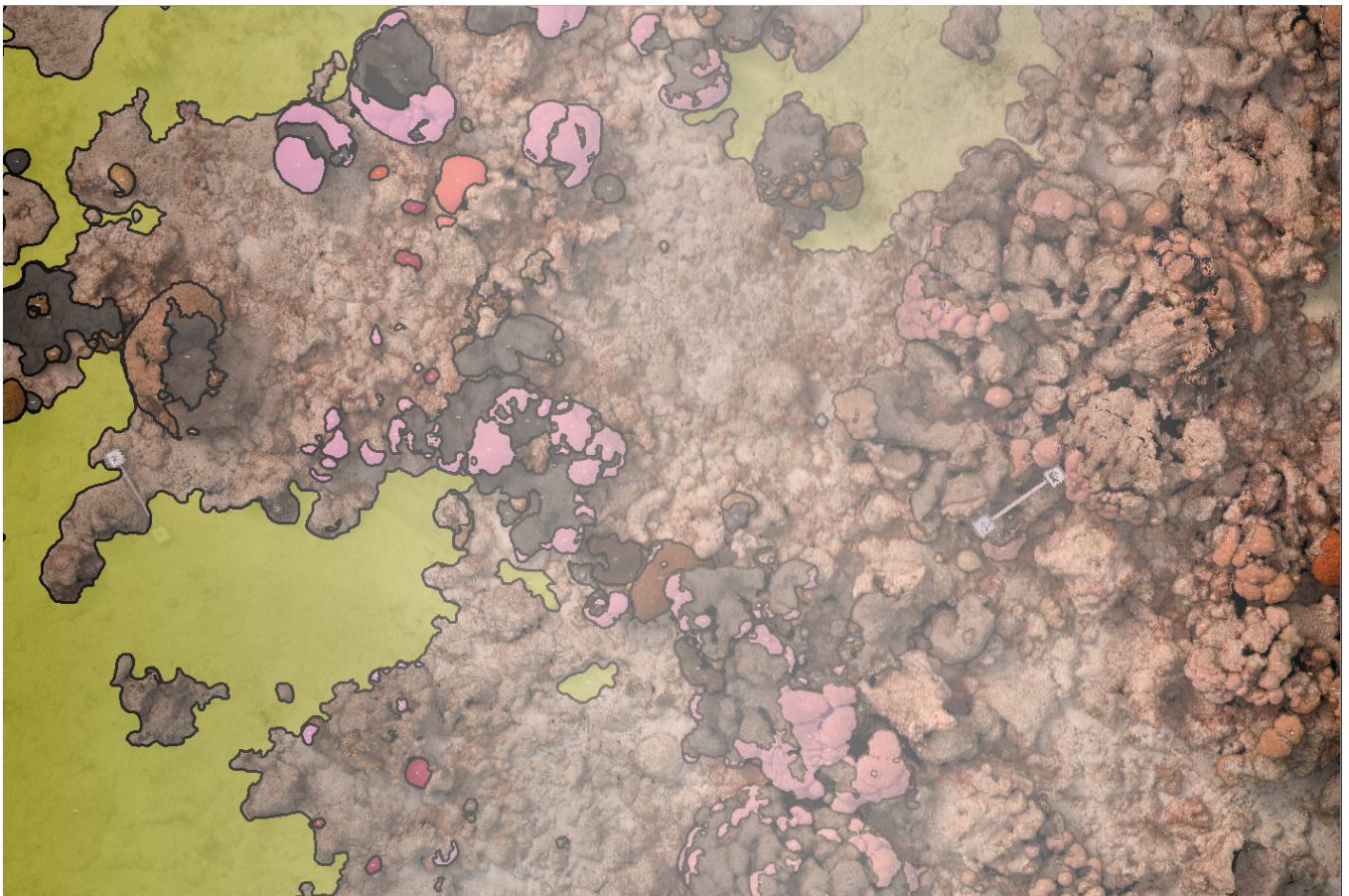


Imágenes bentónicas a gran escala

de los Bajos del Norte y el Parque Nacional Arrecife Alacranes

REPORTE FINAL

Kalanbio A.C.
25 de abril de 2022



Índice

Resumen técnico.....	2
Actividades	2
Capacitación en campo	2
Capacitación en tierra.....	3
Trabajo de campo	3
Procesamiento de Imágenes	3
Procesamiento de Proyecciones	4
Análisis de datos.....	4
Puntos destacados	5
Introducción	7
Método	7
Sitios de Muestreo.....	11
<i>Bajos del Norte</i>	11
<i>Parque Nacional Arrecife Alacranes</i>	13
Resultados	16
Estructura de la comunidad coralina en los Bajos del Norte y Arrecife Alacranes.....	16
Índice Integral de Salud Arrecifal	21
Literatura citada.....	24

Resumen técnico

Proyecto: Imágenes bentónicas a gran escala de los Bajos del Norte y el Parque Nacional Arrecife Alacranes

Consultor: Kalanbio A.C. “*Research for conservation*”

Expediciones:

I) Bajos de Norte, del 9 al 13 de agosto de 2021

II) Parque Nacional Arrecife Alacranes, del 2 al 5 de septiembre de 2021

Informe realizado por: M. en C. Antar Mijail Pérez Botello

Citar cómo: Kalanbio AC; OCEANA México (2022). Imágenes bentónicas a gran escala de los Bajos del Norte y el Parque Nacional Arrecife Alacranes. *Repositorio de campañas y actividades de Kalanbio AC*. 1-28.

Actividades

Capacitación en campo

Se realizó un entrenamiento en campo organizada por OCEANA México en colaboración con el con el *Sandin Lab* a cargo del Dr. Stuart Sandin del *Scripps Institution of Oceanography* de la Universidad de California, EU. para facilitar los procesos toma de información primaria. El objetivo de esta actividad fue aprender el funcionamiento del equipo técnico y el método para la captura de fotografías bentónicas a gran escala.

Las personas involucradas en la capacitación fueron, Nicole Pedersen y Esmeralda Aleli Alcantar como instructoras y Rodrigo Rodríguez y Antar Pérez como personal a capacitar.

Capacitación en tierra

Una vez terminadas las expediciones a los Bajos de Norte y al Parque Nacional Arrecife Alacranes OCEANA México en colaboración con el *Sandin Lab* organizaron un curso de capacitación para aprender a: i) procesar las imágenes de acuerdo con la técnica de “*Large-area imaging*”, procesar lo mapas 3D del fondo marino, procesar las proyecciones generadas a partir de los mapas 3D y a descargar los datos resultas del procesamiento de las proyecciones.

Las personas encargadas de brindar la capacitación fueron: Nicole Pedersen y Esmeralda Aleli Alcanta, Stuart Sandin y Clinton Edwards como instructores y Rodrigo Rodríguez, Rodrigo Garza, Quetzalli Hernández, Mariana Reyna, Teresa Vial, Gabriel Cervantes, Isaac Chacón, y Antar Pérez como personal a capacitar.

Trabajo de campo

El trabajo de campo se realizó en dos sistemas arrecifales del Banco de Campeche. El primero fue en los Bajos del Norte y el segundo fue en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

El trabajo de campo consistió en la toma de fotografías del fondo arrecifal para posteriormente generar mapas 3D de la zona muestreada. A la par se marcaron físicamente los sitios fotografiados para establecer puntos de monitoreo a largo plazo en estos dos sistemas arrecifales.

Procesamiento de Imágenes

Las Imágenes obtenidas de cada punto de recolecta fueron procesadas con AgiSoft Metashape para generar los mapas 3D del fondo arrecifal. Los mapas 3D se procesaron con el programa VisCore para escalar y orientar los mapas, así como para calcular la rugosidad de cada sitio y generar una ortoproyección en 2D y poder caracterizar el suelo arrecifal. La caracterización de los elementos arrecifales se realizó con el programa TagLab (Pavoni et al., 2021).

Procesamiento de Proyecciones

El procesamiento de las proyecciones se basó en caracterizar e identificar ocho tipos de rasgos arrecifales, los cuales fueron: i) especies y cobertura de corales escleractinios, ii) cobertura de estructuras coralinas muertas, iii) cobertura de algas, iv) cobertura de especies bio-erosionadoras, v) cobertura de organismos constructores de hábitat, vi) cobertura de arena, vii) cobertura de pedacearía coralina y viii) cobertura de macizo calcáreo.

Esta información se descargó y ordeno de manera coherente para su posterior análisis.

Análisis de datos

Se realizaron dos tipos de análisis complementarios. El primer análisis fue un Ordenamiento de Componentes Principales (PCO) para calcular la similitud de cada sitio con respecto a todas las zonas muestreadas. La similitud está calculada de acuerdo con la riqueza específica de corales escleractinios presente en cada punto de muestreo y de acuerdo a la cobertura de cada especie de coral. El segundo análisis se basó en el Índice Integral de Salud Arrecifal, propuesto por Healthy Reefs for healthy People (Healthy Reefs for Healthy People, 2022; M McField & Richards, 2007), el cual está basado en un Índice de semáforo con cinco niveles (muy bien, bien, regular, mal y crítico). Este índice promedia la calificación resultante del cálculo de cuatro indicadores (cobertura coralina viva, cobertura de algas, cobertura de bio-erosionadores y cobertura de especies formadoras de hábitat).

Con estos análisis fue posible determinar si la estructura comunitaria de corales escleractinios es similar entre los Bajos del Norte y Alacranes, permitió comparar la similitud de los sitios muestreados dentro y fuera de las Zonas Núcleo de Arrecife Alacranes, fue posible conocer la salud arrecifal de cada punto de muestreo y fue posible calcular la salud de cada sistema arrecifal.

Puntos destacados

-Los sistemas arrecifales de los Bajos del Norte y del Parque Nacional Arrecife Alacranes no son saludables. En promedio, la salud arrecifal por sitio de monitoreo alcanzó apenas el 15% de lo que se considera ideal.

-De manera general la salud arrecifal (IISA) de los Bajos del Norte es **Regular (2.9)**, esto es debido a una alta mortandad de corales de las especies *Diploria*, *Pseudodiploria* y *Eusmilia* dando como resultado bajas coberturas coralina.

-Los Bajos del Norte presentaron un sobrecrecimiento de algas y de organismos bioerosionadores característicos de arrecifes con cierto grado de impacto ambiental.

-La riqueza de especies coralinas para los Bajos del Norte es de 16 spp siendo dominantes especies como *Orbicella faveolata*, *Montastrea caversona*, *Porites porites* y *Porites furcata*. Los bajos del norte se caracterizan por no tener una región terrestre que emerja a la superficie. Esta característica genera que el sistema arrecifal presente en esta región sea más homogéneo comparando con Alacranes.

-A pesar de la alta mortandad de corales en los Bajos de Norte la complejidad estructural y tridimensional de este arrecife medida como la rugosidad del fondo arrecifal es alta, conservando algunos servicios brindados por las estructuras calcáreas como: refugio, protección contra depredadores y heterogeneidad del hábitat.

-El Parque Nacional Arrecife Alacranes presenta un índice integral de salud arrecifal (IISA) de **Regular (3.3)** pero con dos sitios con **muy buena** salud en la región noroeste, particularmente en el frente arrecifal. En esta región dominaron especies de coral como *Pseudodiplora strigosa* y *P. clivosa*, *Porites asteroides* y *Acropora palmata*. El valor de salud arrecifal calculado **(3.3)** es cercano al límite inferior de la categoría de **Bien (3.5)**, por lo que con acciones de manejo adecuadas se podría incrementar el estado de salud del Parque.

-La riqueza de especies coralinas para Alacranes es de 20 spp. siendo dominantes *Pseudodiploria strigosa*, *Siderastrea siderea* y *Poristes asteroides*. Alacranes al ser uno de los sistemas arrecifales más grandes del Golfo de México tiene el potencial de tener una mayor variación en la diversidad de hábitats presentes en todo este sistema. Teniendo lagunas arrecifales, crestas arrecifales y arrecifes frontales

-La comunidad coralina de los Bajos del Norte y de Alacranes es diferente. La importancia de los Bajos del Norte radica en que se podría estar comportando como una entidad parcialmente aislada a arrecife Alacranes compartiendo 12 spp. coralinas con Alacranes entre las que destacan *Orbicella faveolata* y *Prites asteroides* y 4 spp. únicas como *Favia fragum* y *Agaricia lamarcki*. Una de las principales importancias de Arrecife Alacranes es que al ser el sistema arrecifal más grande del Golfo de México funciona como fuente de especies, tanto de corales, como de invertebrados e invertebrados para el resto de los sistemas arrecifales del Golfo. Siendo una de las grandes reservas de organismo, aumentando la resiliencia de la región promoviendo la regeneración de estos ecosistemas después de una perturbación.

Introducción

Este proyecto tiene como objetivo tener el primer muestreo arrecifal basado en imágenes de alta resolución a gran escala. Con estas imágenes fue posible generar unos modelos en tres dimensiones (3D) del fondo arrecifal para establecer puntos de monitoreo a largo plazo en los Bajos del Norte y el Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA).

Con los resultados obtenidos de la caracterización espacial de los mapas arrecifales fue posible analizar la estructura de la comunidad de corales escleractinios de los Bajos del Norte y Arrecife Alacranes. Estos análisis nos permitieron determinar la diversidad coralina, comparar la comunidad coralina de los Bajos del Norte y el PNAA, determinar el estado de salud de estos dos sistemas arrecifales y comparar el estado de salud arrecifal presente en las Zonas núcleo y zonas de amortiguamiento del PNAA.

Las metas de este trabajo fueron establecer estaciones de monitoreo a largo plazo en los Bajos de Norte y Arrecife Alacranes para dar seguimiento al estado de salud arrecifal de ambos sistemas arrecifales. Con esta información será posible tomar decisiones que ayuden a los futuros planes de manejo y conservación de esta región.

Método

Este proyecto está fundamentado en un método denominado como fotogrametría. La fotogrametría es una técnica basada en la recopilación de información de posición y dimensión de objetos a partir de dos o más fotografías (Schenk, 2005). Las fotografías se consideran la información primaria, y los productos resultantes son un modelo 3D obtenido del post-procesamiento de las imágenes y una proyección 2D que recupera la información de todas las fotografías realizadas (Ferrari et al., 2016; Habib et al., 2007). Esta técnica permite generar reconstrucciones digitales tridimensionales y mapas en dos dimensiones del terreno muestreado (Habib et al., 2007).

Con esta técnica se obtiene un mapa del fondo marino con una resolución espacial de milímetros, identificando y midiendo diferentes características bióticas y abióticas como especies bentónicas, amenazas potenciales, enfermedades y sustratos (Edwards et al., 2017; Pedersen et al., 2019). También es posible rastrear el cambio en el fondo marino a lo largo del tiempo, por ejemplo, el crecimiento o la muerte de especies sésiles, el éxito de programas de restauración ambiental y el seguimiento de los fenómenos ambientales que afectan el fondo marino (Ferrari et al., 2021; Koderá et al., 2020; Pedersen et al., 2019).

Otra ventaja de este método es el alto potencial para comunicar los resultados a la población no científica. Parte de los productos resultantes son modelos 3D con los que se pueden generar recorridos virtuales personalizados sobre el área de estudio, el fenómeno de interés o las especies bentónicas objetivo (Sandin et al., 2021; Suka et al., 2019).

La toma de muestras consistió en: i) marcar un cuadro de 10 x 10 m a una profundidad de entre 5 y 20 m, ii) tomar una serie de fotografías con dos cámaras realizando un patrón de zigzag hasta cubrir toda el área delimitada, iii) descargar la información obtenida en cada punto de muestreo de manera ordenada y estandarizada y iv) procesar la información fotográfica de cada punto de muestreo.

El procesamiento de las proyecciones se basó en caracterizar e identificar ocho tipos de rasgos arrecifales (Figura 1), los cuales fueron: i) especies y cobertura de corales escleractinios, ii) cobertura de estructuras coralinas muertas, iii) cobertura de algas, iv) cobertura de especies bioerosionadoras, v) cobertura de organismos constructores de hábitat, vi) cobertura de arena, vii) cobertura de pedacearía coralina y viii) cobertura de macizo calcáreo. Tanto la cobertura de bioerosionadores como la cobertura de esponjas constructoras son dos indicadores propuestos para este monitoreo para robustecer la información con la cual se calcula el Índice Integral de Salud Arrecifal. Los organismos bioerosionadores son animales bentónicos que promueven la erosión arrecifal, como esponjas incrustantes y poliquetos excavadores, por lo que registrar un

sobrecrecimiento de estas especies podría significar un aumento en la producción de sedimentos, el colapso de estructuras calcáreas y en competencia por espacio con corales (Carballo et al., 2013; González-Rivero et al., 2011; Kennedy et al., 2013; López-Victoria et al., 2006; Rützler, 1975; Schönberg, 2002; Schönberg & Ortiz, 2008). En la misma línea las esponjas constructoras son un elemento fundamental en la formación de hábitats presente en los arrecifes después de los corales (Bell et al., 2013; Pawlik et al., 2013; Rossi et al., 2017). Estos organismos son considerados ingenieros de ecosistemas, brindando servicios como, refugio, fuente de alimento y protección tanto para vertebrados como para invertebrados (Aerts, 1998; Maldonado et al., 2016; Rützler, 2004). Para el Atlántico tropical se estima que alrededor de 284 especies arrecifales dependen de la presencia de estas esponjas para completar su ciclo de vida (Pérez-Botello & Simões, 2021).

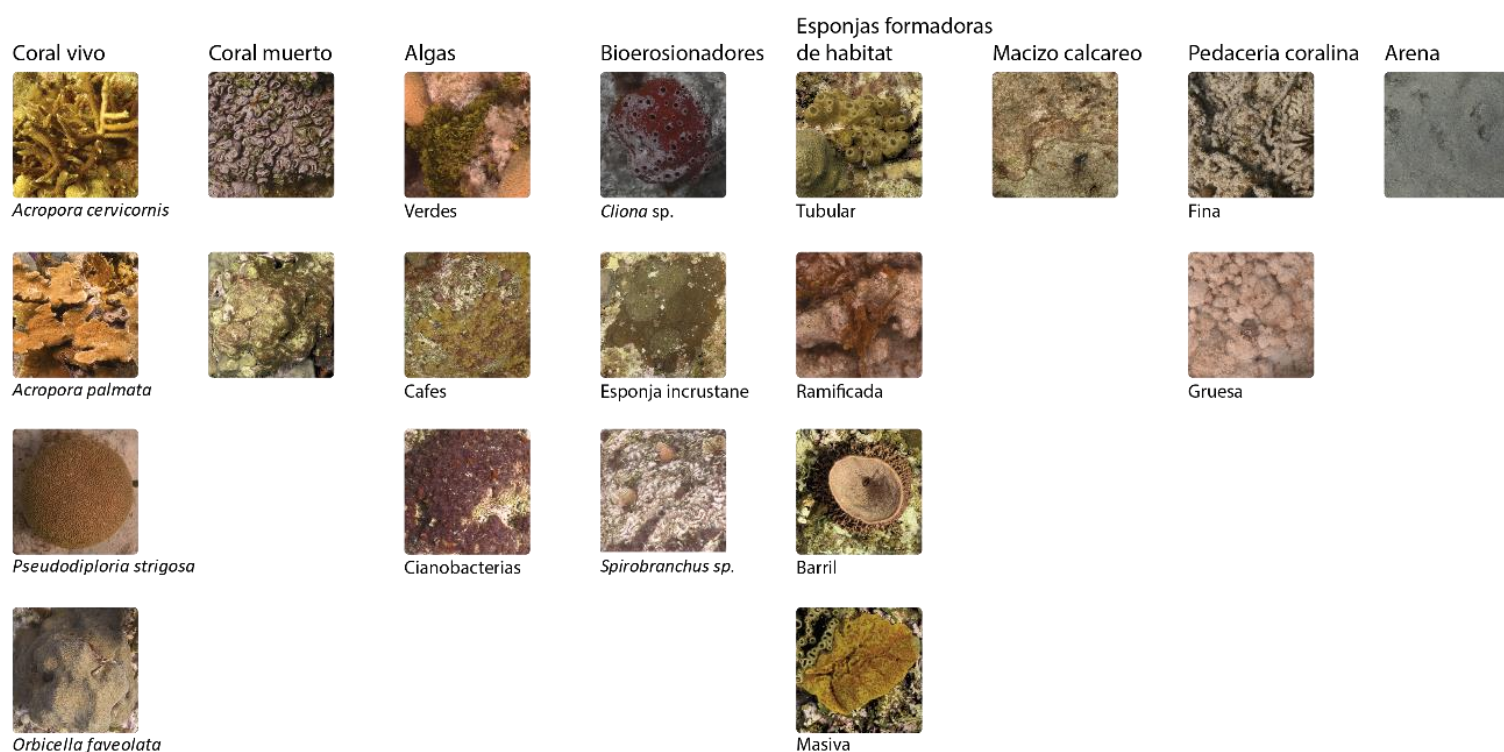


Figura 1. Lista de rasgos arrecifales caracterizados en cada ortoproyección en ambos sistemas arrecifales.

Para este proyecto se realizaron dos tipos de análisis complementarios. El primero fue un Ordenamiento de Componentes Principales (PCO) para calcular la similitud de cada sitio con respecto a todas las zonas muestreadas. La similitud está calculada de acuerdo con la riqueza específica de corales escleractinios presente en cada punto de muestreo y con la cobertura que se calculó para cada especie de coral. El segundo análisis se basó en el Índice Integral de Salud Arrecifal (IISA). Este índice se compone de diferentes indicadores, desde coberturas bentónicas hasta biomasa de peces herbívoros y comerciales, promediando la calificación de cada indicador en un rango de valores que van del 1 (crítico) al 5 (muy bien) (Healthy Reefs for Healthy People, 2022; M McField & Richards, 2007; Melanie McField et al., 2020) (Tabla 1). Por tal motivo para la evaluación de salud arrecifal de los Bajos del Norte y del Parque Nacional Arrecife Alacranes se utilizaron los siguientes indicadores: i) Cobertura coralina, ii) cobertura de macroalgas y tapetes de cianobacterias, iii) cobertura de bioerosionadores y iv) cobertura de esponjas constructoras. (Tabla 1).

Tabla 1. Valores críticos de los indicadores bentónicos utilizados para calcular el Índice Integral de Salud Arrecifal.

Valor de los indicadores					Índice Integral de Salud Arrecifal	
Rango	Corales	Algas	Bioerosionadores	Esponjas formadoras	Rango	Escala
Muy bien	40%	1%	1%	4% < 5%	Muy bien	5-4.3
Bien	20%	5%	2%	3% < 7%	Bien	4.2-3.5
Regular	10%	12%	3%	2% < 10%	Regular	3.4-2.7
Mal	5%	25%	4%	1% < 15%	Mal	2.6-1.9
Crítico	<5%	>25%	>5%	0% < 16%	Crítico	1.8-1

Con estos análisis fue posible determinar si la estructura comunitaria de corales escleractinios es similar entre los Bajos del Norte y Arrecife Alacranes, permitió compara la similitud de los sitios muestreados dentro y fuera de las Zonas Núcleo de Arrecife Alacranes de igual manera fue posible conocer la salud arrecifal de cada sitio de monitoreo y la salud de cada sistema arrecifal.

Sitios de Muestreo

Para esta campaña se visitaron dos sistemas arrecifales ubicados en el Banco de Campeche, México. El primero en la región noroeste denominado Bajos del Norte y el segundo un parque natural ubicado en la región norte del Banco de Campeche llamado Parque Nacional Arrecife Alacranes.

Bajos del Norte

La expedición a los Bajos de Norte se realizó del 9 al 13 de agosto de 2021. La campaña fue organizada y financiada por la organización no gubernamental OCEANA México. Los Bajos del Norte son una región poco profunda cercana al límite de la plataforma continental de Yucatán México, ubicados a 240 km al Noroeste de Puerto Progreso, Yucatán. Esta región no presenta ninguna estructura insular y el sistema arrecifal se caracteriza por la dominancia de corales blandos y corales escleractinios. Se caracteriza por tener estructuras coralinas en profundidades menores a los 30 m. En esta región se visitaron y fotografiaron siete sitios.

Participantes

Las personas involucradas en la toma de datos fueron Nicole Pedersen y Esmeralda Alcantar del *Scripps Institution of Oceanography* de la Universidad de California y Rodrigo Rodriguez y Antar Pérez de la UMDI – Sisal, de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Puntos de monitoreo

Se visitaron y marcaron permanentemente siete sitios (Figura 2) cubriendo 700 m² (100 m² por sitio), capturando un total de 29,352 fotografías correspondientes a 1.26 TB de información (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre puntos muestreados y fotografía tomadas en los Bajos del Norte.

Arrecife	Fecha	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Área (m ²)	Fotografías
Bajos del Norte	10/08/2021	BDN_01	Andrea	23.24122	-88.71497	100	4920
Bajos del Norte	10/08/2021	BDN_02	Paso del Zorro 1	23.26183	-88.69596	100	4433
Bajos del Norte	11/08/2021	BDN_03	Paso del Zorro 2 - A	23.26242	-88.69464	100	3856
Bajos del Norte	11/08/2021	BDN_04	Paso del Zorro 2 - B	23.25107	-88.70450	100	4956
Bajos del Norte	11/08/2021	BDN_05	Agüitas	23.24204	-88.71512	100	4038
Bajos del Norte	12/08/2021	BDN_06	La Loma - A	23.25032	-88.70503	100	3430
Bajos del Norte	12/08/2021	BDN_07	La Loma - B	23.24763	-88.70866	100	3719

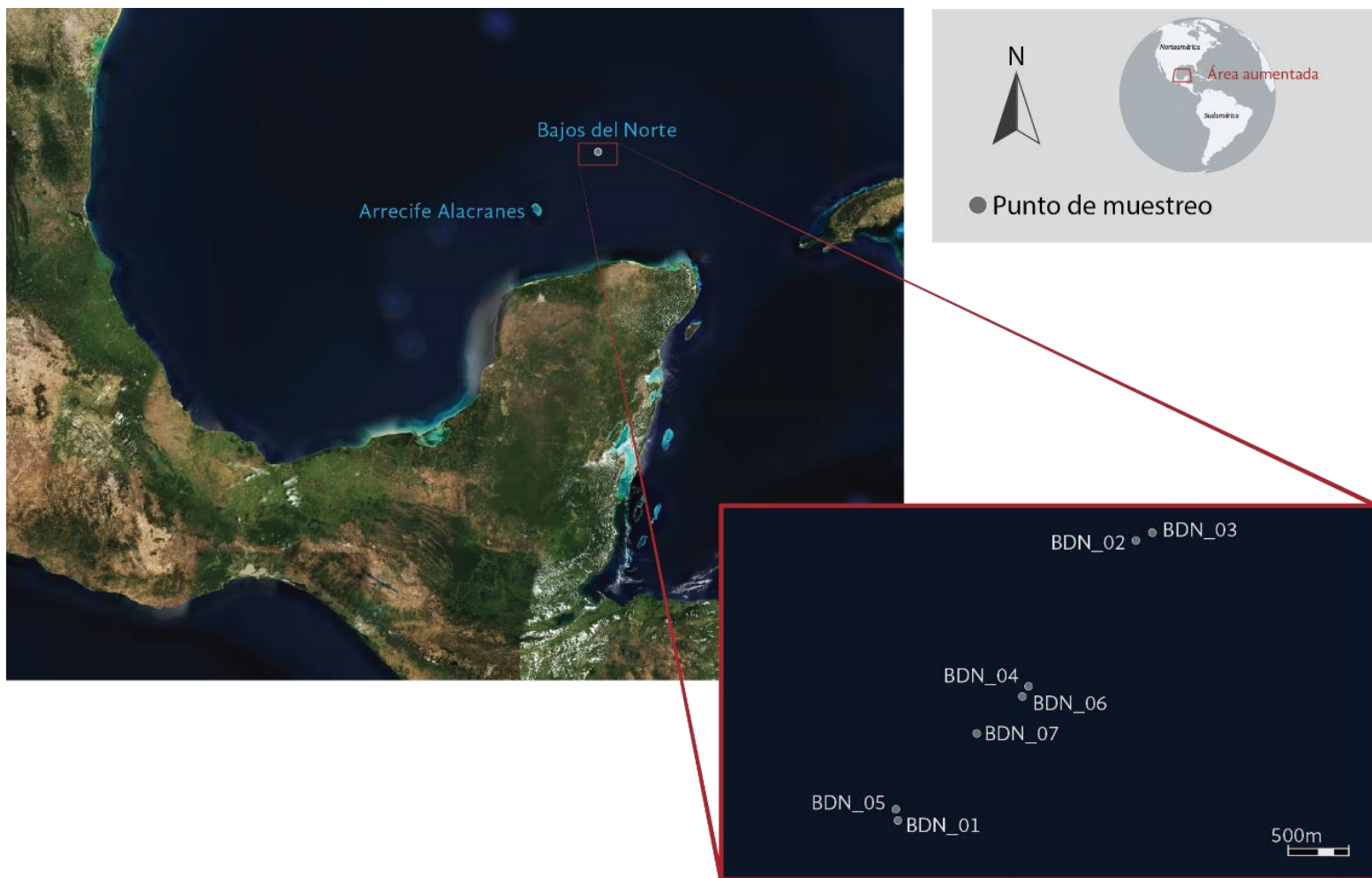


Figura 2. Mapa de los puntos de muestreo en los Bajos del Norte.

Parque Nacional Arrecife Alacranes

La expedición al Parque Nacional Arrecife Alacranes se realizó del 2 al 5 de septiembre de 2021. La campaña fue organizada y financiada OCEANA México. El sistema arrecifal Arrecife Alacranes forma parte de un área natural protegida con el estatus de Parque Nacional. Su manejo y monitoreo está a cargo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Actualmente el plan de manejo de este arrecife cuenta con: Dos Zonas Núcleo, ubicadas al norte y al sur del sistema arrecifal, y una zona de amortiguamiento englobando el límite del parque (CONANP, 2006).

Zona Núcleo Norte (AlaZNN): se encuentra situada en la porción norte del zócalo arrecifal. Forma un polígono que rodea el noroeste del arrecife en forma semicircular. Abarca aproximadamente 3 km fuera de la barrera y cubre una superficie de 19,732 ha, incluyendo Isla Desterrada. En esta zona presenta regiones de cobertura marina desnuda de vegetación y con profundidades mayores a 5 m, y regiones con formaciones arrecifales.

Zona Núcleo Sur (AlaZNS): se encuentra delimitada por un polígono que encierra la porción sur del zócalo arrecifal, con una superficie de 11,937ha. En esta zona se encuentran ecosistemas que presentan un grado de modificación humana bajo. Incluye áreas con una elevada productividad y riqueza de recursos pesqueros y turísticos de importancia económica y a semejanza de la zona núcleo norte, crecen pastos marinos en donde efectúan su ciclo biológico varias especies tanto de vertebrados como invertebrados marinos. En dicho polígono se localizan Isla Muertos o Desertora, Isla Pérez e Isla Pájaros.

Zona de Amortiguamiento (AlaZA): Está delimitada por un polígono ovalado en Dirección SE-NW que rodea el arrecife y encierra las zonas núcleo del parque, definido por el límite del mar territorial -de la isobata de 40 m a una distancia de aproximadamente 12 mn mar adentro. El área resultante queda delimitada entre los meridianos 89° 24' 04" y 90° 00' 28" de longitud oeste y entre los paralelos 22° 47' 56" y 22° 09' 01" de latitud norte, con una superficie de 302,098- ha. La máxima distancia en el sentido N-S es de 72.48 km mientras que en el sentido Este-Oeste es de 62.58 km.

Participantes

Las personas involucradas en la toma de datos fueron Quetzalli Hernández y Antar Pérez de la UMDI – Sisal, de la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Puntos de monitoreo

Se visitaron y marcaron permanentemente ocho sitios (Figura 3) cubriendo un área de 800 m² (100 m² por sitio) y capturando un total de 24,955 fotografías correspondientes a 1.06 TB de información (Tabla 2).

Tabla 2. Relación entre puntos muestreados y fotografías tomadas.

Arrecife	Fecha	Estación	Nombre	Latitud	Longitud	Área (m2)	Fotografías
Alacranes	02/09/2021	EM_ALA_01	Tabasco	22.36754	-89.67426	100	5034
Alacranes	02/09/2021	EM_ALA_02	Langosta	22.39773	-89.67194	100	7968
Alacranes	03/09/2021	EM_ALA_03	Hongos	22.39598	-89.70581	100	3282
Alacranes	03/09/2021	EM_ALA_04	Anegado	22.46042	-89.61147	100	5344
Alacranes	04/09/2021	EM_ALA_05	Arco	22.58483	-89.75362	100	11390
Alacranes	04/09/2021	EM_ALA_06	Vapor	22.53829	-89.65501	100	6198
Alacranes	04/09/2021	EM_ALA_07	Tweed	22.54601	-89.66083	100	6260
Alacranes	05/09/2021	EM_ALA_08	Marisol	22.50024	-89.78677	100	4434



Figura 3. Mapa de los puntos de muestre en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

Resultados

Con la información fotográfica se generaron siete mapas 3D para Bajos del Norte y ocho mapas 3D para Arrecife Alacranes. Para cada sitio se tiene un archivo Metashape Project (.psx), una nube de puntos (.vml), un archivo VisCore (.vis), un archivo GeoTIFF (.tif) y un juego fotográfico de dos distancias focales, 12mm y 60mm.

Estructura de la comunidad coralina en los Bajos del Norte y Arrecife Alacranes

La estructura de la comunidad coralina de los Bajo del Norte y Arrecife Alacranes presentó una aparente diferencia (Figura 4) compartiendo solo 12 spp coralinas (Figura 5). Los Bajos del

Norte son un sistema arrecifal más homogéneo que Arrecife Alacranes y tiene por lo menos cuatro especies de coral únicas dentro de las que destacan *Agaricia humilis* y *Favia fragum*. En contraste Arrecife Alacranes presentó una estructura comunitaria más heterogénea que los Bajos del Norte, con dos sitios particularmente con buen estado de conservación (ALA 6 y ALA 7) y con ocho especies únicas destacando *Acropora palmata*, *Esumilia fastigiata*, *Diploria stokesii* y *Pseudodiploria clivosa*. Es importante aclarar que en los Bajos del Norte se encontraron esqueletos con muerte resiente de *Esmilia* sp., *Diploria* sp. y *Pseudodiploria* sp.

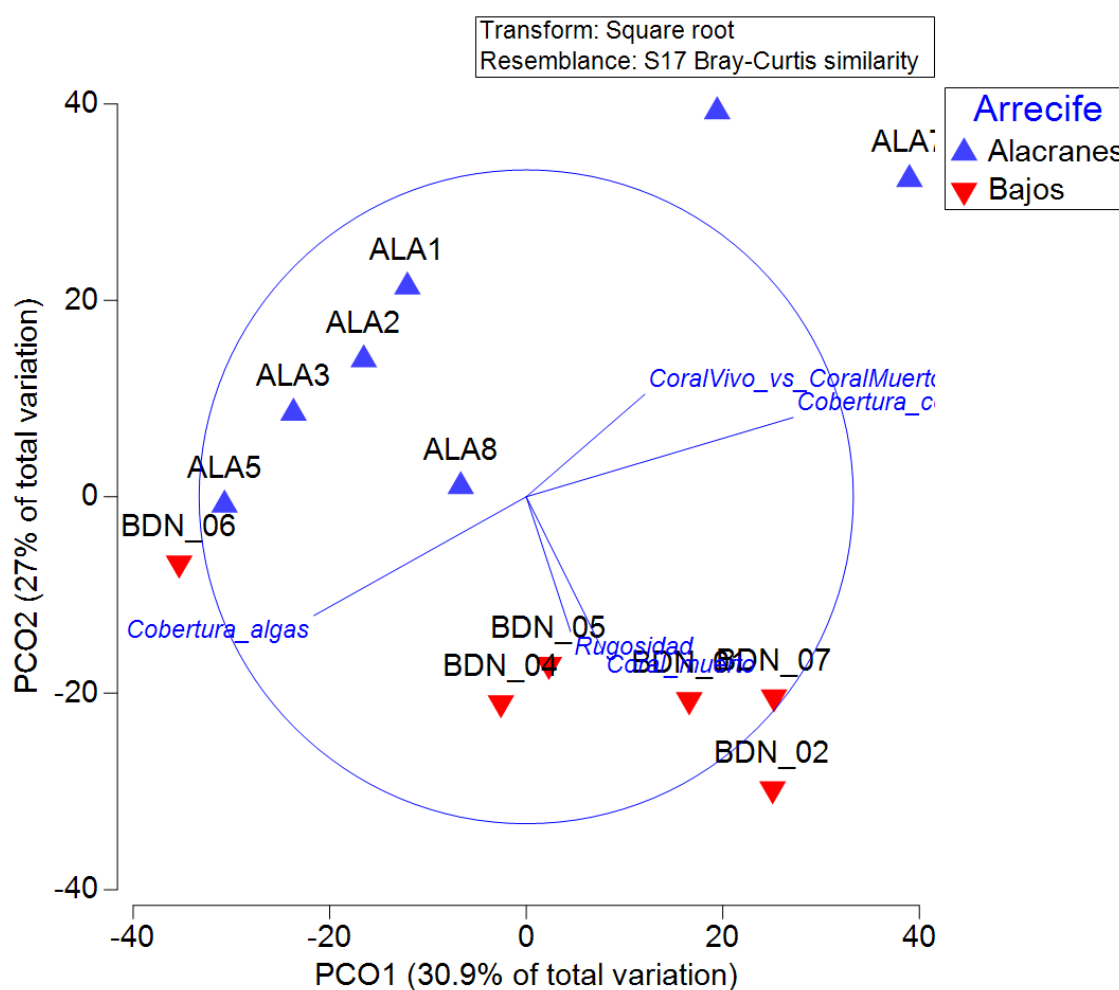


Figura 4. Ordenamiento de Componentes Principales basado en la similitud de Bray-Curtis. La variación explicada entre los dos Componentes Principales es de 57.9%. Los vectores azules representan las variables ambientales de cada punto de muestreo (i.e. Cobertura de corales, Cobertura de algas, Cobertura de estructuras coralinas muertas, relación entre coral vivo y coral muerto y rugosidad).

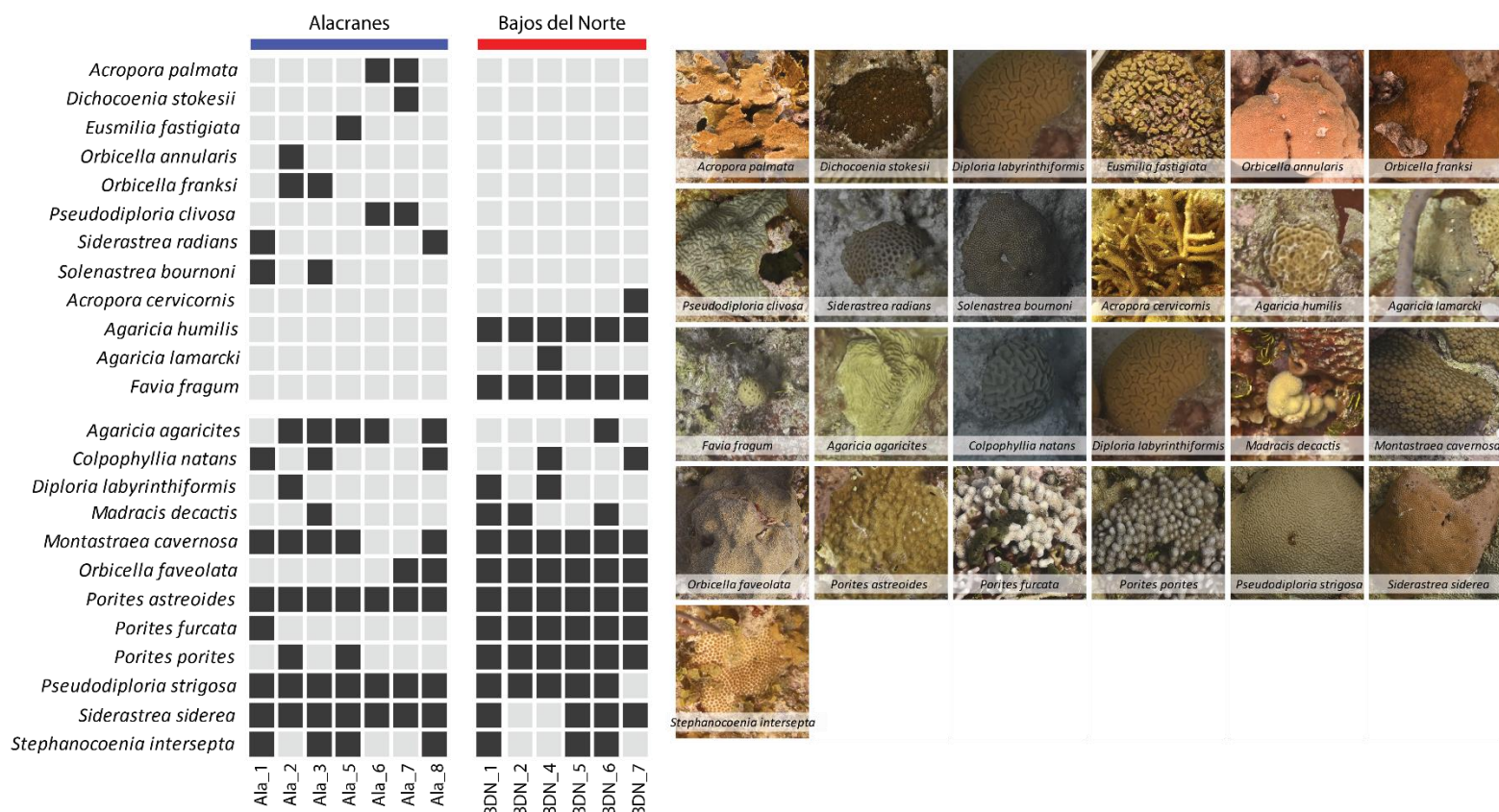


Figura 5. Estructura comunitaria de corales escleractinios de los Bajos del Norte y el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

Los resultados indican que los Bajos de Norte podrían estarse comportando como una entidad parcialmente aislada de Arrecife Alacranes, con especies coralinas únicas difíciles de reemplazar. En contraste Arrecife Alacranes podría estar funcionando como fuente de especies, tanto por la diversidad coralina del sistema arrecifal como por el tamaño del arrecife, siendo el sistema más grande del Golfo de México.

Bajos del Norte

Los arrecifes de los Bajos del Norte presentaron una riqueza de 16 especies coralinas siendo dominante *Orbicella faveolata*, *Montastrea cavernosa* y *Porites* spp. Una característica importante de este sistema arrecifal es el sobrecrecimiento de algas cafés y de organismos bioerosionadores característicos de arrecifes impactados. De igual manera los Bajos de Norte

presentaron una alta mortandad de corales de las especies *Diploria* sp., *Pseudodiploria* sp. y *Eusmilia* sp. (Figura 6).

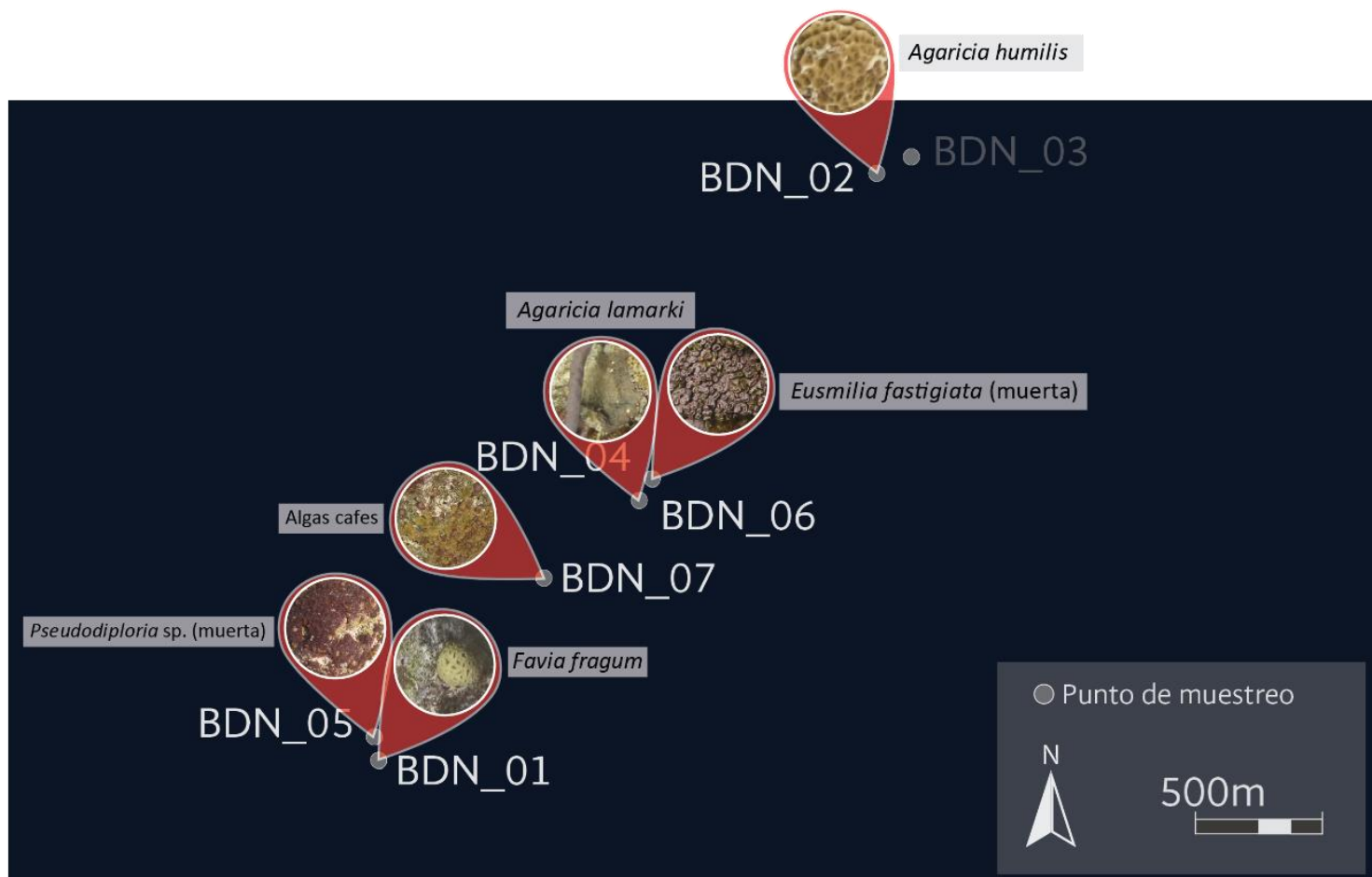


Figura 6. Mapa de características sobresalientes en cada punto de muestreo de los Bajos del Norte.

Parque Nacional Arrecife Alacranes

Arrecife Alacranes presentó una riqueza de 20 especies coralinas siendo dominantes las especies *Pseudodiploria strigosa*, *Siderastrea siderea* y *Poristes asteroides*. Una característica importante de este sistema arrecifal es que dos sitios presentaron una cobertura coralina sobresaliente, con alrededor de 78% y 95% cobertura coralina viva respectivamente (Figura 7).

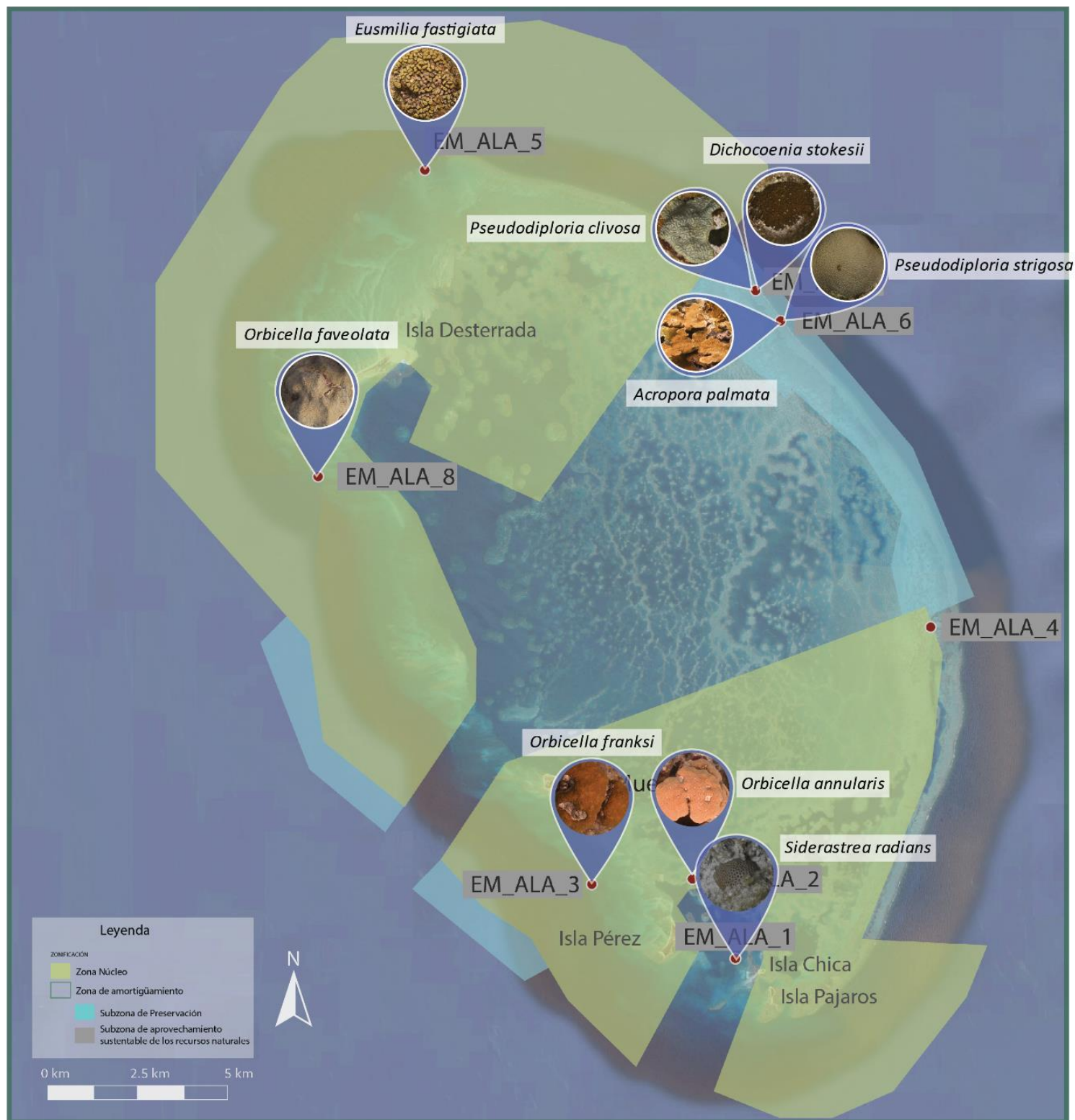


Figura 7. Mapa de características sobresalientes en cada punto de muestreo en el Parque Nacional Arrecife Alacranes.

Índice Integral de Salud Arrecifal

De manera general tanto los Bajos del Norte como Arrecife Alacranes presentaron una calificación de **regular** (Tabla 3 y 4). Esta evaluación indica que los dos sistemas arrecifales evaluados no son saludables. En promedio, la salud arrecifal por sitio de monitoreo alcanzó apenas el 15% de lo que se considera ideal. Nueve sitios analizados están en condiciones de salud regulares, dos sitios están en malas condiciones y solo dos sitios se encuentran en condiciones excepcionalmente buenas. Esto corresponde a que el 84% de los sitios muestreados presentan un grado de deterioro importante.

Tabla 3. Porcentaje de cobertura de los cuatro indicadores utilizados para calcular el Índice Integral de Salud Arrecifal. (Azul= Muy Bien; Verde= Bien; Amarillo= Regular; Naranja= Mal; Rojo= Crítico)

	Corales	Algas	Bio-erosionadores	Formadores de hábitat	Arrecife
ALA1	1.830	3.633	0.014	0.586	Alacranes
ALA2	6.699	19.023	0.053	2.323	Alacranes
ALA3	24.663	22.588	0.004	0.223	Alacranes
ALA5	7.091	91.389	0	0.036	Alacranes
ALA6	78.085	10.724	0.180	3.041	Alacranes
ALA7	95.443	0.7128	0.052	2.841	Alacranes
ALA8	21.371	22.659	0	0.080	Alacranes
BDN_01	35.666	23.866	0	0.070	Bajos
BDN_02	84.436	10.250	0	0.575	Bajos
BDN_04	11.851	62.732	0	6.488	Bajos
BDN_05	22.321	65.356	0.408	1.820	Bajos
BDN_06	0.372	98.746	0.041	0.024	Bajos
BDN_07	26.102	12.127	3.492	5.650	Bajos

Tabla 4. Calificación obtenida en cada indicador bentónico (Azul= Muy Bien; Verde= Bien; Amarillo= Regular; Naranja= Mal; Rojo= Crítico). Y calculo numérico y categórico del Índice Integral de Salud Arrecifal (IISA) para cada punto de muestreo.

	Corales	Algas	Bio-erosionadores	Formadores de hábitat	IISA	IISA_Categórico	Arrecife
ALA1	1	4	5	1	2.75	Regular	Alacranes
ALA2	2	2	5	3	3	Regular	Alacranes
ALA3	4	2	5	1	3	Regular	Alacranes
ALA5	2	1	5	1	2.25	Mal	Alacranes
ALA6	5	3	5	5	4.5	Muy Bien	Alacranes
ALA7	5	5	5	3	4.5	Muy Bien	Alacranes
ALA8	4	2	5	1	3	Regular	Alacranes
BDN_01	4	2	5	1	3	Regular	Bajos
BDN_02	5	3	5	1	3.25	Regular	Bajos
BDN_04	3	1	5	4	3.25	Regular	Bajos
BDN_05	4	1	5	2	3	Regular	Bajos
BDN_06	1	1	5	1	2	Mal	Bajos
BDN_07	4	2	1	5	3	Regular	Bajos

Tanto en los Bajos del Norte cómo Arrecife Alacranes presentaron sitios con una buena cobertura de corales escleractinios, por lo que se recomienda proponer acciones de manejo locales para cada punto de monitoreo.

Las señales principales que se detectaron indicando una mala salud arrecifal es la alta mortandad de especies coralinas (particularmente crítica en los Bajos del Norte) la baja cobertura de corales duros (Figura 8) y el sobrecrecimiento de algas (Figura 9). Para calcular un Índice Integral de Salud Arrecifal más robusto se recomienda ingresar información de otros invertebrados de importancia ecológica como erizos de la especie *Diadema sp.*, de biomasa de peces comerciales y de biomasa de peces herbívoros.

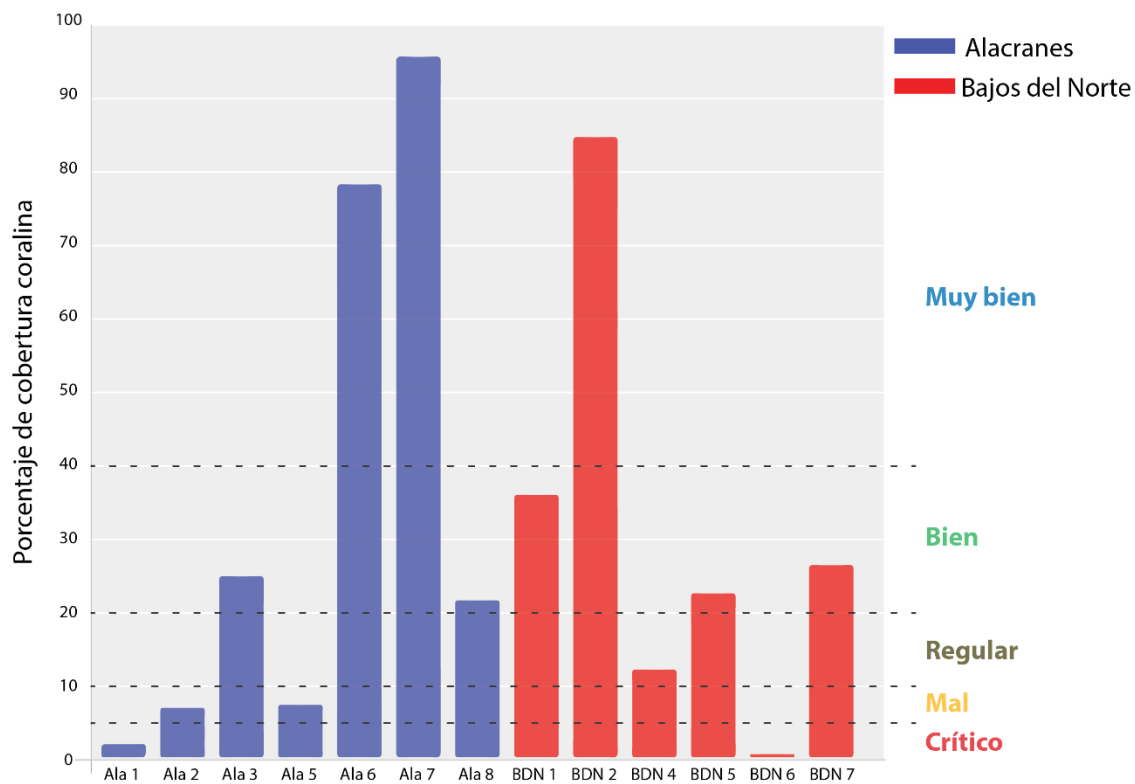


Figura 8. Gráfica de barras del porcentaje de cobertura coralina para cada punto de muestreo. Las líneas punteadas representan los límites críticos para el indicador bentónico de cobertura coralina.

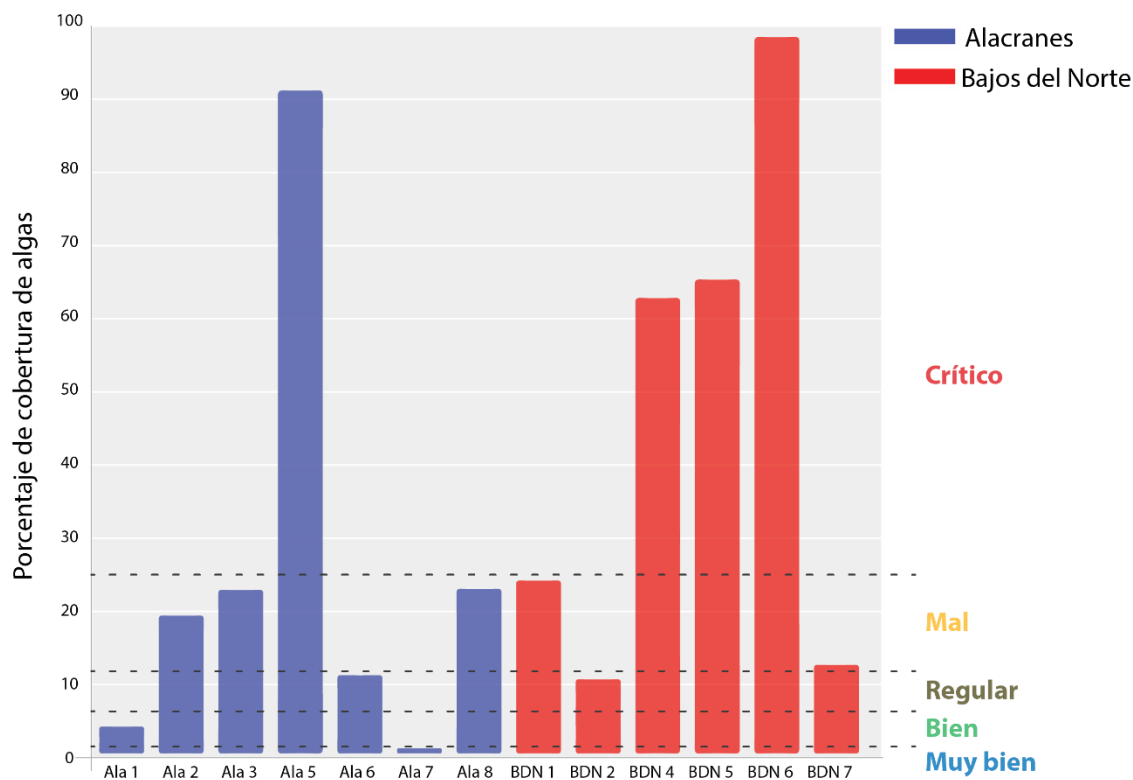


Figura 9. Gráfica de barras del porcentaje de cobertura de algas para cada punto de muestreo. Las líneas punteadas representan los límites críticos para el indicador bentónico de cobertura algal.

Literatura citada

- Aerts, L. A. M. (1998). Sponge/coral interactions in Caribbean reefs: Analysis of overgrowth patterns in relation to species identity and cover. *Marine Ecology Progress Series*, 175, 241–249. <https://doi.org/10.3354/meps175241>
- Bell, J. J., Davy, S. K., Jones, T., Taylor, M. W., & Webster, N. S. (2013). Could some coral reefs become sponge reefs as our climate changes? *Global Change Biology*, 19(9), 2613–2624. <https://doi.org/10.1111/gcb.12212>
- Carballo, J. L., Bautista, E., Nava, H., Cruz-Barraza, J. A., & Chávez, J. A. (2013). Boring sponges, An increasing threat for coral reefs affected by bleaching events. *Ecology and Evolution*, 3(4), 872–886. <https://doi.org/10.1002/ece3.452>

CONANP. (2006). Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Arrecife Alacranes. In *CONANP-SEMARNAT*.

Edwards, C. B., Eynaud, Y., Williams, G. J., Pedersen, N. E., Zgliczynski, B. J., Gleason, A. C. R., Smith, J. E., & Sandin, S. A. (2017). Large-area imaging reveals biologically driven non-random spatial patterns of corals at a remote reef. *Coral Reefs*, 36(4), 1291–1305.
<https://doi.org/10.1007/s00338-017-1624-3>

Ferrari, R., Lachs, L., Pygas, D. R., Humanes, A., Sommer, B., Figueira, W. F., Edwards, A. J., Bythell, J. C., & Guest, J. R. (2021). Photogrammetry as a tool to improve ecosystem restoration. *Trends in Ecology and Evolution*, 36(12), 1093–1101.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2021.07.004>

Ferrari, R., McKinnon, D., He, H., Smith, R. N., Corke, P., González-Rivero, M., Mumby, P. J., & Upcroft, B. (2016). Quantifying multiscale habitat structural complexity: A cost-effective framework for underwater 3D modelling. *Remote Sensing*, 8(2).
<https://doi.org/10.3390/rs8020113>

González-Rivero, M., Yakob, L., & Mumby, P. J. (2011). The role of sponge competition on coral reef alternative steady states. *Ecological Modelling*, 222(11), 1847–1853.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.03.020>

Habib, A. F., Kim, E. M., & Kim, C. J. (2007). New methodologies for true orthophoto generation. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(1), 25–36.
<https://doi.org/10.14358/PERS.73.1.25>

Healthy Reefs for Healthy People. (2022). *Healthy Reefs Indicators*.
<https://www.healthyreefs.org/cms/healthy-reef-indicators/>

Kennedy, E. V., Perry, C. T., Halloran, P. R., Iglesias-Prieto, R., Schönberg, C. H. L., Wisshak, M., Form, A. U., Carricart-Ganivet, J. P., Fine, M., Eakin, C. M., & Mumby, P. J. (2013).

- Avoiding coral reef functional collapse requires local and global action. *Current Biology*, 23(10), 912–918. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.04.020>
- Kodera, S. M., Edwards, C. B., Petrovic, V., Pedersen, N. E., Eynaud, Y., & Sandin, S. A. (2020). Quantifying life history demographics of the scleractinian coral genus *Pocillopora* at Palmyra Atoll. *Coral Reefs*, 39(4), 1091–1105. <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01940-8>
- López-Victoria, M., Zea, S., & Weil, E. (2006). Competition for space between encrusting excavating Caribbean sponges and other coral reef organisms. *Marine Ecology Progress Series*, 312(April), 113–121. <https://doi.org/10.3354/meps312113>
- Maldonado, M., Aguilar, R., Bannister, R. J., James, J., Conway, K. W., Dayton, P. K., Cristina, D., Gutt, J., Kelly, M., Kenchington, E. L. R., Leys, S. P., Shirley, A., Tendal, O. S., Rapp, H. T., Klaus, R., & Young, C. M. (2016). Sponge Grounds as Key Marine Habitats: A Synthetic Review of Types, Structure, Functional Roles, and Conservation Concerns. In S. Rossi, L. Barmanti, A. Gori, & C. Orejas (Eds.), *Marine Animal Forests The Ecology of Benthic Biodiversity Hotspots* (pp. 1–39). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5>
- McField, M., & Richards, K. P. (2007). *Healthy reefs for healthy people: a guide to indicators of reef health and social well-being in the Mesoamerican reef region*.
- McField, Melanie, Kramer, P., Giró-Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N., & Rueda-Flores, M. (2020). Reporte del Arrecife Mesoamericano. *Healthy Reefs for Healthy People Initiative*, 36.
- Pavoni, G., Corsini, M., Ponchio, D., Edwards, C., Pedersen, N., Sandin, S., & Cignoni, P. (2021). *TagLab: AI-assisted annotation for the fast and accurate semantic segmentation of coral reef orthoimages* (v2022.04.21; pp. 1–17). Visual Computing Lab.

- Pawlik, J. R., Loh, T. L., McMurray, S. E., & Finelli, C. M. (2013). Sponge Communities on Caribbean Coral Reefs Are Structured by Factors That Are Top-Down, Not Bottom-Up. *PLoS ONE*, 8(5). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0062573>
- Pedersen, N. E., Edwards, C. B., Eynaud, Y., Gleason, A. C. R., Smith, J. E., & Sandin, S. A. (2019). The influence of habitat and adults on the spatial distribution of juvenile corals. *Ecography*, 42(10), 1703–1713. <https://doi.org/10.1111/ecog.04520>
- Pérez-Botello, A. M., & Simões, N. (2021). Sponge-dwelling fauna: a review of known species from the Northwest Tropical Atlantic coral reefs. *Biodiversity Data Journal*, 9: e63372, 1–18. <https://doi.org/10.3897/BDJ.9.e63372>
- Rossi, S., Barmanti, L., Gori, A., & Orejas, C. (2017). Marine Animal Forests. In S. Rossi, L. Barmanti, A. Gori, & C. Orejas (Eds.), *Springer*. Springer Nature. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21012-4>
- Rützler, K. (1975). The role of burrowing sponges in bioerosion. *Oecologia*, 19(3), 203–216. <https://doi.org/10.1007/BF00345306>
- Rützler, K. (2004). Sponges on coral reefs: a community shaped by competitive cooperation. *Boll Mus Ist Biol Univ Genova*, 68, 85–148.
- Sandin, S., Smith, J., & Brian, Z. (2021). *The Scripps Oceanography 100 Island Challenge* (p. 41).
- Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry. *Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University*, 79–95.
- Schönberg, C. H. L. (2002). Substrate effects on the bioeroding demosponge *Cliona orientalis*. 1. Bioerosion rates. *Marine Ecology*, 23(4), 313–326.
- Schönberg, C. H. L., & Ortiz, J. C. (2008). Is sponge bioerosion increasing. *11th Int Coral Reef*

Symp, 1(16), 527–530.

Suka, R., Asbury, M., Couch, C. S., Gray, A. E., Winston, M., & Oliver, T. (2019). *Processing Photomosaic Imagery of Coral Reefs Using Structure-from-Motion Standard Operating Procedures*. December, 1–54.