



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS



“ESTRUCTURA DEL PAISAJE SUMERGIDO DEL PARQUE  
NACIONAL HUATULCO, OAXACA, MEDIANTE  
PERCEPCIÓN REMOTA”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

PRESENTA

GERARDO MANUEL WILLIAMS JARA

LA PAZ, B. C. S., DICIEMBRE DE 2017



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**  
**ACTA DE REVISIÓN DE TESIS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S., siendo las 12:00 horas del día 27 del mes de Noviembre del 2017 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICIMAR para examinar la tesis titulada:

**"ESTRUCTURA DEL PAISAJE SUMERGIDO DEL PARQUE NACIONAL  
HUATULCO, OAXACA, MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA"**

Presentada por el alumno:

**WILLIAMS**

Apellido paterno

**JARA**

materno

**GERARDO MANUEL**

nombre(s)

Con registro: 

A	1	6	0	9	8	3
---	---	---	---	---	---	---

Aspirante de:

**MAESTRIA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA DEFENSA DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

Directores de Tesis

DR. GUILLERMO MARTINEZ FLORES  
Director de Tesis

DR. VÍCTOR MANUEL GÓMEZ MUÑOZ

DR. ENRIQUE HIPARCO NAVA SÁCHEZ

MAIA. EDUARDO JUVENTINO RAMÍREZ CHÁVEZ  
2º. Director de Tesis

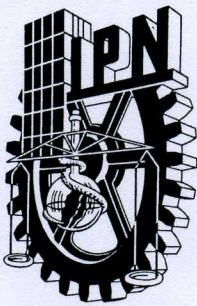
DR. SERGIO AGUÍÑIGA GARCÍA

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. SERGIO HERNÁNDEZ TRUJILLO



I.P.N.  
CICIMAR  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de La Paz, B.C.S. el día 08 del mes de Diciembre del año 2017

El (la) que suscribe BM. GERARDO MANUEL WILLIAMS JARA Alumno (a) del Programa  
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE RECURSOS MARINOS

con número de registro A160983 adscrito al CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE CIENCIAS MARINAS

manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis, bajo la dirección de:

DR. GUILLERMO MARTÍNEZ FLORES Y MAIA. EDUARDO JUVENTINO RAMÍREZ CHÁVEZ

y cede los derechos del trabajo titulado:

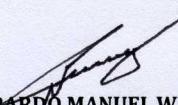
"ESTRUCTURA DEL PAISAJE SUMERGIDO DEL PARQUE NACIONAL

HUATULCO, OAXACA, MEDIANTE PERCEPCIÓN REMOTA"

al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Éste, puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: gmwj.15@gmail.com - gmflores@ieee.org - bmeduardo@msn.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
BM. GERARDO MANUEL WILLIAMS JARA

*Nombre y firma del alumno*

## DEDICATORIA

A MI PADRE, MIGUEL ENRIQUE WILLIAMS ROJAS

A MI MADRE, MARÍA IRENE JARA VALLS

A MIS HERMANOS, MIGUEL, DIEGO Y VERÓNICA

A MIS SERES QUERIDOS, AMIGOS Y PERSONAS QUE ME APOYARON

*AL MAR, FUENTE DE INSPIRACIÓN Y MOTIVO DE ADMIRACIÓN,*

*PORQUE EL DÍA QUE DEJE DE MARAVILLARME,*

*DEJARÉ DE ESTAR VIVO.*

## Agradecimientos

Al llegar al final de este camino, mirar alrededor y darme cuenta de que no he llegado solo a este momento, me invade un sentimiento de gratitud hacia todos los que han sido parte el. Quisiera agradecer especialmente al Dr. Guillermo Martínez por compartir sus conocimientos, brindarme siempre su apoyo y generar un ambiente de trabajo colaborativo, amistoso y de calidad. Al MAIA. Eduardo Ramírez, por todas sus enseñanzas, apoyarme y contagiar su pasión por el trabajo. A los Doctores Víctor Gómez, Enrique Nava y Sergio Aguíñiga por sus comentarios y valiosas aportaciones a este trabajo.

Al posgrado del CICIMAR-IPN, por permitirme realizar los estudios de grado, así como brindarme un espacio y apoyo durante este proceso. A CONACyT y BEIFI, por el apoyo económico para realizar los estudios de posgrado. Al proyecto 2IE1501 "Bahías del Parque Nacional Huatulco y su aporte de gastos máximos de la cuenca río Copalita" (UMAR), por la información proporcionada para la generación de este estudio. Al Dr. Andrés López Pérez y al proyecto "Acidificación del océano y su efecto en las comunidades arrecifales del Pacífico Sur Mexicano (236654), por los datos batimétricos proporcionados.

Al personal académico y administrativo del CICIMAR, principalmente, al Dr. Shirasago, por el entusiasmo con el que compartió sus conocimientos; a Humberto Ceseña y Cesar Casas, del departamento de servicios educativos, por la atención e información brindada; a Rubén García, por su apoyo y conocimientos compartidos.

A mis padres y hermanos, por ser mi soporte y darme fuerza en todo momento. A Marian y Jorge, por el gran apoyo y siempre estar pendientes. A Oscar, Alejandro y mis compañeros de SIGALT, por toda su ayuda, aprendí mucho de ustedes. A Tonatiuh, Matus y Zulema, su apoyo fue muy importante. A mis amigos del Laboratorio de Oceanología, por sus comentarios durante los seminarios y de manera personal, así como por la convivencia que siempre hizo los momentos más agradables, sin ustedes no habría sido lo mismo.

## **Contenido**

1. Introducción.....	1
2. Área de estudio .....	8
3. Antecedentes .....	4
4. Planteamiento del problema .....	7
5. Hipótesis .....	8
6. Objetivo general .....	8
6.1 Objetivos específicos .....	8
7. Datos y métodos .....	8
7.1 Toma de fotografías .....	10
7.2 Generación de ortofotos.....	11
7.3 Clasificación supervisada.....	11
7.4 Batimetría.....	14
7.5 Métricas del paisaje .....	16
7.6. Índice de proximidad.....	22
8. Resultados .....	23
8.1 Procesamiento de fotografías aérea .....	23
8.2 Clasificación supervisada y reclasificación.....	24
8.3 Batimetría.....	25
8.4 Métricas de Paisaje .....	27
8.5. Ráster de proximidad .....	32
9. Discusión .....	36
9.1 Caracterización de la estructura espacial del paisaje sumergido.....	36
9.2 Uso de VANT para la caracterización del paisaje sumergido .....	40
10. Conclusiones .....	43
11. Recomendaciones.....	44
12. Literatura citada.....	45
13. Anexos .....	49

## Índice de figuras

Figura 1. Polígono del Parque Nacional Huatulco, Oaxaca y bahías del área de estudio.	9
Figura 2. Estimación visual del porcentaje de cobertura aparente (Hill & Wilkinson, 2004). Tomado de Aguilera-Arias (2012).	12
Figura 3. Ortofoto de la Bahía San Agustín. Los puntos representan los sitios de entrenamiento.	13
Figura 4. Instalación de la ecosonda. A la derecha se observa la instalación de la consola, a la izquierda, la del transductor.	15
Figura 5. Trayectoria del levantamiento batimétricos en Bahía Chachacual (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).	15
Figura 6. Descriptores de las clases. Donde ID se refiere a la clase, Name al nombre de la clase, Enabled habilita las clases que se van a analizar e IsBackground define la clase que corresponde al fondo.	16
Figura 7. Ortofotos de las bahías del PNH. (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017)	24
Figura 8. Mapas temáticos de las bahías del PNH. El color beige representa el sustrato arenoso, el rojo el coralino y el negro el rocoso.	25
Figura 9. Mapas batimétricos de las bahías del PNH. La escala de las isobatas va desde 0 (verde oscuro) hasta 58 m (rojo). El intervalo entre líneas es de 1 m. (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).	26
Figura 10. Mapa batimétrico del PNH, generado a partir de la Carta Náutica de la Secretaría de Marina (1998)	27

Figura 11. Comparación entre el área total (TA) de las bahías del PNH y su cobertura de coral, estimadas a partir de las ortofotos.....	29
Figura 12. Comparación del porcentaje de cada tipo de sustrato en el paisaje (PLAND), así como el porcentaje del paisaje que ocupa el parche más grande de coral (LPI). ..	30
Figura 13. Número de parches de coral por bahía. ....	30
Figura 14. Métricas que indican la complejidad de la forma para la clase coral por bahía. ....	31
Figura 15. Comparación de los índices de agregación CLUMPY, CHOHESION y AI entre bahías. ....	31
Figura 16. Mapa de distancias (en metros), donde el rojo corresponde a los sitios más alejados de la línea de costa y el amarillo a los más cercanos a esta. ....	34
Figura 17. Histogramas de proximidad y mapas de distancias por bahía. ....	35
Figura 18. Ortofoto de Bahía Órgano (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	49
Figura 19. Ortofoto de Bahía Riscalillo (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	50
Figura 20. Ortofoto de Bahía Chachacual (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	51
Figura 21. Ortofoto de Bahía Cacaluta (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	52
Figura 22. Ortofoto de Bahía Maguey (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	53
Figura 23.Ortofoto de Bahía Órgano (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	54

Figura 24. Mapa temático de Bahía San Agustín.....	55
Figura 25. Mapa temático de Bahía Riscalillo. ....	56
Figura 26. Mapa temático de Bahía Chachacual.....	57
Figura 27. Mapa temático de Bahía Cacaluta. ....	58
Figura 28. Mapa temático de Bahía Maguey.....	59
Figura 29. Mapa temático de Bahía Órgano.....	60
Figura 30. Mapa isobático de Bahía San Agustín (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017). .....	63
Figura 31. Mapa isobático de Bahía Chachacual (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017). .....	64
Figura 32. Mapa isobático de Bahía Riscalillo (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	65
Figura 33. Mapa isobático de Bahía Cacaluta (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	66
Figura 34. Mapa isobático de Bahía Maguey (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	67
Figura 35. Mapa isobático de Bahía Órgano (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).....	68

## **Índice de tablas**

Tabla 1. Métricas del paisaje utilizadas para la caracterización (basado en McGarigal & Marks, 1995) .....	17
Tabla 2. Resolución y número de ortofotos generadas para cada bahía a partir del proceso fotogramétrico.....	23
Tabla 3. Muestra la precisión de los mapas temáticos y el índice Kappa de las bahías estudiadas.....	25
Tabla 4. Valores de profundidad (en metros) por bahía (b) y asociada a la cobertura de coral (c). .....	26
Tabla 5. Métricas del paisaje por bahía, el sufijo A, C y R hacen referencia a arena, coral y roca, respectivamente.....	28
Tabla 6. Correlación entre métricas (en todos los casos PVAL <0.05).....	32
Tabla 7. Valores de proximidad (en metros) por bahía (b) y asociada a la cobertura de coral (c) .....	33
Tabla 8. Matriz de evaluación de precisión de bahía Cacaluta. ....	61
Tabla 9. Matriz de evaluación de precisión de bahía Chachacual.....	61
Tabla 10. Matriz de evaluación de precisión de bahía Maguey.....	61
Tabla 11. Matriz de evaluación de precisión de bahía Órgano.....	61
Tabla 12. Matriz de evaluación de precisión de bahía Riscalillo. ....	62
Tabla 13. Matriz de evaluación de precisión de bahía San Agustín. ....	62

## **Glosario**

**Ecosonda:** Aparato electrónico que permite medir la distancia entre la superficie del agua y el fondo marino

**Fragmentación:** Proceso en el que subdivide un área en parches más pequeños y aislados de un hábitat específico.

**Fragmentación espacial:** Interrupción de la continuidad del paisaje. No está restringida a ninguna escala en particular (por ejemplo, temporal o funcional).

**Firma espectral:** Respuesta característica de un tipo de objeto dentro del espectro electromagnético.

**Índice Kappa:** Medida estadística que ajusta el efecto del azar en la porción de la concordancia observada para elementos cualitativos (variables categóricas).

**Isobatas:** Curva para la representación cartográfica de los puntos de igual profundidad

**Métricas del paisaje:** Conjunto de índices desarrollados para cuantificar las características espaciales específicas de los parches, clases de parches o el mosaico entero del paisaje.

**Paisaje:** Superficie geográfica heterogénea constituida por un grupo de ecosistemas que son observables y a su vez identificables en una fotografía, imagen satelital o de manera visual. Típicamente está compuesto por diversos elementos denominados parches.

**Parches:** Comunidades o conjuntos de especies rodeados por una matriz con una estructura o composición de comunidad diferente.

**Píxel:** Unidad básica de una imagen digitalizada en pantalla a base de puntos a color o en escala de grises.

**Raster:** En su forma más simple, un ráster consta de una matriz de celdas (o píxeles) organizadas en filas y columnas (o una cuadrícula) en la que cada celda contiene un valor que representa información, como la temperatura. Los rásteres son fotografías aéreas digitales, imágenes de satélite, imágenes digitales o incluso mapas escaneados.

**Sustrato:** Superficie que puede estar formada tanto por factores bióticos como abióticos.

**Shapefile:** Formato de representación vectorial, consta de un número variable de archivos, en los que se almacena digitalmente la localización de los elementos geográficos junto con sus atributos o características. Los elementos geográficos de un shapefile se pueden representar por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas).

**Vehículos aéreos no tripulados (VANT):** Aeronave que vuela sin tripulación, generalmente guiado por un piloto que lo controla de manera remota o mediante el uso de aplicaciones de planes de vuelo. También se les conoce como drones.

## **Resumen**

El estudio del paisaje es útil para cuantificar la estructura de los ecosistemas, la cual continuamente está siendo transformada por procesos tales como la fragmentación. El Parque Nacional Huatulco (PNH) posee ecosistemas prioritarios para la conservación, como lo son los arrecifes de coral, sin embargo, la estructura del paisaje marino aún no está caracterizada. Con el objetivo de caracterizar la estructura espacial del paisaje sumergido somero de seis bahías del PNH se utilizaron fotografías obtenidas con vehículos aéreos no tripulados durante el 2015, así como técnicas de sistemas de información geográfica y percepción remota (PR). Adicionalmente, se realizó el levantamiento batimétrico con una ecosonda y se obtuvieron datos de campo mediante buceo libre para generar sitios de entrenamiento georreferenciados de los tipos de cobertura más representativos. A las fotografías aéreas se les aplicó un proceso fotogramétrico, generando seis ortofotos, una por bahía. Las ortofotos se clasificaron usando el algoritmo de máxima verosimilitud. Se generaron mapas del paisaje sumergido, así como temáticos. Posteriormente, se obtuvieron métricas del paisaje, las cuales indican que existe una relación directamente proporcional entre el área y la forma de los parches e inversamente proporcional entre la forma y el aislamiento de los mismos. La bahía que tiene la mayor superficie de coral es San Agustín (5.8 ha) y la de menor es Órgano (0.94 ha). Los arrecifes del PNH se encuentran de manera agregada y presentan patrones de forma regulares. El coral se distribuye con mayor frecuencia entre 15 a 38 m de la línea de costa y de 1 a 4 m de profundidad. El análisis de proximidad no indica que las islas e islotes sean un factor determinante en la fragmentación de los arrecifes de coral.

## **Abstract**

The study of the landscape is useful to quantify the structure of ecosystems, which is continuously being transformed by processes such as fragmentation. The Huatulco National Park (HNP) has priority ecosystems for conservation, such as coral reefs, however, the structure of the marine landscape is not yet characterized. To characterize the spatial structure of the shallow submerged landscape in six bays of the HPN bays, aerial photographs obtained with unmanned aerial vehicles during 2015 were used, as well as geographic information systems and remote perception (RP) techniques. Additionally, the bathymetric survey was conducted with an echo sounder and field data were obtained by means of free diving to generate georeferenced training sites of the most representative types of coverage. A photogrammetric process was applied to aerial photographs, generating six orthophotos, one per bay. The orthophotos were classified using the maximum likelihood algorithm. Submerged landscape and thematic maps were generated. Subsequently, landscape metrics were obtained which indicate that there is a directly proportional relationship between the area and the shape of the patches and inversely proportional between the shape and the isolation of patches. San Agustín bay has the largest coral coverage area (5.8 ha) and Órgano bay has the smaller one (0.94 ha). Coral reefs of the HPN have an aggregate spatial arrangement and present regular forms patterns. Coral are distributed more frequently between 15 to 38 m from the coastline and 1 to 4 m deep. Proximity analysis does not indicate that islands and islets are a determining factor in the fragmentation of coral reefs.

## **1. Introducción**

El Paisaje, según Troll (1950), es una parte de la superficie terrestre con una unidad de espacio que, por su imagen exterior y por la actuación conjunta de sus fenómenos, al igual que las relaciones de posiciones interiores y exteriores, tienen un carácter específico, y que se distingue de otros por fronteras geográficas o naturales. Cuando hablamos de ecología del paisaje, nos referimos al estudio de este complejo de elementos interactuantes entre la asociación de seres vivos y sus condiciones ambientales, los cuales intervienen en una parte específica del paisaje. Es por esto, que la ecología del paisaje es la manera más completa de contemplación para la investigación del paisaje natural (Troll, 2003).

El concepto de ecología del paisaje es resultado de la interpretación científica de la imagen aérea. La amplitud que ofrece la imagen aérea para el estudio del paisaje se sustenta en el gran espacio que abarca esta visión con respecto a los límites de una perspectiva a nivel del terreno, por lo tanto, ofrece una vista más completa y en parte también con más profundidad. La interpretación de las imágenes aéreas es, en realidad, la descripción del paisaje geográfico y de los componentes ecológicos (Troll, 2003).

El estudio del paisaje es un instrumento dinámico y una herramienta útil para orientar los desarrollos urbanos, territoriales y de hábitats. Además, permite establecer criterios para zonificar, catalogar, proteger y conservar los elementos estructurales del territorio que definen en mayor medida el carácter de un paisaje, otorgándole una identidad singular y diferenciada (Muñoz-Criado, 2012).

La ecología del paisaje centra su estudio en tres características: la estructura, la funcionalidad y el cambio (Forman & Godron, 1981, 1986). Las unidades morfológicas y estructurales que componen el paisaje están relacionadas desde un punto de vista funcional, al producirse entre ellas intercambios de energía, materiales, organismos, información (Vila *et al.*, 2006; Forman & Godron, 1981). Las preguntas clave sobre la

estructura del paisaje se centran en la importancia de los números, tipos y configuraciones de los ecosistemas (Forman & Godron, 1981).

Por lo anterior, la diferenciación de los elementos morfológicos fundamentales permite valorar el paisaje de manera cuantitativa y evaluar los cambios a lo largo del tiempo. Es por ello, que la superficie, la forma, el número y la disposición de los elementos del paisaje condicionan de forma clave su realidad y dinamismo, así como también sus perspectivas futuras (Vila *et al.*, 2006). Debido a estas relaciones se diferencian dos conceptos fundamentales: la composición (la variedad y abundancia de fragmentos en un paisaje) y la configuración del paisaje (la distribución espacial de los fragmentos en el paisaje).

Los elementos morfológicos del paisaje están estructurados espacialmente en una serie de escalas, formando patrones que interactúan con la percepción y el comportamiento de los organismos, dando lugar a procesos de alto nivel de dinámica poblacional y estructura comunitaria. Por lo tanto, una alteración en los patrones del paisaje compromete la integridad funcional de esta estructura al interferir con los procesos ecológicos críticos necesarios para la persistencia de la población y el mantenimiento de la biodiversidad y salud de los ecosistemas (McGarigal, 2002).

La transformación del paisaje da origen a la fragmentación del hábitat, lo cual constituye el mayor riesgo a la sustentabilidad (Badii & Landeros, 2007). La fragmentación es la división de un hábitat continuo en segmentos más pequeños y aislados, cuyo resultado es la reducción de hábitats, la reducción del tamaño de los parches de hábitat y el aumento en el aislamiento (ECOTONO, 1996). De acuerdo con Harper *et al.* (2005), la fragmentación de un hábitat tiene consecuencias bióticas y abióticas, tales como variaciones en la dinámica poblacional de las especies, cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas. Que a su vez aumenta la vulnerabilidad de las especies a la extinción (ECOTONO, 1996).

Ortiz-Lozano *et al.* (2009) mencionan que, en los ecosistemas marinos, las características abióticas moldean y delimitan de manera importante la presencia de los

niveles jerárquicos de comunidades y poblaciones biológicamente inferiores. De la misma manera, el tamaño, forma y posición del hábitat en la matriz tienen influencia sobre el grado de fragmentación. A medida que el tamaño del hábitat disminuye, un porcentaje mayor del área se vuelve hábitat de borde. El mismo efecto ocurre cuando la forma del hábitat se hace más elongada. Los hábitats con forma elongada y angosta tienen más borde que los hábitats con formas cuadradas y redondas (ECOTONO, 1996). Estas características abióticas son fenómenos observables que se emplean para comprender y monitorear la biodiversidad marina, debido a que ellas definen los diferentes ecotonos de los ecosistemas marinos (Ortiz-Lozano *et al.*, 2009).

Una de las herramientas esenciales para monitorear y representar de manera espacial las áreas marinas es el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) y percepción remota (PR). La disponibilidad de datos de satélites de alta resolución ha aumentado en los últimos años junto con el lanzamiento de sensores más avanzados, la aplicación de tecnologías emergentes en diseños de sensores, una amplia variedad de plataformas y nuevos algoritmos. El uso de estas herramientas para la cartografía de los hábitats ha demostrado ser de utilidad para comprender las interconexiones entre los arrecifes de coral y los hábitats asociados, ya que abarcan una amplia escala de aplicaciones, incluyendo el diseño y evaluación de las áreas marinas protegidas (Eakin *et al.*, 2010).

A la par del desarrollo de los SIG y PR, se ha desarrollado la fotogrametría, que, según la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS por sus siglas en inglés) es el arte, la ciencia y la tecnología para obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética. De acuerdo con Jauregui (2006), la fotogrametría digital, actualmente en auge, surge como consecuencia del gran desarrollo de la computación, que permitió realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadoras. Con la fotogrametría digital crecen las posibilidades de explotación de las imágenes, a la vez que se simplifican las tecnologías, permitiendo la generación

automática de modelos de elevación del terreno, ortoimágenes y estereo-orthoimágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales.

La tendencia actual en el uso de los vehículos aéreos no tripulados (VANT) en la investigación (Ramírez-Chávez et al. 2013; Apostolos et al., 2016; Casella et al., 2017) ha sido sustentada con la versatilidad y practicidad que ofrecen para el monitoreo y representación espacial de los recursos naturales. En el presente estudio se utilizaron fotografías tomadas con VANT para caracterizar a partir de mapas la fragmentación espacial de las bahías del Parque Nacional Huatulco (PNH). De esta forma, se generará un estudio base con una herramienta tecnológica que brinda un método de evaluación rápida de los recursos arrecifales, en uno de los principales destinos turísticos de México.

## **2. Antecedentes**

El primer trabajo, en México, que incorpora el análisis de imágenes para la evaluación de los paisajes sumergidos, así como un sistema de clasificación para los tipos de fondo fue el realizado por Bello-Pineda (1998) en el Parque Nacional Arrecife Alacranes (PNAA) mediante el análisis de una imagen Landsat TM. Con este método se obtuvieron datos categorizados de los tipos de agregación, porcentaje aparente de cobertura y profundidad de las formas biológicas visualmente más dominantes. De esta manera, se generó un mapa con una exactitud general de 60%, dividido en diez superclases temáticas que representan distintos tipos de fondo a un nivel descriptivo muy general.

Ortiz-Lozano et al. (2009) cartografiaron el paisaje sumergido en el Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV), en el cual proponen un esquema de zonificación con base en la estructura y función de los atributos bióticos dentro del ecosistema (zonificación ecosistémica). En este trabajo, los autores concluyen que generar un esquema de zonificación de acuerdo con la estructura y función del

ecosistema es imprescindible para llevar a cabo un manejo adecuado de las áreas marinas protegidas de la zona costera.

El uso de técnicas de sistemas de información geográfica (SIG) y percepción remota (PR) fueron también utilizadas para el análisis de los arrecifes de coral de la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro, mediante las cuales Contreras-Silva (2011) clasificó ecosistemas benthicos presentes en el arrecife y comparó diferentes métodos de procesamiento de imágenes. El autor menciona que los datos provenientes de sensores remotos son útiles al realizar la cartografía de paisajes sumergidos y concluye que el método de Campos Aleatorios de Markov (CAM) es el mejor método para clasificar las imágenes con respecto al de Iterative Self-organizing Data Analysis (ISODATA), además, denota la necesidad de realizar la corrección de columna de agua.

La caracterización de la estructura y dinámica de los paisajes sumergidos empleando diversos productos de la percepción remota (imágenes satelitales SPOT, fotografía y videos aéreos) y datos recolectados en campo, también fue usada por Aguilera-Arias (2012) para estudiar las lagunas arrecifales del PNSAV, quien elaboró tres mapas temáticos de estos hábitats. Además, calculó las métricas del paisaje sumergido y evaluó el patrón espaciotemporal. Mediante un análisis discriminante obtuvo que el índice de forma es la variable con mayor peso al discriminar entre subsistemas. Atribuyó la forma regular de los arrecifes de Veracruz a la influencia antrópica, mientras que las formas irregulares que presentaron los arrecifes de Antón Lizardo, a las características hidrológicas de la zona. Sin embargo, el subsistema Antón Lizardo presentó mayor fragmentación en comparación con el subsistema Veracruz.

Teixidó *et al.* (2002) describieron los patrones espaciales mediante índices del paisaje, que permitieron caracterizar y comparar diversos hábitats benthicos marinos en Kapp Norvegia, Antártica, utilizando para ello 42 imágenes submarinas y métricas del paisaje.

Uno de los principales inconvenientes del uso de la fotografía aérea en los paisajes sumergidos es la limitación de la visión a causa de la luz, por lo que es común que estas técnicas sean utilizadas en zonas superficiales de agua clara de entre 1 y 20 m. Walker *et al.* (2008) proponen un enfoque para generar mapas de hábitats con alta precisión de áreas con poca visibilidad y lo comparan con el enfoque tradicional (técnicas fotogramétricas). El método consistió en cartografiar zonas con profundidad entre 0 y 35 m en una playa de Florida utilizando sensores de diferente resolución espacial. Los autores, utilizaron batimetría laser (LADS), discriminación acústica (QTC), fotografía aérea, sonar, información previa, así como una inspección visual. Como resultado de este proyecto, generaron un mapa de alta resolución, en el cual clasificaron el tipo de sustrato, tales como arrecifes de coral, arena, barras arenosas, roca, escombros, entre otros. Finalmente, compararon la precisión de los resultados con un estudio previo en la zona (enfoque tradicional) cuya precisión resultó ser mayor, y concluyen que es importante complementar los estudios fotogramétricos con otros sensores, sin embargo, es necesario evaluar su rentabilidad.

Recientemente se ha implementado el uso de VANT para evaluar los paisajes sumergidos, Ramírez *et al.* (2013) describieron los tipos de coberturas presentes en la Bahía Estacahuite, Oaxaca mediante el uso de VANTS de bajo costo y técnicas de fotogrametría y percepción remota. Realizaron una clasificación supervisada con base en un ortomosaico conformado por 48 fotografías tomadas con un Phantom 2 y una cámara Go-Pro Hero 3. Discuten acerca de la alta rentabilidad del uso de VANTS en la cartografía y la investigación. Concluyen sobre el gran potencial de los VANT para el monitoreo biológico, así como de la utilidad para realizar levantamientos fotogramétricos de alta precisión.

Apostolos *et al.* (2016) utilizaron VANT para identificar la línea de costa y conocer la morfología de dos playas de la Isla Lésvos, Grecia mediante la adquisición de datos espaciales a partir de las fotografías aéreas y el procesamiento de estas imágenes de alta resolución. Obtuvieron modelos digitales de superficie, ortofotos y modelos 3D con una precisión de cm. Así mismo, realizaron un análisis geográfico basado en objetos

(GEOBIA) mediante una clasificación difusa, con la cual detectaron las diferentes zonas de la playa, como la berma, dunas de arena, zona de erosión, zona de escombros, entre otras. Los investigadores mencionan la importancia de los VANTS para detectar pequeñas variaciones en la superficie terrestre, así como las bondades que brinda la resolución espacial, la cual permite el estudio de los cambios costeros con gran confianza, incluso para zonas con topografía compleja.

Palma *et al.* (2017) estudiaron el paisaje sumergido en la Reserva Marina de Punta de Oro, Mozambique, mediante el uso de vehículos subacuáticos semiautónomos. Utilizaron técnicas de fotogrametría para generar una ortofoto de alta resolución (0.4 cm), a partir de la cual estimaron, a diferentes escalas de muestreo, las métricas para el paisaje marino que permiten cuantificar área, borde, forma, contagio y diversidad. Además, caracterizaron las comunidades bentónicas hasta colonias individuales. Este estudio cuantifica el efecto de los protocolos de muestreo en la estimación métrica de los fondos marinos de arrecifes de coral e indica que se debe dedicar una atención especial al diseño de los programas de monitoreo, tomando las decisiones con base a las métricas del paisaje marino y a las estadísticas que serán determinadas.

### **3. Planteamiento del problema**

La porción marina del PNH aún no está caracterizada ni existe un diagnóstico que brinde suficiente información para hacer una zonificación del área. Algunos autores (Carr *et al.*, 2003; Ortiz-Lozano *et al.*, 2009) indican que cuando se realiza una zonificación de áreas marinas protegidas en la zona costera, se presentan dos problemas muy comunes: la información científica no es suficiente para detallar la descripción de los aspectos biológicos de la reserva, y los procesos medioambientales que describen la heterogeneidad intrínseca del área costera, principalmente el componente marino, son escasamente conocidos. Existen diversos estudios en los arrecifes de coral del PNH, sin embargo, estos corresponden a necesidades puntuales de investigación o monitoreo.

## **4. Hipótesis**

Debido a que la porción marina del PNH presenta una distribución mayor de islas e islotes en la parte sur que en la parte norte, se espera encontrar mayor grado de fragmentación en la parte norte del PNH, donde los elementos insulares son escasos.

## **5. Objetivo general**

Caracterizar la estructura espacial del paisaje sumergido, de las bahías del Parque Nacional Huatulco, a partir de fotografías tomadas con un vehículo aéreo no tripulado.

### **5.1 Objetivos específicos**

- Determinar la distribución espacial de los tipos de fondos más representativos de las bahías del Parque Nacional Huatulco mediante la clasificación supervisada de las ortofotos.
- Caracterizar el relieve submarino de las bahías del Parque Nacional Huatulco mediante un levantamiento batimétrico.
- Caracterizar la estructura espacial del paisaje a nivel bahía utilizando métricas del paisaje con el software Fragstats.
- Determinar el grado de protección de las bahías del Parque Nacional Huatulco a partir del análisis de proximidad entre la línea de costa, islas e islotes.

## **6. Área de estudio**

El PNH se ubica dentro del municipio de Santa María Huatulco, Oaxaca, se localiza en el Pacífico Tropical Mexicano, dentro del Golfo de Tehuantepec, entre las coordenadas geográficas  $15^{\circ}39'12''$  y  $15^{\circ}47'10''$  de latitud Norte y  $96^{\circ}06'30''$  y  $96^{\circ}15'00''$  de longitud Oeste (Fig. 1). El parque cuenta con una superficie delimitada por una

poligonal de 11,890 ha, de las cuales 6,374.98 ha son terrestres y 5,516 ha pertenecen a la zona marina (CONANP, 2003).

El clima de la región es cálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual de 26 a 28 °C (Arriaga-Cabrera et al., 1998). El promedio anual de precipitación varía entre 800 a 1200 mm, con un porcentaje de lluvia invernal menor a 5% (García, 1973). La vegetación característica de la zona es la selva baja caducifolia y selva mediana caducifolia (Rzedowski, 1978).

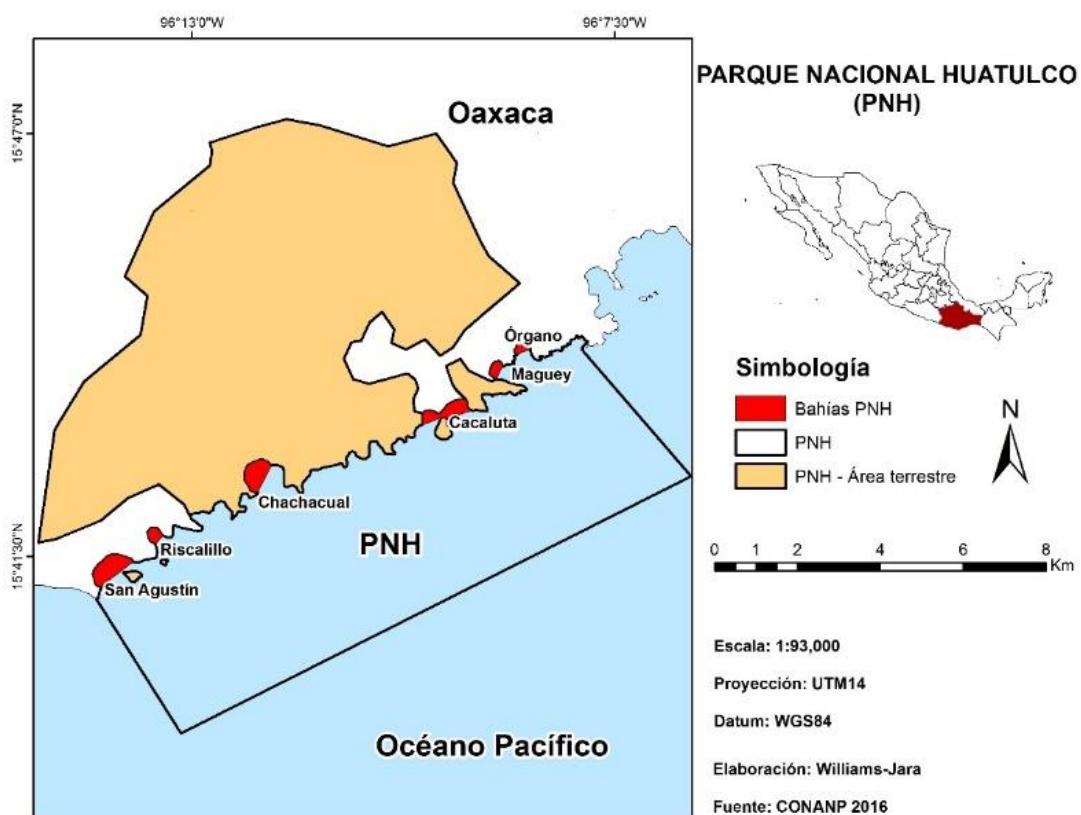


Figura 1. Polígono del Parque Nacional Huatulco, Oaxaca y bahías del área de estudio.

La dinámica del Golfo de Tehuantepec es afectada por la variación en el patrón de circulación en el Pacífico Oriental Tropical, el cual está influenciado por los desplazamientos latitudinales del sistema de Vientos Alisios y de la convergencia intertropical (Tapia-García, 1998). Las corrientes que influyen en la dinámica oceanográfica del área de estudio son, de enero a junio, la corriente Norecuatorial, de

marzo a junio, la Corriente de California, de junio a diciembre, la corriente Costera de Costa Rica, procedente de Panamá, que cambia de nombre a Corriente Costera Mexicana y abarca desde el golfo de Tehuantepec hasta la entrada al golfo de California (De la Lanza-Espino, 2001; Kessler, 2006), se intensifica por la influencia de ondas ecuatoriales y costeras de Kelvin, así como durante El Niño (Lavín, 2006). De noviembre a abril se presentan vientos perpendiculares a la costa, que atraviesan del Atlántico al Pacífico. Estos vientos, también conocidos como vientos Tehuanos, generan remolinos a mesoescala y enfriamiento cerca de la costa (Trasviña *et al.* 1995).

## 7. Datos y métodos

### 7.1 Toma de fotografías

Las fotografías aéreas que se utilizaron en el presente trabajo son parte del proyecto Caracterización del paisaje sumergido de “Bahías del Parque Nacional Huatulco y su aporte de gastos máximos de la cuenca río Copalita” (UMAR) CUP 2IE1501. Éstas fueron obtenidas de abril a noviembre del 2015 mediante VANT en seis bahías que están contenidas en el polígono del parque. El proceso a través del cual se obtuvieron las ortofotos, que son el punto de partida para el primer objetivo, fue el siguiente:

- a) Las fotografías aéreas se tomaron con un VANT modelo Phantom 2 el cual cuenta con un dispositivo GPS (error +/- 1 metro), un controlador de vuelo NAZA V2, equipado con una cámara digital GoPro Hero 3+ Black. El recorrido del VANT en el área de estudio se realizó en “S” ya que este tipo de trayectoria garantiza la mayor sobreposición en las imágenes tanto Norte-Sur como Este-Oeste, (N-S/E-O) (Ramírez-Chávez *et al.* 2013). Para esta sobreposición se ajustó la velocidad de vuelo del VANT a 6 m/s y se programó un intervalo de tiempo de 5 s y altura de vuelo de 80 m, con el fin de garantizar una superposición del 70% (N-S) y 40% (E-O). Además, se sincronizó el GPS y la

cámara para que la fotografía coincidiera con la toma del dato geográfico (Aguilera-Arias *et al.* 2015).

- b) Las fotografías fueron tomadas durante la mañana (7:00 – 8:00 h) para minimizar el efecto del brillo en el trabajo fotogramétrico, así como en marea baja para tener mejor representación del fondo en las fotografías, y vientos menores a 20 km/h. Los vuelos se realizaron mediante la aplicación Ground Station de la empresa DJI.
- c) Adicionalmente, se registraron puntos de verificación en campo (sitios de entrenamiento). Estos son puntos fijos de ubicación y cobertura conocida que se utilizaron como referencia espacial y medio de verificación para la técnica de máxima probabilidad de clasificación supervisada (Apartado 7.3).

## 7.2 Generación de ortofotos

Una vez en el laboratorio, se descargaron las fotografías del VANT y los datos del GPS. Se descartaron las fotografías, borrosas o que no estuvieran encuadradas. A las fotografías seleccionadas, se les aplicó un proceso fotogramétrico con el software Pix4Dmapper Pro, mediante la técnica de estructura de movimiento para obtener una nube de puntos. A partir de ésta, se realizó la restitución fotogramétrica para descartar los puntos que salían de la nube. Por último, se usó el algoritmo de “promedios ponderados”, el cual selecciona los pixeles que se consideran están al alcance de la cámara de acuerdo con el peso que se les ha asignado. El peso que se asigna a cada pixel está en función de la posición de la cámara y la distancia entre el pixel evaluado y el centro de la imagen (PIX4D, 2017). De esta manera, se generaron las ortofotos de las bahías del área de estudio.

## 7.3 Clasificación supervisada

Para obtener los sitios de entrenamiento en campo se utilizó la técnica de “check-point” (Green *et al.*, 2000), la cual consiste en identificar los elementos dominantes del paisaje mediante buceo autónomo o esnórquel. Cada punto fue referido con un GPS (Garmin modelo 60csx), seleccionando sitios representativos de cada tipo de sustrato.

Los sitios fueron seleccionados con base en la ubicación de los elementos visualmente dominantes en el paisaje (Hill & Wilkinson, 2004). Sólo se seleccionaron aquellos cuya cobertura del sustrato dominante fuera mayor a 75% (Fig. 2). Una vez en el laboratorio se descargaron los datos, se ordenaron en una hoja de cálculo la cual incluía la latitud, longitud, clave de la clase y nombre de la clase, se guardó en formato delimitado por comas (.csv) y se importaron en el software TerrSet para su posterior análisis espacial y procesamiento de imágenes.

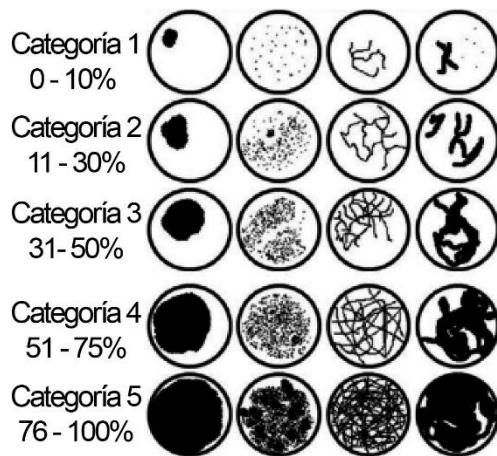


Figura 2. Estimación visual del porcentaje de cobertura aparente (Hill & Wilkinson, 2004). Tomado de Aguilera-Arias (2012).

Con la finalidad de descartar los valores digitales de la región terrestre de la ortofoto, se recortó el área de interés (área marina) de cada una de las bahías. A estas regiones se les aplicó el algoritmo MAXLIKE (máxima probabilidad) de TerrSet, para clasificar los pixeles de acuerdo con el tipo de cobertura. Esta clasificación se realizó con base en el número digital de las bandas roja, verde y azul (RGB) correspondiente de cada elemento del paisaje y los sitios de entrenamiento (áreas donde existen “hàbitats o coberturas” conocidas), que fueron generados a partir de los datos de campo.

El algoritmo MAXLIKE se basa en la teoría de la probabilidad Bayesiana y representa la intercorrelación entre las bandas o segmentos del espectro electromagnético de la imagen (Eastman, 2012). Al usar la información de un grupo de sitios de entrenamiento, MAXLIKE emplea la media y los datos de varianza/covarianza de las

firmas espectrales para estimar la probabilidad de que un pixel pertenezca a cada clase. Al incorporar información acerca de la covarianza entre bandas, así como también su varianza inherente, MAXLIKE produce lo que puede ser conceptualizado como una zona elíptica de caracterización de la firmapectral. Calcula la probabilidad posterior de pertenencia a cada clase, donde la probabilidad es más alta en la posición de la media de la clase, y disminuye en un patrón elíptico alejándose de la media (Eastman, 2012).



Figura 3. Ortofoto de la Bahía San Agustín. Los puntos representan los sitios de entrenamiento.

### 7.3.1 Reclasificación

Una vez clasificadas las imágenes, se convirtieron a formato *shapefile*, se exportó al software QGIS 2.14 y se disminuyó el efecto de polígonos dispersos para depurar los datos, fusionando polígonos continuos con la misma clase. Con ello se obtiene una representación más general (Pucha-Cofrep *et al.*, 2017). Posteriormente, se realizó una reclasificación e interpretación visual mediante la edición del *shapefile*, es decir, se cambió el tipo de clase de algunos polígonos que fueron mal clasificados, ya sea por efecto de luz, espuma de la rompiembre de las olas. A partir de las imágenes reclasificadas se generaron los mapas temáticos de las bahías.

### 7.3.2 Estimación del error en la clasificación

Se realizó la evaluación de la precisión de clasificación en las imágenes finales. La cual consiste en comparar los sitios georreferenciados en campo con la imagen clasificada. Con esto se evalúo la relación entre las categorías cartografiadas y los valores verdaderos. Se utilizó el módulo ERRMAT (TerrSet), el cual, a partir de una matriz de confusión (o matriz de errores) realiza una evaluación de la precisión (Eastman, 2016) tanto a nivel área como para cada tipo de cobertura (coral, roca, arena).

La matriz de errores resultante permite identificar los tipos de coberturas en las que los errores son mayores a los deseados, así como obtener información acerca de qué tipo de cobertura están siendo incluidas por error en una clase en particular (error de comisión) y aquellas que están siendo excluidas por error (error de omisión) de esa clase. Finalmente, a partir de la matriz de errores de los datos, se generó el índice de Concordancia Kappa por categoría e intervalos de confianza seleccionados (Eastman, 2012).

### 7.4 Batimetría

Los datos batimétricos se obtuvieron utilizando un ecosonda Garmin 431s. El equipo fue instalado en una lancha, programado para registrar datos cada dos segundos y el transductor se colocó a 50 cm de profundidad (Fig. 4). Posteriormente, se realizaron recorridos en forma de “S” (Fig. 5) para cubrir el área que comprende cada una de las bahías. Las salidas al campo fueron programadas generalmente durante la marea alta, de tal manera que fuera posible pasar más cerca de las zonas arrecifales.

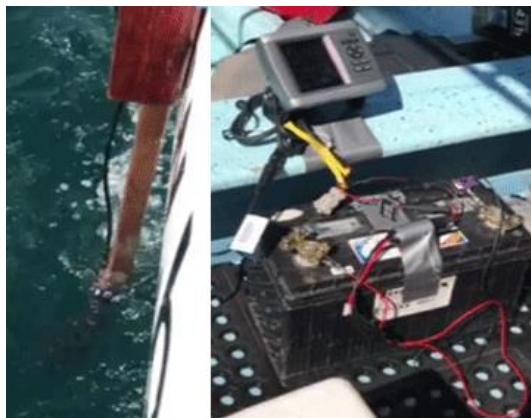


Figura 4. Instalación de la ecosonda. A la derecha se observa la instalación de la consola, a la izquierda, la del transductor.

Los datos de la ecosonda se importaron con el software HomePort y se exportaron en formato .csv. Se aplicó la corrección por marea, utilizando una rutina programada en Matlab, con base en las predicciones de marea calculada mediante el programa MARV1.0 del CISESE (<http://predmar.cicese.mx/>). Adicionalmente, se realizó el ajuste por la profundidad del sensor. Los datos batimétricos rectificados se convirtieron a formato *shapefile* mediante QGIS 2.14, para generar el modelo digital de elevación (MDE) y las isobatas. Se calcularon los estadísticos de mínimo, máximo, promedio y moda por bahía, así como para las áreas donde se distribuye el coral.

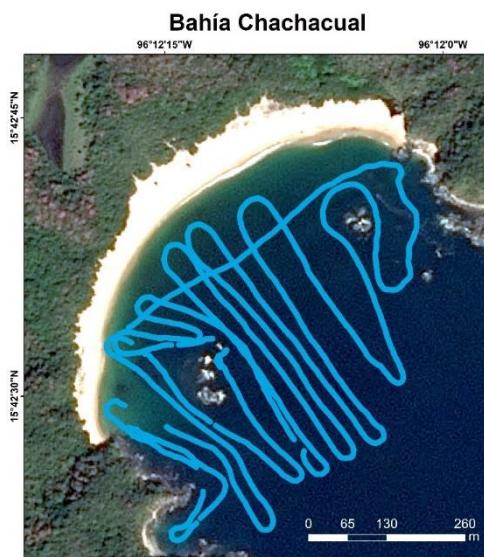


Figura 5. Trayectoria del levantamiento batimétricos en Bahía Chachacual (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

Adicionalmente, a partir de la Carta Náutica de Bahías de Huatulco (Secretaría de Marina, 1998), se obtuvieron los datos batimétricos para la región marina del PNH, generando un archivo de puntos en formato vectorial con los valores de profundidad, así como el MDE y las isobatas (QGIS 2.14).

## 7.5 Métricas del paisaje

El análisis de métricas del paisaje o patrones espaciales se llevó a cabo mediante el programa FRAGSTATS v4.2.1. Este cuantifica la heterogeneidad espacial del paisaje representado en un mapa categórico, en el que se define y escala el paisaje en términos de contenido temático y resolución espacial (McGarigal & Ene, 2013). Las métricas del paisaje cuantifican las características de los parches, clases de parches y el paisaje, como lo son, la superficie, forma, número, disposición, proximidad y área (Vila *et al.*, 2006; Badii & Landeros, 2007). Dentro de estas métricas existen dos categorías, las que describen las características referidas a la variedad y abundancia (composición) de los parches dentro del paisaje, y aquellas que se relacionan con el arreglo específico (configuración) de los elementos espaciales de cada clase o de todo el paisaje (McGarigal & Marks, 1995).

Una vez definida la resolución espacial de los archivos categóricos tipo *raster* (6 cm), se crearon los descriptores de las clases en un archivo de texto (Fig. 6). Ambos se importaron a FRAGSTATS, donde las bahías fueron evaluadas de acuerdo con el criterio de ocho celdas (McGarigal & Marks, 1995). Las métricas analizadas fueron referidas a la superficie, forma, número, disposición, proximidad, y área (Tabla 1).

Descriptores			
ID	Name	Enabled	IsBackground
0	fondo	false	true
1	coral	true	false
2	roca	true	false
3	arena	true	false

Figura 6. Descriptores de las clases. Donde ID se refiere a la clase, Name al nombre de la clase, Enabled habilita las clases que se van a analizar e IsBackground define la clase que corresponde al fondo.

Tabla 1. Métricas del paisaje utilizadas para la caracterización (basado en McGarigal & Marks, 1995).

	<b>Índice</b>	<b>Nivel paisaje</b>	<b>Nivel Clase</b>	<b>Nivel Parche</b>
Índices de Área	Área	TA	CA	Área
	Radio de giro		GYRATE	
	Cantidad de parches		NP	
	Parche máximo		LPI	
Forma	Porcentaje del paisaje		PLAND	
	Índices de forma		SHAPE_MN	SHAPE
			PAFRAC_MN	PAFRAC
Aislamiento/ proximidad	Distancia euclíadiana al vecino más cercano		PARA_MN	PARA
	Índice de agrupamiento		ENN_MN	ENN
	Índice de cohesión		CLUMPY	
	Índice de agregación		COHESION	
			IA	

A continuación, se describen las métricas utilizadas:

**Área total (TA):** extensión total del paisaje en hectáreas.

$$TA = \frac{A}{10,000}$$

Donde:

A = área del paisaje ( $m^2$ ).

**Área de la clase (CA):** medida de la composición del paisaje y se determina mediante la suma de los parches de la clase.

$$CA_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \left( \frac{1}{10,000} \right)$$

Donde:

$a_{ij}$  = área ( $m^2$ ) del parche j de la clase i

**Porcentaje de la clase en el paisaje (PLAND):** medida de la composición del paisaje, referida a la proporción del paisaje que ocupa una determinada clase.

$$PLAND_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} (100)$$

Donde:

$a_{ij}$  = área ( $m^2$ ) del parche j de la clase i

A = área total del paisaje ( $m^2$ )

**Índice del parche más grande en la clase (LPI):** porcentaje del paisaje que ocupa el parche más grande de la clase.

$$LPI_i = \frac{\max_{j=1}^n (a_{ij})}{A} (100)$$

Donde:

$a_{ij}$  = área ( $m^2$ ) del parche j de la clase i

A = área total del paisaje ( $m^2$ )

**Número de parches (NP):** medida de la subdivisión o fragmentación de la extensión del paisaje o de un cierto tipo de parche.

$$NP_i = n_i$$

Donde:

$n_i$  = número de parches de la clase i en el paisaje

**Radio de giro (GYRATE):** medida de la extensión del parche (que tan largo es), corresponde a la distancia media entre cada celda en el parche y el centroide del parche. Es 0 cuando el parche consiste en una sola celda y aumenta sin límite a medida que el parche aumenta de extensión.

$$GYRATE_i = \sum_{r=1}^z \frac{h_{ijr}}{Z}$$

Donde:

$h_{ijr}$  = distancia (m) entre celdas  $ijr$  (localizada dentro del parche  $j$  de la clase  $i$ ) y el centroide del parche  $j$  de la clase  $i$  (la ubicación promedio).

$Z_{ij}$  = número de celdas en el parche  $j$  de la clase  $i$

**Índice de forma de la clase (SHAPE\_MN):** medida de la complejidad media de la clase a partir de la relación área-perímetro de la sumatoria de los parches de esa clase, los cuales son comparados con una forma estándar (cuadrado). Cuanto más se aproxime el valor a 1, la forma es más regular (cuadrado), si el valor es mayor a 1 indica que el parche es más irregular.

$$SHAPE_i = \sum_{j=1}^n \frac{0.25 p_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}}$$

Donde:

0.25 = constante para el estándar cuadrado (ráster)

$p_{ij}$  = perímetro (m) de un tipo de parche  $j$  de la clase  $i$

$a_{ij}$  = área ( $m^2$ ) de un tipo de parche  $j$  de la clase  $i$

**Dimensión fractal del área perimetral (PAFRAC):** refleja la complejidad de la forma de los parches de una clase dada. Cuando se aproxima a 1 indica formas con perímetros muy simples (como cuadrados) y formas con perímetros de contornos muy complejos cuando se aproxima a 2.

$$PAFRAC_i = \frac{\left[ n_i \sum_{j=1}^n (\ln p_{ij} \cdot \ln a_{ij}) - \left[ \left( \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right) \left( \sum_{j=1}^n \ln a_{ij} \right) \right] \right]^2}{\left( n_i \sum_{j=1}^n \ln p_{ij}^2 \right) - \left( \sum_{j=1}^n \ln p_{ij} \right)^2}$$

Donde:

$a_{ij}$  = área ( $m^2$ ) del parche  $j$  de la clase  $i$

$p_{ij}$  = perímetro (m) del parche  $j$  de la clase  $i$

$n_i$  = número de parches en el paisaje de la clase i

**Perímetro-área (PARA):** relación entre área y perímetro, es una medida de la complejidad de la forma, sin la estandarización a una forma euclíadiana simple (cuadrado).

$$PARA_i = \sum_{j=1}^n \frac{p_{ij}}{a_{ij}}$$

Donde:

$p_{ij}$  = perímetro (m) del parche j de la clase i

$a_{ij}$  = área ( $m^2$ ) del parche j de la clase i

**Índice de agrupación (CLUMPY):** mide el grado en el cuál una clase esta agregada, se basa en una matriz de adyacencia. Muestra la frecuencia a la cual, diferentes pares de fragmentos de la misma clase aparecen juntos unos de otros en el mapa.

$$Given G_i = \left( \frac{g_{ii}}{(\sum_{k=1}^m g_{ik}) - \min_{ei}} \right)$$

$$CLUMPY_i = \begin{cases} \frac{G_i - P_i}{P_i} & \text{for } G_i < P_i \text{ y } P_i < 0.5, \\ \text{else } \frac{G_i - P_i}{1 - P_i} & \end{cases}$$

Donde:

$g_{ii}$  = número de adyacencias similares entre píxeles de fragmentos de la clase i

$g_{ik}$  = número de adyacencias entre píxeles de fragmentos de la clase i y k

$\min_{ei}$  = perímetro mínimo (en número de celdas) del fragmento de la clase i para una clase máximamente agrupada

$P_i$  = proporción del paisaje ocupado por el fragmento de la clase i

\* La fórmula es contingente a partir de  $G_i$  y  $P_i$  debido a que el valor mínimo de  $G_i$  tiene dos formas que dependen de  $P_i$ . Específicamente, cuando  $P_i \geq 0.5$ ,  $G_i = 2P_i - 1$ . Dada cualquier  $P_i$ , CLUMPY equivale a -1 cuando el tipo de fragmento de interés está

disgregado al máximo; equivale a 0, cuando está distribuido al azar, y se acerca a 1, cuando está agregado al máximo.

**Índice de cohesión (COHESION):** mide la conexión física de la clase de parche correspondiente. Se aproxima a 0 cuando la proporción del paisaje comprendido por la clase focal disminuye, se subdivide y se conecta menos físicamente. Aumenta a medida que el tipo de parche se agrega o agrupa en su distribución.

$$\text{COHESION}_i = \left[ 1 - \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij}}{\sum_{j=1}^n p_{ij} \sqrt{a_{ij}}} \right] \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{Z}} \right]^{-1} \quad (100)$$

Donde:

$p_{ij}$  = perímetro del parche  $j$  de la clase  $i$  en términos del número de celdas borde

$a_{ij}$  = área del parche  $j$  de la clase  $i$  en términos del número de celdas

$Z$  = número total de celdas en el paisaje

**Índice de agregación (AI):** se calcula a partir de una matriz de adyacencias, que muestra la frecuencia con la que los diferentes pares de tipos de parche (incluyendo las adyacencias entre el mismo tipo de parche) aparecen lado a lado en el mapa. Solo toma en cuenta las adyacencias de la clase focal, no con otros tipos de parche. AI es igual a 0 cuando el tipo de parche focal esta desagregado al máximo y aumenta a medida que el parche focal se agrupa cada vez más.

$$AI_i = \left[ \frac{g_{ii}}{\max \rightarrow g_{ii}} \right] \quad (100)$$

Donde:

$g_{ii}$  = número de adyacencias entre píxeles de parches de la clase  $i$ , basado en el método de conteo único

$\max \rightarrow g_{ii}$  = máximo número de adyacencias similares entre píxeles de parches de la clase  $i$ , basado en el método de conteo único

**Distancia al vecino más cercano (ENN):** proporciona una medida de dispersión de los parches cuantificando el aislamiento entre parches de una misma clase. La

distancia euclíadiana es definida como la línea de distancia más corta entre el parche focal y los parches vecinos de la misma clase.

$$ENN_i = h_{ij}$$

Donde:

$h_{ij}$  = distancia (m) del parche j de la clase i más cercano, calculado de centroide a centroide.

### 7.5.1 Estadísticos

Con la finalidad de determinar la correlación entre las métricas de AREA, SHAPE, FRAC, ENN, se realizó un análisis de correlación de Spearman mediante el programa MATLAB.

### 7.6. Índice de proximidad

Para determinar el grado de exposición de las bahías del PNH se realizó un análisis de proximidad, el cual, consistió en evaluar la distancia desde el centro de cada píxel al centro del píxel más cercano identificado como un píxel objetivo (QGIS, 2016). Los píxeles objetivo fueron generados con base en un *shapefile* de puntos de la línea de costa y las islas e islotes presentes en el área de estudio. A partir de este se obtuvo el archivo *ráster* de proximidad mediante QGIS 2.14. Posteriormente, mediante una rutina en MATLAB, se estimaron los estadísticos de proximidad promedio, moda, mínimo y máximo para cada una de las bahías, así como para la asociación la superficie de coral.

Adicionalmente, se generaron los histogramas de proximidad para cada bahía, y a partir de estos se desarrolló un índice de proximidad:

$$Ip_i = \sum_{i=1}^N C_{N-i} \cdot f_i$$

Donde:

N = número de clases del histograma

C<sub>N-i</sub> = ponderación

f<sub>i</sub> = número de píxeles de la clase i

El intervalo de la clase de los histogramas es de 10 m. El peso asignado a cada clase esta dado por el número de clase en orden inverso (para darle más peso a las clases más cercanas), multiplicado por la frecuencia de la clase.

## 8. Resultados

### 8.1 Procesamiento de fotografías aérea

A partir del proceso fotogramétrico, se obtuvieron seis ortofotos de las bahías del PNH (Figura 7 y anexo 1) con una resolución de entre 4.5 y 6.6 cm, las cuales se generaron con entre 123 y 546 fotografías (Tabla 2). Las ortofotos se representaron en coordenadas UTM (datum WGS84, zona 14).

Tabla 2. Resolución y número de ortofotos generadas para cada bahía a partir del proceso fotogramétrico.

Bahía	Resolución espacial	Número de fotos	Fecha de toma
San Agustín	6.6 cm	216	06/2015
Chachacual	5.8 cm	233	07/2015
Riscalillo	5.5 cm	123	06/2015
Órgano	5.1 cm	190	07/2015
Maguey	6.2 cm	137	07/2015
Cacaluta	4.5 cm	546	11/2015

En la figura 7 se muestran los mapas generados a partir de las imágenes de VANT. En las zonas no cubiertas por el VANT se observa, a manera de fondo, una imagen de satélite (SPOT 5, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017). Las áreas irregulares de la cobertura de la ortofoto representan zonas bordes

o donde no se obtuvieron suficientes puntos característicos como para unir las imágenes durante el proceso fotogramétrico.



Figura 7. Ortofotos de las bahías del PNH. (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## 8.2 Clasificación supervisada y reclasificación

Se elaboraron seis mapas temáticos (Fig. 8 y anexo 2) con la cobertura de los tipos de sustrato más representativos y visualmente dominantes. Los tipos de fondo más representativos fueron coral, roca y arena. Los mapas fueron evaluados con entre 23 y 97 datos de referencia y se obtuvo en promedio una precisión de 84% (Anexo 2), así como un índice kappa promedio de 0.74 (Tabla 3). La bahía con el valor más bajo de precisión e índice Kappa fue Rascalillo, mientras que la que presentó los mayores valores fue Maguey.

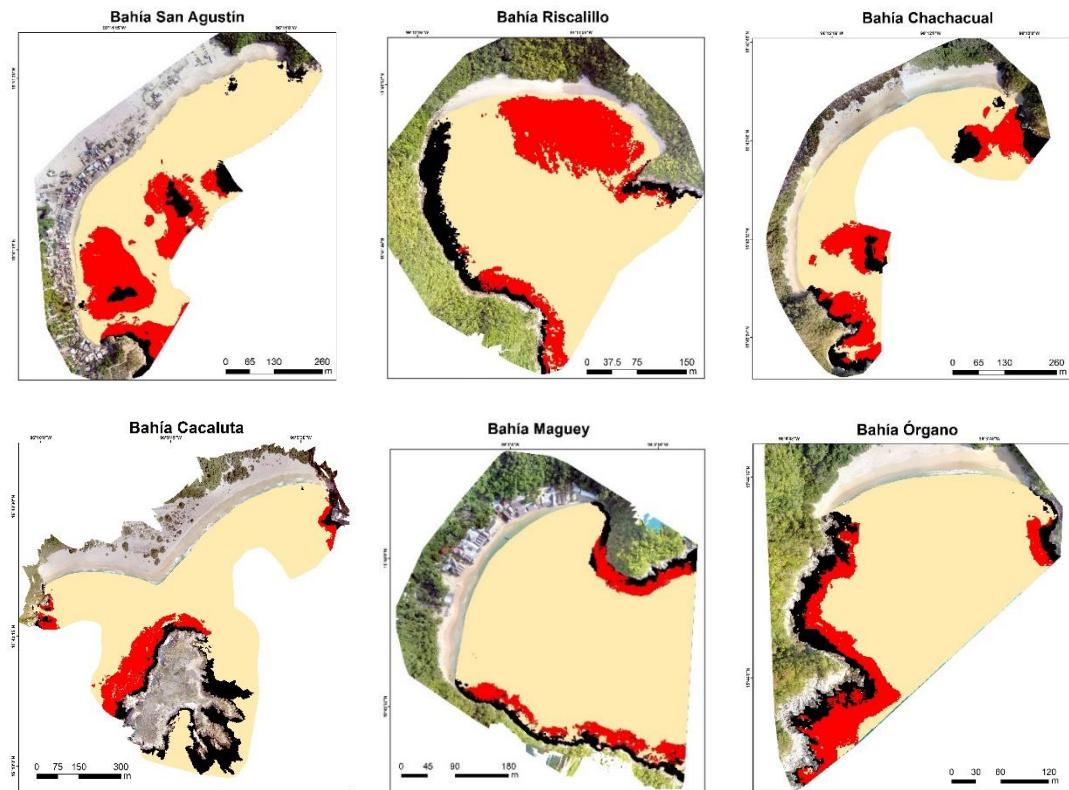


Figura 8. Mapas temáticos de las bahías del PNH. El color beige representa el sustrato arenoso, el rojo el coralino y el negro el rocoso.

Tabla 3. Muestra la precisión de los mapas temáticos y el índice Kappa de las bahías estudiadas.

	Cacaluta	Chachacual	Maguey	Órgano	Riscalillo	San Agustín
Precisión (%)	84.38	83.16	87.18	86.96	79.41	83.51
I. Kappa	0.75	0.73	0.80	0.78	0.67	0.74
Datos de referencia	32	95	39	23	68	97

### 8.3 Batimetría

Como resultado de los levantamientos batimétricos y la obtención de las isobatas, se generaron mapas, en los cuales se asoció la profundidad con la cobertura de coral (Fig. 9 y anexo 3). La profundidad máxima dentro del PNH es de 519 m (Fig. 10). Para el caso en particular de las bahías, la profundidad máxima fue de 16 m y en promedio

6.4 m. La profundidad más frecuente (moda) en las bahías varió entre 1 y 8 m. El coral se distribuye desde profundidades menores a 1 hasta 14 m, y en promedio a 4.43 m, encontrándose con mayor frecuencia entre 1 y 4 m.

Tabla 4. Valores de profundidad (en metros) por bahía (b) y asociada a la cobertura de coral (c).

Profundidad (m)	Bahía					
	San Agustín	Riscalillo	Chachacual	Cacaluta	Maguey	Órgano
<b>Máxima (b)</b>	12.96	12.72	14.73	16	11.37	11.35
<b>Promedio (b)</b>	7.11	5.59	6.37	7.7	5.34	6.29
<b>Moda (b)</b>	8	1	4	6	8	8
<b>Máxima (c)</b>	10.34	8.00	9.70	14.15	7.87	10.83
<b>Promedio (c)</b>	4.17	2.12	4.55	6.37	2.70	6.69
<b>Moda (c)</b>	3	1	4	4	1	4

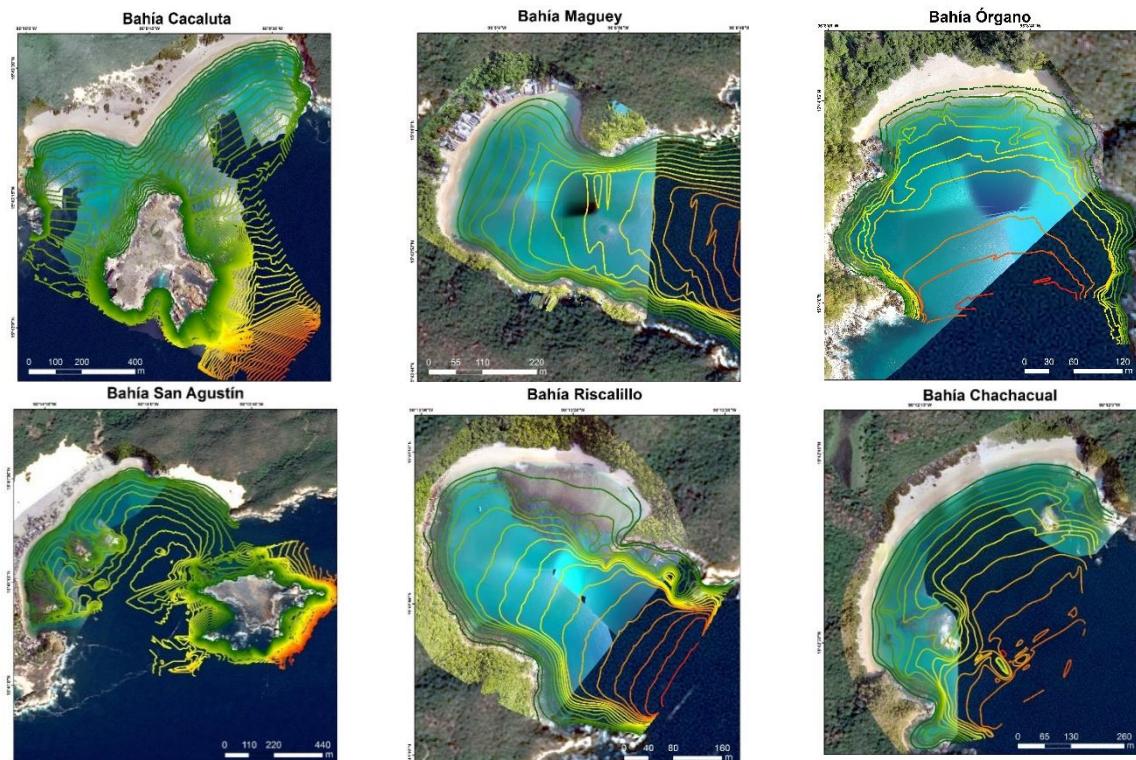


Figura 9. Mapas batimétricos de las bahías del PNH. La escala de las isobatas va desde 0 (verde oscuro) hasta 58 m (rojo). El intervalo entre líneas es de 1 m. (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

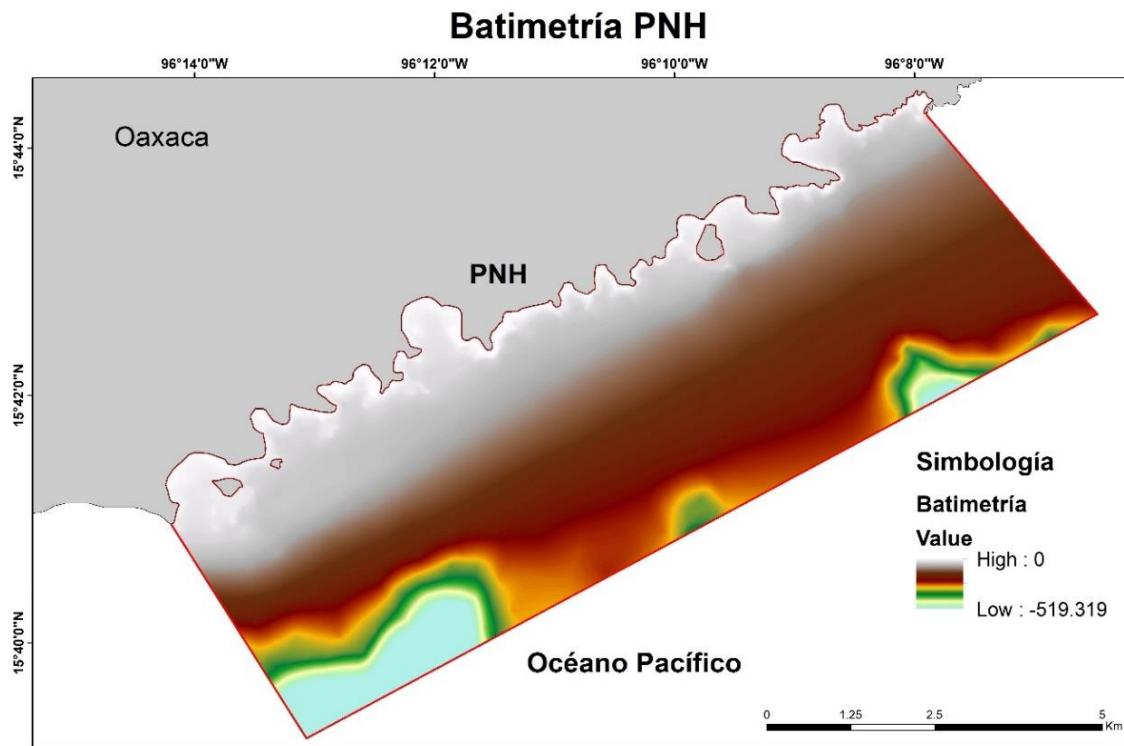


Figura 10. Mapa batimétrico del PNH, generado a partir de la Carta Náutica de la Secretaría de Marina (1998).

#### 8.4 Métricas de Paisaje

Se calcularon las métricas de forma (SHAPE, PAFRAC, PARA, GYRATE), número de parches (NP), área (TA, CA, PLAND, LPI), cohesión (COHESION), agregación (AI), división (DIVISION), agrupamiento (CLUMPY), distancia al vecino más cercano (ENN). A partir de estos datos (Tabla 5) se realizaron gráficos comparativos.

Tabla 5. Métricas del paisaje por bahía, el sufijo A, C y R hacen referencia a arena, coral y roca, respectivamente.

Métricas	Bahía					
	Cacaluta	Chachacual	Maguey	Órgano	Riscalillo	San Agustín
<b>Área</b>						
TA (ha)	30.11	13.99	12.09	6.47	9.93	21.97
CA_A (ha)	24.88	9.12	10.32	4.83	6.67	14.72
CA_C (ha)	3.90	3.20	1.02	0.94	2.31	5.80
CA_R (ha)	1.32	1.67	0.75	0.70	0.95	1.45
PLAND_A	0.83	0.65	0.85	0.75	0.67	0.67
PLAND_C	0.13	0.23	0.08	0.15	0.23	0.26
PLAND_R	0.04	0.12	0.06	0.11	0.10	0.07
LPI_C	0.11	0.08	0.03	0.13	0.18	0.14
NP_C	393.00	108.00	285.00	166.00	360.00	196.00
<b>Forma</b>						
GYRATE_MN_C	0.79	2.06	0.85	0.76	0.60	1.62
GYRATE_SD_C	6.13	7.70	3.80	5.91	4.29	8.03
GYRATE_CV_C	776.10	373.91	446.58	777.54	715.00	494.81
SHAPE_MN_C	1.86	1.88	1.98	1.68	1.84	1.88
SHAPE_SD_C	1.24	1.21	0.97	1.30	1.30	1.01
SHAPE_CV_C	66.42	64.38	48.93	77.29	70.50	53.73
PAFRAC_C	1.33	1.24	1.33	1.33	1.33	1.25
PARA_MN_C	227240.42	138426.35	126894.36	263776.45	273752.99	135866.29
PARA_SD_C	180784.21	92218.44	55413.42	191518.40	207640.39	113692.44
PARA_CV_C	79.56	66.62	43.67	72.61	75.85	83.68
<b>Aislamiento/ proximidad</b>						
CLUMPY_C	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
COHESION_C	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
AI_C	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	1.00
ENN_MN_C (m)	0.33	0.61	0.73	0.35	0.45	0.94
ENN_SD_C (m)	0.49	1.48	1.80	0.72	0.97	1.94
ENN_CV_C (m)	147.33	243.72	247.41	208.50	214.69	206.44

La bahía con mayor área fue Cacaluta (30.1 ha), mientras que la de menor área fue Órgano (6.5 ha). En el caso del área de coral, la bahía que presentó la mayor cobertura fue San Agustín (5.8 ha), seguida de Cacaluta (3.9 ha), Chachacual (3.2 ha), Riscalillo (2.3 ha), Maguey (1 ha) y Órgano (0.9 ha) (Fig. 11).

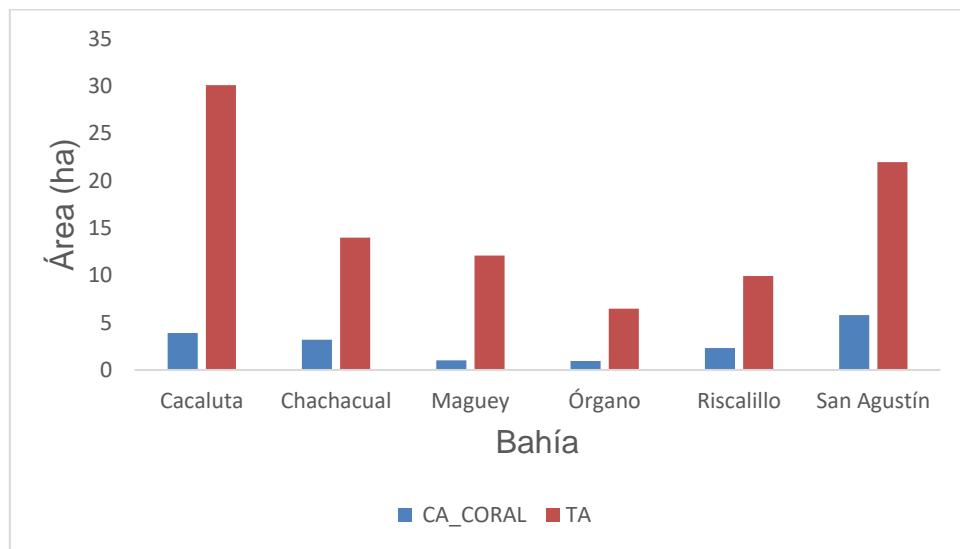


Figura 11. Comparación entre el área total (TA) de las bahías del PNH y su cobertura de coral, estimadas a partir de las ortofotos.

De acuerdo con los resultados de PLAND (porcentaje de cada clase en el paisaje), el sustrato matriz o más conspicuo, del área analizada en cada una de las bahías, fue la arena con entre 65.2 a 85.4%. El sustrato menos representativo fue la roca, con valores entre 4.4 y 11.9 %. La bahía que tuvo el mayor porcentaje de coral, con respecto al área analizada, fue San Agustín (26.4%), seguido de Riscalillo (23.3%), Chachacual (22.9%), Órgano (14.5%), Cacaluta (13%) y Maguey (8.4%) (Fig. 12).

Los parches de coral más grandes se observaron en las bahías Cacaluta (3.17 ha), San Agustín (2.97 ha) y Riscalillo (1.83 ha). Órgano y Maguey presentan parches de menor tamaño (0.84 y 0.38 ha, respectivamente). Por otro lado, el resultado de la métrica LPI indica que Riscalillo es la bahía que tiene el parche más grande respecto a la superficie total del paisaje (18.47%) y en menor proporción San Agustín (13.52%), Órgano (12.97%), Cacaluta (10.54%), Chachacual (7.58%) y Maguey (3.17%).

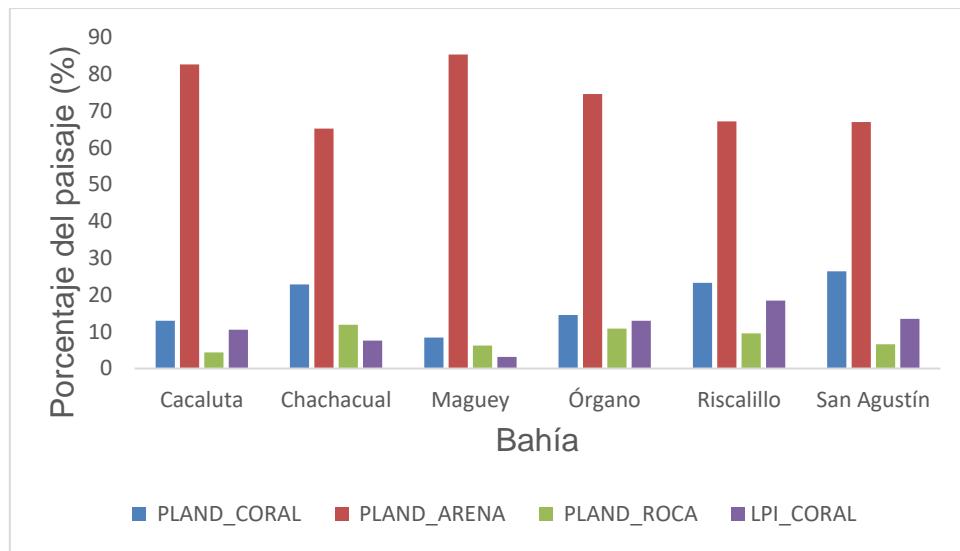


Figura 12. Comparación del porcentaje de cada tipo de sustrato en el paisaje (PLAND), así como el porcentaje del paisaje que ocupa el parche más grande de coral (LPI).

La métrica de NP (número de parches), para la clase corales, fue mayor para la bahía de Cacaluta (393), seguida por Riscalillo (360), Maguey (285), San Agustín (196), Órgano (166) y Chachacual (108) (Fig. 13).

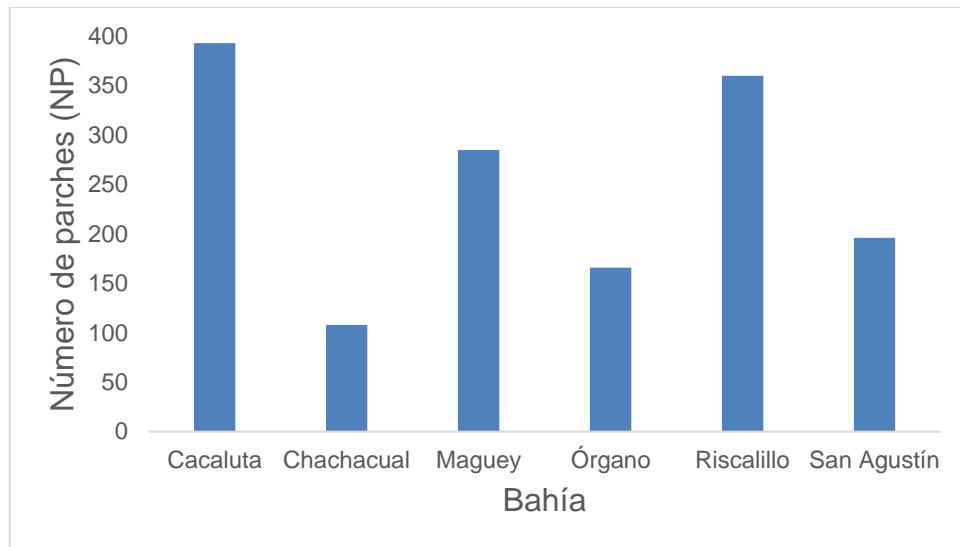


Figura 13. Número de parches de coral por bahía.

Las métricas PAFRAC y SHAPE\_MN indican que los parches presentan en promedio una forma regular. La bahía que presenta una mayor complejidad estructural, de

acuerdo con la métrica de PAFRAC, es Riscalillo (1.33), mientras que Chachacual es la de menor complejidad (1.24). Con respecto a la métrica de SHAPE\_MN, Maguey tuvo los valores más altos (1.9) y Órgano los más bajos (1.7) (Fig. 14).

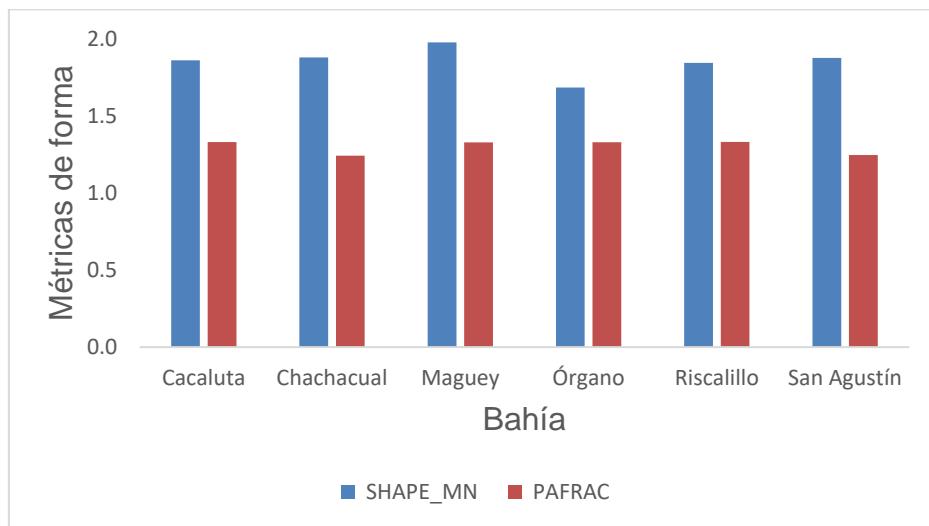


Figura 14. Métricas que indican la complejidad de la forma para la clase coral por bahía.

Los resultados muestran que la clase coral se encuentra agregada, es decir, que no se encuentra dispersa. Los índices de CLUMPY, COHESION y AGREGACION presentaron valores muy altos (cercaos al 100%) para todas las bahías (Fig. 15).

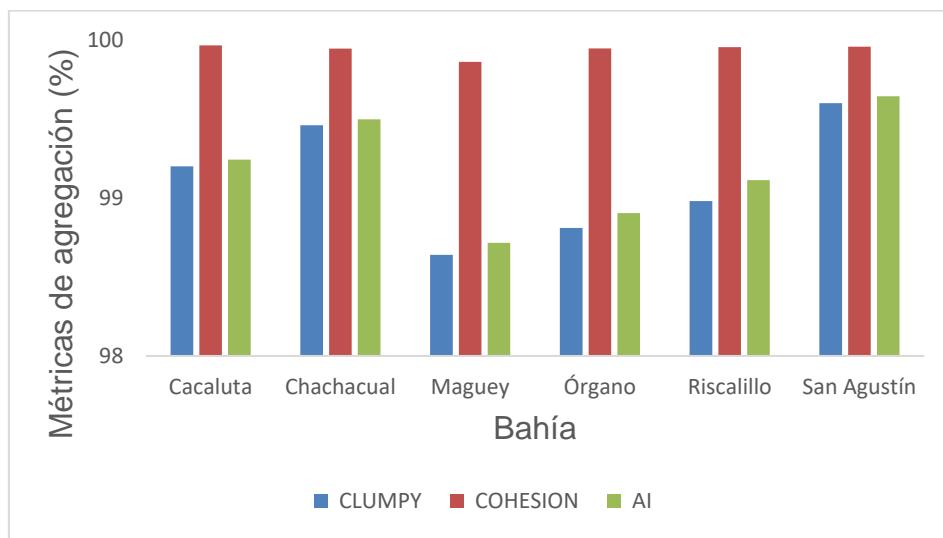


Figura 15. Comparación de los índices de agregación CLUMPY, CHOHESION y AI entre bahías.

#### 8.4.1. Estadísticos

Se analizó la correlación entre las variables de AREA, SHAPE, FRAC y ENN (Tabla 6). Para todos los casos la probabilidad de error (PVAL) es menor a 0.05, por lo tanto, se acepta  $H_0$ . La correlación entre las métrica AREA – SHAPE ( $R = 0.42$ ) y SHAPE – ENN ( $R = -0.43$ ) resultaron con los valores más altos. Entre mayor es el área, la forma (SHAPE) es más irregular, así como, mientras más aislados (ENN) están los fragmentos la forma es más regular.

Tabla 6. Correlación entre métricas (en todos los casos PVAL <0.05).

Variables	R – Spearman	Descripción
<b>AREA – SHAPE</b>	0.424105	SHAPE aumenta a medida que aumenta AREA
<b>AREA – FRAC</b>	0.243302	FRAC aumenta a medida que aumenta AREA
<b>AREA – ENN</b>	-0.1392	ENN disminuye a medida que aumenta AREA
<b>SHAPE – FRAC</b>	0.159228	FRAC aumenta a medida que aumenta SHAPE
<b>SHAPE – ENN</b>	-0.437470	ENN disminuye a medida que aumenta SHAPE
<b>FRAC – ENN</b>	0.23	ENN aumenta a medida que aumenta el FRAC

#### 8.5. Ráster de proximidad

Como resultado del análisis se generó un archivo *ráster* de proximidad entre la línea de costa, islas e islotes por bahía (Fig. 15). A partir de los estadísticos básicos, se determinó que la proximidad varía entre 0 y 290 m, con un valor promedio de 68.27 m (Fig. 17). Los valores más frecuentes de proximidad para San Agustín, Riscalillo y Cacaluta fueron de 2 m, mientras que para Chachacual, Maguey y Órgano de 1 m

(Tabla 7). El índice de proximidad indica que la bahía de Riscalillo es la más protegida y la bahía de Cacaluta es la menos protegida.

La evaluación de la proximidad respecto a la cobertura de coral muestra que éste se encuentra hasta un máximo de 135 m de la línea de costa, y la moda está en un rango de 15 a 38 m. Las bahías de Maguey y Órgano presentan una distribución espacial más cercana a la costa (0 a 56 m), en Riscalillo, Cacaluta, San Agustín y Chachacual el arrecife se distribuye a una distancia mayor a los 100 m.

Tabla 7. Valores de proximidad (en metros) por bahía (b) y asociada a la cobertura de coral (c)

Distancia (m)	Bahía					
	San Agustín	Riscalillo	Chachacual	Cacaluta	Maguey	Órgano
<b>Máximo (b)</b>	225.17	148	198.12	290.07	170.31	155.73
<b>Media (b)</b>	79.09	56.7	66.75	87.99	62.35	56.75
<b>Moda (b)</b>	2	2	1	2	1	1
<b>I. de proximidad</b>	23650654	4252737	13533702	38303584	6145516	4837909
<b>Máximo coral (c)</b>	135.06	118.22	107.34	123.43	45.12	56.13
<b>Media coral (c)</b>	39.28	39.60	38.52	46.91	15.55	19.70
<b>Moda coral (c)</b>	25	21	21	38	15	19

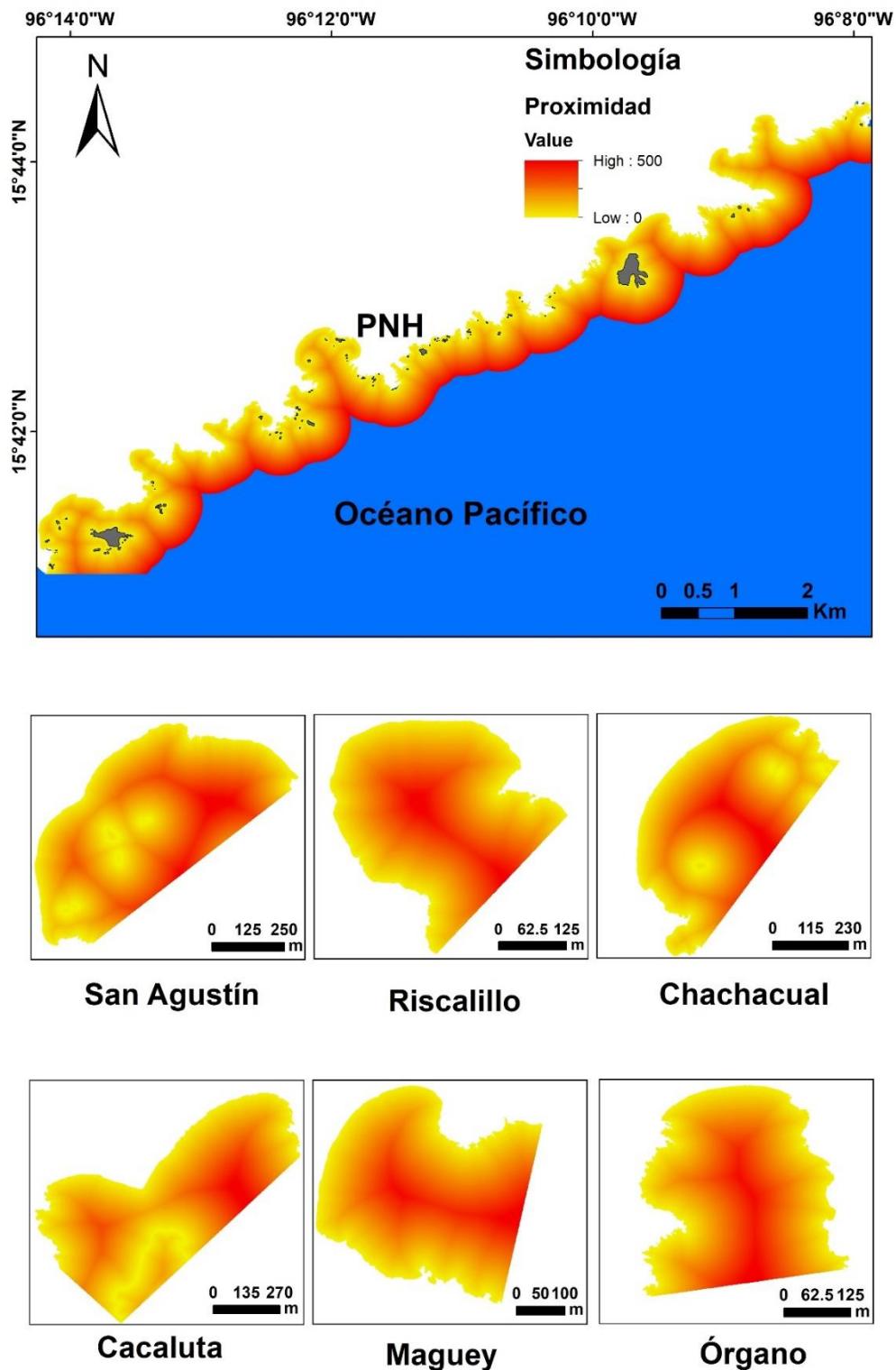


Figura 16. Mapa de distancias (en metros), donde el rojo corresponde a los sitios más alejados de la línea de costa y el amarillo a los más cercanos a esta.

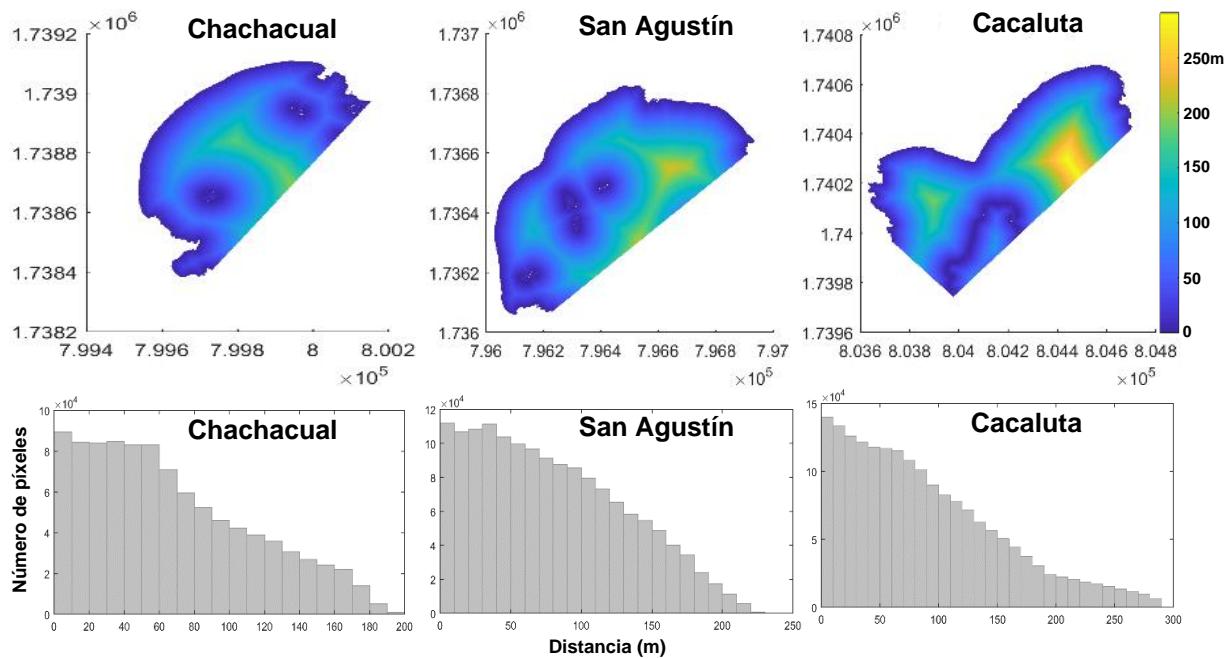
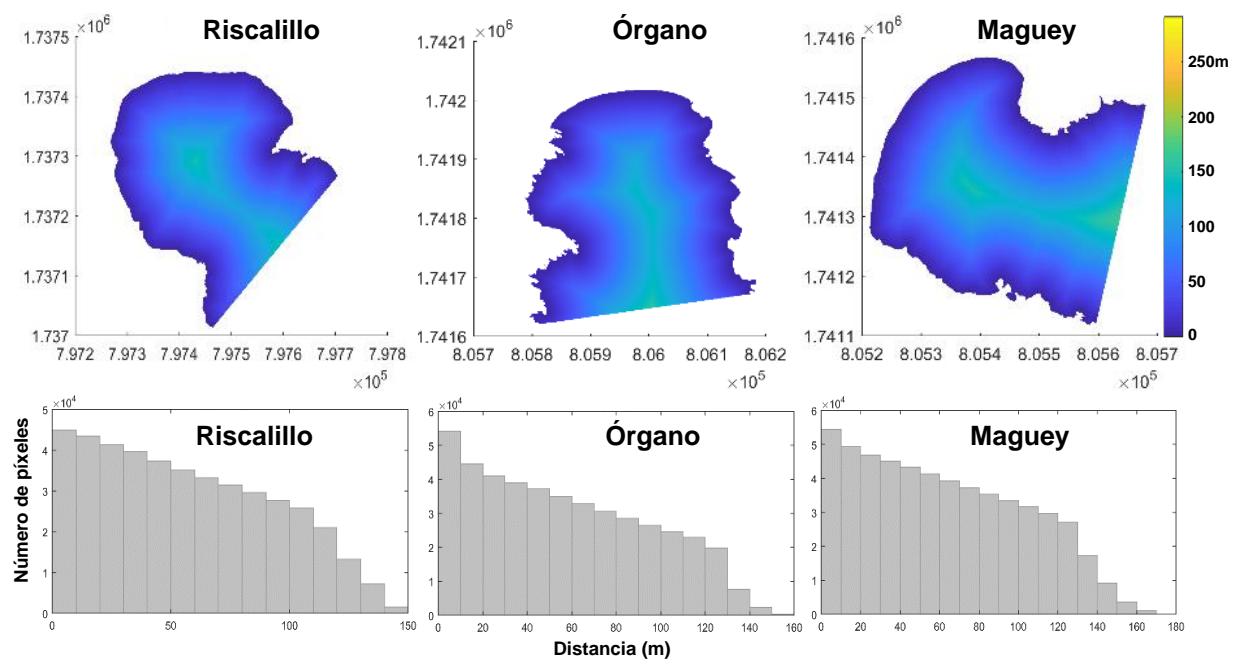


Figura 17. Histogramas de proximidad y mapas de distancias por bahía.

## 9. Discusión

### 9.1 Caracterización de la estructura espacial del paisaje sumergido

De acuerdo con los resultados, el paisaje sumergido del PNH está representado principalmente por tres tipos de sustratos: coral, arena y roca. Los sustratos coralinos dominantes pertenecen al género *Pocillopora*, el cual se distribuye de manera agregada y formando un borde con parches de gran tamaño (hasta de 3.17 ha), como en el caso de la bahía de Cacaluta. Consistentemente con lo reportado por Glynn y Leyte-Morales (1997) y López-Pérez *et al.* (2007), quienes mencionan que las formaciones coralinas del PNH se encuentran dentro de la clasificación de arrecifes bordeantes o de franja y están dominados por la especie *Pocillopora damicornis*.

Estudios previos realizados con técnicas tradicionales (transectos) reportan una superficie de coral para las bahías de Cacaluta, Chachacual, Maguey, Órgano, Riscalillo y San Agustín de 6.4, 3.2, 3.8, 1.5, 2.1 y 6.2 ha, respectivamente (Universidad del Mar, 2000). Sin embargo, en el presente estudio se reporta una superficie menor para Cacaluta, Maguey, Órgano y San Agustín (3.9, 1.02, 0.94, 5.8, respectivamente), igual en Chachacual (3.2 ha) y mayor para la bahía de Riscalillo (2.3 ha). Esto puede deberse a un cambio en la cobertura de los arrecifes o a las limitantes del sensor en zonas profundas, es decir, a la diferencia en el diseño de muestreo. Otros factores que condicionan nuestros resultados son el área cubierta en los muestreos, y la clasificación de las imágenes. Es importante señalar que no se encontró información reciente con la cual comparar el cambio en la superficie de coral.

Aun cuando los resultados mostraron diferencias en la composición y estructura del paisaje, los índices AI, CLUMPY y COHESIÓN, referidos a la agregación de los parches (fragmentación espacial) no mostraron diferencias entre las bahías. Otras métricas utilizadas para evaluar la fragmentación son las referidas a la forma, la proximidad, número de parches y área de las clases (Aguilera-Arias, 2012; Wang *et al.*, 2014), las cuales, en nuestro estudio no muestran un patrón claro. La mayor superficie de coral se registró en San Agustín (5.8 ha), así como el mayor valor para

el índice de ENN\_MN, Cacaluta tiene el mayor número de parches y el menor valor en el índice de ENN\_MN, mientras que Chachacual presentó la forma más irregular (de acuerdo con el índice de SHAPE) y es la bahía con el menor número de parches.

A diferencia de este estudio, en el cual el rango de valores para todas las bahías en ambos índices de forma sugiere parches regulares, (valores de SHAPE de 1.68 a 1.98 y de PAFRAC de 1.24 a 1.33), Aguilera-Arias (2012) reporta en el PNSAV formas irregulares de los parches en estos hábitats, con valores de SHAPE hasta de 5, las cuales asocia a un mayor efecto de borde y por ende mayor fragmentación.

El análisis de correlación indica que los parches más aislados (ENN) presentan una forma más regular, probablemente debido a que a medida que las colonias de coral crecen y cubren el sustrato marino, van formando grandes estructuras (Veron, 2011). Según Spalding *et al.* (2001) la extensión de estas estructuras está determinada principalmente por las condiciones oceanográficas (oleaje, corrientes y profundidad), lo que también explica la relación directamente proporcional entre el área y la forma.

Glynn y Leyte-Morales (1997) mencionan que todos los arrecifes de Huatulco están presentes en bahías o detrás de islas y rocas, sitios que brindan protección contra el impacto directo del oleaje. Esto fue observado con el análisis de proximidad realizado en el presente trabajo, las bahías tienen un alto grado de protección y la distribución espacial del coral se asocia a las zonas menos vulnerables. El índice de proximidad indica que la bahía más protegida es Rascalillo, la cual tiene la mayor superficie de coral respecto al área de la bahía. Sin embargo, esa tendencia no se cumple para las demás bahías, contrariamente a lo que se esperaba (que las bahías con más cobertura se asociaran con el índice más bajo de proximidad).

En relación con la proximidad y los arrecifes de coral, es importante señalar que, tanto en Órgano como en Maguey (donde no hay presencia de islas e islotes), la distribución espacial del coral se limita a los primeros 60 m de distancia a la línea de costa. En cambio, en las otras bahías se distribuyen hasta distancias mayores a 100 m. Esto

podría denotar que la presencia de islotes es un factor importante en la distribución espacial y cobertura del coral.

La arena es el sustrato más representativo en todas las bahías, de 2.5 a 10.1 veces mayor a la superficie de coral (San Agustín y Maguey, respectivamente), mientras que la cobertura menos representativa fue la rocosa. La mayor parte del sustrato rocoso está asociado a la delimitación de la bahía y en algunos casos está cubierto por coral (Glynn & Leyte-Morales, 1997).

El LPI (índice del parche más grande) de todas las bahías se observó en Riscalillo, sin embargo, el PLAND\_C (porcentaje del paisaje de coral) más alto lo tuvo San Agustín. Estas métricas, en conjunto con el NP (número de parches) y ENN (distancia al vecino más cercano) nos permiten hacer inferencias en la configuración del paisaje. Por ejemplo, Riscalillo, al igual que Cacaluta son bahías cuya superficie de coral está conformada, principalmente, por un parche de gran tamaño, reduciendo la distancia entre los fragmentos (bajos valores de ENN). En cambio, San Agustín es una bahía que está conformada, principalmente, por cuatro parches con una superficie entre 0.24 y 2.97 ha, por lo tanto, la distancia entre parches de coral aumenta. De acuerdo con Palma *et al.* (2007) el LPI proporciona información sobre la estructura del arrecife. Al contrario de lo que mencionan Wang *et al.* (2014) sobre el índice ENN, no se encontró relación con respecto a la superficie de coral, sino que se explica con base en las características espaciales de los fragmentos.

Vila *et al.* (2006) mencionan que la superficie de los fragmentos esta correlacionada con la diversidad de especies que puede albergar (efecto área), por lo tanto, las bahías de Cacaluta y San Agustín, debido a que tienen las mayores coberturas de coral, son las que podrían presentar la mayor diversidad de especies. Si bien este estudio está enfocado a la estructura del paisaje, dicha estructura de acuerdo con algunos investigadores (Forman & Godron, 1981; Turner *et al.*, 2001; Vila *et al.* 2006) aporta información sobre las características morfológicas, las condiciones y procesos ecológicos.

Palma *et al.* (2017) mencionan que se ha hecho poco esfuerzo para definir la estrategia de muestreo apropiada para determinar con precisión cada una de las métricas del paisaje marino, por lo cual se debe dedicar especial atención al diseño de los programas de monitoreo de los arrecifes de coral, tomando las decisiones con base a estas métricas. Al respecto, Wang *et al.* (2014) señalan que no hay métricas perfectas para las medidas de fragmentación del hábitat, pero muchas métricas de fragmentación son útiles bajo ciertas condiciones y para preguntas biológicas específicas. Además, explican que, si bien es importante desentrañar los efectos de la cobertura del hábitat y la fragmentación, no debe olvidarse la biología y la ecología de los sistemas estudiados.

En este trabajo se emplearon diversas métricas, de las cuales, las referidas al área del coral fueron las que mejor diferenciaron entre las bahías. Palma *et al.* (2017) recomiendan el uso de métricas clave para la caracterización de los arrecifes de coral (como la rugosidad), así como el desarrollo de nuevas métricas producto de diversas técnicas de geomática a partir de MDE y ortofotos. Casella *et al.* (2017) también hacen alusión a la rugosidad como una variable estructural clave de los arrecifes de coral, que se correlaciona con la densidad de peces, la diversidad, biomasa, el pastoreo por erizos de mar, la acreción de los arrecifes y la capacidad de recuperación del sistema después de una perturbación.

La escala desempeña un papel fundamental y condiciona, de forma determinante, los resultados de los índices de paisaje, por lo que es imprescindible identificar correctamente cual es la escala más adecuada para desarrollar un determinado tipo de estudio, de lo contrario se obtendrán estimaciones sesgadas de los valores (Vila *et al.*, 2006; Palma *et al.*, 2017). Como lo observado en las métricas de agregación (CLUMPY, COHESION y AI) que presentaron valores cercanos al 100%, sin embargo, en el trabajo de campo y en las ortofotos se observó que no todos los arrecifes se encontraban totalmente agregados. Probablemente la escala de muestreo y los algoritmos de clasificación no permitieron una discriminación adecuada del sustrato, lo que aumentó la agregación. Similar a lo reportado por Palma *et al.* (2017), quienes

observaron que conforme aumentaba la escala, el arrecife de coral se representaba espacialmente menos heterogéneo de lo que era, lo cual tiene importantes implicaciones en la evaluación del estado de conservación del arrecife de coral, sus comunidades y su papel en el apoyo a los servicios ecosistémicos.

La fragmentación espacial se produce en un rango de escalas, donde la variación en la disposición espacial (dispersión), puede ocurrir a pequeñas escalas de fragmentación (v. g. parches) al mismo tiempo que las escalas más grandes (v. g. arrecife) (Lord y Norton, 1990). Palma *et al.* (2017) mencionan que se deben considerar diferentes escalas de muestreo, relacionadas directamente con la relevancia ecológica de las métricas y de las características espaciotemporales de las comunidades presentes en el área de estudio. Se cuestionan sobre si los resultados habrían diferido utilizando otras escalas.

Es importante señalar, que si bien la fragmentación de un hábitat es un proceso que produce cambios en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas (ECOTONO, 1996), en los arrecifes de coral la fragmentación se considera el proceso asexual dominante (Richmond, 1997) y es extremadamente valiosa en la recuperación a corto plazo de las poblaciones locales después de una perturbación (López-Pérez *et al.* 2007). Es por ello, que se requieren esfuerzos multidisciplinarios e interinstitucionales coordinados, incluidos enfoques genéticos, histológicos y ecológicos, para determinar los procesos que controlan la estructura y dinámica de la comunidad en el área (López-Pérez *et al.* 2007).

## 9.2 Uso de VANT para la caracterización del paisaje sumergido

Con este trabajo se demuestra la importancia del uso de nuevas tecnologías para el estudio de los arrecifes de coral. Sin embargo, es necesario complementar los estudios con datos de campo e integrar otros sensores que nos permitan conocer en mayor medida las características del área de estudio, como en este caso lo fue la toma de datos batimétricos. En este trabajo no se evalúa si el uso de VANTS es más adecuado con respecto a los transectos, cada técnica tiene ventajas y desventajas, e incluso

podrían ser complementarios. La visión sinóptica del uso de VANTs, el constante desarrollo de tecnología y algoritmos especializados podrían llegar a sustituir a los transectos en algunos estudios que estén enfocados en evaluar el área y aspectos relacionados con la ecología del paisaje, como el cambio en la estructura de los arrecifes. En otros estudios, como la estimación de la cobertura de pólipos, la evaluación en zonas profundas o sitios con poca visibilidad podrían ser más adecuados los transectos.

Las ortofotos, en general, fueron generadas con un buen porcentaje de traslape (alrededor de 70 y 40 % de N-S y E-O, respectivamente), sin embargo, las imágenes que se encontraban en los bordes no tuvieron suficiente traslape, esto repercutió en la generación de los mosaicos, con posibles subestimaciones de la cobertura de coral. Por otro lado, en zonas con características homogéneas no fue posible encontrar puntos característicos que permitieran unir las imágenes, principalmente, en zonas profundas con sustrato arenoso.

Los mapas temáticos fueron generados con una buena precisión (promedio de 84.10%) e índice Kappa (0.74). Green *et al.* (2000) mencionan que el objetivo de la clasificación es reflejar los principales tipos de hábitats encontrados en el área de interés tan fielmente como sea posible y debido a que no existe un método absolutamente correcto para clasificar los hábitats ecológicos, los mapas de hábitat nunca pueden ser 100% precisos. El autor considera que una buena estrategia es generar un mapa con una resolución descriptiva gruesa (pocas clases) e ir aumentando la resolución y el número de clases, en sitios específicos de interés.

La clasificación supervisada se realizó con imágenes RGB, que, si bien permitieron identificar los tipos de fondo, se dedicó gran cantidad de horas a reclasificar las imágenes, los errores en la asignación de clase se debieron principalmente al reflejo de la luz, la espuma y la atenuación de la luz por la profundidad. De acuerdo con Ramírez *et al.* (2013) las cámaras digitales convencionales (RGB) limitan las tareas

relacionadas con la investigación científica, por lo que es necesario una mayor resolución espectral, lo que incrementaría el costo.

Palma *et al.* (2017) mencionan que escalas finas de muestreo no proporcionan estimaciones tan buenas como las escalas más gruesas. En el presente trabajo no se evalúa el efecto de la escala debido principalmente a la limitación en el tiempo de vuelo (el área muestreada aumenta con la altura). Sin embargo, se espera que los resultados sirvan como marco de referencia para estudios posteriores y sea aplicable a otras áreas y objetos de estudio.

Una de las motivaciones de este trabajo y del uso de VANTs para el monitoreo de los arrecifes, es la escala espacial a la que es posible obtener información, principalmente en comparación con las imágenes de satélite. Mientras que con una imagen SPOT los cálculos habrían sido con una resolución máxima de 1.5 m, con el VANT a una altura de vuelo de 80 m fue de alrededor de 6 cm. Casella *et al.* (2017) generaron ortofotos de 0.78 a 1.56 cm por píxel a partir de imágenes aéreas con un VANT a 30 m de altura mientras que Palma *et al.* (2017) utilizaron un VPB (vehículo de propulsión de buceo) y obtuvieron una ortofoto de 0.5 cm de resolución. La resolución espacial (y por lo tanto la escala) al utilizar vehículos autónomos es establecida por el investigador de acuerdo con el objeto de estudio. Por ejemplo, en uno de los trabajos previamente mencionados (Palma *et al.*, 2017), los autores identifican los diferentes géneros de corales, formas de crecimiento y blanqueamiento, a diferencia del presente estudio, en el cual, es posible discernir sólo al género *Pocillopora* en virtud de que forma parches grandes, cuando se encuentra desagregado no es posible diferenciarlo de otros géneros. Por otro lado, mediante el uso de técnicas convencionales (transectos), López-Pérez *et al.* (2007) lograron determinar distintas características de los corales, como lo son cubiertas algales, coral muerto y cobertura de coral vivo.

Al igual que Casella *et al.* (2017), reconocemos que la caracterización del paisaje a partir del uso de vehículos aéreos no tripulados es una buena alternativa, principalmente en sitios con poca profundidad y buena visibilidad. Áreas extensas

requerirían el uso de más baterías o VANTs, así como más días de muestreo si se tiene en cuenta que una de las principales limitantes del área de estudio es el reflejo de la luz. Por otro lado, conforme aumenta la profundidad o turbidez, la visibilidad va disminuyendo, al igual que la capacidad para discriminar el tipo de sustrato. Ramírez *et al.* (2013) hacen énfasis en la relevancia del uso de VANTs en la investigación, mencionan que el tener con una resolución temporal imágenes de la cobertura de cada fragmento del ecosistema puede ayudar a la reducción, la prevención y la degradación de los ecosistemas marinos.

## **10. Conclusiones**

Se obtuvo una superficie de coral menor a la reportada por estudios previos con diferente diseño de muestreo. No existe información reciente con la cual comparar los resultados aquí descritos, por lo tanto, este estudio sirve de base para futuras investigaciones que tengan como objetivo evaluar la superficie de coral en el PNH.

El método de clasificación supervisada permitió discriminar los sustratos en tres grandes clases: coral, roca y arena. Con la finalidad de generar cartografía con una resolución descriptiva menos gruesa se podría explorar el uso de otras técnicas de clasificación.

Los arrecifes de coral de las bahías del PNH se encuentran de manera agregada y presentan formas regulares. La bahía con la mayor superficie de coral fue San Agustín, la que presentó el mayor número de parches fue Cacaluta.

Las bahías del PNH tienen una profundidad máxima de 16 m, en las cuales, el coral se distribuye entre 1 hasta 14 m. La mayor cobertura de coral se encuentra entre 1 y 4 m de profundidad.

El análisis de proximidad indica el coral se distribuyen, frecuentemente, entre 15 y 38 m de distancia a la línea de costa. La presencia de islas e islotes no resultó ser un factor determinante en la fragmentación de los arrecifes de coral.

Después de analizar los resultados, se rechaza la hipótesis, referida al aumento en el grado de fragmentación espacial de sur a norte por la presencia de Islas e Islotes.

El uso de VANTs es una herramienta eficaz para la cartografía de arrecifes. Desarrollar un plan de trabajo en el que se contemplen las limitaciones de luminosidad, las propias de estos equipos y complementar las mediciones con otros sensores aumentará los alcances de este tipo de trabajos.

## **11. Recomendaciones**

Se espera que los resultados de este estudio base sean comparables con futuras investigaciones, cuyos esfuerzos deberán estar enfocados a mejorar las técnicas de clasificación (v. g. redes neuronales), la precisión de los sitios de entrenamiento/verificación, así como a integrar otros sensores como cámaras hiperespectrales, vehículos subacuáticos o el uso de vehículos submarinos operados remotamente (ROVs). Además, automatizar el proceso de clasificación y obtención de las métricas significaría contar con un método de evaluación y monitoreo rápido de los recursos arrecifales, que podría volverse extensivo a otros recursos naturales. Un trabajo adicional podría analizar la estructura tridimensional de los arrecifes para determinar el volumen.

Deben tenerse en cuenta también los avances tecnológicos en materia de VANTs. Durante un periodo de tiempo (2 años), el tiempo de vuelo mejoró de 12 a 25 minutos, con posibilidad de desplazarse hasta distancias mayores a 2 km (antes 500 m) y la cámara mejoró de 7 a 20 mp. Se recomienda hacer pruebas para establecer un diseño experimental que se ajuste a las necesidades del estudio, así como los subsecuentes productos asociados. Las aplicaciones de los VANTs observadas durante el desarrollo de este proyecto son muy variadas, estimación de la cobertura de arrecifes, manglares, pastos marinos, algas; cambios morfológicos y volumétricos de la línea de costa; monitoreo de mamíferos marinos, tortugas, aves, tiburones, entre otros; así como para cuestiones de vigilancia en reservas o zonas de importancia comercial.

## **12. Literatura citada**

- Aguilera-Arias, J. 2012. Caracterización estructural y dinámica del paisaje en lagunas arrecifales: estudio de caso Sistema Arrecifal Veracruzano. Instituto de Ciencias Marinas y Ecología, UV. Tesis de Maestría. México. 81 pp.
- Aguilera-Arias, J., E.J. Ramírez-Chávez & J. Bello-Pineda. 2015. Comparación en el uso de drones como herramientas para el mapeo y monitoreo del PANSAV. REVISTA DIGITAL E-BIOS (UAM). Número Especial. Vol. 2 No.8: 3-20. ISNN 2007-5782. [http://cbs1.xoc.uam.mx/e\\_bios/docs/2015/documento.pdf](http://cbs1.xoc.uam.mx/e_bios/docs/2015/documento.pdf)
- Apostolos, P., T. Konstantinos & P. Gerasimos. 2016. Coastline Zone Identification and 3D Coastal Mapping Using UAV Spacial Data. International Journal of Geo-Information. 5(6):76.
- Arriaga-Cabrera, L., E. Vásquez-Domínguez, J. González-Cano, R. Jiménez-Rosenberg, E. Muñoz-López & V. Aguilar-Sierra. 1998. Regiones prioritarias marinas de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 198 pp.
- Badii, M.H & J. Landeros. 2007. Cuantificación de la fragmentación del paisaje y su relación con Sustentabilidad. International Journal of Good Conscience. 2(1): 26-38.
- Bello-Pineda, J. 1998. Sistema de Clasificación para los Tipos de Fondo del Arrecife Alacranes compatible con una imagen Landsat TM. CINVESTAV, Mérida. Tesis de Maestría. México. 126 pp.
- Carr, M.H., J.E. Neigel, J.A. Estes, S. Andelman, R.R. Warner & J.L. Largier. 2003. Comparing marine and terrestrial ecosystems: Implications for the design of coastal marine reserves. Suplement. Ecological Applications 13(1):S90-S107.
- Casella, E., A. Collin, D. Harris, S. Ferse, S. Bejarano, V. Parravicini, L.J. Hench & A. Rovere. 2017. Mapping coral reefs using a consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. Coral Reefs 36:269-275
- CONANP. 2003. Programa de manejo del Parque Nacional Huatulco. México. 205 pp.
- Contreras-Silva, A. 2011. Clasificación de fondos béticos en arrecifes de coral mediante imágenes satelitales, Banco Chinchorro, México. Centro de investigación en Geografía y Geometría. México. Tesis de Maestría. 95 pp.
- De La Lanza-Espino, G. 2001. Características fisicoquímicas de los mares en México. Instituto de Geográfica y Playa y Valdés. México, DF. 149 pp.

- Eakin, C.M., C.J. Nim, R.E. Brainard, C. Aubrecht, C. Elvidge, D.K. Gledhill, F. Muller-Karger, P.J. Mumby, W.J. Skirving, A.E. Strong, M. Wang, S. Weeks & F. Wentz. 2010. Monitoring coral reefs from space. *Oceanography* 23:118-133.
- Eastman, J.R. 2012. IDRISI Selva, guía para SIG y procesamiento de imágenes. Manual versión 17. Clark Labs, Clark University. Worcester, MA, US. 322 pp.
- Eastman, J.R. 2016. TerrSet, Geospatial Monitoring and Modeling System. Manual. Clark Labs, Clark University. Worcester, MA, US. 393 pp.
- ECOTONO, 1996. Fragmentación y Metapoblaciones. Centro para la Biología de la Conservación. Departamento de Ciencias Biológicas, Universidad Stanford, California. Invierno (1996):2.
- Forman, R.T. & M. Gordon. 1981. Patches and Structural Components For a Landscape Ecology. *BioScience*, 31(10): 733–740.
- Forman, R.T. & M. Godron. 1986. Landscape Ecology. Nueva York: Wiley and Sons.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köpen para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. Inst. Geogr. UNAM, México. 246 pp.
- Glynn, P.W. & G.E. Leyte-Morales. 1997. Coral reefs of Huatulco, West México: reef development in upwelling Gulf of Tehuantepec. *Rev. Biol. Trop.* 45(3):1033-1047.
- Green, P.E., A.J. Mumby, A.J. Edwards & D.C. Clark. 2000. Remote sensing handbook for tropical coastal management. UNESCO, London, England. 320 pp
- Harper, K.A., S.E. McDonald, P.J. Burton, J. Chen, K.D. Brosowske, S.C. Saunders, E.S. Euskirchen, D. Roberts, M.J. Jaiteh & P. Essen. 2005. Edge influence on Forest Structure and Composition in Fragmented Landscapes. *Conservation Biology*. 19(3):768-782)
- Hill, J. & C. Wilkinson. 2004. Methods For Ecological Monitoring Of Coral Reefs: A Resource For Managers. 1st ed. Australian Institute of Marine Science 8ed. Townsville, Australia. 123 pp.
- Jauregui, L. 2006. Introducción a la fotogrametría. Tomado de [webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO1.pdf](http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/iluis/publicaciones/Fotogrametr%EDa/CAPITULO1.pdf)
- Kessler, W. S. 2006: The circulation of the Eastern Tropical Pacific: A review. *Progress In Oceanography*. 69 (2-4): 181-217.

- Lavín, M. F., E. Beier, J. Gómez-Valdés, V. M. Godínez, and J. García, 2006: On the summer poleward coastal current off SW México. *Geophysical Research Letters*. 33(L02601), 1-4. (ID: 9743).
- López-Pérez, R.A., M.G. Mora-Pérez & G.E. Leyte-Morales. 2007. Coral (Anthozoa: Scleractinia). Recruitment at Bahías de Huatulco, Western México: Implications for Coral Community Structure and Dynamics. *Pacific Science*. 61(3):355-369.
- Lord, J. M. & Norton, D. A. 1990. Scale and the Spatial Concept of Fragmentation. *Conservation Biology*. 4(2): 197-202.
- McGarigal, K. 2002. Landscape pattern metrics. In: El-Shaarawi AH, Piegorsch WW (eds) *Encyclopedia of environmetrics*, vol 2. Wiley, Chichester, pp 1135–1142
- McGarigal, K. & E. Ene, 2013. Fragstats 4.0. A Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps.
- McGarigal, K. & B. Marks, 1995. FRAGSTATS: a spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure v2.0 (unpublished computer program user manual and guide). Oregon State University. Cornallis, Canadá.
- Muñoz-Criado, A. 2012. Guía Metodológica Estudios de Paisaje. Generalitat Valenciana: Conselleria de infraestructuras, territorio y medio ambiente. España. 170 pp.
- Ortiz-Lozano, L., Granados-Barba, A. & I. Espejel. 2009. Ecosystem zonification as a management tool for marine protected areas in the coastal zone: Applications for the Sistema Arrecifal Veracruzano National Park, México. *Ocean. Coast. Manage.* 52: 317-323.
- Tapia-García, M. 1998. El Golfo de Tehuantepec. El ecosistema y sus recursos. Universidad Autónoma Metropolitana. México. 239 pp.
- Texido *et al.* 2002. Spatial pattern quantification of Antarctic benthic communities using landscape índices. *Mar Ecol Prog Ser*. 242: 1–14.
- Trasviña, A., E. D. Barton, J. Brown, H. S. Velez, P. M. Kosro, and R. L. Smith, 1995: Offshore wind forcing in the Gulf of Tehuantepec, Mexico: The asymmetric circulation. *Journal of Geophysical Research*. 100 (C10): 20649-20663.
- Troll, C. 1950. The geographic Landscape and its investigation. *Studium Generale*. Heidelberg 3:163-181.
- Troll, C. 2003. Ecología del Paisaje (Sthephan Scheibner, trad.). *Gaceta Ecológica*. 68: 71-84. (Obra original publicada en 1968)

- Turner, M.G., H.R. Gardner & V.R. O'Neill. 2001. Landscape ecology in theory and practice: pattern and process. Springer Verlag New York, Inc. New York, USA. 288 pp.
- Palma, M. C. M. Rivas, U. Pantaleo & C. Cerrano, 2017. High Resolution Orthomosaics of African Coral Reef: A Tool for Wide-Scale Benthic Monitoring. *Remote Sens.* 9(7): 705
- Pix4D. 2017. Pix4Dmapper 4.0. User Manual. Lausanne, Switzerland. 303 pp
- Pucha-Cofrep, F., A. Fries, F. Cánovas-García, F. Oñate-Valdivieso & D. Pucha-Cofrep. 2017. Fundamentos de SIG. Aplicaciones con ArcGIS. 84 pp.
- QGIS, 2016. Documentación de QGIS. 2.8. Recuperado el 17 de noviembre del 2017: <http://docs.qgis.org/2.8/pdf/es/QGIS-2.8-UserGuide-es.pdf>
- Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México. 432 pp.
- Ramírez-Chávez, E.J., A. Cruz-García, A.G. Lagunas-Pérez & O.E. Carreño-Reyes. 2013. Uso de vehículos aéreos no tripulados para la caracterización del paisaje sumergido; Bahía Estacahuite. *Ciencia y Mar.* 49(16): 30-40. Rzedowski, J. 1978. Vegetación de México. Limusa. México. 432 pp.
- Richmond, R.H. 1997. Reproduction and recruitment in coral: Critical links in the persistence of reefs. Pages 175–196 in C. E. Birkeland, ed. *Life and death of coral reefs*. Chapman and Hall, New York.
- Spalding, M.D., Ravilious, C. & E.P., Green. 2001. *World Atlas of Coral Reefs*. UNEP/WCMC, Universidad de California Press, EUA,
- Universidad del Mar. 2000. Diagnóstico preliminar en la porción marina del Parque Nacional Huatulco, Universidad del Mar, Oaxaca, México
- Vila-Subirós, J., D. Varga-Linde, A. Llausás-Pascual & A. Ribas-Palom. 2006. Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology): una interpretación desde la geografía. *An. Geog.* 48: 151-166.
- Wang, X., B.F. Guillaume & N. Koper. 2014. Measuring habitat fragmentation: An evaluation of landscape pattern metrics. *Methods in Ecology and Evolution*. 5: 634-646-
- Walker, B.K., B. Riegl & R.E. Dodge. 2008. Mapping coral reef habitats in southeast Florida using a combined technique approach. *Journal of Coastal Research*. 24(5): 1138-1150.
- Veron, J.E.N. 2011. Coral Taxonomy and Evolution. In: Dubinsky Z., Stambler N. (eds) *Coral Reefs: An Ecosystem in Transition*. Springer, Dordrecht.

### 13. Anexos

Anexo 1. Ortofotos del Parque Nacional Huatulco (PNH).



Figura 18. Ortofoto de Bahía Órgano (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Riscalillo

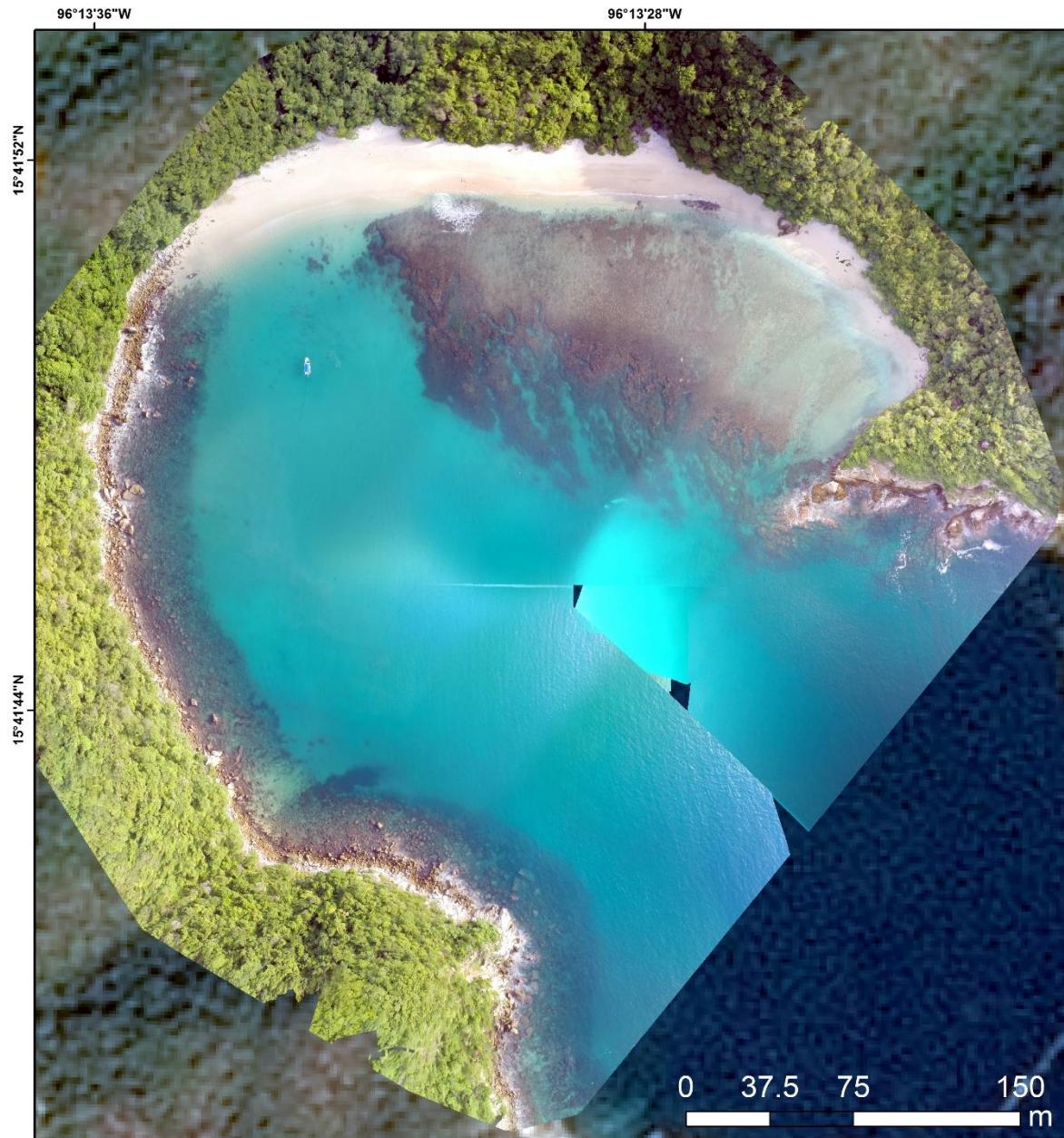


Figura 19. Ortofoto de Bahía Riscalillo (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).

## Bahía Chachacual

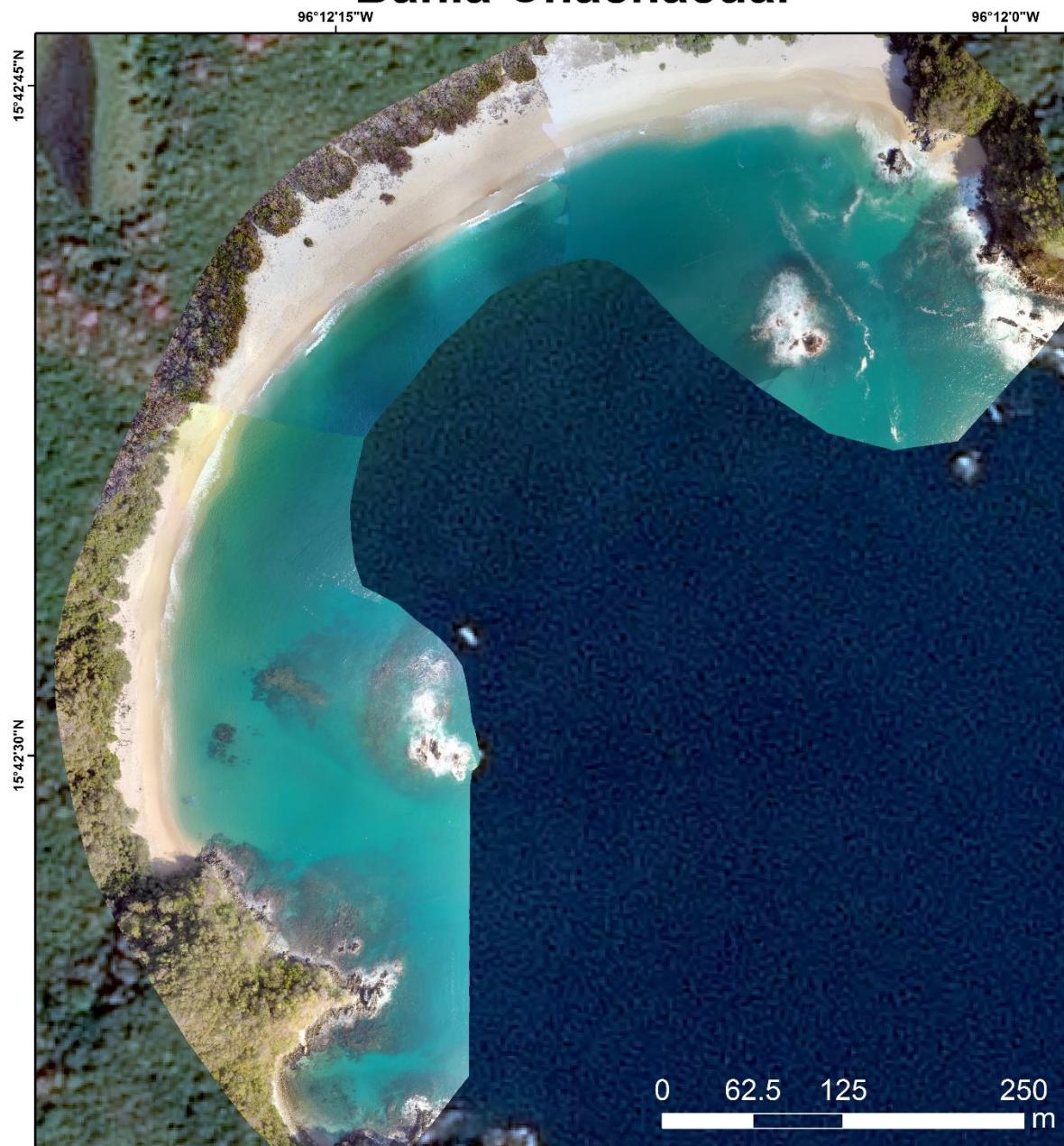


Figura 20. Ortofoto de Bahía Chachacual (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Cacaluta

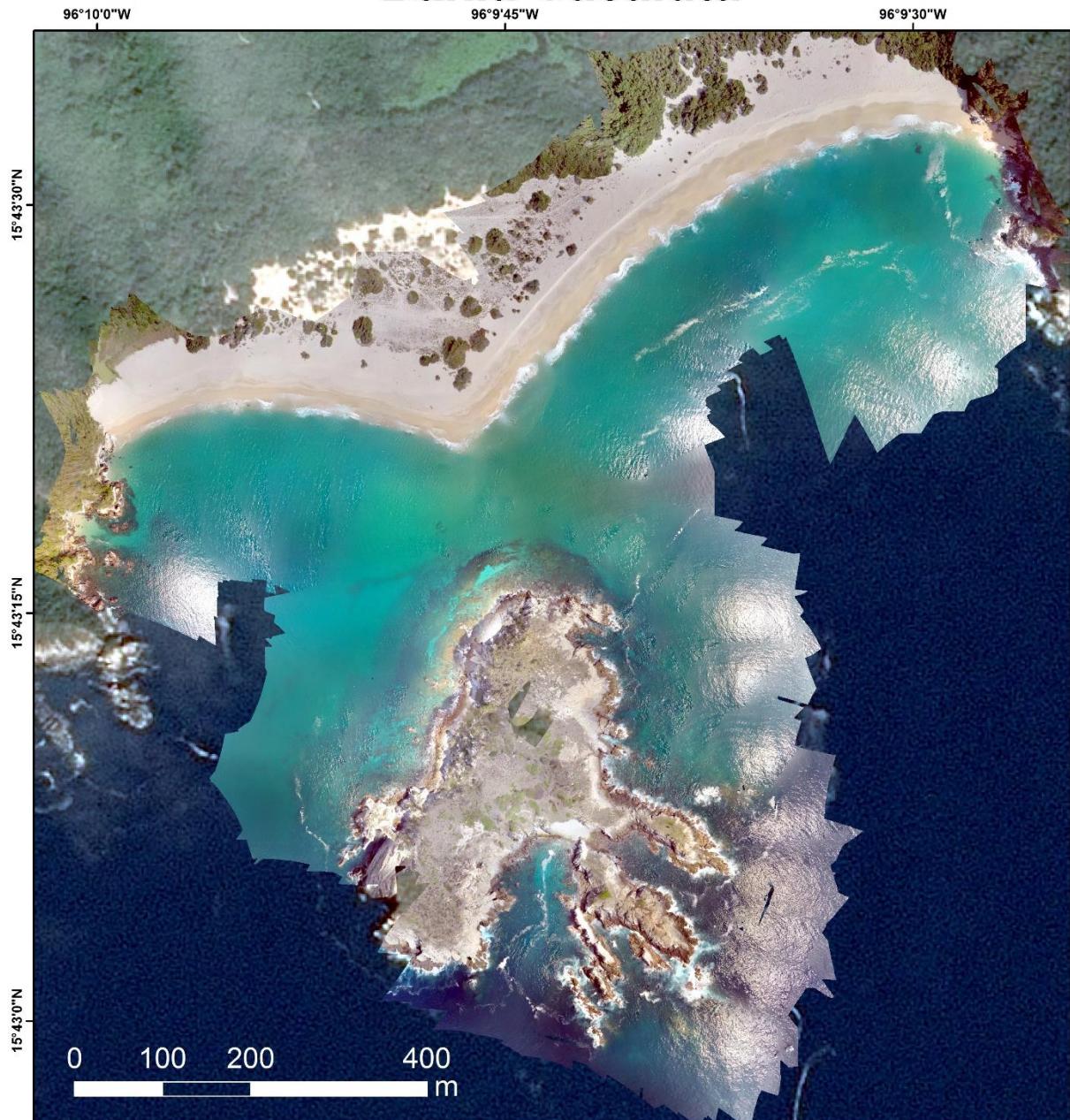


Figura 21. Ortofoto de Bahía Cacaluta (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Maguey



Figura 22. Ortofoto de Bahía Maguey (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Órgano

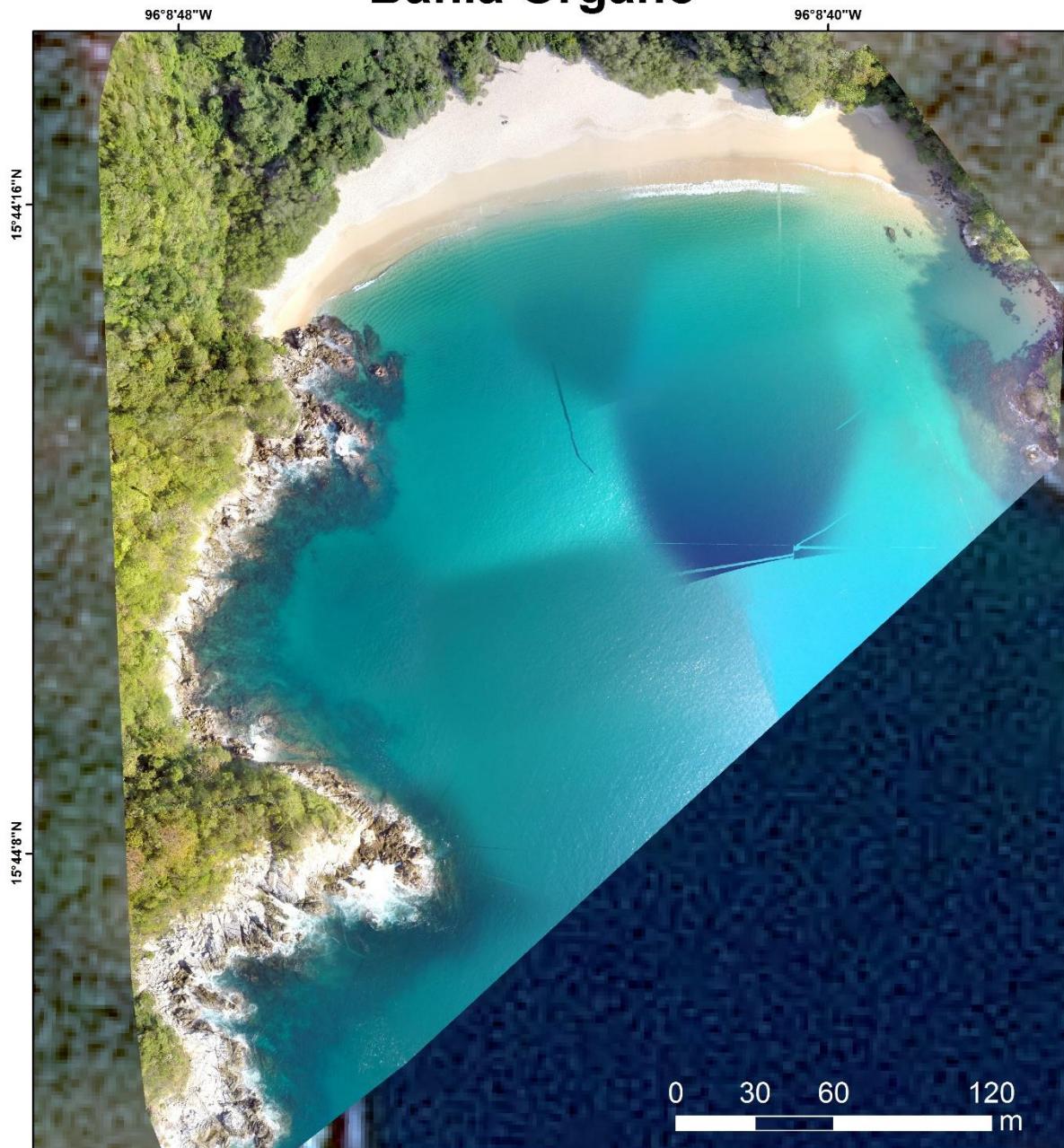


Figura 23.Ortofoto de Bahía Órgano (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017).

Anexo 2. Mapas temáticos y matrices de error de clasificación.

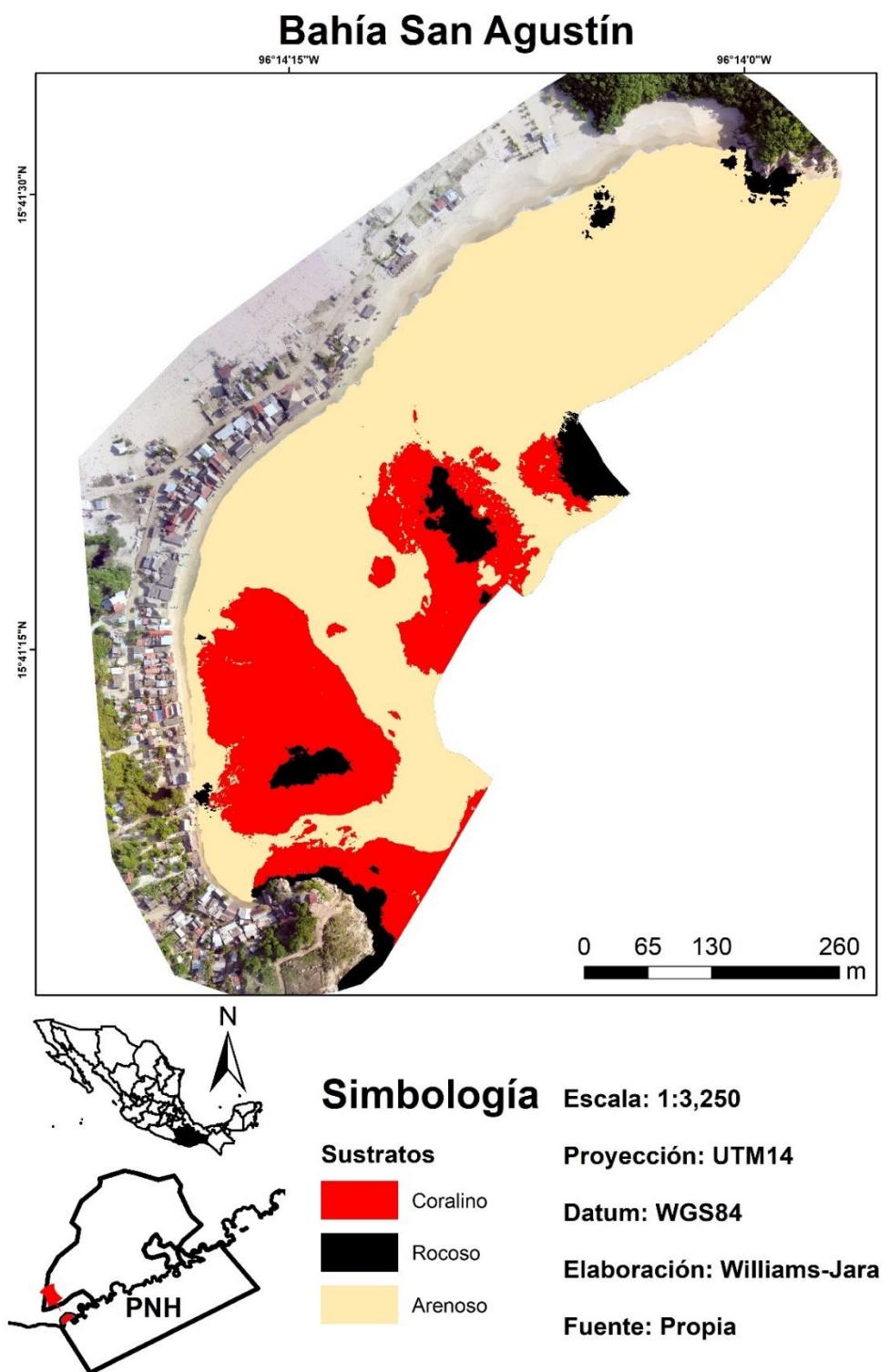


Figura 24. Mapa temático de Bahía San Agustín.

## Bahía Riscalillo

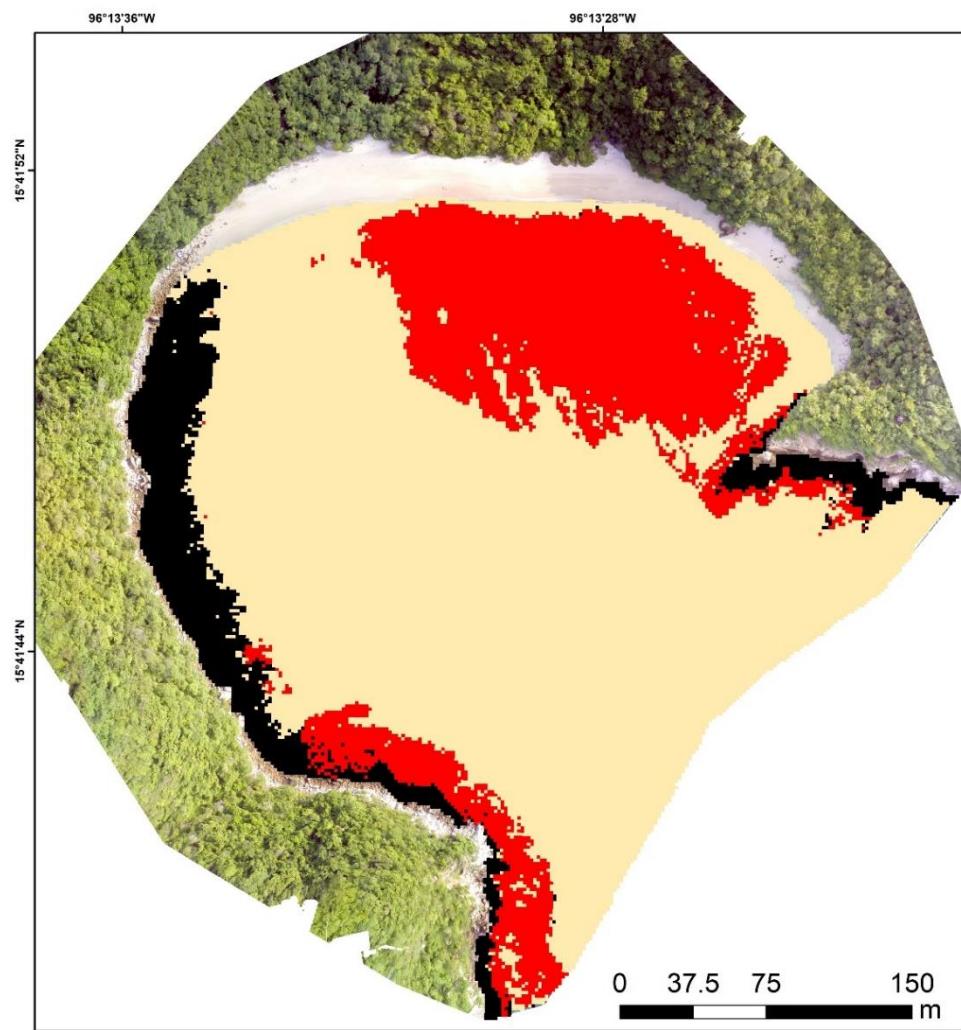


Figura 25. Mapa temático de Bahía Rascalillo.

## Bahía Chachacual

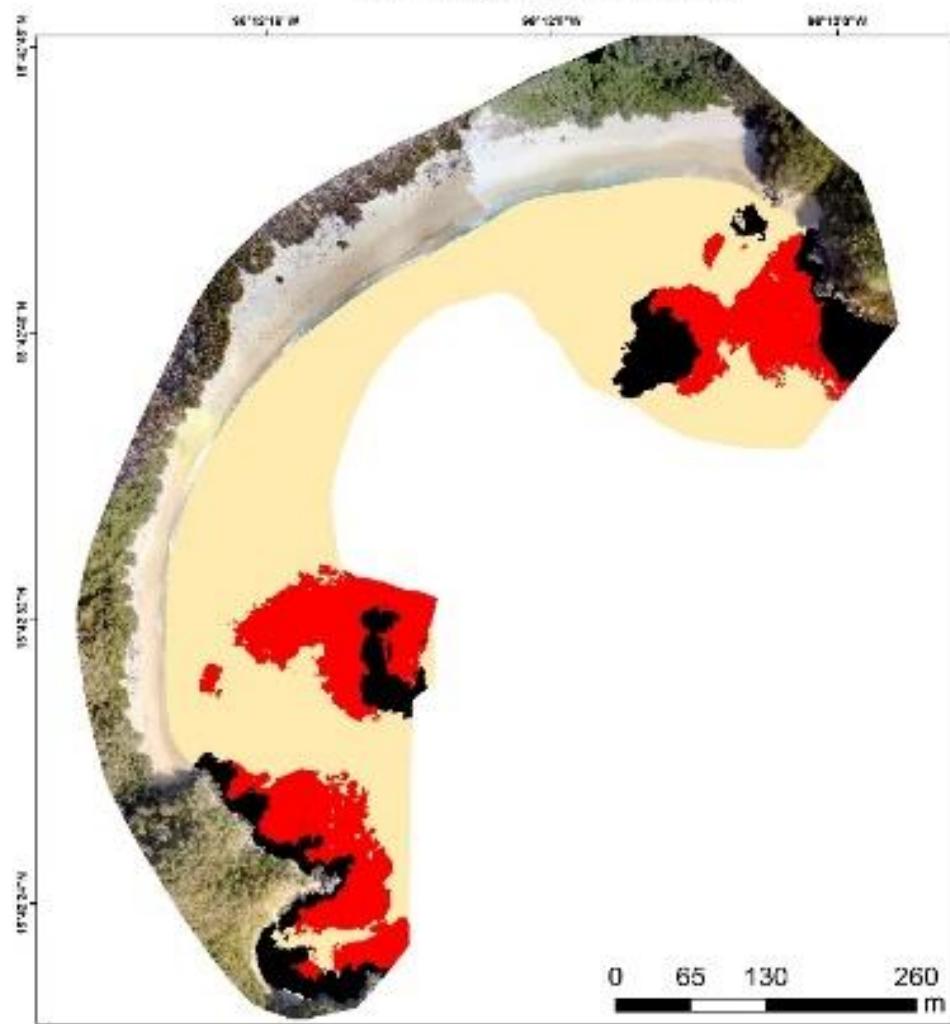


Figura 26. Mapa temático de Bahía Chachacual.

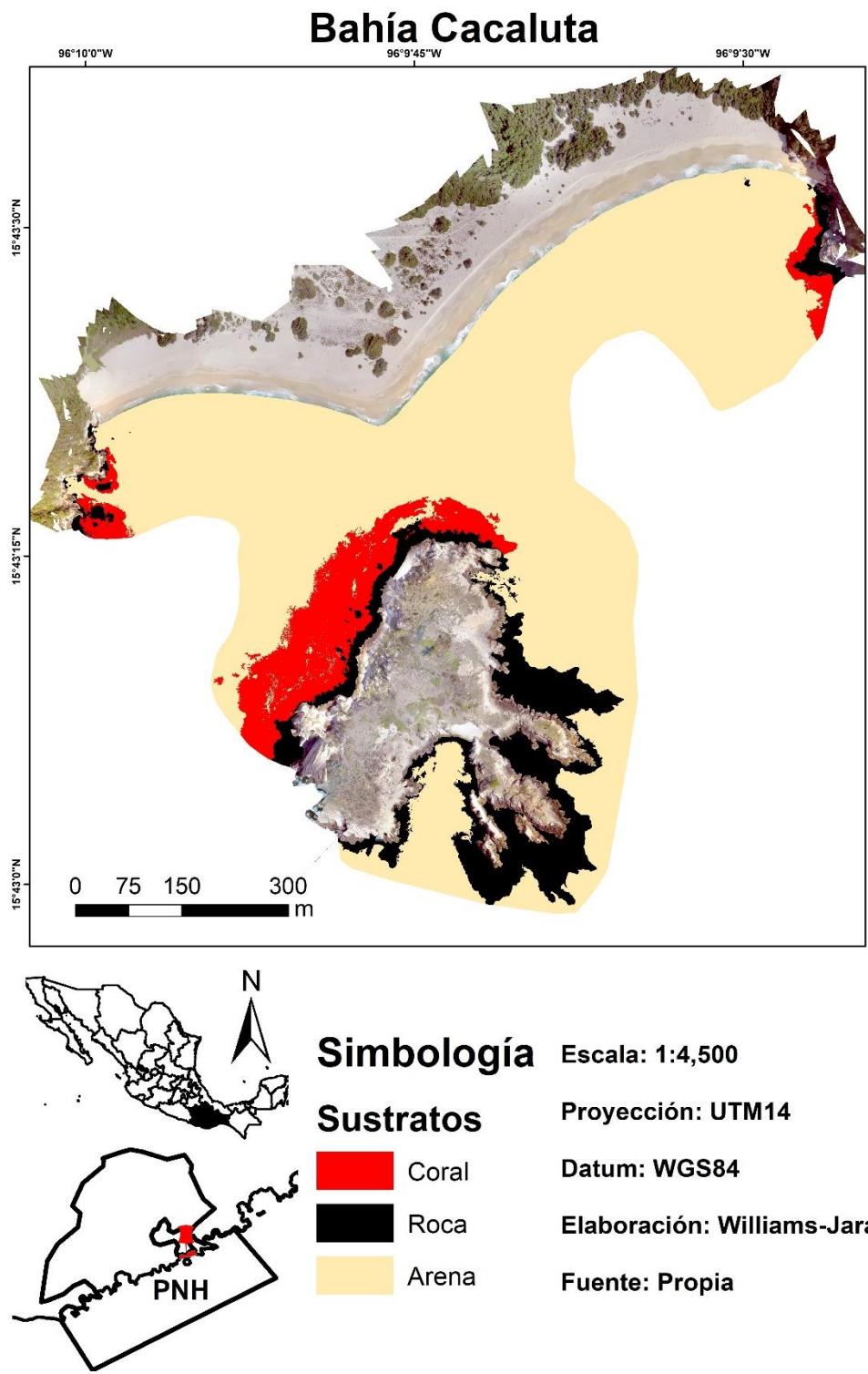


Figura 27. Mapa temático de Bahía Cacaluta.

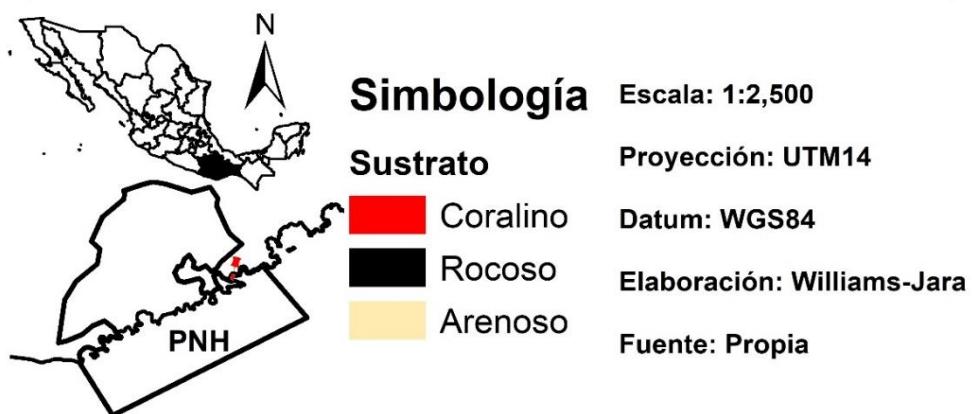
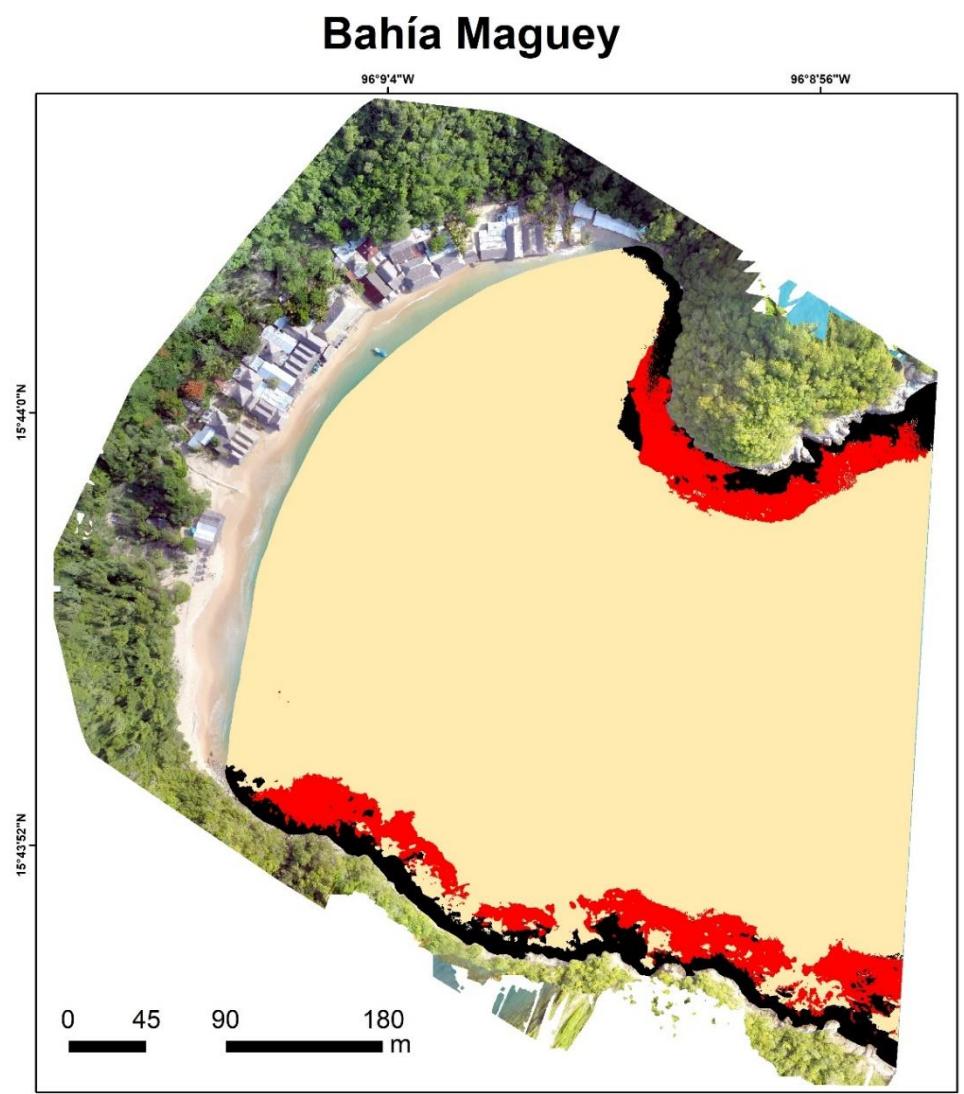


Figura 28. Mapa temático de Bahía Maguey.

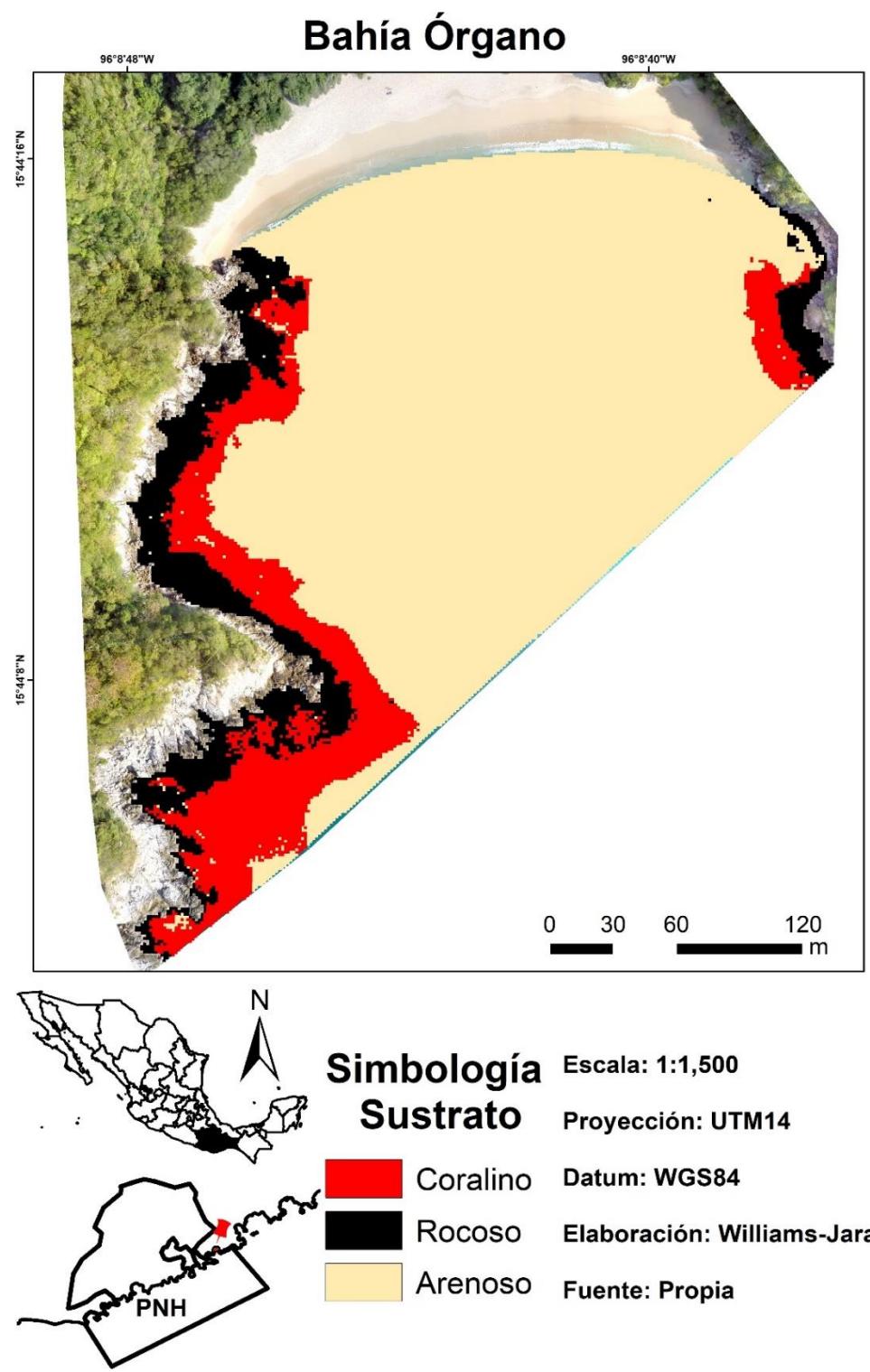


Figura 29. Mapa temático de Bahía Órgano.

Tabla 8. Matriz de evaluación de precisión de bahía Cacaluta.

Clase	Coral	Roca	Arena	Total	ErrorC	Precisión
Coral	14	3	1	18	0.2	77.78%
Roca	0	3	0	3	0	100%
Arena	0	1	10	11	0.09	90.91%
Total	14	7	11	32		
ErrorO	0	0.57	0.09		0.16	
Precisión	100%	42.86%	90.91%			
Precisión Total			84.38%	índice Kappa		0.75

Tabla 9. Matriz de evaluación de precisión de bahía Chachacual.

Clase	Coral	Roca	Arena	Total	ErrorC	Precisión
Coral	44	9	1	54	0.19	81.44%
Roca	2	15	1	18	0.17	83.33%
Arena	0	3	20	23	0.13	86.96%
Total	46	27	22	95		
ErrorO	0.04	0.44	0.09		0.17	
Precisión	95.65%	55.56%	90.91%			
Precisión Total			83.16%	índice Kappa		0.73

Tabla 10. Matriz de evaluación de precisión de bahía Maguey.

Clase	Coral	Roca	Arena	Total	ErrorC	Precisión
Coral	14	4	0	18	0.22	78.78%
Roca	1	8	0	9	0.11	88.89%
Arena	0	0	12	12	0	100%
Total	15	12	12	39		
ErrorO	0.07	0.33	0		0.13	
Precisión	93.33%	66.67%	100%			
Precisión Total			87.18%	índice Kappa		0.80

Tabla 11. Matriz de evaluación de precisión de bahía Órgano.

Clase	Coral	Roca	Arena	Total	ErrorC	Precisión
Coral	11	3	0	14	0.21	78.57%
Roca	0	5	0	5	0	100%
Arena	0	0	4	4	0	100%
Total	11	8	4	23		
ErrorO	0	0.38	0		0.13	
Precisión	100%	62.50%	100%			
Precisión Total			86.96%	índice Kappa		0.78

Tabla 12. Matriz de evaluación de precisión de bahía Riscalillo.

Clase	Coral	Roca	Arena	Total	ErrorC	Precisión
Coral	29	2	0	31	0.06	93.55%
Roca	2	9	0	11	0.18	81.82%
Arena	8	2	16	16	0.38	61.54%
Total	39	13	16	68		
ErrorO	0.26	0.31	0		0.21	
Precisión	74.36%	69.23%	100%			
Precisión Total			79.41%	índice Kappa		0.67

Tabla 13. Matriz de evaluación de precisión de bahía San Agustín.

Clase	Coral	Roca	Arena	Total	ErrorC	Precisión
Coral	35	8	0	43	0.19	92.11%
Roca	0	10	1	11	0.09	45.45%
Arena	3	4	36	36	0.16	97.30%
Total	38	22	37	97		
ErrorO	0.08	0.55	0.03		0.16	
Precisión	92.11%	45.45%	97.30%			
Precisión Total			83.51%	índice Kappa		0.74

Anexo 3. Mapas Isobáticos.

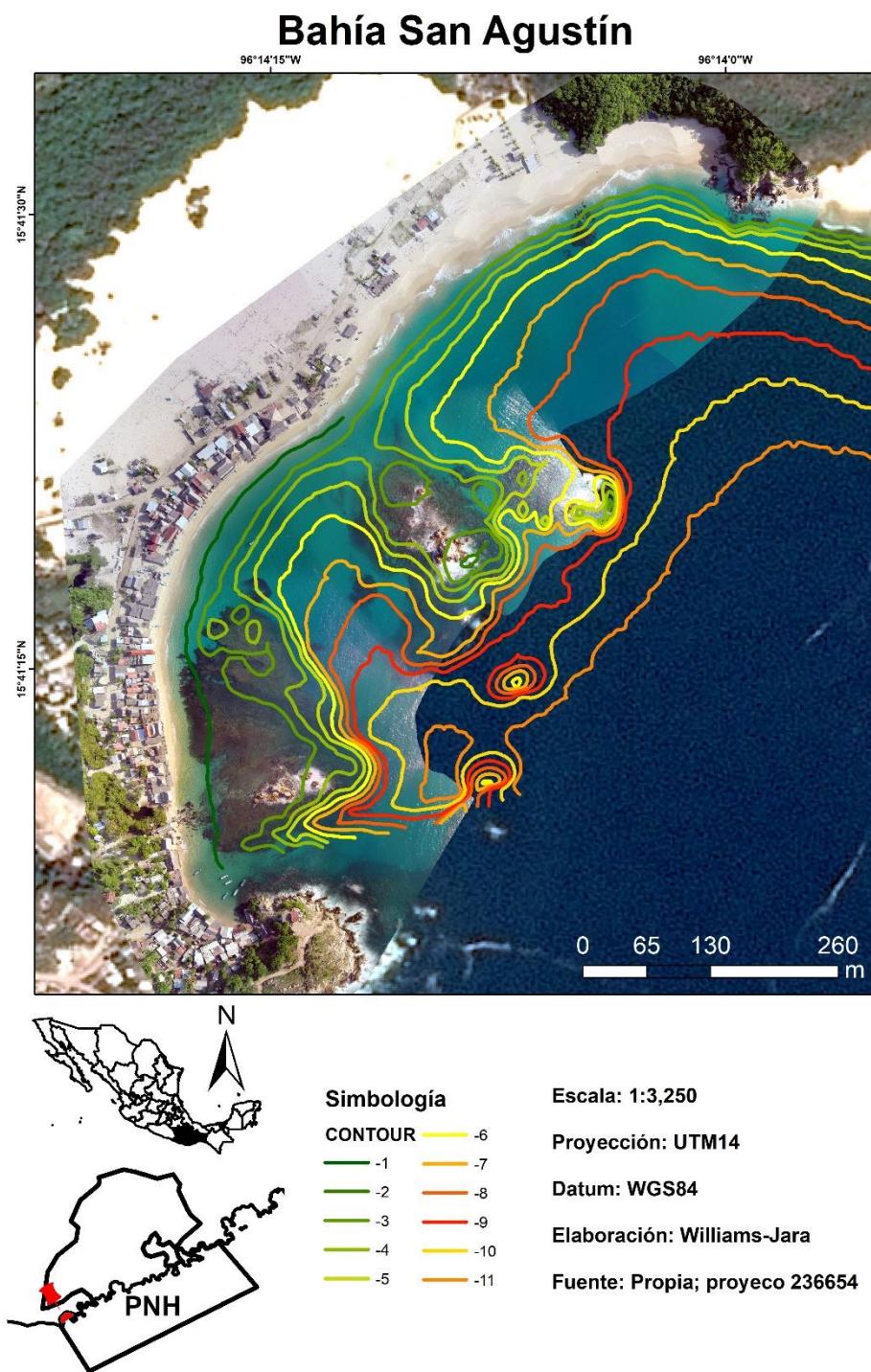


Figura 30. Mapa isobático de Bahía San Agustín (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

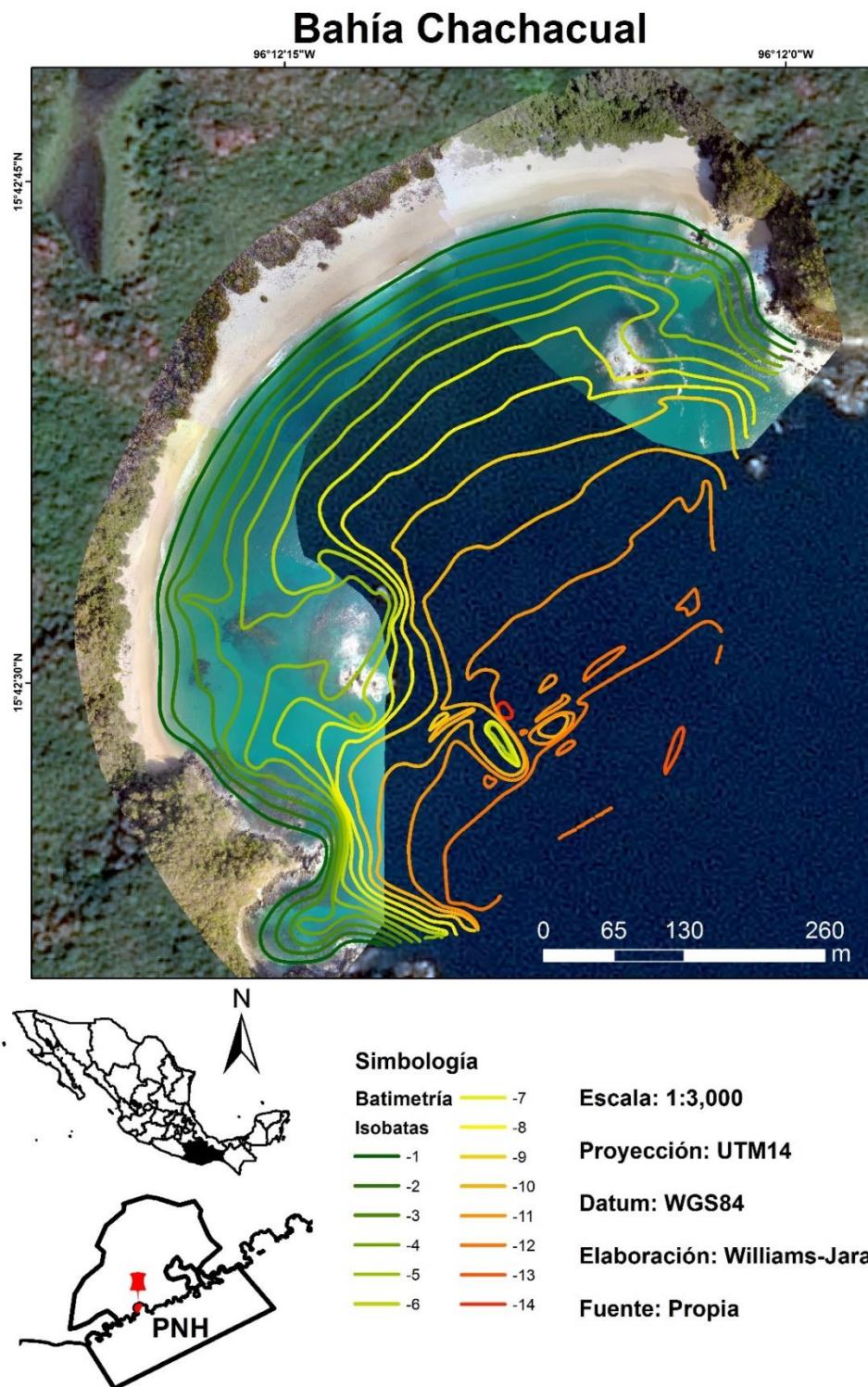


Figura 31. Mapa isobático de Bahía Chachacual (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Riscalillo

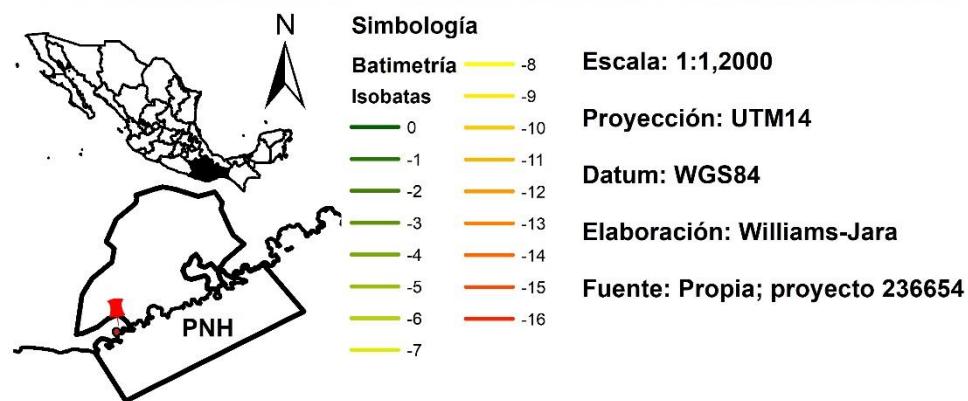
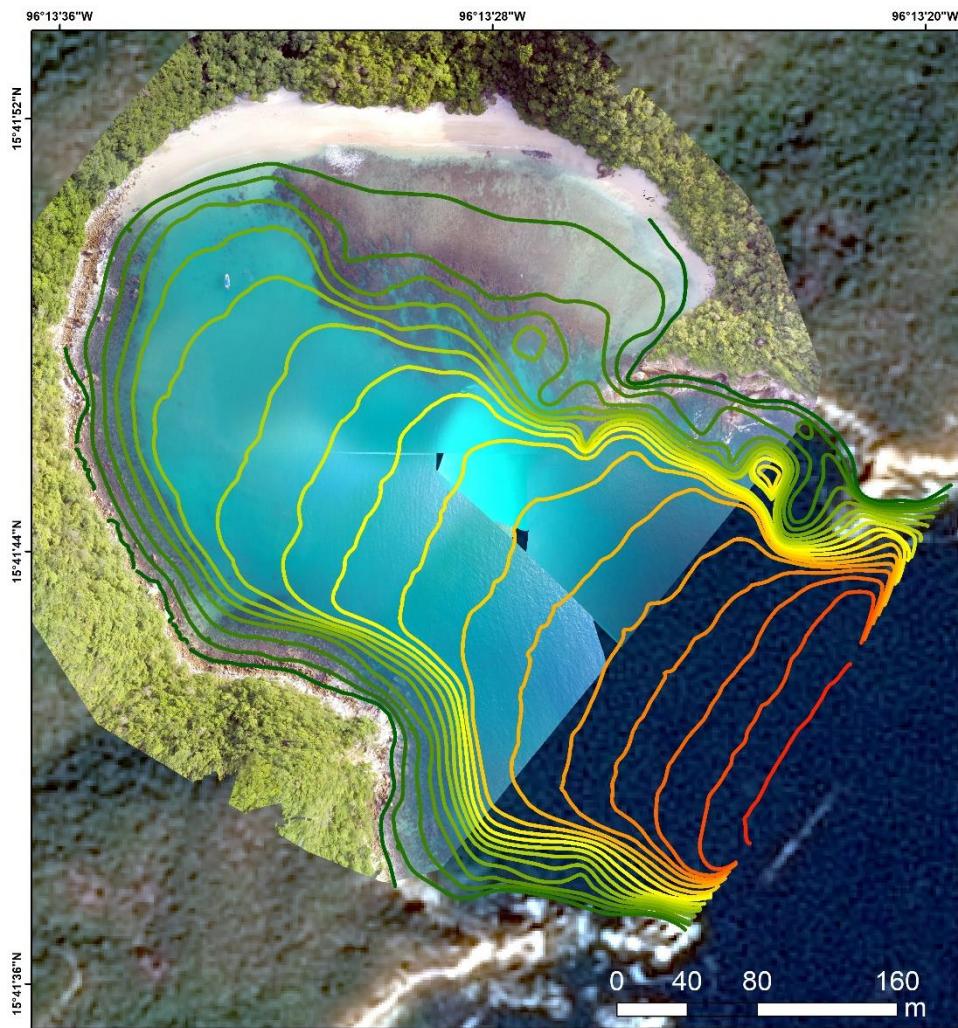


Figura 32. Mapa isobático de Bahía Rascalillo (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Cacaluta

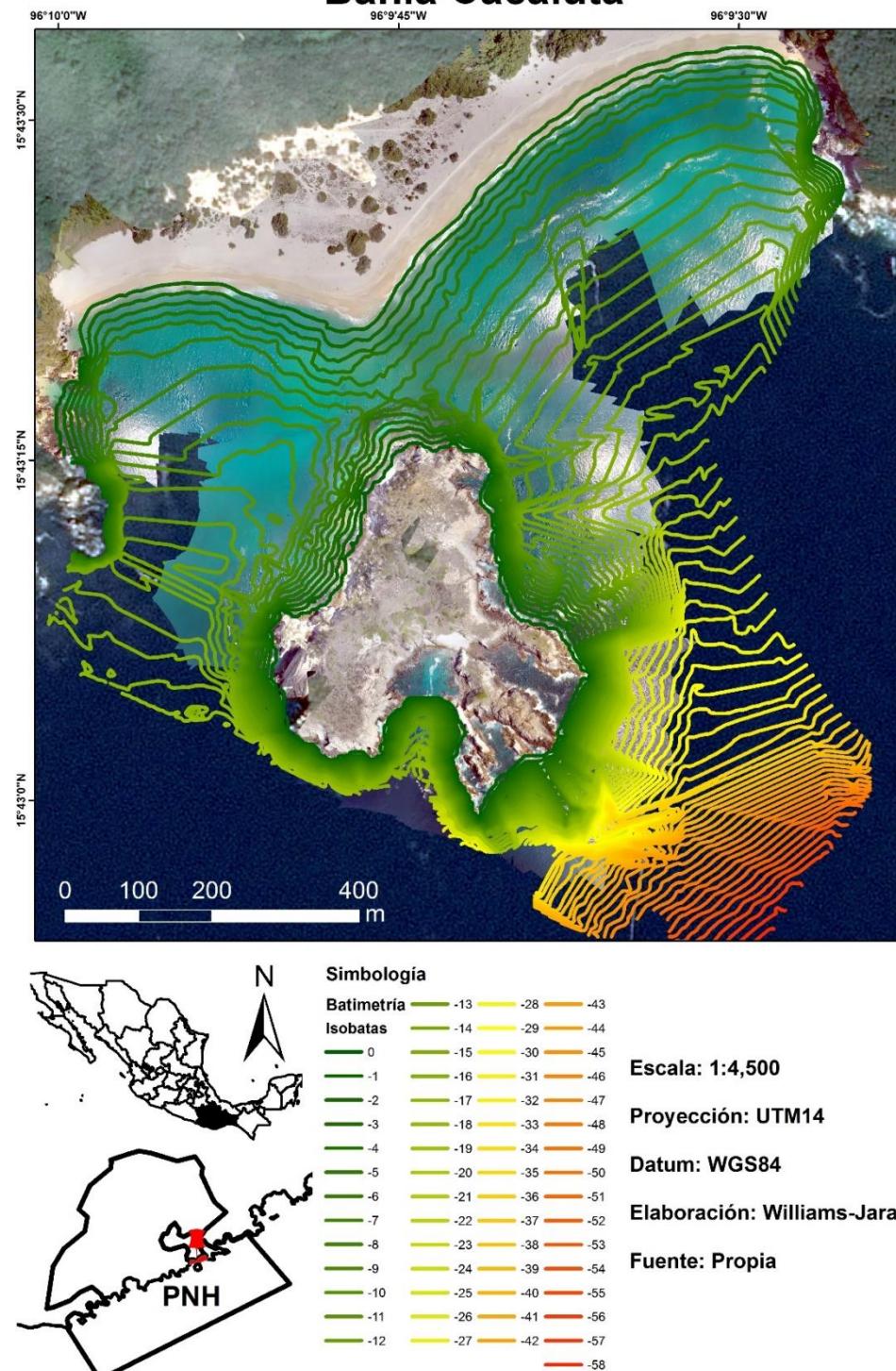


Figura 33. Mapa isobático de Bahía Cacaluta (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Maguey

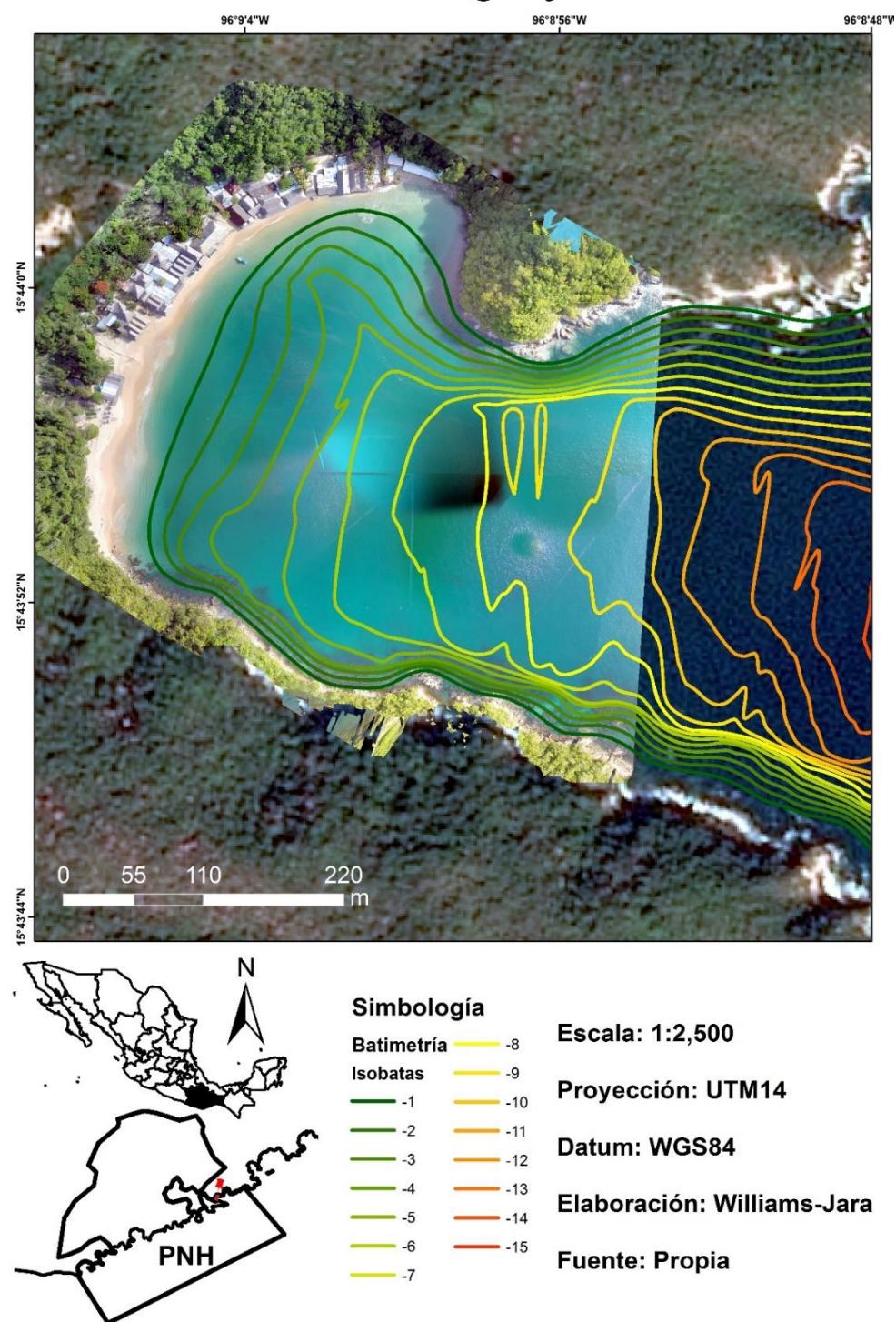


Figura 34. Mapa isobático de Bahía Maguey (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).

## Bahía Órgano

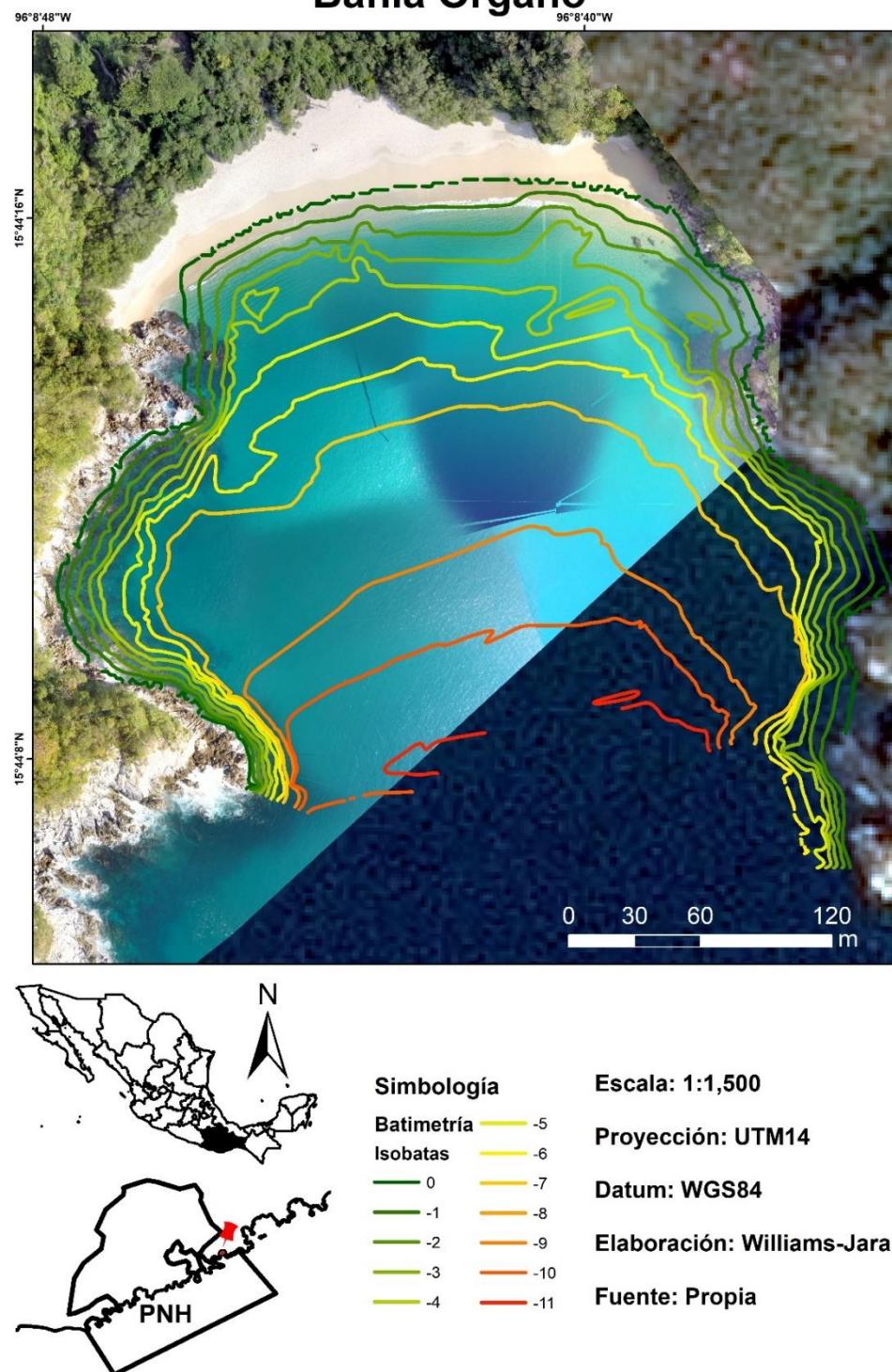


Figura 35. Mapa isobático de Bahía Órgano (Imagen SPOT 5 de fondo, generado con datos provenientes de la “ERMEXNG-ermex0169, 2017”).