo y el desmonte de tierras también están asociados con altas tasas de sedimentación (Kottermair 2012, Prouty et al. 2014). En el archipiélago volcánico de Samoa Americana, la mayor parte de la actividad humana se produce en la isla de

Table 1. Conceptual categorization of example resilience-based management strategies. The examples are arranged along 2 axes: (1) Coral resilience and (2) environmental favorability. The 4 resulting quadrants may be subject to different reef management strategies.

Tabla 1. Categorización conceptual de ejemplos de estrategias de gestión basadas en la resiliencia. Los ejemplos están organizados según 2 ejes: (1) resiliencia de los corales y (2) favorabilidad ambiental. Los 4 cuadrantes resultantes pueden estar sujetos a diferentes estrategias de gestión de arrecifes.

Environmental favorability	Coral resilience	
	Low or positive change, high stability	Negative change, low stability
Favorable environment	Conserve or restore	Restore coral
Unfavorable environment	Conserve coral Genetic material Mitigate stressors	Neither

those influenced by typical management levers up to the spatial scale of island, including chlorophyll concentrations (a proxy for land-based nutrient runoff), fish biomass, herbivore biomass, turbidity (a proxy for land-based sediment runoff), ocean-based pollution, and macroalgal cover. Globally influenced environmental conditions were those outside the control of managers at the island scale. These conditions either require global cooperation to affect substantial change or cannot be controlled and include calcite concentrations (a proxy for ocean acidity), ocean surface irradiance, thermal stress (degree heating weeks), and wave energy (Table S1). We excluded the ocean-based pollution layer for American Samoa from the analysis because it exhibited no spatial variability and did not contribute to our goal of discerning spatial differences in environmental conditions.

Following the approach of Maynard et al. (2018), we scaled each environmental variable linearly from 0 to 1 in ArcMap 10.7 (Environmental Systems Research Institute, Inc.), with 0 representing conditions least favorable to coral growth and survival and 1 representing the most favorable conditions (Fig. 1), scaling each jurisdiction separately. Each raster cell represented one data point with many environmental attributes ($N_{\text{Guam}} = 299$, $N_{\text{AS}} = 7,766$). We controlled for covariation between variables with a principal component analysis (PCA) using the ‘FactoMineR’ package (Lê et al. 2008) in R v. 4.1 (R Core Team 2021). We performed separate PCAs for the managed and globally influenced conditions (Supplementary material, Tables S2, S3). We linearly rescaled the principal components (PCs) from 0 to 1 based on the minimum and maximum values, with 1 representing the most favorable conditions. We averaged these 2 PCs to obtain an overall score of environmental favorability (Fig. 1). The values with environmental favorability scores in the top 20th percentile served as a heuristic for “highly favorable environmental conditions”.

Tutuila, mientras que las islas Manu‘a (Ofu, Olosega y Ta‘ū) al este están poco habitadas y en gran medida protegidas como parte del Parque Nacional de Samoa Americana. La remota isla Swains y el atolón Rose de Samoa Americana no se consideraron en este estudio debido a limitaciones de datos.

Puntuación de favorabilidad ambiental

Evaluamos patrones geográficos en las condiciones ambientales para identificar áreas favorables para el crecimiento y la supervivencia de los corales. Reunimos capas de datos espaciales con resolución suficiente (≤ 10 km) para evaluar la variación ambiental alrededor de las islas (Tabla S1). Dividimos las condiciones ambientales en 2 categorías, “gestionadas” e “influidas globalmente”, para diferenciar las condiciones sujetas a gestión o que están fuera de su control. Las condiciones ambientales gestionadas fueron aquellas influenciadas por mecanismos de gestión típicos hasta la escala espacial de la isla, incluidas las concentraciones de clorofila (un indicador de la escorrentía de nutrientes terrestres), la biomasa de peces, la biomasa de herbívoros, la turbidez (un indicador de la escorrentía de sedimentos terrestres), contaminación de origen oceánico y cubierta de macroalgas. Las condiciones ambientales influenciadas globalmente fueron aquellas que estaban fuera del control de los administradores a escala insular. Estas condiciones requieren cooperación global para lograr cambios sustanciales o no pueden controlarse e incluyen concentraciones de calcita (un indicador de la acidez del océano), irradiancia de la superficie del océano, estrés térmico (grados de calentamiento por semana) y energía de las olas (Tabla S1). Excluimos del análisis la capa de contaminación oceánica de Samoa Americana porque no mostró variabilidad espacial y no contribuyó a nuestro objetivo de discernir diferencias espaciales en las condiciones ambientales.

We assumed all input variables carried equal weight when contributing to the scores for managed and globally influenced conditions. Thus, we weighted the influence of these 2 sets of conditions on coral growth and survival equally. The degree to which environmental stressors synergistically affect coral reef ecosystems is location-specific (Ateweberhan et al. 2013, Houk et al. 2014), making variable weighting difficult to apply in our study areas. However, prior coral reef resilience assessments have also weighted all environmental conditions equally, including climatic and anthropogenic stressors (Maynard et al. 2015, 2018). We sought to account for potential correlation (Tables S4–S7) between environmental variables through the PCA, reducing the number of dimensions based on variables that increased or decreased in a coordinated manner (Bastazini et al. 2007, Jales-Cavalcanti et al. 2015, Moritsch 2018).

In addition to examining patterns under present-day climate conditions, we repeated this process for 2 future climate scenarios from global climate models representing conditions in 2100. Scenario 1, the intermediate emissions scenario, assumed greenhouse gas emissions stabilized mid-century, corresponding to Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5. Scenario 2, the worst-case emissions scenario, assumed greenhouse gas emissions continued unabated, corresponding to RCP 8.5 (Riahi et al. 2011, Thomson et al. 2011).

Siguiendo el enfoque de Maynard et al. (2018), escalamos cada variable ambiental linealmente de 0 a 1 en ArcMap 10.7 (Environmental Systems Research Institute, Inc.), donde 0 representa las condiciones menos favorables para el crecimiento y la supervivencia de los corales y 1 representa las condiciones más favorables (Fig. 1). Se escaló cada jurisdicción por separado. Cada celda ráster representó un punto de datos con diversos atributos ambientales ($N_{\text{Guam}} = 299$, $N_{\text{AS}} = 7,766$). Controlamos la covariación entre variables con un análisis de componentes principales (ACP) utilizando el paquete ‘FactoMineR’ (Lê et al. 2008) en R v. 4.1 (R Core Team 2021). Realizamos ACP separados para las condiciones manejadas y globalmente influenciadas (Material complementario, Tablas S2, S3). Cambiamos la escala lineal de los componentes principales (CP) de 0 a 1 en función de los valores mínimo y máximo, donde 1 representa las condiciones más favorables. Promediamos estos 2 CP para obtener una puntuación general de favorabilidad ambiental (Fig. 1). Los valores con puntuaciones de favorabilidad ambiental en el percentil 20 superior sirvieron como heurística para “condiciones ambientales altamente favorables”.

Supusimos que todas las variables de entrada tenían el mismo peso al contribuir a las puntuaciones de las condiciones gestionadas y globalmente influenciadas. Por lo tanto, ponderamos por igual la influencia de estos 2 conjuntos

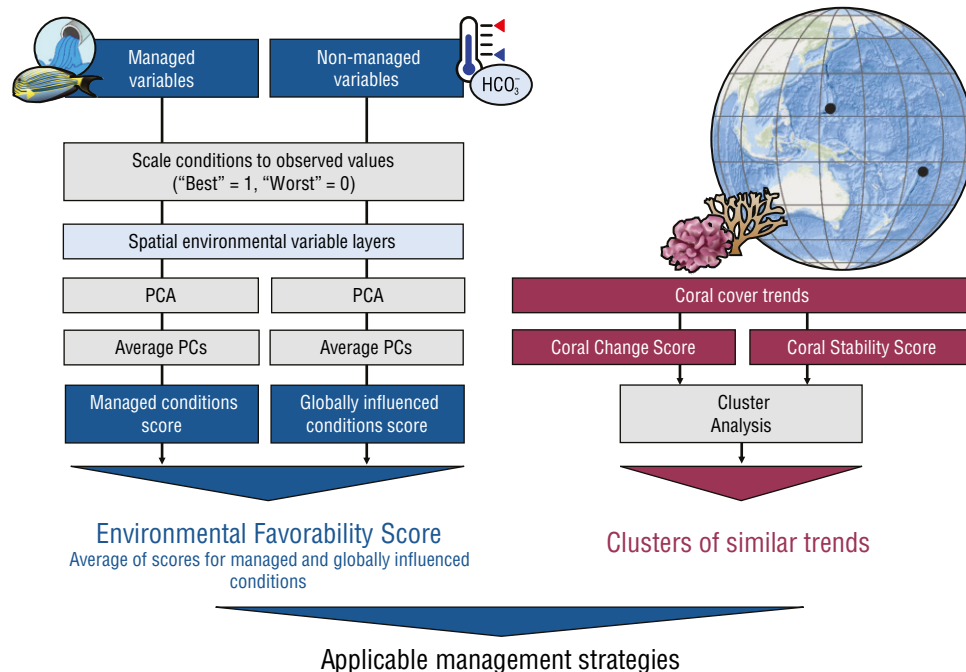


Figure 1. Overview of methods used to assess spatial patterns of environmental favorability and coral resilience. This process was repeated for each climate scenario. Black points on the globe represent study the locations, Guam (left) and American Samoa (right). PCA stands for Principal Component Analysis and PC stands for Principal Component.

Figura 1. Descripción general de los métodos utilizados para evaluar los patrones espaciales de favorabilidad ambiental y resiliencia de los corales. Este proceso se repitió para cada escenario climático. Los puntos negros en el globo representan las ubicaciones de estudio: Guam (izquierda) y Samoa Americana (derecha). PCA es análisis de componentes principales; PC, componente principal.

For the future climate scenarios, we replaced the present-day thermal stress layer with a layer of the projected timing of annual severe bleaching under RCP 4.5 or RCP 8.5 as a proxy for future thermal stress (van Hooijdonk et al. 2016, UNEP 2017). We added soil erosion due to sea-level rise (SLR) as another future condition that could negatively impact corals by either reducing light availability for symbiont photosynthesis or increasing physiologically damaging sedimentation (Field et al. 2011, Storlazzi et al. 2011, Weber et al. 2012, Bessell-Browne et al. 2017). We measured the proximity to easily erodible soils, which SLR would inundate under RCP 4.5 and RCP 8.5, as a proxy for the severity of the effects of SLR (Supplementary material, erosion estimates related to SLR). Projections of the other globally influenced conditions (calcite concentrations, irradiance, and wave energy) were not available in a spatial resolution fine enough to discern geographic patterns within the jurisdictions, so we used the present-day climate scores for these 3 conditions for both future climate scenarios. We also assumed the managed conditions would remain the same across all scenarios because robust projections for how these conditions may change were not available.

Characterizing coral resilience

We used existing coral cover data from the National Oceanographic and Atmospheric Administration National Coral Reef Monitoring Program (NOAA NCRMP) to measure 2 aspects of coral resilience: the ability to recover coral cover quickly and the ability to resist change in coral cover over time. The NCRMP diver surveys recorded coral cover with multiple methods and sampling sites. These surveys excluded the reef flat zone, resulting in an underrepresentation of the complexity of coral cover dynamics across reef sites. For Guam, surveys from 2009 to 2017 were aggregated into 10 sectors of variable size that accounted for ecological similarities in substrate, coral communities, and benthic cover (Oliver et al. 2020a; Fig. 2a). We excluded data from 2016, when major storm events prevented adequate sampling for several sectors. For American Samoa, we used 11 coastal management sectors defined by NOAA (NOAA 2018) as units for measuring coral cover trends (Fig. 2b, c). Boundaries of the National Marine Sanctuary of American Samoa influenced sector boundaries, wherein geographically separated areas of the sanctuary were made into their own sectors. All sector names followed NOAA's established naming conventions. We excluded the sector Tutuila Aunu'u B due to insufficient data, leaving a total of 10 sectors. Annual sector-level averages, which were required due to the spatially variable sampling design of the NCRMP, were not conducive to identifying resilient coral populations at sub-kilometer scales.

We quantified whether coral cover was increasing, a potential indicator of post-disturbance recovery, or remaining stable, a potential indicator of resistance to disturbance, by calculating a coral change score and coral stability score

de condiciones en el crecimiento y la supervivencia de los corales. El grado en que los factores estresantes ambientales afectan sinérgicamente a los ecosistemas de arrecifes de coral es específico de la ubicación (Ateweberhan et al. 2013, Houk et al. 2014), lo que dificulta la aplicación de ponderaciones variables en nuestras áreas de estudio. Sin embargo, evaluaciones anteriores de la resiliencia de los arrecifes de coral también han ponderado todas las condiciones ambientales por igual, incluidos los factores estresantes climáticos y antropogénicos (Maynard et al. 2015, 2018). Buscamos tener en cuenta la correlación potencial (Tablas S4-S7) entre variables ambientales a través del ACP, reduciendo el número de dimensiones basadas en variables que aumentaron o disminuyeron de manera coordinada (Bastazini et al. 2007, Jales-Cavalcanti et al. 2015, Moritsch 2018).

Además de examinar los patrones en las condiciones climáticas actuales, repetimos este proceso para 2 escenarios climáticos futuros a partir de modelos climáticos globales que representan las condiciones en 2100. El escenario 1, el escenario de emisiones intermedias, supuso que las emisiones de gases de efecto invernadero se estabilizarían a mediados de siglo, correspondientes a la trayectoria de concentración representativa (TCR) 4.5. El escenario 2, el peor escenario de las emisiones, suponía que las emisiones de gases de efecto invernadero continuarían sin disminuir, lo que corresponde a TCR 8.5 (Riahi et al. 2011, Thomson et al. 2011). Para los escenarios climáticos futuros, reemplazamos la capa de estrés térmico actual con una capa del momento proyectado del blanqueamiento severo anual bajo TCR 4.5 o TCR 8.5 como indicador del estrés térmico futuro (van Hooijdonk et al. 2016, PNUMA 2017). Agregamos la erosión del suelo debido al aumento del nivel del mar (ANM) como otra condición futura que podría impactar negativamente a los corales al reducir la disponibilidad de luz para la fotosíntesis de los simbioses o al aumentar la sedimentación fisiológicamente dañina (Field et al. 2011, Storlazzi et al. 2011, Weber et al. 2012, Bessell-Browne et al. 2017). Medimos la proximidad a suelos fácilmente erosionables, que el ANM inundaría bajo TCR 4.5 y TCR 8.5, como un indicador de la gravedad de los efectos del ANM (Material suplementario, estimaciones de erosión relacionadas con el ANM). Las proyecciones de las otras condiciones influenciadas globalmente (concentraciones de calcita, irradiancia y energía de las olas) no estaban disponibles en una resolución espacial lo suficientemente fina como para discernir patrones geográficos dentro de las jurisdicciones, por lo que utilizamos los puntajes climáticos actuales para estas 3 condiciones para ambos escenarios climáticos futuros. También supusimos que las condiciones gestionadas seguirían siendo las mismas en todos los escenarios porque no se disponía de proyecciones sólidas sobre cómo podrían cambiar estas condiciones.

Caracterización de la resiliencia de los corales

Utilizamos datos de cobertura de coral existentes del Programa Nacional de Vigilancia de Arrecifes de Coral de

for every sector (Fig. 1). Without detailed information on the timing of stressors, we could not definitively determine whether coral cover demonstrated resilience. The coral change and coral stability scores did not account for species composition or biodiversity by sector, as this information was not available. These scores were calculated based on coral cover data alone; no environmental conditions were considered in calculating this score.

The coral change score (Equation 1) characterizes sectors according to their ability to rapidly increase coral cover without major fluctuations.

Equation 1. Coral change score

$$\text{Coral change score} = \text{Sign of coral cover slope} \times \sqrt{\left| \frac{\text{slope}}{\text{RMSE}} \right|} .$$

By using the slope of the coral cover trendline over time, rapid increases (positive slope) in coral cover resulted in higher positive scores, whereas rapid declines (negative slope) resulted in lower negative scores. Several sectors exhibited trendlines with non-significant slopes ($P > 0.05$), although these still suggested divergent trajectories for coral cover. Rather than remove these sectors due to their lack of significance, we incorporated root mean square error (RMSE) as a term to reflect the limited confidence in trend direction in these sectors. We divided the slope of the sector trendline by its RMSE so that sectors with high variability in coral cover received scores closer to zero than sectors with low variability, indicating weaker positive or negative trajectories. We square root-transformed the output to minimize the impact of outliers in the scores, such that the range of coral change scores was similar for Guam and American Samoa.

For the coral stability score (Equation 2), we characterized sectors according to their ability to maintain steady levels of coral cover over time without major fluctuations.

Equation 2. Coral stability score

$$\text{Stability score} = \ln \frac{\text{mean coral cover}}{|\text{RMSE} \times \text{slope}| + 1} .$$

Sectors with higher mean coral cover over the entire sampling period received higher scores than sectors with lower mean coral cover. By dividing by the slope and RMSE, rapid increases or decreases in coral cover or high variability around the trendline resulted in low scores. We natural log-transformed the output to minimize the impact of outliers in the scores.

To facilitate comparisons among environmental favorability scores between sectors with similar dynamics in coral cover, we performed a cluster analysis using the coral change and stability scores of each sector to identify groups with statistically similar scores. Using the *kmeans* function of the ‘cluster’ package (Maechler et al. 2023) in R, we selected the optimal number of groups based on precipitous drops in the within-group sum of squares (Fig. S1). This

la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NCRMP, NOAA, por sus siglas en inglés) para medir 2 aspectos de la resiliencia de los corales: la capacidad de recuperar la cubierta de coral rápidamente y la capacidad de resistir los cambios en la cubierta de coral a lo largo del tiempo. Los estudios de buzos del NCRMP registraron la cobertura de coral con múltiples métodos y sitios de muestreo. Estos estudios excluyeron la zona plana del arrecife, lo que resultó en una subrepresentación de la complejidad de la dinámica de la cobertura coralina en los sitios del arrecife. Para Guam, los estudios de 2009 a 2017 se agregaron en 10 sectores de tamaño variable que representaron similitudes ecológicas en el sustrato, las comunidades de coral y la cobertura bentónica (Oliver et al. 2020a; Fig. 2a). Excluimos datos de 2016, cuando grandes tormentas impidieron un muestreo adecuado para varios sectores. Para Samoa Americana, utilizamos 11 sectores de gestión costera definidos por la NOAA (NOAA 2018) como unidades para medir las tendencias de la cobertura de coral (Fig. 2b, c). Los límites del Santuario Marino Nacional de Samoa Americana influyeron en los límites de los sectores, donde áreas geográficamente separadas del santuario se convirtieron en sus propios sectores. Todos los nombres de los sectores siguieron las convenciones de nomenclatura establecidas por la NOAA. Excluimos el sector Tutuila Aunu'u B debido a datos insuficientes, dejando un total de 10 sectores. Los promedios anuales a nivel de sector, que fueron requeridos debido al diseño de muestreo espacialmente variable del NCRMP, no fueron conducentes a identificar poblaciones de coral resilientes a escalas por debajo de kilómetros.

Cuantificamos si la cubierta de coral estaba aumentando, un indicador potencial de recuperación posterior a la perturbación, o si su permanencia era estable, un indicador potencial de resistencia a la perturbación, calculando una puntuación de cambio de coral y una puntuación de estabilidad de coral para cada sector (Fig. 1). Sin información detallada sobre el momento en que ocurren los factores estresantes, no pudimos determinar definitivamente si la cubierta de coral demostró resiliencia. Las puntuaciones de cambio y estabilidad de los corales tomaron en cuenta la composición de especies o la biodiversidad por sector, ya que esta información no estaba disponible. Estas puntuaciones se calcularon basándose únicamente en los datos de la cobertura de coral; no se tomaron en cuenta condiciones ambientales para calcular esta puntuación.

La puntuación de cambio en el coral (Ecuación 1) caracteriza los sectores según su capacidad para aumentar rápidamente la cobertura de coral sin grandes fluctuaciones.

Ecuación 1. Puntuación de cambio en el coral

$$\text{Puntuación de cambio en el coral} = \text{Signo de la pendiente de la cobertura del coral} \times \sqrt{\left| \frac{\text{pendiente}}{\text{RMSE}} \right|} .$$

Al utilizar la pendiente de la línea de tendencia de la cobertura de coral a lo largo del tiempo, los aumentos rápidos (pendiente positiva) de la cobertura de coral dieron como

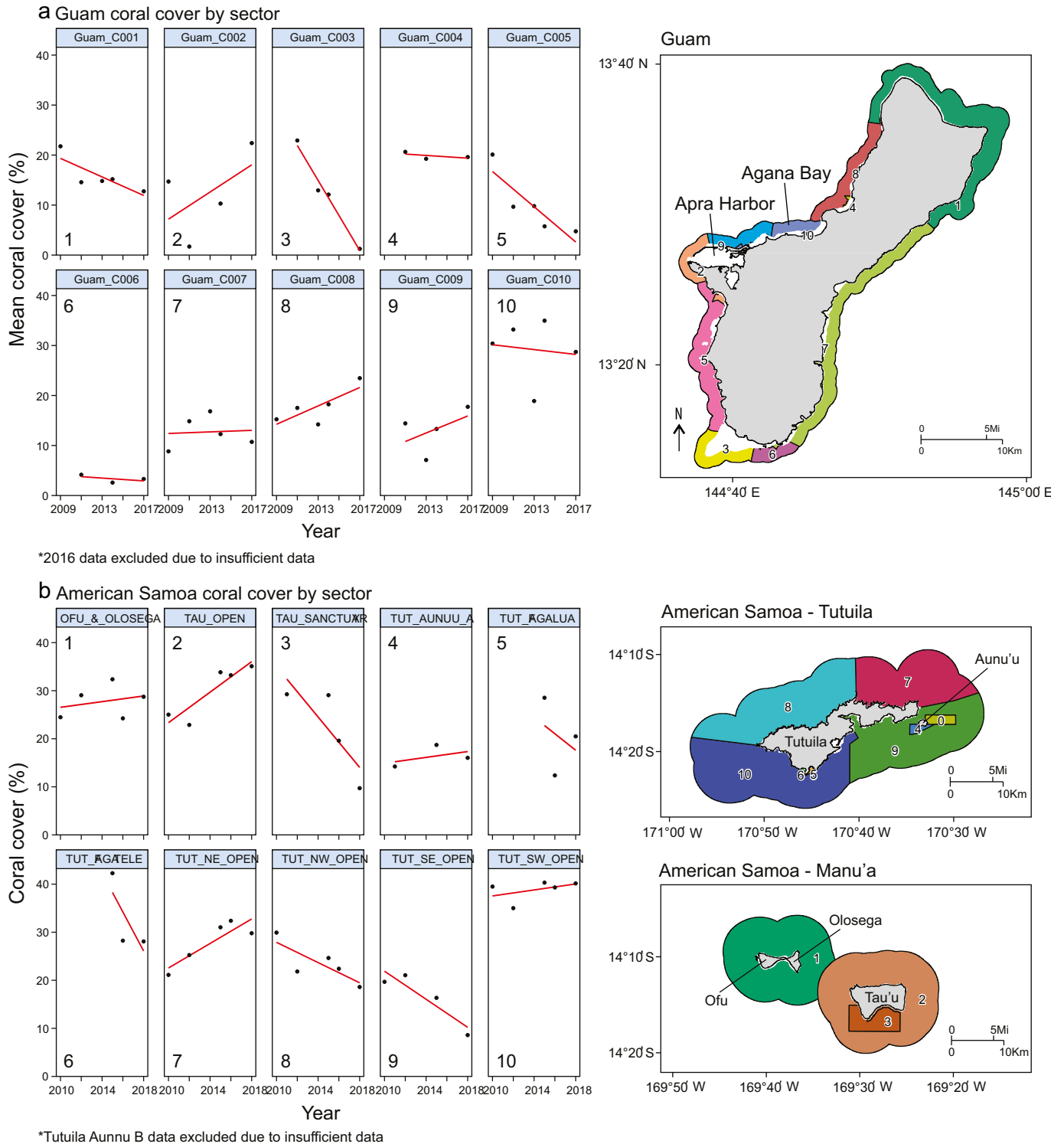


Figure 2. Mean percent coral cover by sector and map of sectors for (a) Guam and (b) American Samoa based on yearly aggregated data from the National Oceanographic and Atmospheric Administration National Coral Reef Monitoring Program. Trendlines are represented in red. Guam sectors are unnamed and are referred to by arbitrarily assigned numbers. Surveys from Guam in 2016 and from American Samoa sector Tutuila Annu'u B (labeled sector 0) in all years were excluded from analysis due to insufficient data. Map colors represent unique sectors. American Samoa sector names are: (1) Ofu and Olosega, (2) Ta'u Open, (3) Ta'u Sanctuary, (4) Tutuila Annu'u A, (5) Tutuila Fagalua, (6) Tutuila Fagatele, (7) Tutuila Northeast Open, (8) Tutuila Northwest Open, (9) Tutuila Southeast Open, (10) Tutuila Southwest Open. Reef flat, dredged, lagoon, back reef and intertidal areas are excluded from view.

Figura 2. Porcentaje medio de cobertura de coral por sector y mapa de sectores para (a) Guam y (b) Samoa Americana según datos agregados anuales del National Oceanographic and Atmospheric Administration National Coral Reef Monitoring Program. Las líneas de tendencia están representadas en rojo. Los sectores de Guam no tienen nombre y se les asigna números asignados arbitrariamente. Los muestreos de Guam en 2016 y del sector de Samoa Americana Tutuila Aunu'u B (etiquetado como sector 0) en todos los años se excluyeron del análisis debido a datos insuficientes. Los colores del mapa representan sectores únicos. Los nombres de los sectores de Samoa Americana son: (1) Ofu y Olosega, (2) Ta'u abierto, (3) Ta'u santuario, (4) Tutuila Aunu'u A, (5) Tutuila Fagalua, (6) Tutuila Fagatele, (7) Noreste de Tutuila abierto, (8) Noroeste de Tutuila abierto, (9) Sureste de Tutuila abierto, (10) Suroeste de Tutuila abierto. Los arrecifes planos, dragados, lagunas, arrecifes traseros y áreas intermareales están excluidos de la vista.

function also assessed group membership for each sector (Fig. S1).

Identifying areas of overlap between coral resilience and favorable environmental conditions

We calculated the area of overlap between highly favorable environmental conditions and groups of coral sectors with similar cover trends using the cell center method to convert all raster grid cells to squares of the same area. We identified the spatial intersection between the resulting polygons representing environmental favorability scores ≥ 0.80 and sector polygons in ArcMap 10.7 (ESRI). We also identified the intersections between sectors with environmental favorability scores < 0.80 . Based on this overlap, we found the area in each quadrant corresponding to the potential management actions listed in Table 1 to determine the proportion of each jurisdiction that could be subject to different RBM strategies. We used a chi-squared test to determine whether these proportions were significantly different than expected at random.

RESULTS

Environmental favorability

Under present-day climate conditions, the northeastern side of Guam exhibited the highest environmental favorability. This area had intermediate to high environmental favorability scores for managed conditions (0.50 to 0.80) and high environmental favorability scores for globally influenced conditions (> 0.75). The lowest scores for managed conditions (0.22 to 0.35) were concentrated on the western side of the island around Apra Harbor. In contrast, the lowest scores for globally influenced conditions (≤ 0.30) were located in the southwestern quadrant of the island. High environmental favorability (≥ 0.70) scores were found in the northern half of Guam, and low scores (0.10 to 0.35) were present along the southwestern side (Fig. 3a).

In the intermediate emissions and worst-case emissions scenarios, this pattern was reversed. The globally influenced conditions were more favorable along the southwestern side, largely because this portion of the island is projected to experience thermal stress capable of severe annual bleaching farther into the future than the northern side. The highest relative environmental favorability scores occurred in the southwest and north, although the differences between the best- and

resultado puntuaciones positivas más altas, mientras que las disminuciones rápidas (pendiente negativa) dieron como resultado puntuaciones negativas más bajas. Varios sectores exhibieron líneas de tendencia con pendientes no significativas ($P > 0.05$), aunque todavía sugirieron trayectorias divergentes para la cobertura de coral. En lugar de eliminar estos sectores debido a su falta de importancia, incorporamos la raíz cuadrada media del error (RMSE, por sus siglas en inglés) como término para reflejar la confianza limitada en la dirección de la tendencia en estos sectores. Dividimos la pendiente de la línea de tendencia del sector por su RMSE de modo que los sectores con alta variabilidad en la cobertura de coral recibieron puntuaciones más cercanas a cero que los sectores con baja variabilidad, lo que indica trayectorias positivas o negativas más débiles. Transformamos el resultado mediante raíz cuadrada para minimizar el impacto de los valores atípicos en las puntuaciones, de modo que el rango de las puntuaciones de cambio en el coral fue similar para Guam y Samoa Americana.

Para el puntaje de estabilidad del coral (Ecuación 2), caracterizamos los sectores según su capacidad para mantener niveles estables de cobertura de coral a lo largo del tiempo sin grandes fluctuaciones.

Ecuación 2. Puntuación de estabilidad del coral

$$\text{Puntuación de estabilidad} = \ln \frac{\text{cobertura de coral media}}{|\text{RMSE} \times \text{pendiente}| + 1}$$

Los sectores con una cobertura coralina media más alta durante todo el periodo de muestreo recibieron puntuaciones más altas que los sectores con una cobertura coralina media más baja. Al dividir por la pendiente y el RMSE, los rápidos aumentos o disminuciones en la cobertura de coral o la alta variabilidad alrededor de la línea de tendencia dieron como resultado puntuaciones bajas. Transformamos de forma logarítmica natural la salida para minimizar el impacto de los valores atípicos en las puntuaciones.

Para facilitar las comparaciones entre los puntajes de favorabilidad ambiental entre sectores con dinámicas similares en la cobertura de coral, realizamos un análisis de conglomerados utilizando los puntajes de estabilidad y cambio en el coral de cada sector para identificar grupos con puntajes estadísticamente similares. Utilizando la función *kmeans* del paquete 'cluster' (Maechler et al. 2023) en R, seleccionamos el número óptimo de grupos en función de caídas precipitadas en la suma de cuadrados dentro del grupo (Fig. S1). Esta

worst-scoring locations were not as pronounced as those under the present-day climate (Fig. 3b, c).

Under present-day climate conditions in American Samoa, the environmental favorability scores for managed conditions were lowest (0.00 to 0.40) along the southeastern side of Tutuila, while intermediate scores (0.35 to 0.65) were found around the southwestern side, and the highest scores were detected around the northwestern side (>0.65). The Manu'a Islands had relatively high (>0.65) scores for managed conditions, with the exception of a small pocket at the southwestern corner of Ofu (Fig. 4a). This pattern reflected a confluence of relatively benign conditions for multiple contributing environmental variables, with no single condition determining the locations of high scores. In contrast, the highest scores for globally influenced conditions (>0.70) were concentrated around the southwestern side of Tutuila. The lowest scores (0.10 to 0.40) were found along the eastern tip of Tutuila and were accentuated by high thermal stress in the vicinity. The Manu'a Islands exhibited a mixture of high and low scores for globally influenced conditions. The resulting environmental favorability scores were moderately low (≤ 0.40) around the eastern tip of Tutuila and moderately high (>0.65) everywhere else (Fig. 4a). These patterns were similar for the intermediate emissions and worst-case emissions scenarios (Fig. 4b, c).

Coral change and stability

In Guam, the most negative coral change scores were located around the southern tip of the island. The most positive coral change scores were identified on the southeastern and northwestern sides, reflecting gradual gains in coral cover since 2009 (Figs. 2a, 5a). The southwestern side had the lowest coral stability scores, reflecting steep declines in coral cover approaching zero. The highest coral stability scores were observed along the southeastern side and near Agana Bay (Fig. 5b) where some of the highest percentages of coral cover persisted over time (Fig. 2). The sectors formed 3 groups with distinct trends in cover: a stable group around the northern and eastern sides of the island; a group with increasing cover on the northwestern side, which exhibited positive coral change scores and low coral stability scores; and a declining cover group on the southwestern side, which had negative coral change scores and low coral stability scores (Fig. 6a). The coral change and stability scores explained 72.0% of the variation between groups (between-group sum of squares: 8.567; total sum of squares: 11.901).

In American Samoa, the northeast side of Tutuila and the unprotected sector of Ta'u had the highest positive coral change scores due to relatively high gains in coral cover since 2010 (Fig. 5a). Southwest Tutuila, Aunu'u, Ofu, and Olosega had low positive coral change scores, reflecting slight increases in coral cover, whereas the rest of the sectors had low to moderate negative coral change scores due to declines in coral cover (Figs. 2b, 5a). Conversely, southwest Tutuila had the highest coral stability scores, as coral cover remained

función también evaluó la membresía del grupo para cada sector (Fig. S1).

Identificación de áreas de superposición entre la resiliencia de los corales y las condiciones ambientales favorables

Calculamos el área de superposición entre condiciones ambientales altamente favorables y grupos de sectores de coral con tendencias de cobertura similares utilizando el método del centro de celda para convertir todas las celdas de la cuadrícula ráster en cuadrados de la misma área. Identificamos la intersección espacial entre los polígonos resultantes que representan puntuaciones de favorabilidad ambiental ≥ 0.80 y los polígonos sectoriales en ArcMap 10.7 (ESRI). También identificamos las intersecciones entre sectores con puntuaciones de favorabilidad ambiental < 0.80 . Con base en esta superposición, encontramos el área en cada cuadrante correspondiente a las posibles acciones de gestión enumeradas en la Tabla 1 para determinar la proporción de cada jurisdicción que podría estar sujeta a diferentes estrategias de la GBR. Utilizamos una prueba de chi cuadrado para determinar si estas proporciones eran significativamente diferentes de lo esperado al azar.

RESULTADOS

Favorabilidad ambiental

Bajo las condiciones climáticas actuales, la zona nororiental de Guam presentó la mayor favorabilidad ambiental. Esta área tuvo puntajes de favorabilidad ambiental de intermedios a altos para las condiciones manejadas (0.50 a 0.80) y puntajes de favorabilidad ambiental altos para las condiciones influenciadas globalmente (>0.75). Las puntuaciones más bajas para las condiciones gestionadas (0.22 a 0.35) se concentraron en el lado occidental de la isla alrededor del puerto de Apra. En contraste, los puntajes más bajos para las condiciones influenciadas globalmente (≤ 0.30) se ubicaron en el cuadrante suroeste de la isla. Se encontraron puntuaciones altas de favorabilidad ambiental (≥ 0.70) en la mitad norte de Guam, y puntuaciones bajas (0.10 a 0.35) en el lado suroeste (Fig. 3a).

En el escenario de emisiones intermedias y en el peor escenario de emisiones, este patrón se invirtió. Las condiciones influenciadas globalmente fueron más favorables a lo largo del lado suroeste, en gran parte porque se prevé que esta parte de la isla experimentara estrés térmico capaz de provocar un blanqueamiento anual severo en un futuro más lejano que en el lado norte. Los puntajes de favorabilidad ambiental relativa más altos se produjeron en el suroeste y el norte, aunque las diferencias entre los sitios con mejor y peor puntaje no fueron tan pronunciadas como las obtenidas con el clima actual (Fig. 3b, c).

Bajo las condiciones climáticas actuales en Samoa Americana, las puntuaciones de favorabilidad ambiental para las condiciones gestionadas fueron las más bajas (0.00 a 0.40)

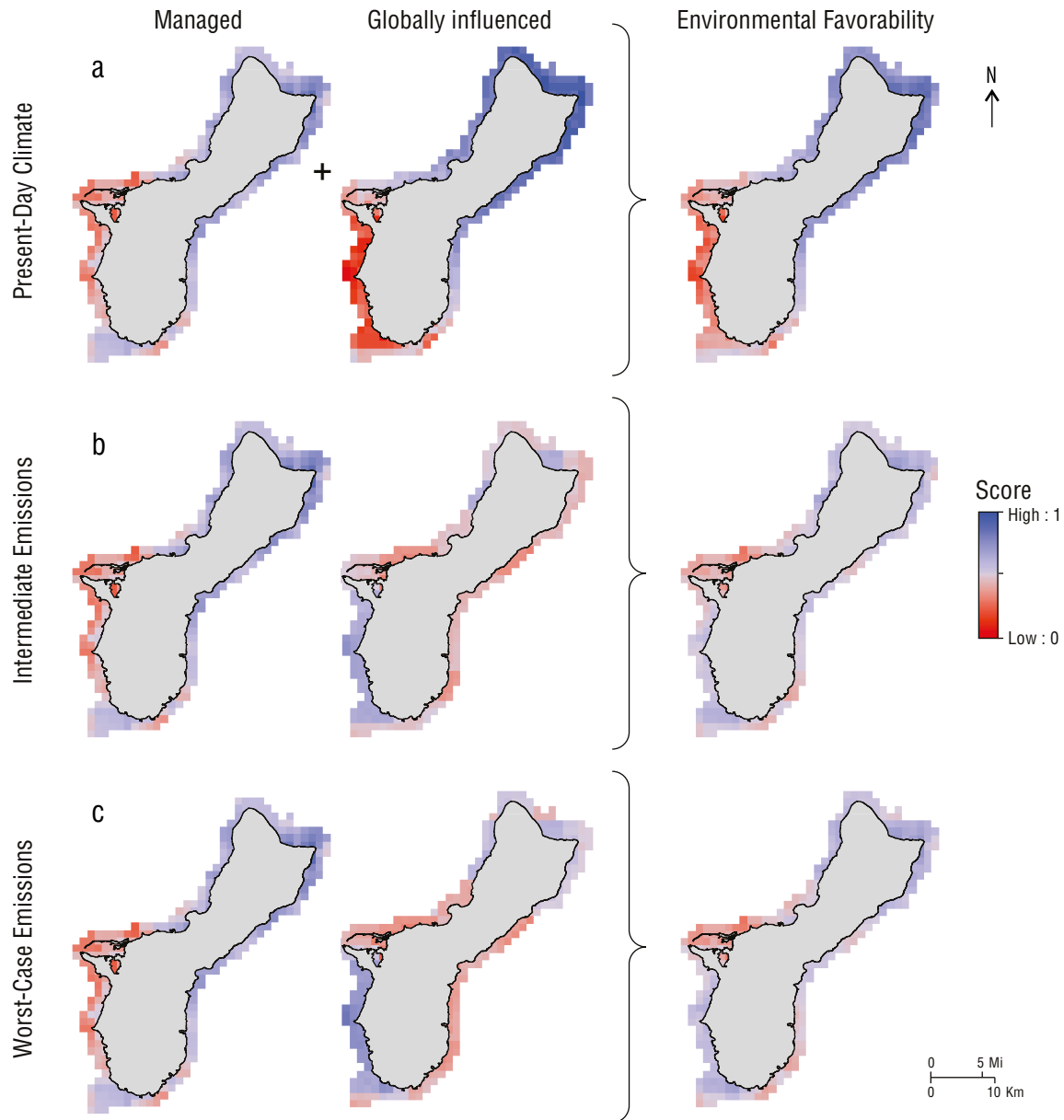


Figure 3. Scores for managed conditions, globally influenced conditions, and environmental favorability in Guam for the (a) present-day climate, (b) intermediate emissions scenario, and (c) worst-case emissions scenario. Scores for managed conditions remained the same across future climate scenarios. Red colors correspond to lower favorability and worse conditions for coral. Blue colors correspond to higher favorability and better conditions for coral.

Figura 3. Puntajes de condiciones gestionadas, condiciones influenciadas globalmente y favorabilidad ambiental en Guam para (a) el clima actual, (b) el escenario de emisiones intermedias y (c) el peor escenario de emisiones. Las puntuaciones de las condiciones gestionadas se mantuvieron iguales en todos los escenarios climáticos futuros. Los colores rojos corresponden a una menor preferencia y peores condiciones para los corales. Los colores azules corresponden a una mayor preferencia y mejores condiciones para los corales.

the highest out of all 10 sectors. Aunu'u, Ofu, and Olosega had moderately high coral stability scores, maintaining high coral cover at lower levels or with more variability (Figs. 2b, 5b). Northwest Tutuila, southeast Tutuila, and the unprotected sector of Ta'u had moderately low coral stability scores, whereas the low coral stability scores in the 3 protected sectors (Ta'u Sanctuary, Fagalua, and Fagatele) resulted from

en el lado sureste de Tutuila, mientras que las puntuaciones intermedias (0.35 a 0.65) se encontraron alrededor del lado suroeste, y las puntuaciones más altas se detectaron alrededor del lado noroeste (>0.65). Las islas Manu'a tuvieron puntuaciones relativamente altas (>0.65) en condiciones de manejo, con la excepción de una pequeña zona en la esquina suroeste de Ofu (Fig. 4a). Este patrón reflejó una confluencia de

relatively steep declines or high variability in coral cover (Figs. 2b, 5b). Here, sectors formed 2 distinct groups: a stable group with low coral change scores and high coral stability scores around southwest Tutuila, northeast Tutuila, Aunu'u, and most of the Manu'a Islands and a declining cover group with negative coral change scores and low coral stability scores in northwest Tutuila, southeast Tutuila, southern Ta'u, Fagalu Bay, and Fagatele Bay (Fig. 6b). The change and stability scores explained 75.3% of the variation between groups (between-group sum of squares: 9.608; total sum of squares: 12.759; Fig. 6).

Synthesis of coral resilience and environmental favorability for the implementation of RBM strategies

In both locations, the overlap of highly favorable environmental conditions and stable sectors declined in future climate scenarios. The northern half of Guam exhibited the most overlap under present-day climate conditions and in both future climate scenarios (Fig. 7). The overlap decreased from 54.1 km² under present-day climate conditions to 29.6 and 30.5 km² in the intermediate emissions and worst-case emissions scenarios, respectively (Fig. 7b, c). The overlap between sectors with increasing cover and highly favorable conditions was considerably smaller than that of the stable sectors and limited to <8.0 km² on the northwestern side of the island for all climates considered (Fig. 7). Declining sectors did not overlap with highly favorable conditions under present-day climate conditions, but this increased to 4.0 and 4.9 km² near the southern end of the island in the intermediate and worst-case emissions scenarios, respectively (Fig. 7).

In American Samoa, stable sectors and highly favorable conditions overlapped around the south and southwest sides of Tutuila and the western side of Ofu (Fig. 8a) under present-day climate conditions. In both future climate scenarios, this overlap shifted to include less area from the south side of Tutuila and more area from western Ofu. The overlap declined from 207.5 km² under present-day climate conditions to 179.2 and 190.1 km² in the intermediate emissions and worst-case emissions scenarios, respectively (Fig. 8b, c). Stable sectors outside of highly favorable conditions made up the majority of the area of the waters of American Samoa across all climate scenarios (839.9 to 868.3 km²). Declining sectors overlapped with 134.1 km² of highly favorable conditions under present-day climate conditions, concentrated around the northwestern sector of Tutuila (Fig. 8a). This area increased in future climate scenarios, remaining concentrated in northwestern Tutuila (Fig. 8b, c).

In Guam, the area suited for the conservation of stable or increasing coral cover declined in future climate scenarios. Under present-day climate conditions, this area comprised 23% of the 238.7 km² of the Guam study area and was spatially overrepresented compared to what was expected at random ($\chi^2 < 0.0001$, d.f. = 1, $P = 0.0049$). In both future climate scenarios, the area for the representation of this strategy

condiciones relativamente benignas para múltiples variables ambientales contribuyentes, sin que ninguna condición determinara la ubicación de las puntuaciones altas. En contraste, las puntuaciones más altas para las condiciones influenciadas globalmente (>0.70) se concentraron alrededor del lado suroeste de Tutuila. Las puntuaciones más bajas (0.10 a 0.40) se encontraron a lo largo del extremo oriental de Tutuila y se acentuaron por el alto estrés térmico en los alrededores. Las islas Manu'a exhibieron una combinación de puntuaciones altas y bajas en condiciones influenciadas globalmente. Los puntajes de favorabilidad ambiental resultantes fueron moderadamente bajos (≤ 0.40) alrededor del extremo oriental de Tutuila y moderadamente altos (>0.65) en todos los demás lugares (Fig. 4a). Estos patrones fueron similares para el escenario de emisiones intermedias y el peor escenario de emisiones (Fig. 4b, c).

Cambio y estabilidad de los corales

En Guam, las puntuaciones de cambio de coral más negativas se ubicaron alrededor del extremo sur de la isla. Las puntuaciones de cambio en el coral más positivas se identificaron en los lados sureste y noroeste, lo que refleja ganancias graduales en la cobertura de coral desde 2009 (Figs. 2a, 5a). El lado suroeste tuvo los puntajes más bajos de estabilidad de coral, lo que refleja fuertes disminuciones en la cubierta de coral acercándose a cero. Los puntajes más altos de estabilidad de coral se observaron a lo largo del lado sureste y cerca de la bahía de Agana (Fig. 5b), donde algunos de los porcentajes más altos de cubierta de coral persistieron a lo largo del tiempo (Fig. 2). Los sectores formaron 3 grupos con distintas tendencias en cuanto a cobertura: un grupo estable alrededor de los lados norte y este de la isla; un grupo con una cobertura cada vez mayor en el lado noroeste, que exhibió puntuaciones positivas de cambio en el coral y puntuaciones bajas de estabilidad de coral; y un grupo de cobertura en declive en el lado suroeste, que tuvo puntuaciones negativas de cambio de coral y puntuaciones bajas de estabilidad de coral (Fig. 6a). Las puntuaciones de cambio y estabilidad del coral explicaron el 72.0% de la variación entre grupos (suma de cuadrados entre grupos: 8.567; suma total de cuadrados: 11.901).

En Samoa Americana, el lado noreste de Tutuila y el sector desprotegido de Ta'u tuvieron las puntuaciones positivas más altas de cambio en el coral debido a ganancias relativamente altas en la cubierta de coral desde 2010 (Fig. 5a). El suroeste de Tutuila, Aunu'u, Ofu y Olosega tuvieron puntuaciones positivas bajas de cambio en el coral, lo que refleja ligeros aumentos en la cobertura de coral, mientras que el resto de los sectores tuvieron puntuaciones negativas de bajas a moderadas para el cambio en el coral debido a disminuciones en la cubierta de coral (Fig. 2b, 5a). Por el contrario, el suroeste de Tutuila tuvo las puntuaciones más altas de estabilidad de coral, ya que la cubierta de coral siguió siendo la más alta de los 10 sectores. Aunu'u, Ofu y Olosega tuvieron puntuaciones de estabilidad de coral moderadamente altas, manteniendo

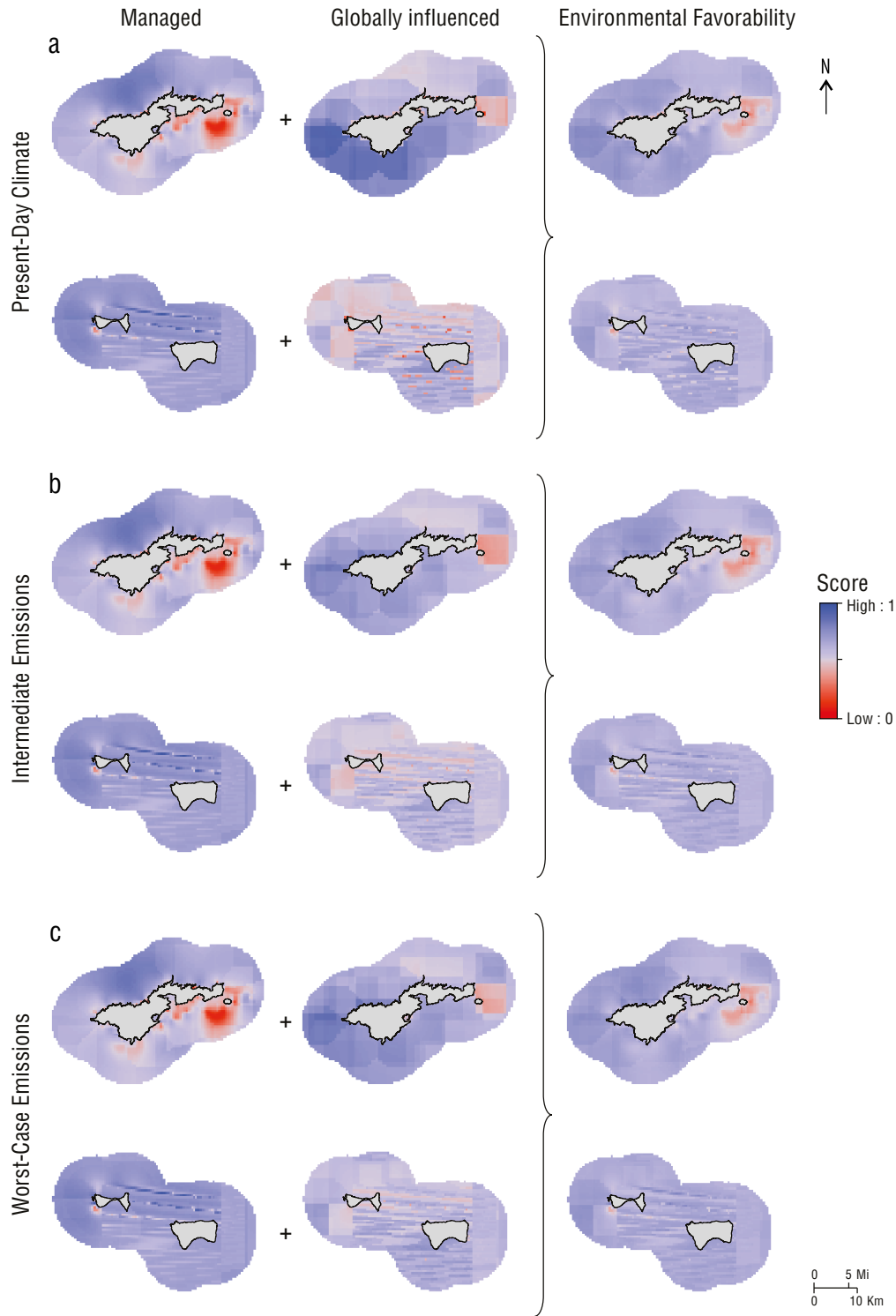


Figure 4. Scores for managed conditions, globally influenced conditions, and environmental favorability in American Samoa for the (a) present-day climate, (b) intermediate emissions scenario, and (c) worst-case emissions scenario. Scores for managed conditions remained the same across future climate scenarios. Red colors correspond to lower favorability and worse conditions for coral. Blue colors correspond to higher favorability and better conditions for coral.

Figura 4. Puntajes de condiciones gestionadas, condiciones influenciadas globalmente y favorabilidad ambiental en Samoa Americana para (a) el clima actual, (b) el escenario de emisiones intermedias y (c) el peor escenario de emisiones. Las puntuaciones de las condiciones gestionadas se mantuvieron iguales en todos los escenarios climáticos futuros. Los colores rojos corresponden a una menor favorabilidad y peores condiciones para los corales. Los colores azules corresponden a una mayor favorabilidad y mejores condiciones para los corales.

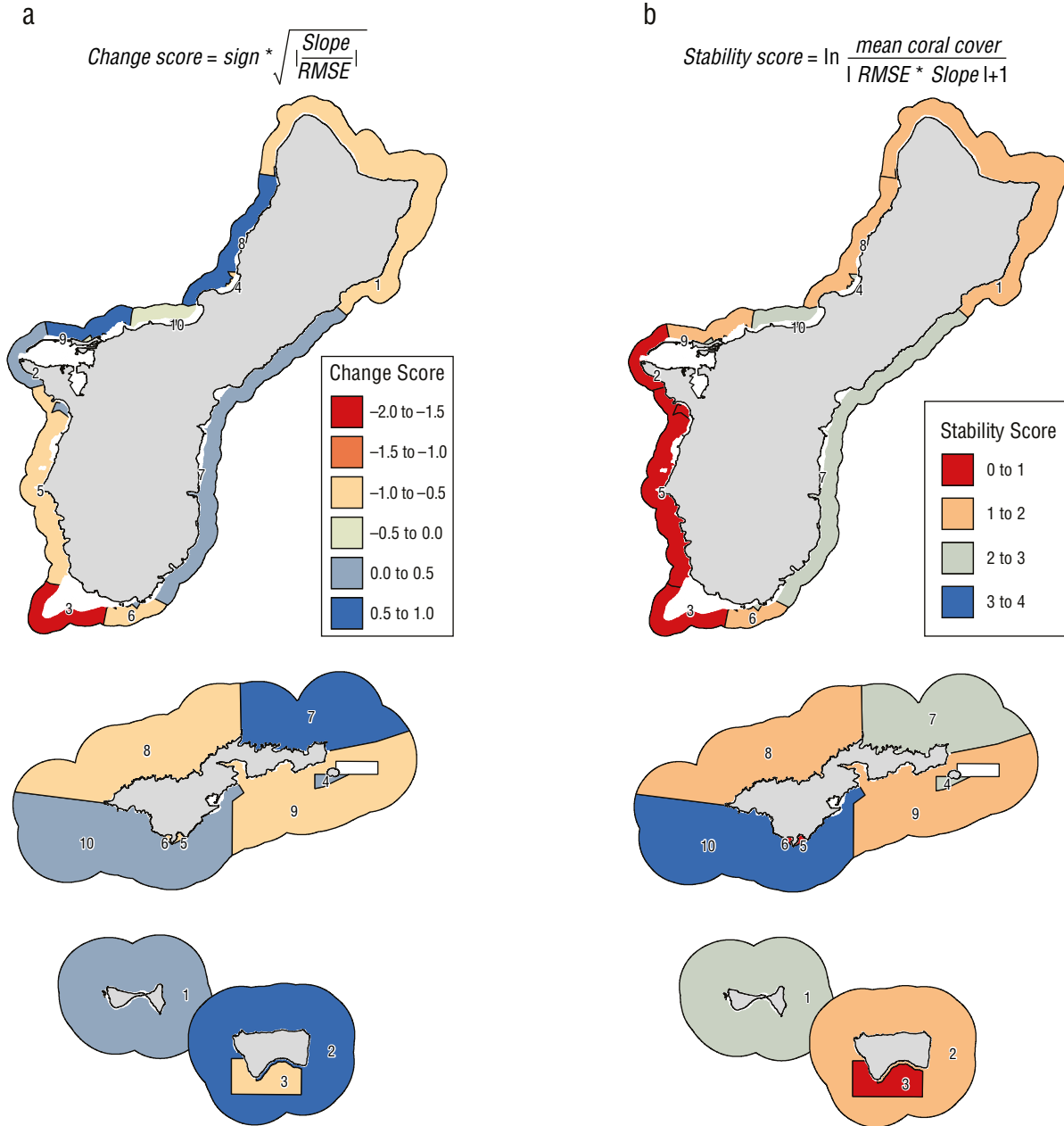


Figure 5. (a) Coral change score and (b) coral stability score by sector. Reds correspond to lower values and blues correspond to higher values. Guam sectors are unnamed and referred to by arbitrarily assigned numbers. American Samoa sector names are: (1) Ofu and Olosega, (2) Ta'ū Open, (3) Ta'ū Sanctuary, (4) Tutuila Aunu'u A, (5) Tutuila Fagalua, (6) Tutuila Fagatele, (7) Tutuila Northeast Open, (8) Tutuila Northwest Open, (9) Tutuila Southeast Open, (10) Tutuila Southwest Open. Reef flat, dredged, lagoon, back reef and intertidal areas are excluded from view. Coral sector boundaries for Guam based on boundaries from Oliver et al. (2020a). Colors correspond to the coral change and stability scores. Guam sectors are unnamed and referred to by arbitrarily assigned numbers. Coral sectors for American Samoa based on boundaries from the NOAA National Coral Reef Monitoring Program. Not to scale.

Figura 5. (a) Puntaje de cambio en el coral y (b) puntaje de estabilidad de coral por sector. Los rojos corresponden a valores más bajos y los azules corresponden a valores más altos. Los sectores de Guam no tienen nombre y se hace referencia a ellos mediante números asignados arbitrariamente. Los nombres de los sectores de Samoa Americana son: (1) Ofu y Olosega, (2) Ta'ū abierto, (3) Ta'ū santuario, (4) Tutuila Aunu'u A, (5) Tutuila Fagalua, (6) Tutuila Fagatele, (7) noreste de Tutuila abierto, (8) noroeste de Tutuila abierto, (9) sureste de Tutuila abierto, (10) suroeste de Tutuila abierto. Los arrecifes planos, dragados, lagunas, arrecifes traseros y áreas intermareales están excluidos de la vista. Límites del sector coralino de Guam basados en los límites de Oliver et al. (2020a). Los colores corresponden a las puntuaciones de cambio y estabilidad del coral. Los sectores de Guam no tienen nombre y se hace referencia a ellos mediante números asignados arbitrariamente. Sectores de coral para Samoa Americana basados en los límites del National Coral Reef Monitoring Program de la NOAA. No a escala.

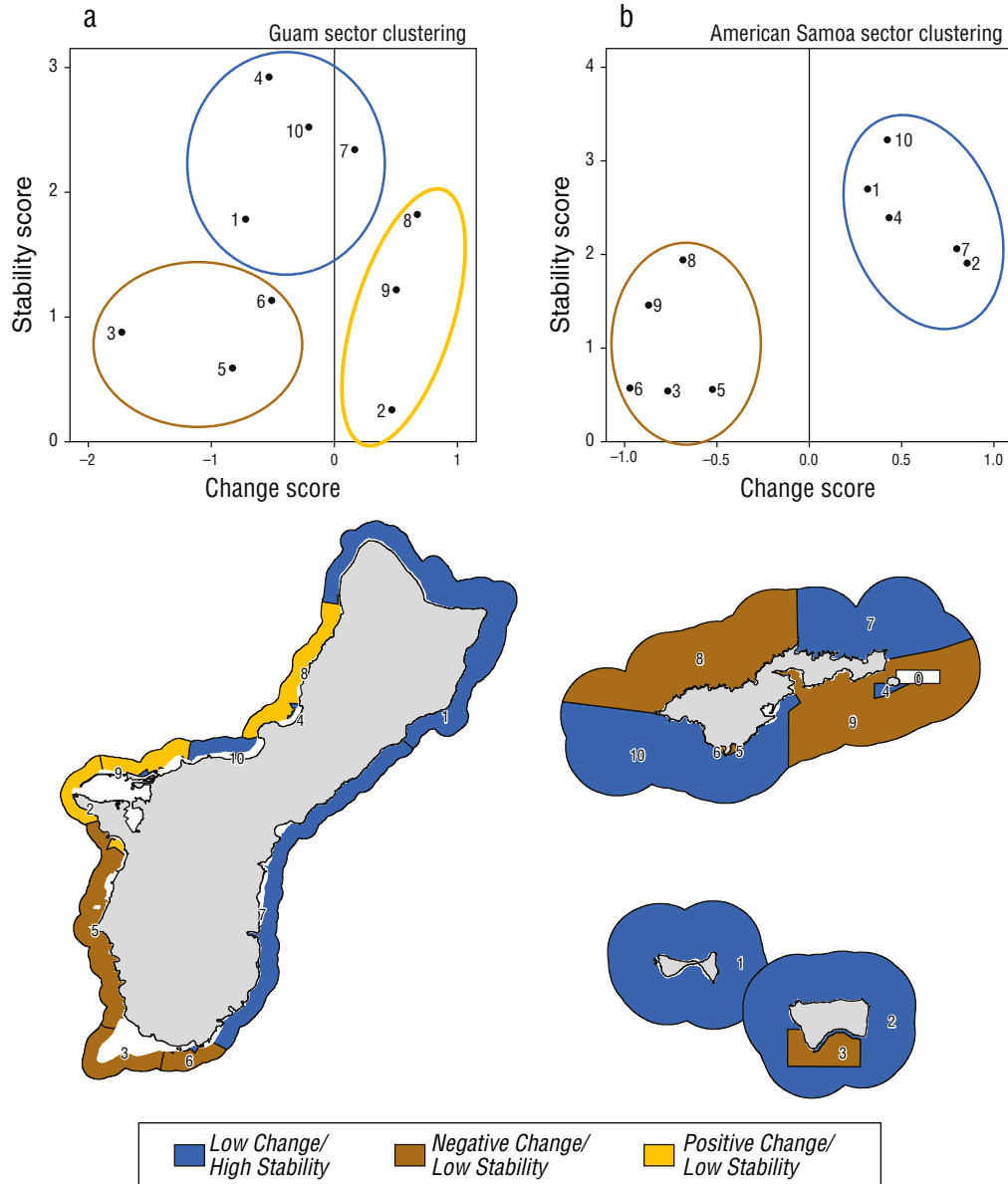


Figure 6. Sector clustering for (a) Guam and (b) American Samoa. Sectors are plotted based on change and stability scores. Cluster analysis determined group membership, shown by ellipses and corresponding colors for sector polygons on the maps. Blue indicates the low change/high stability group (high resilience). Yellow indicates the positive change/low stability group (moderate resilience). Brown indicates the negative change/low stability group (low resilience). Reef flat, dredged, lagoon, back reef and intertidal areas are excluded from view.

Figura 6. Agrupación de sectores para (a) Guam y (b) Samoa Americana. Los sectores se trazan en función de las puntuaciones de cambio y estabilidad. El análisis de conglomerados determinó la pertenencia al grupo, que se muestra mediante elipses y colores correspondientes a los polígonos sectoriales en los mapas. El azul indica el grupo de bajo cambio/alta estabilidad (alta resiliencia). El amarillo indica el grupo de cambio positivo/baja estabilidad (resiliencia moderada). El café indica el grupo de cambio negativo/baja estabilidad (baja resiliencia). Los arrecifes planos, dragados, lagunas, arrecifes traseros y áreas intermareales están excluidos de la vista.

declined to 15.1% to 15.4% of the study area (Fig. 9a) and was not significantly different from what was expected at random (intermediate emissions: $\chi^2 = 0.2209$, d.f. = 1, $P = 0.3616$; worst-case emissions: $\chi^2 = 0.1455$, d.f. = 1, $P = 0.2971$). A restoration strategy for declining coral cover was represented by a very small proportion of the study area (<3%) under all climate scenarios. Strategies for conserving genetic material or

una alta cobertura de coral en niveles más bajos o con mayor variabilidad (Figs. 2b, 5b). El noroeste de Tutuila, el sureste de Tutuila y el sector desprotegido de Ta'ū tuvieron puntuaciones de estabilidad de coral moderadamente bajas, mientras que las puntuaciones bajas de estabilidad de coral en los 3 sectores protegidos (Santuario de Ta'ū, Fagaluva y Fagatele) fueron el resultado de disminuciones relativamente pronunciadas o altas

mitigating stressors could be applied to the highest proportion of Guam (52% to 60% of the study area; Fig. 9a).

In American Samoa, the proportions of the areas in which each applicable set of RBM strategies (Table 1) could be applied were similar (varying by <3%) across climate scenarios (Fig. 9b). The areas for applying the strategies of conserving stable coral populations, conserving genetic material, and mitigating stressors for declining coral cover under favorable conditions were similar, each occupying 9% to 13% of the study area (1,556.9 km²). The management strategy of restoring declining coral cover could be applied in the largest area, comprising 54% to 56% of the study area. This strategy was consistently overrepresented, whereas conserving genetic material and mitigating stressors were underrepresented (9% to 11%; present-day climate: $\chi^2 < 0.0001$, d.f. = 1, $P < 0.0001$; intermediate emissions: $\chi^2 < 0.0001$, d.f. = 1, $P < 0.0001$; worst-case emissions: $\chi^2 < 0.0001$, d.f. = 1, $P < 0.0001$; Fig. 9b). Despite exhibiting consistent proportions among strategy areas, American Samoa showed greater geographic shifts regarding where these strategies could be applied in future climate scenarios compared to those of Guam (Figs. 7–9).

DISCUSSION

Our results highlight areas where corals showing 2 potential characteristics of resilience, positive change and stability, co-occur with favorable environmental conditions both now and in multiple future climate scenarios. Prior resilience assessments in the Pacific Islands region partially agree with the geographic patterns identified in this study. In Guam, the environmental favorability scores were highest around the northern half of the island (Fig. 3), which aligned with the highly resilient sites that Maynard et al. (2018) identified based on scaled scores for coral cover, coral diversity, coral recruitment, bleaching resistance, macroalgae cover, herbivorous fish biomass, and temperature variability. The northwestern coast of Guam is also a center of importance for marine biodiversity, suggesting that RBM strategies in this area could contribute additional benefits to taxa other than corals (Dobson et al. 2021). The stable coral sectors in American Samoa partially aligned with the results of a prior resilience assessment that incorporated coral diversity and coral performance during past bleaching events (Oliver et al. 2020a), particularly around the Manu'a Islands (Fig. 6). However, around Tutuila, the stable sectors in this study were different than those identified by Oliver et al. (2020a), who found that only the northwestern sector of Tutuila exhibited medium to high resilience based on average scaled scores of coral diversity, herbivorous fish biomass, macroalgae cover, juvenile coral diversity, fishing depletion, bleaching resistance, coral disease, and temperature variability. This divergence illustrates that examining climate-related changes in community structure and ecosystem functions could complement our species-indifferent approach, yielding a more comprehensive picture of ecosystem resilience, as coral stress

variabilidad en la cobertura de coral (Figs. 2b, 5b). Aquí, los sectores formaron 2 grupos distintos: un grupo estable con puntuaciones bajas de cambio en el coral y puntuaciones altas de estabilidad de coral alrededor del suroeste de Tutuila, noreste de Tutuila, Aunu'u y la mayor parte de las islas Manu'a y un grupo de cobertura en declive con puntuaciones negativas de cambio de coral y bajas puntuaciones de estabilidad de los corales en el noroeste de Tutuila, el sureste de Tutuila, el sur de Ta'u, la bahía de Fagalua y la bahía de Fagatele (Fig. 6b). Las puntuaciones de cambio y estabilidad explicaron el 75.3% de la variación entre grupos (suma de cuadrados entre grupos: 9.608; suma total de cuadrados: 12.759; Fig. 6).

Síntesis de la resiliencia coralina y la favorabilidad ambiental para la implementación de estrategias de GBR

En ambos sitios, la superposición de condiciones ambientales altamente favorables y sectores estables disminuyó en escenarios climáticos futuros. La mitad norte de Guam exhibió la mayor superposición en las condiciones climáticas actuales y en ambos escenarios climáticos futuros (Fig. 7). La superposición disminuyó de 54.1 km² en las condiciones climáticas actuales a 29.6 y 30.5 km² en el escenario de emisiones intermedias y en el peor escenario de emisiones, respectivamente (Fig. 7b, c). La superposición entre sectores con cobertura creciente y condiciones altamente favorables fue considerablemente menor que la de los sectores estables y se limitó a <8.0 km² en el lado noroeste de la isla para todos los climas considerados (Fig. 7). Los sectores en declive no se superpusieron con condiciones altamente favorables en las condiciones climáticas actuales, pero esto aumentó a 4.0 y 4.9 km² cerca del extremo sur de la isla en el escenario de emisiones intermedias y el peor escenario, respectivamente (Fig. 7).

En Samoa Americana, sectores estables y condiciones muy favorables se superpusieron alrededor de los lados sur y suroeste de Tutuila y el lado occidental de Ofu (Fig. 8a) bajo condiciones climáticas actuales. En ambos escenarios climáticos futuros, esta superposición se desplazó para incluir menos área del lado sur de Tutuila y más área del oeste de Ofu. La superposición disminuyó de 207.5 km² bajo las condiciones climáticas actuales a 179.2 y 190.1 km² en el escenario de emisiones intermedias y el peor escenario de emisiones, respectivamente (Fig. 8b, c). Los sectores estables fuera de condiciones muy favorables constituían la mayor parte de la superficie de las aguas de Samoa Americana en todos los escenarios climáticos (839.9 a 868.3 km²). Los sectores en declive se superpusieron con 134.1 km² de las condiciones altamente favorables bajo las condiciones climáticas actuales, los cuales se concentraron alrededor del sector noroeste de Tutuila (Fig. 8a). Esta área aumentó en escenarios climáticos futuros y permaneció concentrada en el noroeste de Tutuila (Fig. 8b, c).

En Guam, el área adecuada para la conservación de la cobertura de coral estable o en aumento disminuyó en escenarios climáticos futuros. Bajo condiciones climáticas actuales,

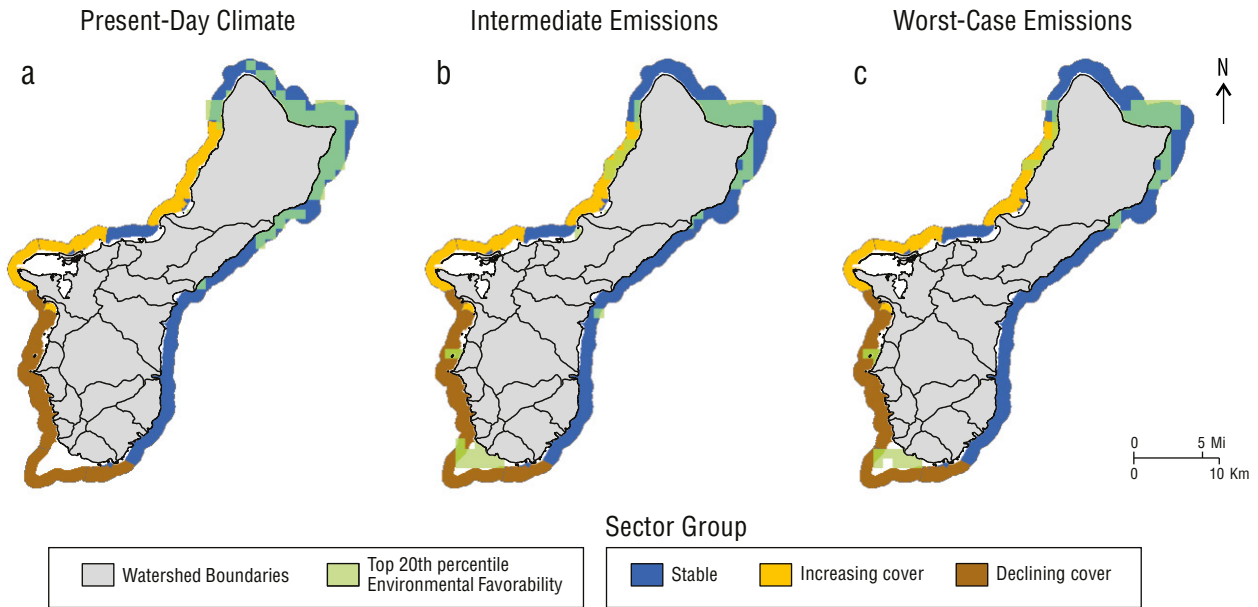


Figure 7. Map of overlap in Guam’s areas of high environmental favorability (light green) and high coral resilience (dark blue) for (a) present-day climate, (b) intermediate emissions scenario, and (c) worst-case emissions scenario. Watershed boundaries included for reference (WERI 2021). Reef flat, dredged, lagoon, back reef and intertidal areas are excluded from view.

Figura 7. Mapa de superposición en las áreas de Guam de alta favorabilidad ambiental (verde claro) y alta resiliencia coralina (azul oscuro) para (a) el clima actual, (b) el escenario de emisiones intermedias y (c) el peor escenario de emisiones. Límites de cuencas hidrográficas incluidos como referencia (WERI 2021). Los arrecifes planos, dragados, lagunas, arrecifes traseros y áreas intermareales están excluidos de la vista.

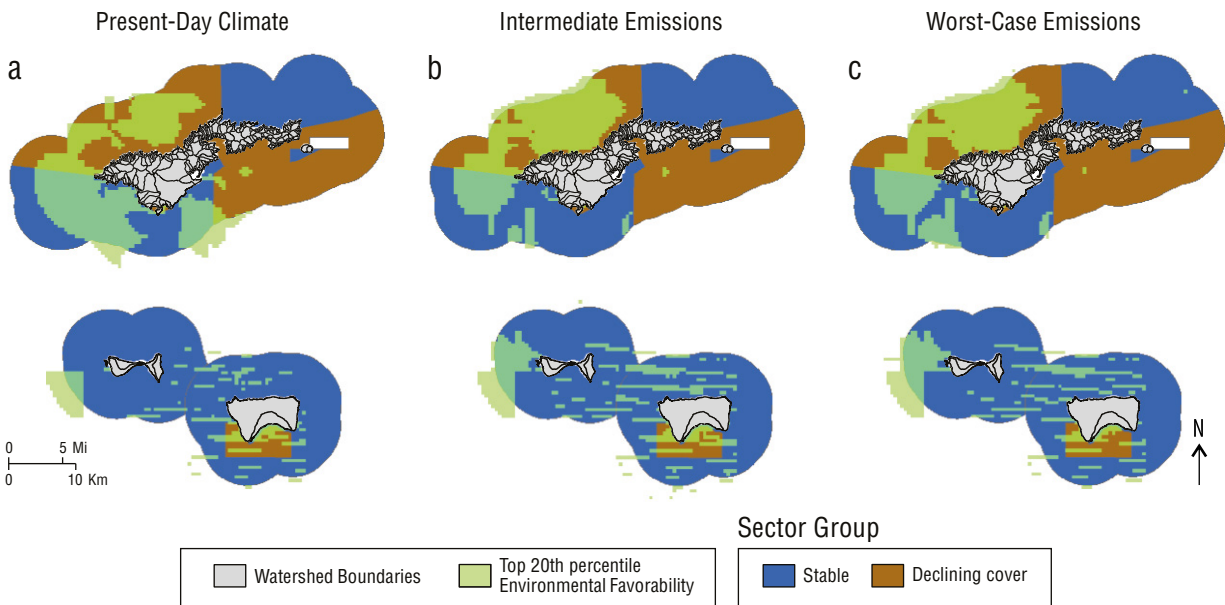


Figure 8. Map of overlap in American Samoa’s areas of high environmental favorability (light green) and high coral resilience (dark blue) for (a) present-day climate, (b) intermediate emissions scenario, and (c) worst-case emissions scenario. Watershed boundaries included for reference (Wright 2016a, 2016b). Reef flat, dredged, lagoon, back reef and intertidal areas are excluded from view.

Figura 8. Mapa de superposición en las áreas de alta favorabilidad ambiental (verde claro) y alta resiliencia de los corales (azul oscuro) de Samoa Americana para (a) el clima actual, (b) el escenario de emisiones intermedias y (c) el peor escenario de emisiones. Los límites de las cuencas hidrográficas se incluyen como referencia (Wright 2016a, 2016b). Los arrecifes planos, dragados, lagunas, arrecifes traseros y áreas intermareales están excluidos de la vista.

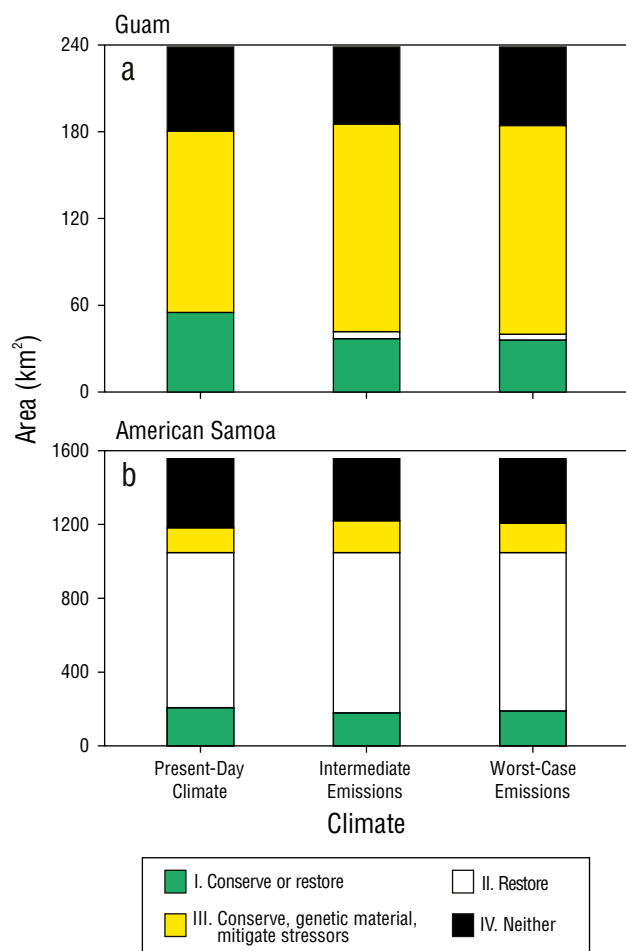


Figure 9. Area of sectors for (a) Guam and (b) American Samoa that correspond to management strategies outlined in Table 1 based on trends in coral cover and environmental favorability scores.

Figura 9. Área de sectores para (a) Guam y (b) Samoa Americana que corresponden a las estrategias de gestión descritas en la Tabla 1 en función de las tendencias en la cobertura de coral y las puntuaciones de favorabilidad ambiental.

tolerance varies by taxon and life history stage (McCowan et al. 2012, Nalley et al. 2021).

The large differences in the relative proportions of the applicable RBM strategies between the 2 jurisdictions (Fig. 9) could have been driven by the greater overlap of highly favorable conditions with declining coral sectors in American Samoa, creating a larger area potentially suitable for restoration (Figs. 7, 8), whereas restoration did not emerge as a widespread strategy for Guam (Fig. 9). The principles of RBM suggest that restoration is more successful in areas with low environmental stress compared to the surrounding areas (McLeod et al. 2019). In contrast, the presence of the large area of Guam suitable for the conservation of genetic material or stressor mitigation suggests that it contains several sectors resilient to challenging conditions. Repeated exposure to

esta área comprendió el 23% de los 238.7 km² del área de estudio de Guam y estuvo sobrerrepresentada espacialmente en comparación con lo que se esperaba al azar ($\chi^2 < 0.0001$, g.l. = 1, $P = 0.0049$). En ambos escenarios climáticos futuros, el área para la representación de esta estrategia disminuyó de 15.1% a 15.4% del área de estudio (Fig. 9a) y no fue significativamente diferente de lo que se esperaba al azar (emisiones intermedias: $\chi^2 = 0.2209$, g.l. = 1, $P = 0.3616$; peor escenario de emisiones: $\chi^2 = 0.1455$, g.l. = 1, $P = 0.2971$). Una estrategia de restauración para la cobertura de coral en declive estuvo representada por una proporción muy pequeña del área de estudio (<3%) en todos los escenarios climáticos. Se podrían aplicar estrategias para conservar el material genético o mitigar los factores estresantes en la mayor proporción de Guam (52% a 60% del área de estudio; Fig. 9a).

En Samoa Americana, las proporciones de las áreas en las que se podría aplicar cada conjunto de estrategias de GBR (Tabla 1) fueron similares (variando en <3%) en todos los escenarios climáticos (Fig. 9b). Las áreas para aplicar las estrategias de conservación de poblaciones de coral estables, conservación de material genético y mitigación de factores estresantes para la disminución de la cobertura de coral en condiciones favorables fueron similares y ocuparon cada una del 9% al 13% del área de estudio (1,556.9 km²). La estrategia de gestión de restaurar la cobertura de coral en declive podría aplicarse en el área más grande, la cual comprende del 54% al 56% del área de estudio. Esta estrategia estuvo consistentemente sobrerrepresentada, mientras que la conservación del material genético y la mitigación de los factores estresantes estuvieron subrepresentadas (9% a 11%; clima actual: $\chi^2 < 0.0001$, g.l. = 1, $P < 0.0001$; emisiones intermedias: $\chi^2 < 0.0001$, g.l. = 1, $P < 0.0001$; peor escenario de emisiones: $\chi^2 < 0.0001$, g.l. = 1, $P < 0.0001$; Fig. 9b). A pesar de exhibir proporciones consistentes entre las áreas estratégicas, Samoa Americana mostró mayores desplazamientos geográficos con respecto a dónde podrían aplicarse estas estrategias en escenarios climáticos futuros en comparación con los de Guam (Figs. 7-9).

DISCUSIÓN

Nuestros resultados resaltan áreas donde corales que muestran 2 características de resiliencia potenciales, cambio positivo y estabilidad, coexisten con condiciones ambientales favorables tanto ahora como en múltiples escenarios climáticos futuros. Las evaluaciones de resiliencia anteriores en la región de las islas del Pacífico concuerdan parcialmente con los patrones geográficos identificados en este estudio. En Guam, los puntajes de favorabilidad ambiental fueron más altos alrededor de la mitad norte de la isla (Fig. 3), lo que se alineó con los sitios altamente resilientes que Maynard et al. (2018) identificaron con puntuaciones escaladas para la cobertura de coral, la diversidad de coral, el reclutamiento de coral, la resistencia al blanqueamiento, la cobertura de macroalgas, la biomasa de peces herbívoros y la variabilidad

environmental variability and stress has been documented to increase positive outcomes after severe disturbance events. For example, corals exposed to variable water temperatures maintain higher photosynthetic efficiency and exhibit higher survival rates during heat stress events than those of corals living in less variable water temperatures. These differences can be attributed to symbiont clades and to the corals themselves (McClanahan et al. 2007, Oliver and Palumbi 2011).

Strengths and limitations of this approach

The sector-wide averages of the aggregated NOAA NCRMP data did not allow us to explicitly incorporate coral community structure into our approach. The sector boundaries in American Samoa were based on NOAA management units and were largely influenced by protected area boundaries. The disagreement between our results and those of Oliver et al. (2020a) regarding which sectors of American Samoa showed signs of resilience could stem from the fact that breaks in community structure were not closely aligned with sector boundaries. In contrast, coral community structure informed the boundaries of the Guam sectors, possibly explaining the comparatively better agreement between our results and those of Maynard et al. (2018). This suggests that setting the boundaries of aggregation units based on similarities in community structure can improve the use of coral cover metrics in resilience assessments in which repeated surveys of community composition are spatially limited or absent.

One strength of our approach is that it utilizes aggregated data such as those reported by government monitoring agencies. The collection and interpretation of coral community data, while offering valuable insights into ecosystem dynamics, requires more time and expertise than analyzing coral cover without regard to species. Coral change and coral stability scores provide metrics for comparisons among coral cover trends over time and are easily repeatable. Furthermore, it is easy to spatially overlay these metrics with environmental variables to reveal alignments in potential drivers. However, these scores do not capture nuances of community change post-disturbance. For example, in the wake of repeated bleaching events, a low-diversity assemblage of fast-growing species may recolonize a formerly diverse assemblage. Alternatively, an assemblage of slower-growing, heat-tolerant species may be all that survives (van Woesik et al. 2011, Guest et al. 2012). Implications for fish and invertebrate communities are also not captured in these scores. We do not suggest that this approach should replace community surveys. Rather, our approach complements these labor-intensive surveys by providing a rapid way to assess sector-wide trends.

Implications for management

When selecting sites to implement RBM, many managers prefer to target areas with desirable conditions for specific taxa

de temperatura. La costa noroeste de Guam también es un centro de importancia para la biodiversidad marina, lo que sugiere que las estrategias de GBR en esta área podrían aportar beneficios adicionales a otros taxones además de a los corales (Dobson et al. 2021). Los sectores coralinos estables en Samoa Americana se alinearon parcialmente con los resultados de una evaluación de resiliencia anterior que incorporó la diversidad y el desempeño de los corales durante eventos de blanqueamiento pasados (Oliver et al. 2020a), particularmente alrededor de las islas Manu'a (Fig. 6). Sin embargo, alrededor de Tutuila, los sectores estables encontrados en este estudio fueron diferentes a los identificados por Oliver et al. (2020a), quienes encontraron que solo el sector noroeste de Tutuila exhibía una resiliencia de media a alta según las puntuaciones promedio escaladas de diversidad de corales, biomasa de peces herbívoros, cobertura de macroalgas, diversidad de corales juveniles, agotamiento de la pesca, resistencia al blanqueamiento, enfermedades de los corales y variabilidad de la temperatura. Esta divergencia ilustra que examinar los cambios relacionados con el clima en la estructura de la comunidad y las funciones de los ecosistemas podría complementar nuestro enfoque indiferente a las especies, generando una imagen más completa de la resiliencia de los ecosistemas, ya que la tolerancia al estrés de los corales varía según el taxón y la etapa de la historia de vida (McCowan et al. 2012, Nalley et al. 2021).

Las grandes diferencias en las proporciones relativas de las estrategias de GBR aplicables entre las 2 jurisdicciones (Fig. 9) podrían haber sido impulsadas por la mayor superposición de condiciones altamente favorables con sectores de coral en declive en Samoa Americana, lo cual creo un área más grande potencialmente adecuada para la restauración (Figs. 7, 8), mientras que la restauración no surgió como una estrategia generalizada en Guam (Fig. 9). Los principios de la GBR sugieren que la restauración tiene más éxito en áreas con bajo estrés ambiental en comparación con las áreas circundantes (McLeod et al. 2019). Por el contrario, la gran cantidad de superficie de Guam adecuada para la conservación de material genético o la mitigación de factores estresantes sugiere que contiene varios sectores resistentes a condiciones desafiantes. Se ha documentado que la exposición repetida a la variabilidad ambiental y al estrés aumenta los resultados positivos después de eventos de perturbación graves. Por ejemplo, los corales expuestos a temperaturas del agua variables mantienen una mayor eficiencia fotosintética y exhiben tasas de supervivencia más altas durante eventos de estrés por calor que los corales que viven en temperaturas del agua menos variables. Estas diferencias pueden atribuirse a clados de simbiosis y a los propios corales (McClanahan et al. 2007, Oliver y Palumbi 2011).

Fortalezas y limitaciones de este enfoque

Los promedios sectoriales de los datos agregados del NCRMP de la NOAA no nos permitieron incorporar

in multiple climate scenarios. These preferences are based on the assumption that positive outcomes, in terms of ecosystem function and biodiversity, are more likely in these locations, regardless of the uncertainty surrounding the severity of climate change impacts (Moilanen et al. 2006, Polasky et al. 2011, Neuman et al. 2019). In this respect, Guam may exhibit more geographic consistency for applying RBM strategies than American Samoa as the climate continues to change. In contrast, the proportions of applicable RBM strategies remained similar in American Samoa, although larger geographic shifts regarding where they should be implemented were present (Figs. 7–9). Regardless, for both jurisdictions, the RBM strategies outlined in this study (Table 1) could be suitable in >75% of their sectors (Fig. 9).

A lack of fine-scale climate projections poses a challenge for evaluating the potential impacts of future environmental conditions on coral growth and survival. For example, sea surface temperature projections from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) were only available at 0.5-degree resolution (Krasting et al. 2018) at the time of analysis, representing small island territories with only a few cells. Future projections for only 2 globally influenced variables, thermal stress and SLR-related erosion, were available at sufficient resolution to be included in the analysis of future climate scenarios. Notably, the projected onset of annual severe bleaching differed by less than a decade between the intermediate emissions and worst-case emissions scenarios, likely contributing to the similarity in environmental favorability scores. In the Pacific Islands region, many marine management actions are considered at the scale of single watersheds, which typically have <10 km of coastline (Comeros-Raynal et al. 2019), demonstrating a mismatch between the spatial scales of the available climate projections and the detail needed for local management decisions. As the resolution of downscaled climate projections improves for more variables, this assessment could be repeated to provide greater local-scale nuance.

We have highlighted areas that may be suitable for conserving existing robust coral populations, restoring corals, and mitigating environmental stressors. These ecological considerations can be added to socioeconomic and logistical considerations to determine locally appropriate RBM strategies (Oliver et al. 2020c), assisting reef managers and local stakeholders in making decisions that facilitate adaptive responses to climate change.

ACKNOWLEDGMENTS

Any use of trade, firm, or product names is for descriptive purposes only and does not imply endorsement by the U.S. Government. This work was funded by the U.S. Geological Survey Pacific Islands Climate Adaptation Science Center, supported in part by the Pacific Islands Regional Ocean Data Sharing Initiative, and coordinated by the Pacific Islands Ocean Observing System (PacIOOS) with

explícitamente la estructura de la comunidad coralina en nuestro enfoque. Los límites del sector en Samoa Americana se basaron en las unidades de gestión de la NOAA y estuvieron influenciados en gran medida por los límites de las áreas protegidas. El desacuerdo entre nuestros resultados y los de Oliver et al. (2020a) con respecto a qué sectores de Samoa Americana mostraron signos de resiliencia podría deberse al hecho de que las rupturas en la estructura comunitaria no estaban estrechamente alineadas con los límites del sector. Por el contrario, la estructura de la comunidad coralina sirvió para limitar los sectores de Guam, lo que posiblemente explique la concordancia comparativamente mejor entre nuestros resultados y los de Maynard et al. (2018). Esto sugiere que usar las similitudes en la estructura de la comunidad para establecer los límites de las unidades de agregación puede mejorar el uso de métricas de cobertura de coral en evaluaciones de resiliencia en las que los estudios repetidos de la composición de la comunidad son espacialmente limitados o están ausentes.

Una fortaleza de nuestro enfoque es que utiliza datos agregados como los reportados por las agencias de monitoreo gubernamentales. La recopilación e interpretación de datos de la comunidad de coral, si bien ofrece información valiosa sobre la dinámica de los ecosistemas, requiere más tiempo y experiencia que analizar la cobertura de coral sin tener en cuenta las especies. Las puntuaciones de cambio y estabilidad de los corales proporcionan métricas para comparar las tendencias de la cobertura de coral a lo largo del tiempo y son fácilmente repetibles. Además, es fácil superponer espacialmente estas métricas con variables ambientales para revelar alineaciones en posibles impulsores. Sin embargo, estas puntuaciones no captan los matices del cambio comunitario posterior a los disturbios. Por ejemplo, tras repetidos eventos de blanqueamiento, un conjunto de especies de rápido crecimiento y baja diversidad puede recolonizar un conjunto anteriormente diverso. Alternativamente, un conjunto de especies de crecimiento más lento y tolerantes al calor puede ser todo lo que sobreviva (van Woesik et al. 2011, Guest et al. 2012). Estas puntuaciones tampoco reflejan las implicaciones para las comunidades de peces e invertebrados. No sugerimos que este enfoque deba reemplazar las encuestas comunitarias. Más bien, nuestro enfoque complementa estas encuestas que requieren mucha mano de obra al proporcionar una forma rápida de evaluar las tendencias de todo el sector.

Implicaciones para la gestión

Al seleccionar sitios para implementar la GBR, muchos gestores prefieren centrarse en áreas con condiciones deseables para taxones específicos en múltiples escenarios climáticos. Estas preferencias se basan en el supuesto de que es más probable que en estos lugares se obtengan resultados positivos, en términos de función del ecosistema y biodiversidad, independientemente de la incertidumbre que rodea la gravedad de los impactos del cambio climático (Moilanen et al. 2006, Polasky et al. 2011, Neuman et al. 2019). En este sentido,

funding from National Oceanographic and Atmospheric Administration (Award #NA16NOS0120024). The authors thank Tom Oliver and Kurt Ingeman for coral sector data and feedback on the development of the change and stability scores; Jim Potemra, Bernardo Vargas-Angel, David Burdick, and Curt Storlazzi for feedback on the resilience modeling process; Michael Ackerman for sharing data from the American Samoa Coral Drivers project; Melissa Iwamoto and PacIOOS for administrative and logistical support; and Cynthia Derosier and Trent Fish for technical support during feedback workshops with coastal managers. We thank the following agencies for feedback on map presentation: Guam Bureau of Statistics and Planning, Guam Department of Agriculture, University of Guam Marine Laboratory, Guam Port Authority, Commonwealth of the Northern Mariana Islands Bureau of Environmental and Coastal Quality, American Samoa Coral Reef Advisory Group, American Samoa Department of Commerce, NOAA Office of Coastal Management, NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center, National Marine Sanctuary of American Samoa, and National Park of American Samoa.

Data Availability

GIS layers are available for download (Moritsch 2021; <https://doi.org/10.5066/P9N32V3M>). Maps are available in an interactive web viewer on the PacIOOS website (PacIOOS 2022; <http://www.pacioos.hawaii.edu/projects/coral-resilience-guam-amsam/>).

Copyediting by MacTavish Scientific Editing.

REFERENCES

- Assis J, Tyberghein L, Bosch S, Verbruggen H, Serrão EA, de Clerck O, Tittensor D. 2018. Bio-ORACLE v2.0: Extending marine data layers for bioclimatic modelling. *Global Ecol Biogeogr* 27:277-284.
- Ateweberhan M, Feary DA, Keshavmurthy S, Chen A, Schleyer MH, Sheppard CRC. 2013. Climate Change Impacts on coral reefs: synergies with local effects, possibilities for acclimation, and management implications. *Mar Pollut Bull.* 74(2):526-539. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.06.011>
- Aucan J. 2018. Effects of Climate Change on Sea Levels and Inundation Relevant to the Pacific Islands. Pacific Marine Climate Change Report Card: Science Review 2018:43-49.
- Barbier EB, Hacker SD, Kennedy C, Koch EW, Stier AC, Silliman BR. 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecol Monogr.* 81(2):169-193. <https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- Bastazini CV, Munduruca JFV, Rocha PLB, Napoli MF. 2007. Which environmental variables better explain changes in anuran community composition? A case Study in the Restinga of Mata de São João, Bahia, Brazil. *Herpetologica.* 63(4):459-471. [https://doi.org/10.1655/0018-0831\(2007\)63\[459:WEVBEC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1655/0018-0831(2007)63[459:WEVBEC]2.0.CO;2)
- Bessell-Browne P, Negri AP, Fisher R, Clode PL, Duckworth A, Jones R. 2017. Impacts of turbidity on corals: the relative importance of light limitation and suspended sediments. *Mar*

Guam puede mostrar una mayor coherencia geográfica a la hora de aplicar estrategias de GBR que Samoa Americana a medida que el clima continúa cambiando. Por el contrario, las proporciones de estrategias de GBR aplicables siguieron siendo similares en Samoa Americana, aunque se produjeron cambios geográficos más importantes con respecto a dónde deberían implementarse (Figs. 7-9). Independientemente, para ambas jurisdicciones, las estrategias de GBR descritas en este estudio (Tabla 1) podrían ser adecuadas en >75% de sus sectores (Fig. 9).

La falta de proyecciones climáticas a escala fina plantea un desafío para evaluar los impactos potenciales de las condiciones ambientales futuras sobre el crecimiento y la supervivencia de los corales. Por ejemplo, las proyecciones de la temperatura de la superficie del mar del Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) solo estaban disponibles con una resolución de 0.5 grados (Krasting et al. 2018) en el momento del análisis, lo que representa pequeños territorios insulares con solo unas pocas celdas. Solo para 2 variables influenciadas globalmente, el estrés térmico y la erosión relacionada con el ANM, estaban disponibles las proyecciones futuras con suficiente resolución para ser incluidas en el análisis de escenarios climáticos futuros. En particular, el inicio proyectado del blanqueamiento severo anual difirió en menos de una década entre el escenario de emisiones intermedias y el peor escenario de emisiones, lo que probablemente contribuyó a la similitud en las puntuaciones de favorabilidad ambiental. En la región de las islas del Pacífico, muchas acciones de gestión marina se consideran a escala de cuencas individuales, que normalmente tienen <10 km de costa (Comeros-Raynal et al. 2019), lo que demuestra un desajuste entre las escalas espaciales de las proyecciones climáticas disponibles y el detalle necesario para las decisiones de gestión local. A medida que la resolución de las proyecciones climáticas de menor escala mejora para más variables, esta evaluación podría repetirse para proporcionar mayores matices a escala local.

Hemos destacado áreas que pueden ser adecuadas para conservar poblaciones de coral robustas existentes, restaurar corales y mitigar factores de estrés ambiental. Estas consideraciones ecológicas se pueden agregar a consideraciones socioeconómicas y logísticas para determinar estrategias de GBR apropiadas a nivel local (Oliver et al. 2020c), lo cual ayuda a los gestores de arrecifes y a las partes locales interesadas a tomar decisiones que faciliten respuestas adaptativas al cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Cualquier uso de nombres comerciales, de empresas o de productos tiene fines descriptivos únicamente y no implica respaldo por parte del gobierno de los EE. UU. Este trabajo fue financiado por el U.S. Geological Survey Pacific Islands Climate Adaptation Science Center, apoyado en parte por la Pacific Islands Regional Ocean Data Sharing Initiative y coordinado por el Pacific Islands Ocean Observing

- Pollut Bull. 117(1–2):161-170.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.050>
- Bruno JF, Petes LE, Harvell CD, Hettlinger A. 2003. Nutrient enrichment can increase the severity of coral diseases: effect of nutrients on coral disease severity. *Ecol Lett.* 6(12):1056-1061.
<https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00544.x>
- Chung AE, Wedding LM, Green AL, Friedlander AM, Goldberg G, Meadows A, Hixon MA. 2019. Building coral reef resilience through spatial herbivore management. *Front Mar Sci.* 6:98.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00098>
- Chung AE, Wedding LM, Meadows A, Moritsch MM, Donovan MK, Gove J, Hunter C. 2019. Prioritizing reef resilience through spatial planning following a mass coral bleaching event. *Coral Reefs.* 38(4):837-850.
<https://doi.org/10.1007/s00338-019-01812-w>
- Comeros-Raynal MT, Lawrence A, Sudek M, Vaeoso M, McGuire K, Regis J, Houk P. 2019. Applying a ridge-to-reef framework to support watershed, water quality, and community-based fisheries management in American Samoa. *Coral Reefs.* 38(3):505-520.
<https://doi.org/10.1007/s00338-019-01806-8>
- Comte A, Pendleton LH. 2018. Management strategies for coral reefs and people under global environmental change: 25 years of scientific research. *J Environ Manage.* 209:462-474.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.12.051>
- Dobson G, Johnson I, Kowal V, Rhodes K, Lussier B, Byler K. 2021. Guam Coastal Resilience Assessment. Prepared for the National Fish and Wildlife Federation. Ashville (NC): University of North Carolina Asheville National Environmental Modeling and Analysis. 63 p.
- Fabricius KE. 2005. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Mar Pollut Bull.* 50(2):125-146.
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.11.028>
- Field ME, Ogston AS, Storlazzi CD. 2011. Rising sea level may cause decline of fringing coral reefs. *Trans Am Geophys Union.* 92(33):273-274.
<https://doi.org/10.1029/2011EO330001>
- Foo SA, Asner GP. 2020. Sea surface temperature in coral reef restoration outcomes. *Environ Res Lett.* 15(7):074045.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab7dfa>
- Fox MD, Nelson CE, Oliver TA, Quinlan ZA, Remple K, Glanz J, Smith JE, Putnam HM. 2021. Differential resistance and acclimation of two coral species to chronic nutrient enrichment reflect life-history traits. *Funct Ecol.* 35(5):1081-1093.
<https://doi.org/10.1111/1365-2435.13780>
- Graham NAJ, Bellwood DR, Cinner JE, Hughes TP, Norström AV, Nyström M. 2013. Managing resilience to reverse phase shifts in coral reefs. *Front Ecol Environ.* 11(10):541-548.
<https://doi.org/10.1890/120305>
- Guest JR, Baird AH, Maynard JA, Muttaqin E, Edwards AJ, Campbell SJ, Yewdall K, Affendi YA, Chou LM. 2012. Contrasting patterns of coral bleaching susceptibility in 2010 suggest an adaptive response to thermal stress. *PLoS ONE.* 7(3):e33353.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0033353>
- Halpern BS, Frazier M, Potapenko J, Casey KS, Koenig K, Longo C, Lowndes JS, Rockwood RC, Selig ER, Selkoe KA, Walbridge S. 2015. Spatial and temporal changes in cumulative human impacts on the world's ocean. *Nat Commun* 6:7615
- Heron SF, Maynard JA, van Hooidonk R, Eakin CM. 2016. Warming trends and bleaching stress of the world's coral reefs 1985–2012. *Sci Rep.* 6(1):38402.
<https://doi.org/10.1038/srep38402>
- Holling CS. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annu Rev Ecol Syst.* 4(1):1-23.
<https://doi.org/10.1146/annurev.es.04.110173.000245>
- System (PacIOOS) con financiamiento de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (concesión #NA16NOS0120024). Los autores agradecen a Tom Oliver y Kurt Ingeman por los datos del sector coralino y sus comentarios sobre el desarrollo de las puntuaciones de cambio y estabilidad; a Jim Potemra, Bernardo Vargas-Angel, David Burdick y Curt Storlazzi por sus comentarios sobre el proceso de modelado de resiliencia; a Michael Ackerman por compartir datos del proyecto American Samoa Coral Drivers; a Melissa Iwamoto y PacIOOS por el apoyo administrativo y logístico; y a Cynthia Derosier y Trent Fish por el apoyo técnico durante los talleres de retroalimentación con gestores costeros. Agradecemos a las siguientes agencias por sus comentarios sobre la presentación del mapa: Guam Bureau of Statistics and Planning, Guam Department of Agriculture, University of Guam Marine Laboratory, Guam Port Authority, Commonwealth of the Northern Mariana Islands Bureau of Environmental and Coastal Quality, American Samoa Coral Reef Advisory Group, American Samoa Department of Commerce, NOAA Office of Coastal Management, NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center, National Marine Sanctuary of American Samoa y National Park of American Samoa.

Disponibilidad de datos

Las capas del SIG están disponibles para descargar (Moritsch 2021; <https://doi.org/10.5066/P9N32V3M>). Los mapas están disponibles en un visor web interactivo en el sitio web de PacIOOS (PacIOOS 2022; <http://www.pacioos.hawaii.edu/projects/coral-resilience-guam-amsam/>).

Traducido al español por Claudia Michel-Villalobos.

- Houk P, Benavente D, Iguel J, Johnson S, Okano R. 2014. Coral reef disturbance and recovery dynamics differ across gradients of localized stressors in the Mariana Islands. *PLoS ONE.* 9(8):e105731.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105731>
- Houk P, Didonato G, Iguel J, van Woesik R. 2005. Assessing the effects of non-point source pollution on American Samoa's coral reef communities. *Environ Monit Assess.* 107(1–3):11-27.
<https://doi.org/10.1007/s10661-005-2019-4>
- Jales-Cavalcanti M, do Nascimento-Feitosa FA, Koenig ML, Flores-Montes MJ, de Araújo-Filho MC, Araújo-da Silva R. 2015. Phytoplankton biomass dynamics and environmental variables around the Rocas Atoll Biological Reserve, South Atlantic. *Brazilian J Oceanogr.* 63(4):443-454.
<https://doi.org/10.1590/S1679-87592015093906304>
- Jenness J, Houk P. 2014. UOGML Wave Energy ArcGIS Extension. Mangilao: University of Guam Marine Laboratory.
- Kenneth RNA, Marshall PA, Abdulla A, Beeden R, Bergh C, Black R, Eakin CM, Game ET, Gooch M, Graham NAJ. 2015. Operationalizing Resilience for Adaptive Coral Reef Management under Global Environmental Change. *Global*

- Change Biol. 21(1):48-61.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12700>
- Kottermair M. 2012. Piti-Asan Watershed Management Plan. Mangilao (Guam): Water and Environmental Research Institute (WERI) of the Western Pacific-University of Guam. Technical Report No.: 138.
- Krasting JP, John JG, Blanton C, McHugh C, Nikonov S, Radhakrishnan A, Rand K, Zadeh NT, Balaji V, Durachta J, et al. 2018. NOAA-GFDL GFDL-ESM4 Model Output Prepared for CMIP6 CMIP: Earth System Grid Federation.
<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1407>
- Lê S, Josse J, Husson F. 2008. FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis. *J Stat Softw*, 25(1):1-18.
<https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.
- Maechler M, Rousseeuw P, Struyf A, Hubert M, Hornik K. 2023. cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions. R package v. 2.1.5.
- Maynard J, Johnson S, Burdick DR, Jarrett A, Gault J, Idechong J, Miller R, Williams GJ, Heron SF, Raymundo L. 2018. Coral reef resilience to climate change in Guam in 2016. NOAA Technical Memorandum CRCP. 29:1-51.
<https://doi.org/10.7289/V5/TM-CRCP-29>
- McClanahan TR, Ateweberhan M, Muhando CA, Maina J, Mohammed MS. 2007. Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality. *Ecol Monogr*. 77(4):503-525.
<https://doi.org/10.1890/06-1182.1>
- McCowan DM, Pratchett MS, Baird AH. 2012. Bleaching susceptibility and mortality among corals with differing growth forms. *Proceedings of the 12th International Coral Reef Symposium*; 9–13 Jul 2012, vol. 9. Cairns (Australia). 6 p.
- McLeod E, Anthony KRN, Mumby PJ, Maynard J, Beeden R, Graham NAJ, Heron SF, Hoegh-Guldberg O, Jupiter S, MacGowan P, et al. 2019. The future of resilience-based management in coral reef ecosystems. *J Environ Manage*. 233:291-301.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.034>
- Moilanen A, Runge MC, Elith J, Tyre A, Carmel Y, Fegraus E, Wintle BA, Burgman M, Ben-Haim Y. 2006. Planning for robust reserve networks using uncertainty analysis. *Ecol Modell*. 199(1):115-124.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.07.004>
- Moritsch MM. 2018. Ecological causes and consequences of sea star wasting syndrome on the Pacific coast [dissertation]. [Santa Cruz (CA)]: Univesity of California Santa Cruz. 184 p.
- Moritsch MM. 2021. Favorability of environmental conditions for coral reefs in Guam and American Samoa under multiple climate scenarios: U.S. Geological Survey data release.
<https://doi.org/10.5066/P9N32V3M>
- Nalley EM, Tuttle LJ, Barkman AL, Conklin EE, Wulstein DM, Richmond RH, Donahue MJ. 2021. Water quality thresholds for coastal contaminant impacts on corals: a systematic review and meta-analysis. *Sci Total Environ*. 794:148632.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148632>
- NASA Ocean Biology Distributed Active Archive Center (DAAC). 2020. Earth Science Data and Information System (ESDIS): NASA; [accessed 2021 May 03]. <https://oceansci.gsfc.nasa.gov/directaccess/MODIS-Aqua/>.
- Neuman KK, Stein RW, Eyster CR, Gardali T. 2019. Climate-Smart Conservation of Beaches and Dunes for Western Snowy Plover Recovery in Monterey Bay, California. *Petaluma (CA): Point Blue Conservation Science*. Report No.: F15AC00642.
- NOAA. 2018. US Coral Reef Monitoring Data Summary. NOAA Technical Memorandum CRCP. 31:1-224.
<https://doi.org/10.25923/G0V0-NM61>
- NOAA. 2020. Coral Reef Watch Version 3.1. Daily Global 5 km Satellite Coral Bleaching Degree Heating Week Product, 1985–2020. College Park (Maryland, USA): NOAA Coral Reef Watch; [accessed 2021 Jan 10]. https://coralreefwatch.noaa.gov/product/5km/index_5km_composite.php.
- NOAA Digital Coast. 2017. Digital Coast Sea Level Rise Viewer. 1-8. <https://coast.noaa.gov/slr/>.
- Norström AV, Nyström M, Lokrantz J, Folke C. 2009. Alternative states on coral reefs: beyond coral–macroalgal phase shifts. *Mar Ecol Prog Ser*. 376:295-306.
<https://doi.org/10.3354/meps07815>
- Oliver TA, Barkley H, Couch C, Kindinger T, Williams I. 2020b. Downscaling ecological trends from the spatially randomized datasets of the National Coral Reef Monitoring Program. NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC.106:59.
<https://doi.org/10.25923/2FEF-8R42>
- Oliver TA, Danika K, Hospital J, Maynard J, Dieter T. 2020a. Coral Reef Resilience and Social Vulnerability to Climate Change: American Samoa. Honolulu (HI): NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center.
- Oliver TA, Hospital J, Brainard R. 2020c. Spatial prioritization under Resilience Based Management: evaluating trade-offs among prioritization strategies. NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC. 105:47.
<https://doi.org/10.25923/XDF2-T259>
- Oliver TA, Palumbi SR. 2011. Do fluctuating temperature environments elevate coral thermal tolerance? *Coral Reefs*. 30(2):429-440.
<https://doi.org/10.1007/s00338-011-0721-y>
- [PacIOOS] Pacific Islands Ocean Observing System. 2022. Projects: Coral Reef Resilience in Guam and American Samoa; [accessed 2022 February 1]. <http://www.pacioos.hawaii.edu/projects/coral-resilience-guam-amsam/>.
- [PIFSC] NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center, [CRCP] NOAA Coral Reef Conservation Program, and [ESA-CCI] European Space Agency Climate Change Initiative. 2021a. Chlorophyll-a Long-term Mean, 1998-2018. American Samoa: [PacIOOS] Pacific Islands Ocean Observing System.
- [PIFSC] NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center, [CRCP] NOAA Coral Reef Conservation Program, and [ESA-CCI] European Space Agency Climate Change Initiative. 2021b. Turbidity (Kd490) Long-term Mean, 1998-2018. American Samoa: [PacIOOS] Pacific Islands Ocean Observing System.
- [PIFSC] NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center, [CRCP] NOAA Coral Reef Conservation Program, and [NCEP] NOAA National Centers for Environmental Prediction. 2021d. Wave Power Long-term Mean, 2002-2012. American Samoa: [PacIOOS] Pacific Islands Ocean Observing System.
- [PIFSC] NOAA Pacific Islands Fisheries Science Center, [CRCP] NOAA Coral Reef Conservation Program, and [OBPG] NASA Ocean Biology Processing Group. 2021c. Photosynthetically Active Radiation (PAR) Long-term Mean, 2003-2018. American Samoa: [PacIOOS] Pacific Islands Ocean Observing System.
- Polasky S, Carpenter SR, Folke C, Keeler B. 2011. Decision-making under great uncertainty: environmental management in an era of global change. *Trends Ecol Evol*. 26(8):398-404.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.04.007>
- Pratchett M, Heron S, Mellin C, Cumming G. 2009. Recurrent mass-bleaching and the potential for ecosystem collapse on Australia's Great Barrier Reef. In: Canadell J, Jackson R (eds.), *Ecosystem Collapse and Climate Change*. Vol. 241, *Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*. Cham (Switzerland): Springer Nature. p. 1492-1499.
- Prouty NG, Storlazzi CD, McCutcheon AL, Jenson JW. 2014. Historic impact of watershed change and sedimentation to reefs along west-central Guam. *Coral Reefs*. 33(3):733-749.
<https://doi.org/10.1007/s00338-014-1166-x>
- Raj KD, Aeby GS, Mathews G, Williams GJ, Caldwell JM, Laju RL, Bharath MS, Kumar PD, Arasamuthu A, Asir NGG,

- Wedding LM, Davies AJ, Moritsch MM, Patterson-Edward JK. 2021. Coral reef resilience differs among islands within the Gulf of Mannar, southeast India, following successive coral bleaching events. *Coral Reefs*. 40(4):1029-1044. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02102-0>
- Raymundo LJ, Burdick D, Hoot WC, Miller RM, Brown V, Reynolds T, Gault J, Idechong J, Fifer J, Williams A. 2019. Successive bleaching events cause mass coral mortality in Guam, Micronesia. *Coral Reefs*. 38(4):677-700. <https://doi.org/10.1007/s00338-019-01836-2>
- Raymundo LJ, Burdick D, Lapacek V, Miller R, Brown V. 2017. Anomalous temperatures and extreme tides: Guam staghorn *Acropora* succumb to a double threat. *Mar Ecol Prog Ser*. 564:47-55. <https://doi.org/10.3354/meps12005>
- R Core Team. 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org>.
- Reguero BG, Storlazzi CD, Gibbs AE, Shope JB, Cole AD, Cumming KA, Beck MW. 2021. The value of US coral reefs for flood risk reduction. *Nature Sustainability*. 4:688-698. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00706-6>
- Riahi K, Rao S, Krey V, Cho C, Chirkov V, Fischer G, Kindermann G, Nakicenovic N, Rafaj P. 2011. RCP 8.5—A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*. 109(1–2):33-57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>
- Risk MJ, Edinger E. 2011. Impacts of sediment on coral reefs. In: Hopley D (ed.), *Encyclopedia of Modern Coral Reefs*, *Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Dordrecht (Netherlands): Springer Netherlands. p. 575-586.
- Safaie A, Silbiger NJ, McClanahan TR, Pawlak G, Barshis DJ, Hench JL, Rogers JS, Williams GJ, Davis KA. 2018. High frequency temperature variability reduces the risk of coral bleaching. *Nat Commun*. 9(1):1671. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04074-2>
- Schoepf V, Jung MU, McCulloch MT, White NE, Stat M, Thomas L. 2020. Thermally variable, macrotidal reef habitats promote rapid recovery from mass coral bleaching. *Front Mar Sci*. 7:245. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00245>
- Shuler CK, Comerros-Raynal M. 2020. Ridge to reef management implications for the development of an open-source dissolved inorganic nitrogen-loading model in American Samoa. *Environ Manage*. 66(3):498-515. <https://doi.org/10.1007/s00267-020-01314-4>
- Smith JE, Hunter CL, Smith CM. 2010. The effects of top-down versus bottom-up control on benthic coral reef community structure. *Oecologia*. 163(2):497-507. <https://doi.org/10.1007/s00442-009-1546-z>
- Soil Survey Staff. 2020. Gridded Soil Survey Geographic (gSSURGO) Database for American Samoa and Guam; [accessed 2021 January 06]. <https://gdg.sc.egov.usda.gov/>.
- Storlazzi CD, Elias E, Field ME, Presto MK. 2011. Numerical modeling of the impact of sea-level rise on fringing coral reef hydrodynamics and sediment transport. *Coral Reefs*. 30(S1):83-96. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0723-9>
- Stuart-Smith RD, Brown CJ, Ceccarelli DM, Edgar GJ. 2018. Ecosystem restructuring along the Great Barrier Reef following mass coral bleaching. *Nature*. 560(7716):92-96. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0359-9>
- Swanson DW, Bailey H, Schumacher B, Ferguson M, Vargas-Ángel B. 2018. Ecosystem Sciences Division standard operating procedures: Data collection for rapid ecological assessment benthic surveys. NOAA Technical Memorandum NMFS-PIFSC-71-63.
- Thomson AM, Calvin KV, Smith SJ, Kyle GP, Volke A, Patel P, Delgado-Arias S, Bond-Lamberty B, Wise MA, Clarke LE, et al. 2011. RCP4.5: a pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. *Climatic Change*. 109(1–2):77-94. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0151-4>
- [UNEP] United Nations Environment Programme. 2017. Coral Bleaching Futures: Downscaled Projections of Bleaching Conditions for the World's Coral Reefs, Implications of Climate Policy and Management Responses. Nairobi (Kenya): United Nations Environment Programme. 71.
- Van Hooidonk R, Maynard JA, Manzello D, Planes S. 2014. Opposite latitudinal gradients in projected ocean acidification and bleaching impacts on coral reefs. *Global Change Biol*. 20(1):103-112. <https://doi.org/10.1111/gcb.12394>
- Van Hooidonk R, Maynard J, Tamelander J, Gove J, Ahmadi A, Raymundo L, Williams G, Heron SF, Planes S. 2016. Local-scale projections of coral reef futures and implications of the Paris Agreement. *Sci Rep*. 6(1):39666. <https://doi.org/10.1038/srep39666>
- Van Woeseik R, Sakai K, Ganase A, Loya Y. 2011. Revisiting the winners and the losers a decade after coral bleaching. *Mar Ecol Prog Ser*. 434:67-76. <https://doi.org/10.3354/meps09203>
- Weber M, de Beer D, Lott C, Polerecky L, Kohls K, Abed RMM, Ferdelman TG, Fabricius KE. 2012. Mechanisms of damage to corals exposed to sedimentation. *Proc Natl Acad Sci*. 109(24). <https://doi.org/10.1073/pnas.1100715109>
- [WERI] Water and Environmental Research Institute of the Western Pacific. 2016. Watersheds, Major – Southern Guam. Dataset. Distributed by Pacific Islands Ocean Observing System; [accessed 1 August 2023].
- Williams G, Maynard J. 2019. Human and natural drivers of coral reef resilience to climate-induced coral bleaching in Guam; identifying potential climate refugia. Final report for Grant No. NA18NOS4820106.
- Wright DJ. 2016. Watersheds, Minor – Tutuila, American Samoa. Dataset. Distributed by Pacific Islands Ocean Observing System; [accessed 2022 August 01].
- Wright DJ. 2016. Watersheds, Major – Manua, American Samoa. Dataset. Distributed by Pacific Islands Ocean Observing System; [accessed 2022 August 01].

SUPPLEMENTARY METHODS

Raster processing

All rasters were projected into the appropriate coordinate system (WGS UTM 55N for Guam, WGS UTM 2S for American Samoa) and aligned to a single grid for each jurisdiction in ArcMap 10.7 (ESRI). We rescaled rasters to a common spatial resolution appropriate to the jurisdiction. For Guam, spatial autocorrelation within coral community composition declines after 2,300 m (Williams and Maynard 2019). We used this distance to inform our choice of resolution. Because we required each ecological sector to be represented by at least one pixel in width, we chose 1,150 m (half of the distance of spatial autocorrelation) for the output resolution so that the smallest sectors would still be represented separately from their larger neighbors while still maintaining units that nested with the autocorrelation distance.

For American Samoa, a literature search did not reveal any studies documenting the distance of spatial autocorrelation. Preliminary conversations with managers highlighted a preference for datasets with <1 km resolution to assist bay-scale management objectives. Several environmental datasets had already been generated at a 500 m resolution (<http://www.pacioos.hawaii.edu/projects/coral-drivers-amsam>; Table S1). To increase relevance to management and compatibility of our data with those layers, we chose to use a 500 m resolution for this jurisdiction. Where native resolution of the environmental rasters did not match the chosen resolution of resilience maps (1,150 m for Guam, 500 m for American Samoa), we resampled the rasters using the Nearest Neighbor method to better preserve original data values. Polygon data, such as mean macroalgal cover in each sector, was converted into rasters matching the output resolution using the cell centers method.

Sea-level rise-related soil erosion estimates

We found the overlap between USDA SSURGO soils with higher probability of erosion (Soil Survey Staff 2020) and areas that would be inundated with 61 cm (2 ft) and 91 cm (3 ft) of sea-level rise (SLR). We found polygons from the SSURGO database with the following geomorphic types: coastal plain, alluvial flats, valley flats, valley floors, swamps, depressions, basin floors, and fill. These are all low-slope ($\leq 5\%$) areas. We used NOAA estimates of sea-level rise-driven extreme-tide inundation from NOAA Digital Coast (2017). While these did not correspond exactly with SLR expected in Representative Concentration Pathway (RCP) 4.5 or 8.5 (Aucan 2018), we chose the closest available heights in the 30.5 cm (1 ft) increments mapped by NOAA. We used the Cost Distance function in ArcMap to produce a raster of over-water distance from these erodible polygons to all water cells.

MÉTODOS SUPLEMENTARIOS

Procesamiento ráster

Todos los rásteres se proyectaron en el sistema de coordenadas apropiado (WGS UTM 55N para Guam, WGS UTM 2S para Samoa Americana) y se alinearon en una cuadrícula única para cada jurisdicción en ArcMap 10.7 (ESRI). Cambiamos la escala de los rásteres a una resolución espacial común apropiada para la jurisdicción. En Guam, la autocorrelación espacial dentro de la composición de la comunidad coralina disminuye después de 2,300 m (Williams y Maynard 2019). Usamos esta distancia para informar nuestra elección de resolución. Debido a que necesitábamos que cada sector ecológico estuviera representado por al menos un píxel de ancho, elegimos 1,150 m (la mitad de la distancia de autocorrelación espacial) para la resolución de salida, de modo que los sectores más pequeños aún estuvieran representados por separado de sus vecinos más grandes y al mismo tiempo manteniendo unidades que anidadas con la distancia de autocorrelación.

Para Samoa Americana, una búsqueda bibliográfica no reveló ningún estudio que documente la distancia de la autocorrelación espacial. Las conversaciones preliminares con los gestores resaltaron una preferencia por conjuntos de datos con una resolución <1 km para atender los objetivos de gestión a escala de bahía. Ya se habían generado varios conjuntos de datos ambientales con una resolución de 500 m (<http://www.pacioos.hawaii.edu/projects/coral-drivers-amsam>; Tabla S1). Para aumentar la relevancia para la gestión y la compatibilidad de nuestros datos con esas capas, optamos por utilizar una resolución de 500 m para esta jurisdicción. Cuando la resolución nativa de los rásteres ambientales no coincidía con la resolución elegida de los mapas de resiliencia (1,150 m para Guam, 500 m para Samoa Americana), volvimos a muestrear los rásteres utilizando el método del vecino más cercano para preservar mejor los valores de los datos originales. Los datos de los polígonos, como la cobertura media de macroalgas en cada sector, se convirtieron en rásteres que coincidían con la resolución de salida utilizando el método de centros de células.

Estimaciones de la erosión del suelo relacionada con el aumento del nivel del mar

Encontramos la superposición entre los suelos SSURGO del USDA con mayor probabilidad de erosión (Soil Survey Staff 2020) y áreas que se inundarían con 61 cm (2 pies) y 91 cm (3 pies) de aumento del nivel del mar (SLR). Encontramos polígonos de la base de datos SSURGO con los siguientes tipos geomórficos: llanura costera, llanuras aluviales, llanuras de valles, fondos de valles, pantanos, depresiones, fondos de cuencas y rellenos. Todas estas son áreas de baja pendiente ($\leq 5\%$). Utilizamos estimaciones de la NOAA sobre inundaciones por mareas extremas provocadas por el aumento del

Filling empty nearshore pixels in remotely sensed data

Ocean color data can be unreliable in nearshore environments due to sediment runoff. In American Samoa, nearshore pixels had already been masked out and interpolated in the nearshore for chlorophyll *a*, turbidity, irradiance, and wave energy datasets (NOAA PIFSC et al. 2021a–d). Guam ocean color datasets (NASA Ocean Biology DAAC 2020) had nearshore pixels masked but not re-filled by interpolation. We used the Focal Statistics method in ArcMap to calculate the mean of a 3-cell radius in a circular neighborhood around missing nearshore pixels to estimate nearshore values of chlorophyll *a* and turbidity (Table 1).

Principal component analysis

We selected principal components (PC) with Eigenvalues ≥ 1 (Table S2, S3). Variables loading onto PC with Eigenvalues < 1 were omitted from further analysis. To determine variable loadings for each PC (Table S2, S3), we used a cutoff of >0.4 or <-0.4 . Variables with moderate values could be associated with multiple PC. When rescaling the PC, we assigned 1 to the conditions that were best for coral and 0 to conditions that were worst. For example, for Guam's managed conditions, PC1 consisted of chlorophyll, macroalgal cover, pollution, and turbidity all increasing in favorability (Table S2). Correlations coefficients between variables in the same principal component analysis are listed in Table S4–S7.

nivel del mar de NOAA Digital Coast (2017). Si bien estos no se correspondían exactamente con el SLR esperado en la trayectoria de concentración representativa (TCR) 4.5 u 8.5 (Aucan 2018), elegimos las alturas disponibles más cercanas en los incrementos de 30.5 cm (1 pie) mapeados por la NOAA. Usamos la función Costo de distancia en ArcMap para producir un ráster de distancia sobre el agua desde estos polígonos erosionables hasta todas las celdas de agua.

Llenando píxeles vacíos cercanos a la costa en datos de detección remota

Los datos sobre el color del océano pueden ser poco fiables en entornos cercanos a la costa debido a la escorrentía de sedimentos. En Samoa Americana, los píxeles cercanos a la costa ya habían sido enmascarados e interpolados en la zona costera para conjuntos de datos de clorofila *a*, turbidez, irradiancia y energía de las olas (NOAA PIFSC et al. 2021a–d). Los conjuntos de datos de color del océano de Guam (NASA Ocean Biology DAAC 2020) tenían píxeles cercanos a la costa enmascarados, pero no rellenados mediante interpolación. Utilizamos el método de Estadísticas Focales en ArcMap para calcular la media de un radio de 3 celdas en un vecindario circular alrededor de los píxeles cercanos a la costa que faltan para estimar los valores cercanos a la costa de clorofila *a* y turbidez (Tabla 1).

Análisis de componentes principales

Seleccionamos componentes principales (CP) con valores propios ≥ 1 (Tabla S2, S3). Las variables cargadas en la CP con valores propios < 1 se omitieron de análisis posteriores. Para determinar cargas variables para cada CP (Tabla S2, S3), utilizamos un límite de >0.4 o <-0.4 . Las variables con valores moderados podrían estar asociadas a múltiples CP. Al cambiar la escala de la PC, asignamos 1 a las mejores condiciones para los corales y 0 a las peores. Por ejemplo, para las condiciones gestionadas de Guam, CP1 consistió en clorofila, cubierta de macroalgas, contaminación y turbidez, todas las cuales aumentaron en favorabilidad (Tabla S2). Los coeficientes de correlación entre variables en el mismo análisis de componentes principales se enumeran en la Tabla S4–S7.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S1. Sources of environmental data used in calculation of Environmental Favorability Scores. GU = Guam, AS = American Samoa. RCP 4.5 corresponds to the Intermediate Emissions scenario. RCP 8.5 corresponds to the worst-case emissions scenario. Continued on next page.

Table S1. Fuentes de datos ambientales utilizados en el cálculo de los puntajes de favorabilidad ambiental. GU = Guam, AS = Samoa Americana. RCP 4.5 corresponde al escenario de emisiones intermedias. RCP 8.5 corresponde al peor escenario de emisiones. Continúa en la siguiente página.

Variable	Place	Description	Units	Scenario	Source	Dates	Original resolution
Managed variables							
Chlorophyll	GU	Chlorophyll <i>a</i> annual mean	mg·m ⁻³	All	(NASA Ocean Biology DAAC 2020)	1997–2018	4.80 km
Chlorophyll	AS	Chlorophyll <i>a</i> annual mean	mg·m ⁻³	All	(PIFSC et al. 2021a)	1998–2018	5.40 km
Herbivore Biomass	GU, AS	Herbivore biomass from NCRM surveys	g·m ⁻²	All	(Swanson et al. 2018)	2015–2017	Point
Fish biomass	GU, AS	Total reef fish biomass from NCRM surveys (excluding sharks and rays)	g·m ⁻²	All	(Swanson et al. 2018)	2015–2017	Point
Turbidity	GU	Total organic and inorganic matter held in solution and suspension in the water column	kd490 (KD4)	All	(NASA Ocean Biology DAAC 2020)	2003–2020	4.00 km
Turbidity	AS	Total organic and inorganic matter held in solution and suspension in the water column	kd490 (KD4)	All	(PIFSC et al. 2021b)	1998–2018	0.50 km
Ocean-based pollution	GU	Pollution coming from commercial shipping and ports, based on shipping volume and modeled plumes within 100 km from ports	Index-based	All	(Halpern et al. 2015)	2003–2011	0.93 km
Macroalgal cover	GU, AS	Average percent cover of macroalgae by sector in NCRM surveys	Percent	All	(Swanson et al. 2018)	2009–2018	Polygon
Globally influenced variables - present							
Calcite	GU, AS	Mean monthly calcite concentration	mmol·m ⁻³	All	(Assis et al. 2018)	2000–2014	7.00 km
Irradiance	AS	Photosynthetically available radiation (PAR)	E·m ⁻² ·d ⁻¹	All	(PIFSC et al. 2021c)	2013–2018	0.50 km
Irradiance	GU	Photosynthetically available radiation (PAR)	E·m ⁻² ·d ⁻¹	All	(NASA Ocean Biology DAAC 2020)	2002–2019	4.60 km
Cumulative thermal stress	GU, AS	Average monthly maximum Degree Heating Weeks (oC above the maximum monthly mean per week, cumulative over the prior 12 weeks)	Degree heating weeks (°C)	Present-Day Climate	(NOAA Coral Reef Watch 2020)	2013–2020	5.00 km



SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S1 (Cont.)

Variable	Place	Description	Units	Scenario	Source	Dates	Original resolution
Wave energy	GU	Mean daily wave energy along shoreline based on wind direction, wind speed, and fetch length, created with University of Guam Marine Lab Wave Energy ArcGIS Extension	J·m ⁻³	All	(Jenness and Houk 2014)	2014	0.33 km
Wave energy	AS	Long term mean cumulative annual wave power based on Wave Watch III global wave model data and coastline analysis of wave exposure	MW·hr ⁻¹ ·m ⁻¹	All	(PIFSC et al. 2021d)	2002–2012	0.50 km
Globally influenced variables - future							
Future thermal stress	GU,	Year of annual severe bleaching using RCP 4.5 and RCP 8.5 sea surface temperature projections	Year	RCP 4.5,	(van Hooidonk et al. 2016; UNEP 2017)	2015	4.80 km
	AS			RCP 8.5			
Sea-level rise	GU,	2100 projections for sea-level rise heights of 2ft (~RCP 4.5 = 0.57 m) and 3ft (~RCP 8.5 = 0.76 m)	m	RCP 4.5,	(NOAA Digital Coast 2017)	2100	3.00 m
	AS			RCP 8.5			
Soil type	GU, AS	Erosion-prone soil geomorphic types	Polygon	RCP 4.5, RCP 8.5	(Soil Survey Staff 2020)	2020	10.00 m

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S2. Principal Component (PC) Eigenvalues and variable loadings for Guam. Sign indicates direction of loading on the PC. Input variables were scaled based on favorability to coral growth and survival from 0 (worst) to 1 (best) prior to analysis, such that the direction of loading represents favorability rather than the directionality of the environmental conditions themselves. SLR indicates sea-level rise.

Tabla S2. Valores propios del componente principal (CP) y cargas variables para Guam. El letrero indica la dirección de carga en la CP. Las variables de entrada se escalaron en función de la favorabilidad para el crecimiento y la supervivencia del coral de 0 (peor) a 1 (mejor) antes del análisis, de modo que la dirección de la carga represente la favorabilidad en lugar de la direccionalidad de las condiciones ambientales mismas. SLR indica el aumento del nivel del mar.

Managed		PC1	PC2	
	Eigenvalues	1.88	1.59	
	% Variation	31.40	26.50	
	Loading variables	Chlorophyll (+) Macroalgae (+) Pollution (+) Turbidity (+)	Fish biomass (+) Herbivore biomass (+)	
Globally influenced (Present-Day Climate)		PC1		
	Eigenvalues	2.07		
	% Variation	44.10		
	Loading variables	Calcite (+) Thermal stress (-) Irradiance (+)		
Globally influenced (Intermediate Emissions, RCP 4.5)		PC1	PC2	PC3
	Eigenvalues	1.66	1.11	1.05
	% Variation	33.30	22.10	20.90
	Loading variables	Calcite (+) Irradiance (+)	Bleaching date (+)	Calcite (+) SLR-erosion (+)
Globally Influenced (worst-case emissions, RCP 8.5)		PC1	PC2	
	Eigenvalues	1.74	1.28	
	% Variation	34.70	25.60	
	Loading variables	Calcite (+) Irradiance (+)	Bleaching date (+) SLR-erosion (+)	

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S3. Principal component (PC) eigenvalues and variable loadings for American Samoa. Sign indicates direction of loading on the PC. Input variables were scaled based on favorability to coral growth and survival from 0 (worst) to 1 (best) prior to analysis, such that the direction of loading represents favorability rather than the directionality of the environmental conditions themselves. SLR indicates “sea-level rise.”

Tabla S3. Valores propios del componente principal (CP) y cargas variables para Samoa Americana. El letrero indica la dirección de carga en la CP. Las variables de entrada se escalaron en función de la favorabilidad para el crecimiento y la supervivencia del coral de 0 (peor) a 1 (mejor) antes del análisis, de modo que la dirección de la carga represente la favorabilidad en lugar de la direccionalidad de las condiciones ambientales mismas. SLR indica el aumento del nivel del mar.

Managed	PC1	PC2
Eigenvalues	2.53	1.27
% Variation	50.60	25.40
Loading variables	Chlorophyll (+) Herbivore biomass (+) Macroalgae (+) Turbidity (+)	Fish biomass (+)
Globally influenced (Present-Day Climate)		
Eigenvalues	1.76	1.00
% Variation	44.10	25.10
Loading variables	Calcite (–) Thermal stress (+) Irradiance (+)	Wave power (+)
Globally influenced (Intermediate Emissions, RCP 4.5)		
Eigenvalues	1.49	1.31
% Variation	29.90	26.20
Loading variables	Bleaching date (+) Calcite (–) Irradiance (+)	SLR-erosion (+) Wave power (+)
Globally influenced (Worst-case Emissions, RCP 8.5)		
Eigenvalues	1.48	1.34
% Variation	29.60	26.70
Loading variables	Bleaching date (+) Calcite (–) Irradiance (+)	SLR-erosion (+) Wave power (+)

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S4. Correlation matrix for managed environmental variables for Guam.**Tabla S4.** Matriz de correlación de variables ambientales gestionadas para Guam.

	Chlorophyl	Fish biomass	Herbivore biomass	Macroalgae	Pollution	Turbidity
Chlorophyl	1.000	-0.091	0.026	0.381	0.401	0.270
Fish biomass	-0.091	1.000	0.586	0.048	-0.013	0.149
Herbivore biomass	0.026	0.586	1.000	-0.018	-0.052	-0.101
Macroalgae	0.381	0.048	-0.018	1.000	0.303	0.041
Irradiance	-0.477	-0.254	-0.257	-0.594	-0.261	-0.098
Pollution	0.401	-0.013	-0.052	0.303	1.000	0.321
Turbidity	0.270	0.149	-0.101	0.041	0.321	1.000

Table S5. Correlation matrix for globally influenced environmental variables for Guam. Variables for RCP 4.5 (intermediate emission scenario) were not used in the same component analysis as RCP 8.5 (worst-case emissions scenario). Present-day thermal stress was also not used in the future climate scenarios.

Tabla S5. Matriz de correlación para variables ambientales influenciadas globalmente para Guam. Las variables para RCP 4.5 (escenario de emisiones intermedio) no se utilizaron en el mismo análisis de componentes principales que RCP 8.5 (escenario de emisiones en el peor de los casos). El estrés térmico actual tampoco se utilizó en los escenarios climáticos futuros.

	Calcite	Present thermal stress	Irradiance	Wave power	Bleaching RCP 4.5	Bleaching RCP 8.5	Erosion RCP 4.5	Erosion RCP 8.5
Calcite	1.000	-0.166	0.491	-0.323	0.157	0.424	-0.023	-0.057
Present thermal stress	-0.166	1.000	-0.776	0.293	0.359	0.386	0.435	0.433
Irradiance	0.491	-0.776	1.000	-0.155	-0.173	-0.079	-0.312	-0.312
Wave power	-0.323	0.293	-0.155	1.000	-0.037	-0.080	0.379	0.394
Bleaching RCP 4.5	0.157	NA	-0.173	-0.037	1.000	NA	-0.040	NA
bleaching RCP 8.5	0.424	NA	-0.079	-0.080	NA	1.000	NA	0.134
erosion RCP 4.5	-0.023	NA	-0.312	0.379	-0.040	NA	1.000	NA
erosion RCP 8.5	-0.057	NA	-0.312	0.394	NA	0.134	NA	1.000

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Table S6. Correlation matrix for managed environmental variables in American Samoa.**Tabla S6.** Matriz de correlación para variables ambientales gestionadas en Samoa Americana.

	Fish biomass	Herbivore biomass	Chlorophyll	Turbidity	Macroalgae
Fish biomass	1.000	0.376	0.093	0.051	-0.034
Herbivore biomass	0.376	1.000	-0.432	-0.414	-0.208
Chlorophyll	0.093	-0.432	1.000	0.913	0.574
Turbidity	0.051	-0.414	0.913	1.000	0.590
Macroalgae	-0.034	-0.208	0.574	0.590	1.000

Table S7. Correlation matrix for globally influenced environmental variables in American Samoa. Variables for RCP 4.5 (intermediate emission scenario) were not used in the same component analysis as RCP 8.5 (worst-case emissions scenario). Present-day thermal stress was also not used in the future climate scenarios.

Tabla S7. Matriz de correlación para variables ambientales influenciadas globalmente en Samoa Americana. Las variables para RCP 4.5 (escenario de emisiones intermedias) no se utilizaron en el mismo PCA que RCP 8.5 (escenario de emisiones en el peor de los casos). El estrés térmico actual tampoco se utilizó en los escenarios climáticos futuros.

	Bleaching RCP4.5	Bleaching RCP8.5	Calcite	Present thermal stress	Erosion RCP4.5	Erosion RCP 8.5	Irradiance	Wave power
Bleaching RCP4.5	1.000	NA	-0.266	NA	-0.110	NA	-0.216	-0.214
Bleaching RCP8.5	NA	1.000	-0.279	NA	NA	-0.165	-0.220	-0.136
Calcite	-0.266	-0.279	1.000	0.478	-0.165	-0.160	0.275	0.067
Present thermal stress	-0.304	-0.225	0.478	1.000	0.005	-0.015	0.328	0.188
Erosion RCP4.5	-0.110	NA	-0.165	NA	1.000	NA	-0.032	0.228
Erosion RCP 8.5	NA	-0.165	-0.160	NA	NA	1.000	-0.066	0.257
Irradiance	-0.216	-0.220	0.275	0.328	-0.032	-0.066	1.000	0.005
Wave power	-0.214	-0.136	0.067	0.188	0.228	0.257	0.005	1.000

SUPPLEMENTARY MATERIAL

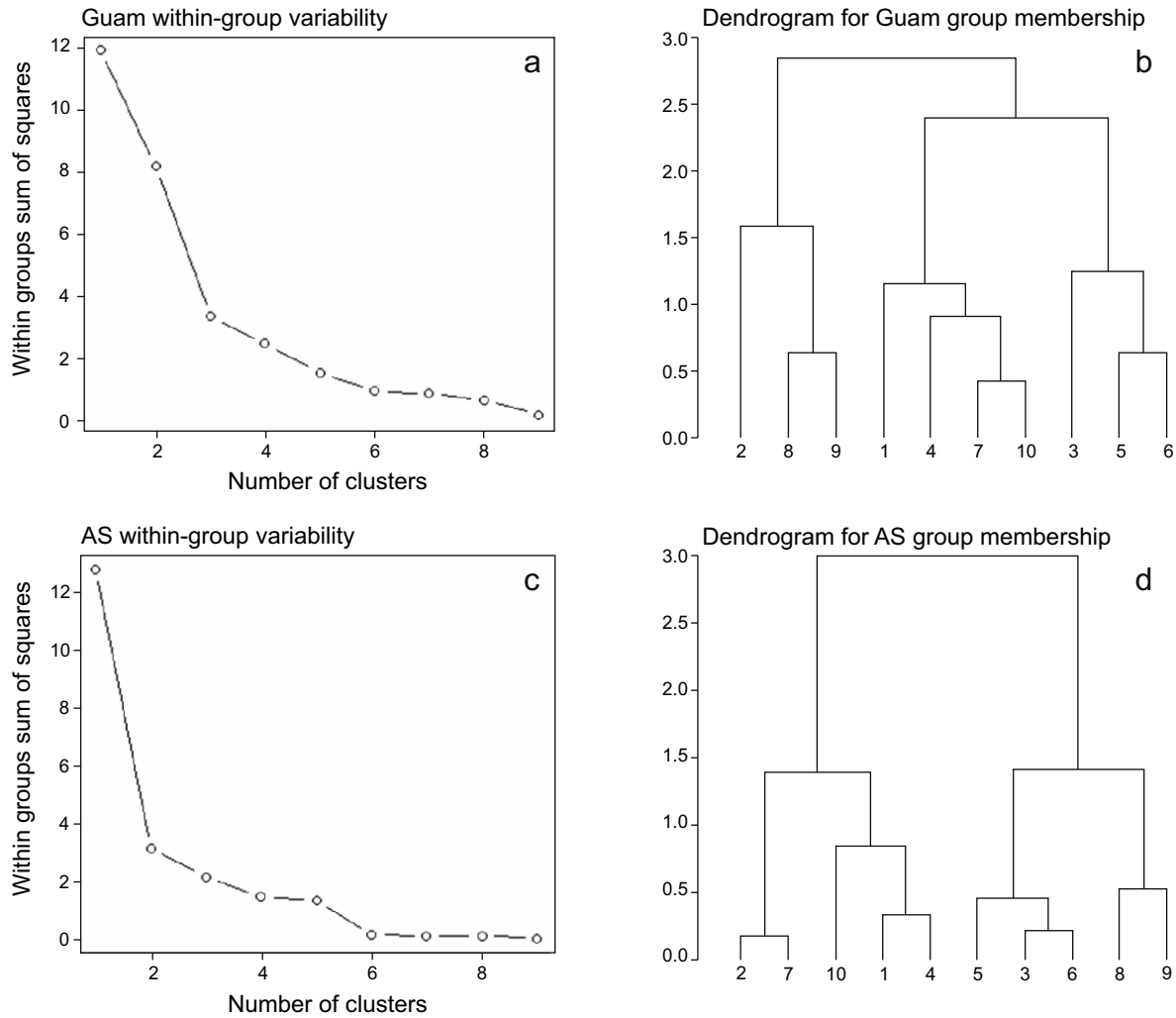


Figure S1. (a) Guam *kmeans* cluster analysis results for optimal number of clusters and (b) sector membership within clusters. (c) American Samoa (AS) cluster analysis results for optimal number of clusters and (d) sector membership within clusters. Precipitous drops in sum of squares were used to determine the optimal number of clusters. Numbers inside plots for (b) and (d) refer to corresponding sectors.

Figura S1. (a) Resultados del análisis de conglomerados de *kmeans* de Guam para un número óptimo de conglomerados y (b) membresía del sector dentro de los conglomerados. (c) Resultados del análisis de conglomerados de Samoa Americana (AS) para un número óptimo de conglomerados y (d) membresía del sector dentro de los conglomerados. Se utilizaron caídas precipitadas en la suma de cuadrados para determinar el número óptimo de grupos. Los números dentro de las parcelas para (b) y (d) se refieren a los sectores correspondientes.