



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA
UNIDAD ACADÉMICA SISAL**

**“CARACTERIZACIÓN DE DOS SISTEMAS ARRECIFALES DEL
CARIBE MEXICANO MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES OBTENIDAS POR VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS”**

TESIS

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
(Biología Marina)**

**PRESENTA:
BIÓL. SÁNCHEZ JIMÉNEZ HÉCTOR RICARDO**

TUTOR PRINCIPAL:

**DR. RIOJA NIETO RODOLFO
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM**

COMITÉ TUTOR:

**DR. AGUIRRE GÓMEZ RAÚL
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM
DR. GARZA PÉREZ JOAQUÍN RODRIGO
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM
DR. FLORES DE SANTIAGO FRANCISCO JAVIER
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM
DR. LORENZO ÁLVAREZ FILIP
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, PTO. MORELOS, UNAM**

YUCATÁN, MAYO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**“CARACTERIZACIÓN DE DOS SISTEMAS ARRECIFALES DEL
CARIBE MEXICANO MEDIANTE EL USO DE IMÁGENES
MULTIESPECTRALES OBTENIDAS POR VEHÍCULOS AÉREOS NO
TRIPULADOS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS
(Biología Marina)

PRESENTA:
BIÓL. SÁNCHEZ JIMÉNEZ HÉCTOR RICARDO

TUTOR PRINCIPAL:

DR. RIOJA NIETO RODOLFO
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. AGUIRRE GÓMEZ RAÚL
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM
DR. GARZA PÉREZ JOAQUÍN RODRIGO
FACULTAD DE CIENCIAS, UMDI-SISAL, UNAM
DR. FLORES DE SANTIAGO FRANCISCO JAVIER
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, UNAM
DR. LORENZO ÁLVAREZ FILIP
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA, PTO. MORELOS, UNAM

YUCATÁN, MAYO, 2021



Agradecimientos

En primera instancia, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme un espacio libre de discriminación donde poder compartir mis ideas e ideales con igualdad de derechos y obligaciones. Donde se me otorgo la apertura para poder estudiar y desarrollarme como persona, brindándome oportunidades, no solo para ampliar mis conocimientos, sino también, desarrollar mis habilidades físicas y culturales.

Agradezco, con especial mención, al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología por valorar mi iniciativa abriendo un espacio para mi proyecto de Maestría. Así mismo, agradezco mucho al personal que allí labora tanto en Ciudad Universitaria, CDMX como en la UMDI-Sisal, Yucatán; porque siempre estuvieron en excelente disposición para atender mis dudas y problemáticas. Igualmente, agradezco el apoyo económico otorgado por el CONACYT (CVU: 968218); quienes al otorgar becas promueven la Ciencia por México.

Le agradezco a mi tutor principal, él Dr. Rioja Nieto Rodolfo, por tener apertura y permitirme formar parte de su equipo en COSTALAB; donde afine mis conocimientos en Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota, especialmente en el uso conjunto de tecnologías y metodologías para la determinación y manejo de ecosistemas costeros. Con la misma intensidad, le agradezco a mi comité tutorial (Dres. Aguirre Gómez Raúl, Garza Pérez Joaquín Rodrigo, Flores de Santiago Francisco Javier y Lorenzo Álvarez Filip) por acompañarme en todo el trayecto y enriquecer tanto mis conocimientos como este trabajo con todas sus observaciones y sugerencias. Igualmente, le agradezco a todos los colegas de COSTALAB por brindarme su apoyo, principalmente a Carlos Cruz por compartir sus conocimientos y asesorarme en el manejo de los drones.

Empero, agradezco principalmente a mi madre por apoyarme siempre en todo. Así mismo a Dios, ese ser que me llena de esperanzas, motivándome cada día; resonando en mi mente que todos los caminos llevan a *Rāma*, esencialmente el amor. Finalmente, aprovecho la oportunidad para agradecer a la Universidad Autónoma Metropolitana: a mis compañeros, amigos y profesores de la licenciatura por contribuir en mi formación como biólogo.

Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico principalmente a mis abuelitos y a mi mamá; porque siempre me han motivado con todo su amor e impulsado a vivir mi vida con felicidad:

A mi abuelito (Ricardo Jiménez. M.), quien siempre me ha brindado su confianza y respeto en todos los sentidos, además de transmitirme un espíritu de aventura y firme juventud, sin olvidar las responsabilidades más cruciales.

A mi abuelita (Elsy Castro. C.) la mujer con la fortaleza más grande que he conocido y a quien recuerdo con mucha felicidad todos los días, puesto que siempre me ha transmitido su amor, fortaleza y dedicación.

A mi mamá (Zeomara Karina. J. C.), una mujer a quien admiro y respeto mucho; principalmente, por su genialidad, su gran capacidad para crear y transformar las cosas.

Finalmente, quiero dedicar este trabajo, de igual manera, al resto de mi familia y amigos (nuevos y viejos); cada uno forma parte del tesoro de mi vida. Seguramente, no estaría haciendo esto hoy de no haber compartido con ustedes las etapas de la vida.

Con mucho cariño, para todos.

*"Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad" y
"Locura es hacer la misma cosa una y otra vez esperando obtener diferentes resultados"*
Einstein, A. (1879-1955).

ÍNDICE

Lista de figuras	vii
Lista de ecuaciones.....	xii
Lista de tablas	xiii
1. Resumen/Abstract	1
2. Introducción	2
3. Marco Teórico.....	4
3.1. El sistema bentónico arrecifal.....	4
3.2. Percepción Remota.....	7
3.3. Teoría del color	8
3.4. Firmas espectrales del paisaje bentónico arrecifal	11
3.5. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)	12
3.6. Sistemas de Información Geográfica.....	14
4. Antecedentes.....	15
5. Área de Estudio	17
6. Hipótesis.....	19
7. Objetivos	20
7.1. Objetivo general	20
7.2. Objetivos específicos	20
8. Materiales y métodos.....	21
8.1. Identificación de sitios de entrenamiento y obtención de imágenes multiespectrales	21
8.2. Pre-procesamiento de imágenes.....	24
8.2.1. Corrección del efecto atmosférico.....	24
8.2.2. Corrección del brillo, <i>deglint</i> (remoción del <i>sunlint-NIR</i>).....	25
8.2.3. Corrección de la columna de agua	26
8.3. Construcción de mapas temáticos	27
9. Resultados	29

9.1.	Construcción de ortomosaicos multiespectrales.....	29
9.2.	Pre-procesamiento de imágenes multiespectrales	31
9.3.	Caracterización del paisaje bentónico arrecifal	35
9.4.	Análisis de Vídeos.....	35
9.5.	Caracterización de los tipos de hábitats	35
9.6.	Matrices de error y coeficiente Tau	39
9.7.	Mapas temáticos de las AOI (Akumal y Puerto Morelos).....	45
10.	Discusión.....	49
10.1.	Imágenes y ortomosaicos multiespectrales (RGB-NIR) de ultra alta resolución espacial.....	49
10.2.	Perspectivas de la aplicación de técnicas de pre- procesamiento	51
10.3.	Perspectivas de los mapas temáticos desarrollados.....	52
11.	Conclusiones y Recomendaciones	53
11.1.	Conclusiones.....	53
11.2.	Recomendaciones.....	55
12.	Referencias	56
13.	Anexos	75
13.1.	Anexo 1: Imágenes representativas de los substratos bentónicos	75
13.2.	Anexo 2: cálculos de las técnicas de pre-procesamiento.....	82

Lista de figuras

Figura 1. Experimentos cruciales sobre el comportamiento físico de la luz, empleados para explicar el fenómeno del color por I. Newton. Se aprecia el haz de luz atravesando un prisma, así como, la forma oblonga del espectro visible; la imagen sobre la forma cilíndrica es original del experimento mismo: A. dispersión de un haz de luz blanca en los matices del espectro al ser refractados ($n_1 \sin \Theta_1 = n_2 \sin \Theta_2$) con un prisma y, B. convergencia de los rayos previamente separados mediante un lente a otro prisma para formar de nuevo el haz de luz blanca, reintegración..... 9

Figura 2. Haz de luz incidiendo sobre un prisma triangular, representando la refracción del rojo y el azul: se aprecia que los rayos emergentes cambiaron su ángulo, lo que los separa y permite que sean visibles, pues, al pasar las diferentes longitudes de onda de un medio a otro, los rayos de luz se refractan diferente: n_1 y n_2 corresponden a los distintos índices de refracción en cada uno de los medios (en el vacío y en el prisma, respectivamente) y Θ hace referencia a los ángulos de cada haz de luz desviado con respecto a la línea normal la cual es perpendicular a la superficie de incidencia del haz de luz blanca..... 10

Figura 3. Área de estudio en las localidades de Akumal y Pto. Morelos, Quintana Roo, en el Caribe Mexicano..... 18

Figura 4. Acercamiento a ambas áreas de estudio: las líneas punteadas hacen referencia al área trabajada, a la izquierda Akumal y a la derecha Pto. Morelos..... 18

Figura 5. Ubicación de los sitios de entrenamiento identificados mediante el uso de un muestreo estratificado basado en la clasificación no supervisada con 10 clases de una imagen RGB del 2013 obtenida por la plataforma *World View 2*, para el AOI en Akumal, Quintana Roo. 21

Figura 6. Ubicación de los sitios de entrenamiento identificados mediante el uso de un muestreo estratificado basado en la clasificación no supervisada con 10 clases de una imagen RGB del 17 de noviembre del 2009 obtenida por la plataforma *Landsat 7* para el AOI en Pto. Morelos, Quintana Roo. 22

Figura 7. Plan de vuelo empleado en Akumal, Quintana Roo. La línea verde indica la trayectoria seguida por VANT matrice 100, los puntos azules indican el

centro de la posición de las imágenes obtenidas. Se realizaron dos vuelos, uno de Norte a Sur y otro de Este a Oeste, en la porción más próxima a la costa.....	23
Figura 8. Plan de vuelo empleado en Pto. Morelos, Quintana Roo. La línea verde indica la trayectoria seguida por VANT matrice 100, los puntos azules indican el centro de la posición de las imágenes obtenidas. Vuelo realizado en la porción más próxima a la costa, de Este a Oeste.	23
Figura 9. Cálculo del número de sobreposición de imágenes por cada píxel del ortomosaico de Pto. Morelos (A) y Akumal (B); del rojo al amarillo se indica bajo sobreposición de las imágenes y las áreas verdes indican un alto nivel, con más de cinco imágenes por píxel.	29
Figura 10. Akumal, Quintana Roo: ortomosaico multiespectral (RGB-NIR), sin pre-procesar, elaborado con técnicas fotogramétricas <i>SfM</i> , mediante Pix4D.....	30
Figura 11. Pto. Morelos, Quintana Roo: ortomosaico multiespectral (RGB-NIR), sin pre-procesar, elaborado con técnicas fotogramétricas <i>SfM</i> , mediante Pix4D.....	30
Figura 12. Ortomosaico multiespectral (RGB-NIR) de Akumal, Quintana Roo, con previa corrección atmosférica.....	31
Figura 13. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica y <i>deglint</i> , de Akumal, Quintana Roo.....	32
Figura 14. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica, <i>deglint</i> y corrección de columna de agua, sobre el cual se realizó una clasificación supervisada para el AOI de Akumal, Quintana Roo.....	32
Figura 15. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica, de Pto. Morelos, Quintana Roo.....	33
Figura 16. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica y <i>deglint</i> , de Pto. Morelos, Quintana Roo.	34
Figura 17. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica, <i>deglint</i> y corrección de columna de agua, de Pto. Morelos, Quintana Roo.	34

Figura 18. Akumal, Quintana Roo: análisis jerárquico mediante el índice de Bray-Curtis (de la raíz cuadrada de los datos): se destaca 80% de similitud y las clases que se generaron partiendo de ese criterio. La línea punteada (...) Indica el 80% de similitud, las líneas rojas indican la agrupación de clases..... 36

Figura 19. Pto. Morelos, Quintana Roo: análisis jerárquico mediante el índice de Bray-Curtis (de la raíz cuadrada de los datos): se destaca 80% de similitud y las clases que se generaron partiendo de ese criterio. La línea punteada (...) Indica el 80% de similitud, las líneas verdes indican la agrupación de clases..... 36

Figura 20. Akumal, Quintana Roo: porcentajes de cobertura para cada una de las clases: Ma, macroalgas; Pm, pastos marinos; Es, esponjas; Cb, coral blando; Cd, coral duro; Ar, sustrato. La categoría de otros corresponde a coberturas conjuntas menores al 5% (ej. coral blando, coral duro, esponjas y sustrato arenoso). 37

Figura 21. Pto. Morelos, Quintana Roo: porcentajes de cobertura para cada una de las clases: Ma, macroalgas; Pm, pastos marinos; Es, esponjas; Cb, coral blando; Cd, coral duro; Ar, arena. La categoría de otros corresponde a coberturas conjuntas menores al 5% (ej. coral blando, coral duro y esponjas)..... 38

Figura 22. Akumal, Quintana Roo: comparación entre los coeficientes Tau (T_e) y la exactitud general para cada uno de los ortomosaicos desde el no corregido, con corrección atmosférica, con *deglint*, hasta la corrección de columna de agua; datos derivados de la clasificación supervisada para cada una de sus respectivas matrices de contingencia (tabla 11)..... 44

Figura 23. Pto. Morelos, Quintana Roo: comparación entre los coeficientes Tau (T_e) y la exactitud general para cada uno de los ortomosaicos desde el no corregido, con corrección atmosférica, con *deglint*, hasta la corrección de columna de agua; datos derivados de la clasificación supervisada para cada una de sus respectivas matrices de contingencia (tabla 11)..... 45

Figura 24. Akumal, Quintana Roo: clasificación supervisada con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua (elaborado con 80% de los sitios de entrenamiento): DMpm, dominado por pastos marinos; DMar, dominado por arena; CMma, cobertura media de macroalgas; CMpm, cobertura media de pastos marinos; CMar, cobertura media de arena; CBma, Cobertura baja

de macroalgas; CBpm, cobertura baja de pastos marinos. Exactitud general del 83.33% con coeficiente kappa de 0.78 (evaluado con el 20% de los sitios de entrenamiento, de manera independiente)..... 46

Figura 25. Diagrama de pastel sobre el porcentaje del área total de 17.09 ha para cada una de las clases del mapa final (con corrección atmosférica, de glint y corrección de columna de agua) desarrollado a partir de una clasificación supervisada con el 80% de los sitios de entrenamiento para el ortomosaico multiespectral de Akumal. 47

Figura 26. Pto. Morelos, Quintana Roo: clasificación supervisada sin aplicar técnicas de pre-procesamiento (elaborado con 80% de los sitios de entrenamiento): DMar, dominado por arena; CMpm, cobertura media de pastos marinos; CMma, cobertura media de macroalgas; CBar, cobertura baja de arena; CMar, cobertura media de arena; CBpm, cobertura baja de pastos marinos; CBma, cobertura baja de macroalgas; CApm, cobertura alta de pastos marinos. Exactitud general del 75% con coeficiente kappa de 0.67 (evaluado con el 20% de los sitios de entrenamiento, de manera independiente)..... 48

Figura 27. Diagrama de pastel sobre el porcentaje del área total de 12.14 ha para cada una de las clases del mapa final (sin aplicar técnicas de pre-procesamiento) desarrollado a partir de una clasificación supervisada con el 80% de los sitios de entrenamiento para el ortomosaico multiespectral de Pto. Morelos. 49

Figura 28. anomalías del viento (200mb) en el mes de junio (arriba) del 2019 y agosto (debajo). Datos: NCEP Daily Global Analyses. Tomado del Reporte del clima de México (CONAGUA, 2019)..... 50

Figura SI. Campo dominado por macroalgas y substrato arenoso, así como, algunos corales blandos de categoría morfológica ramosa y abanico. 75

Figura SII. Campo dominado por pastos marinos (*Syringodium filiforme*)..... 76

Figura SIII. Campo dominado por pastos marinos (*Thalassia testudinum*)..... 76

Figura SIV. Coral blando y duro de categoría morfológica ramosa y masivo/domo, respectivamente.....	77
Figura SV. Coral duro (de categoría morfológica tipo masivo/domo; <i>Orbicella annularis</i>) con secciones del complejo con blanqueamiento total y/o muertas, además, unas secciones pálidas.....	77
Figura SVI. Coral blando de categoría morfológica de tipo pluma y coral duro de categoría morfológica de tipo cerebro, digitiforme, y algunos fragmentos de tipo masivo/domo, principalmente.....	78
Figura SVII. Coral duro (de categoría morfológica tipo masivo/domo) con secciones del complejo con blanqueamiento total y/o muertas, con algas y esponjas incrustantes recubriéndolo; en el fondo, un coral blando de tipo abanico.	78
Figura SVIII. Dominancia de pastos marinos (<i>Syringodium filiforme</i> acompañada con un poco de <i>Thalassia testudinum</i>), así como, algunas macroalgas. También se aprecia un equinodermo (<i>Oreaster reticulatus</i>) de un tamaño considerable.....	79
Figura SIX. Coral blando (de categoría morfológica de tipo ramoso) con notable dominancia de los pastos marinos (una mezcla de <i>Thalassia testudinum</i> con <i>Syringodium filiforme</i>).....	79
Figura SX. Coral duro de categoría morfológica de tipo coral de fuego (<i>Millepora alcicornis</i>), acompañado por <i>Syringodium filiforme</i> y macroalgas.	80
Figura SXI. Coral blando (de categoría morfológica tipo ramoso) con pastos marinos (<i>Thalassia testudinum</i> y <i>Syringodium filiforme</i>).	80
Figura SXII. Coral duro de categoría morfológica ramosa (<i>Acropora cervicornis</i>), acompañado por <i>Syringodium filiforme</i> y <i>Thalassia testudinum</i>	81
Figura SXIII. Coral blando ramoso con macroalgas en el fondo.....	81
Figura SXIV. Campo dominado por pastos marinos (<i>principalmente Syringodium filiforme</i> y un poco de <i>Thalassia testudinum</i>).	82
Figura SXV. Akumal, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda uno y dos correspondientes a 1392 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 5-2 m.	85

Figura SXVI. Akumal, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda uno y tres, correspondientes a 1392 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 5-2 m.	85
Figura SXVII. Akumal, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda dos y tres, correspondientes a 1392 pixeles de arenales para cada una de las bandas para una profundidad de entre 5-2 m.....	86
Figura SXVIII. Pto. Morelos, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda dos y uno correspondientes a 1680 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 4-2 m.	89
Figura SXIX. Pto. Morelos, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda uno y tres correspondientes a 1680 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 4-2 m.	89
Figura SXX. Pto. Morelos, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda dos y tres correspondientes a 1680 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 4-2 m.	90

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Ecuación empleada para corregir atmosféricamente los ortomosaicos, donde: A_i hace referencia a la reflectancia atmosféricamente corregida; L_i es la reflectancia del píxel para la banda i ; L_{si} es la reflectancia media en aguas profundas para la banda i ($L_{si} = x_i + s_i$, donde x_i es la media aritmética y s_i corresponde a la desviación estándar)..... 25

Ecuación 2. Ecuación empleada para la remoción del *sun glint* (*deglint*) en los ortomosaicos, donde: R_i' es la reflectancia con remoción del *sun glint*; R_i corresponde a la banda i (cada una de las bandas); b_i es la pendiente de la regresión; R_{NIR} es el valor del píxel en NIR; $MinNIR$ hace referencia al NIR del ambiente (valor mínimo del NIR). 26

Ecuación 3. Ecuación para calcular el Índice de profundidad invariable del fondo (P), donde: L es la reflectancia del píxel para una banda (subíndices i y j hacen referencia a bandas espectrales diferentes); σ_{ii} es la varianza de la banda i ; σ_{jj} es la varianza de la banda j ; σ_{ij} es la covarianza de las bandas

i y j); K_iK_j es la razón del coeficiente de atenuación y a es el coeficiente de atenuación..... 27

Ecuación SI y SII. Cálculos efectuados con la corrección atmosférica y el *deglint*, Akumal, Quintana Roo. La imagen con el *deglint* con un balance de 0.16, de acuerdo con Watkins Russell (2015)..... 83

Ecuación SIII. Cálculos semidesarrollados del índice de profundidad invariable para cada uno de los tres pares de datos de las bandas (b1-b2, b1-b3 y b2-b3) del *subset* de los fondos de sustrato uniforme (arenales) para el ráster de Akumal, Quintana Roo. 84

Ecuación SIV y SV. Cálculos efectuados con la corrección atmosférica y el *deglint*, Pto. Morelos, Quintana Roo. La imagen con la corrección atmosférica con un balance de 0.39 y 0.07 a la imagen del *deglint*, de acuerdo con Watkins Russell (2015)..... 87

Ecuación SVI. Cálculos semidesarrollados del índice de profundidad invariable para cada uno de los tres pares de datos de las bandas (b2-b1, b1-b3 y b2-b3) del *subset* de los fondos de sustrato uniforme (arenales) para el ráster de Pto. Morelos, Quintana Roo. 88

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos de hábitats del sistema bentónico arrecifal, basados en porcentajes de cobertura del AOI de Akumal ($\geq 10 < 30\%$ = cobertura baja, $\geq 30 < 60\%$ = cobertura media, $\geq 60 < 80\%$ = cobertura alta, $\geq 80\%$ = dominado). 37

Tabla 2. Tipos de hábitats del sistema bentónico arrecifal, basados en porcentajes de cobertura del AOI de Pto. Morelos ($\geq 10 < 30\%$ = cobertura baja, $\geq 30 < 60\%$ = cobertura media, $\geq 60 < 80\%$ = cobertura alta, $\geq 80\%$ = dominado). 38

Tabla 3. Matriz de error de las firmas espectrales sin correcciones del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos

marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos..... 39

Tabla 4. Matriz de error de las firmas espectrales con previa corrección atmosférica del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos..... 39

Tabla 5. Matriz de error de las firmas espectrales con previa corrección atmosférica y *deglint* del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos..... 40

Tabla 6. Matriz de error de las firmas espectrales con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos. 40

Tabla 7. Matriz de error de las firmas espectrales sin correcciones del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas. 41

Tabla 8. Matriz de error de las firmas espectrales con corrección atmosférica del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno,

dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas. 41

Tabla 9. Matriz de error de las firmas espectrales con corrección atmosférica y *deglint* del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas..... 42

Tabla 10. Matriz de error de las firmas espectrales con corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas. 42

Tabla 11. Resultados de los cálculos de coeficiente Tau (T_e), exactitud general, *percentage of agreement* (P_o) y *random agreement* (P_r) de cada uno de los ortomosaicos, tanto para Akumal como para Pto. Morelos..... 43

Tabla 12. Valores calculados para la prueba de hipótesis en la determinación de las significancias entre los ortomosaicos con clasificación supervisada de Akumal y Pto. Morelos. S/C, sin correcciones; CATM, con corrección atmosférica; DGLT, con *deglint*; CCA, con corrección de columna de agua. El símbolo rojo hace referencia a significativamente diferentes (\neq) y el amarillo referencia a no significativamente diferentes (=)..... 44

Tabla 13. Intervalos para la interpretación del coeficiente kappa (Landis & Koch, 1977). 53

Tabla SI. Datos clave sobre los cálculos efectuados para realizar las correcciones al ortomosaico multiespectral de Akumal, Quintana Roo..... 86

Tabla SII. Datos clave sobre los cálculos efectuados para realizar las correcciones al ortomosaico multiespectral de Pto. Morelos, Quintana Roo..... 90

1. Resumen/Abstract

Los paisajes bentónicos arrecifales son amenazados por perturbaciones tanto antropogénicas como naturales. En el Caribe Mexicano, el acelerado desarrollo de la infraestructura turística compromete aún más la resiliencia de estos sistemas. Por lo tanto, es necesario desarrollar evaluaciones rápidas, exactas y espacialmente explícitas. Este trabajo tiene como principal objetivo evaluar la exactitud de mapas temáticos del sistema bentónico arrecifal construidos a partir del análisis de imágenes multispectrales obtenidas mediante un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). Se usó un VANT Matrice 100, equipado con una cámara multispectral rededge-MX (*RGB-RedEdgeMX-NIR*) para obtener imágenes del paisaje bentónico arrecifal en aguas poco profundas. Los ortomosaicos se construyeron utilizando algoritmos de procesamiento *Structure from Motion (SfM)*. Se aplicaron técnicas de pre-procesamiento de imágenes (correcciones atmosférica, *deglint* y de columna de agua) a los ortomosaicos, y se realizó una clasificación supervisada utilizando sitios de entrenamiento agrupados en función del porcentaje de cobertura de sustratos bentónicos (coral blando, coral duro, pastos marinos, arena y macroalgas) para construir mapas temáticos del hábitat bentónico. La exactitud general de los mapas temáticos fue de 83.33% ($Kappa = 0.78$) y 75% ($Kappa = 0.67$) para Akumal y Pto. Morelos respectivamente y se evaluaron considerando diferentes técnicas de pre-procesamiento sobre los ortomosaicos. En condiciones ambientales adecuadas (ej. viento bajo, alta transparencia de la columna de agua), los VANT equipados con cámaras multispectrales son herramientas poderosas para caracterizar el paisaje bentónico arrecifal poco profundo. Además, el uso de estas herramientas permite realizar evaluaciones frecuentes y rápidas a un costo relativamente bajo, proporcionando información sobre la dinámica del paisaje bentónico arrecifal.

The tropical benthic reef seascapes are threatened by anthropogenic and natural disturbances. In the Mexican Caribbean, the fast development of the tourist infrastructure further compromises the resilience of this system. Therefore, rapid accurate and spatially explicit assessments are needed. This work aims to evaluate the accuracy of thematic maps of the benthic reef system obtained from the analysis of multispectral images collected by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). We used a Matrice 100 UAV, equipped with a rededge-MX multispectral camera (*RGB-RedEdgeMX-NIR*) to obtain images of the shallow benthic seascape. Orthomosaics were constructed using Structure from Motion (SfM) processing algorithms. Image pre-processing techniques were applied (atmospheric and water column corrections) to the orthomosaics, and a supervised classification using training sites (percentage of cover of soft coral, hard coral, seagrass, sand, and macroalgae) was used to construct benthic habitat thematic maps. The general accuracy of the thematic maps were 83.33% ($Kappa = 0.78$) and 75% ($Kappa = 0.67$) to the orthomosaics of Akumal and Pto. Morelos respectively, and they were assessed considering different pre-processing techniques to the orthomosaics. Under adequate environmental conditions (e.g., low wind, high water column transparency) UAVs coupled with multispectral cameras, are powerful tools to characterize the shallow seascape. Furthermore, the use of these tools allows to conduct frequent and fast assessments at a relative low cost, providing information on the dynamics of the benthic reef seascape.

2. Introducción

En México, el mayor desarrollo arrecifal se extiende de manera casi continua a lo largo de las costas del Estado de Quintana Roo, con una extensión aproximada de 400 km de largo, considerada la reserva coralina más importante de México. Esta zona junto con los arrecifes que se encuentran frente a las costas de Belice, Honduras y Guatemala, conforman el Sistema Arrecifal Mesoamericano, el segundo sistema arrecifal más grande del mundo después de la Gran Barrera Australiana (Almada *et al.*, 2003).

Los paisajes bentónicos arrecifales son heterogéneos y albergan una gran biodiversidad biológica debido a su gran productividad (Jordan, 1993). Ocurren en aguas someras a lo largo de la franja tropical, entre los trópicos de Cáncer y Capricornio (Spalding *et al.*, 2001). El sistema arrecifal, considerado como la interacción que se da entre praderas de pastos marinos, camas de macroalgas, arrecifes de coral y sustratos arenosos libres de vegetación, se ha visto amenazado por fenómenos antropogénicos y naturales (Horta, 2010), los cuales han ocasionado su modificación (Chadwick & Morrow, 2011). Aquellas perturbaciones naturales que generalmente afectan al paisaje arrecifal son los huracanes, las tormentas tropicales, los frentes fríos invernales, la descarga de agua proveniente del continente y el oleaje. Por otro lado, perturbaciones antropogénicas como la sobrepesca, la contaminación química, la pesca con explosivos, los encallamientos de embarcaciones y actividades turísticas no controladas, afectan también a estos sistemas (Garzón & Díaz, 2003; Horta, 2010). Por otro lado, en las últimas décadas, el cambio climático ha provocado un incremento en la frecuencia de las perturbaciones (Birkeland, 2015), consecuentemente, alterando los patrones de las corrientes, la topografía y al sustrato, llevando a una reducción de la complejidad del sistema, al generar la muerte de ciertas secciones (Connell, 1997).

Debido a que el gran desarrollo de la infraestructura turística podría estar comprometiendo la resiliencia del sistema bentónico arrecifal del Caribe

Mexicano, es necesario desarrollar más investigación en la región para entender las nuevas tendencias con relación al desarrollo costero y el cambio climático (Rioja *et al.*, 2018).

Los sensores remotos para el estudio de sistemas arrecifales han ido ganando popularidad por su gran utilidad en el monitoreo. Algunos instrumentos que se han empleado para su estudio son: videofotografía, fotografía aérea, imágenes multiespectrales e hiperespectrales. Éstos se han usado para determinar las propiedades biofísicas de estos ecosistemas (presencia/ausencia, composición y batimetría, etc.). Particularmente, los sensores multiespectrales se han usado para elaborar mapas temáticos de las características de los sistemas arrecifales coralinos con exactitudes por encima del 80%, mientras que, los sensores hiperespectrales, al proporcionar mayor intervalo espectral, se han empleado principalmente en mapeos más detallados de los tipos de cobertura, desde diferencias estructurales hasta propiedades químicas (Goodman *et al.*, 2013).

Las ventajas de la utilización de sensores remotos incluyen, entre otras, la posibilidad de obtener mediciones de cada lugar, la velocidad con la que los datos pueden ser adquiridos y procesados, el costo relativamente bajo de muchos de los sensores, y la capacidad de recopilar datos en áreas de difícil acceso (Bortolot & Wynne, 2005; Sá *et al.*, 2015).

En este sentido, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), junto con los avances recientes en microsensores, permiten obtener imágenes con una alta resolución en tres niveles (espectral, espacial y temporal). Además, los VANT permiten llevar a cabo planes de vuelo de forma autónoma y con gran exactitud, así como, transportar distintos tipos de sensores (Yuste *et al.*, 2013).

Con este proyecto, se propone determinar la capacidad de imágenes multiespectrales transportadas por VANT para la caracterización del paisaje bentónico arrecifal.

3. Marco Teórico

3.1. El sistema bentónico arrecifal

El sistema bentónico arrecifal consiste en un complejo mosaico de manglar, praderas de pastos marinos, macroalgas y arrecifes de coral interactuando dinámicamente, influenciados por el medio terrestre y el mar abierto (Ogden, 1988). Cuenta con una gran variedad de zonas ecológicas, en las cuales, su estructura (cobertura total, organización espacial, diversidad y dominancia) es controlada por una serie de factores y gradientes físicos (principalmente, régimen de transferencia de energía por medio de corrientes y luz) e interacciones ecológicas (Montaggioni *et al.*, 2009). Su desarrollo depende de variables ambientales (como temperatura, salinidad, pH, nutrimentos, oxígeno disuelto, sedimentos, etc.), que modifican las historias de vida (reproducción, crecimiento, longevidad, etc.) de sus especies constructoras y erosionadoras (Hallock, 1997; Hubbard, 1997).

Existen muchas formas y grados en que los arrecifes de coral se encuentran interconectados con los manglares y las praderas de pastos marinos (Moberg & Folke, 1999), algas y sustrato. El manglar y las praderas de pastos marinos filtran las descargas de agua dulce, retienen la materia orgánica e inorgánica en suspensión, así como, de contaminantes, generando un ambiente limpio, con escasos nutrimentos, promoviendo el crecimiento del arrecife de coral, mientras que, este último, provee a los otros hábitats de un amortiguador de corrientes oceánicas y del oleaje, creando un adecuado ambiente tanto para los pastos marinos como para los manglares (Moberg & Folke, 1999).

Los pastos marinos son angiospermas acuáticas, se caracterizan por ser un grupo clonal, por lo que principalmente colonizan el espacio creciendo vegetativamente (Larkum *et al.*, 2007). Tienen hojas lineales con meristemas basales y sus tejidos están menos lignificados que las angiospermas terrestres (Stevenson, 1988). Los pastos marinos proveen hábitat a una gran cantidad de peces e invertebrados, formando comunidades únicas (Christensen *et al.*, 2003) y relaciones con otras comunidades marinas, a

través de exportación de materia orgánica disuelta, y el movimiento de peces e invertebrados a zonas de cría, migración ontogénica, así como la búsqueda de alimentos (Rooker & Dennis, 1991). De manera general en el Caribe, la especie *Halodule wrightii* (en contraste con *Syringodium filiforme* y *Thalassia testudinum*) es la primera, respecto a la sucesión de los pastos marinos, en colonizar los sedimentos inestables. Su presencia promueve la estabilización de los sedimentos, y posterior aparición de *S. filiforme* y *T. testudinum*. Esta última especie no tolera aguas con elevada turbidez ni fuertes corrientes (Zieman & Zieman, 1989).

Muchos peces arrecifales migran ontogénica o estacionalmente con patrones de migración a distancias considerables, en las que los estadios juveniles se asientan y crecen en hábitats alternativos, como las praderas de pastos marinos y manglar, para después, en estadios sub-adultos migrar al hábitat arrecifal, donde maduran sexualmente (Cocheret *et al.*, 2002).

Los manglares están conformados por especies de árboles y arbustos halófitos que forman una interfaz, localizada en zonas intermareales entre el medio terrestre y el marino, principalmente en lagunas costeras y estuarios en regiones tropicales y subtropicales (Polidoro *et al.*, 2010). Algunas especies de peces ocupan los manglares como zonas de crianza (Cocheret *et al.*, 2002). La ausencia de manglar se relaciona con una gran reducción del número de individuos adultos de especies de peces arrecifales (Mumby *et al.*, 2004).

Los arrecifes de coral están compuestos principalmente por roca caliza y sedimentos calcáreos biogénicos, que le otorgan resistencia al oleaje (Hubbard, 1997) y son estructuras esqueléticas, rígidas, con una estructura predominada por corales pétreos (Hallock, 2015). Requieren para su desarrollo óptimo una alta irradiación solar, temperaturas entre los 23° - 29° C (algunos llegan a tolerar los 40° C por cortos periodos), salinidad de 32-35%, alta transparencia y baja concentración de nutrientes (Lapointe, 1997). El sustrato en el arrecife es suministrado por corales y algas coralinas, además, es cementado por algas calcáreas, esponjas y briozoarios (Masselink & Hughes, 2003).

La degradación del sistema bentónico arrecifal es causada por procesos físicos (ej. tormentas y huracanes), así como, bioerosión (Flügel & Flügel, 1992). Si una serie de perturbaciones ocurren muy frecuentemente, con intervalos de tiempo muy cortos para recuperarse, se considera como una perturbación crónica (Connell, 1997). El cambio climático provoca un aumento en la frecuencia de las perturbaciones (Birkeland, 2015). Las perturbaciones pueden provocar alteraciones al sustrato, a los patrones de las corrientes, a la topografía o la muerte de ciertas secciones del sistema, llevando a la reducción de la complejidad del sustrato, aumento del movimiento del agua e incidencia de la luz sobre el sustrato y reducción de la cantidad de refugios para animales vágiles (Connell, 1997).

El Caribe cuenta con menos resiliencia en contraste con el Indo-Pacífico; ya que cuenta con una menor cantidad de representantes de cada grupo funcional (Moberg & Folke, 1999). Al contar con menos representantes de cada grupo funcional, al desaparecer una especie, se pone en riesgo la pérdida de esa función; dicha función es llevada a cabo por otras especies, manteniendo la relativa estabilidad del sistema arrecifal coralino (Bellwood *et al.*, 2004).

El manejo de ecosistemas, como los implicados en el paisaje bentónico arrecifal, deben de enfocarse en la salud y la capacidad productiva de los sistemas, así como, en la identificación y protección de hábitats clave, lo cual, será crítico para proteger la integridad y función de estos ecosistemas. Para fomentar la resiliencia del sistema es imperativo seleccionar las áreas que son críticas para la capacidad productiva del sistema a gran escala, manteniendo sus funciones ecológicas, donde los enlaces entre estos ecosistemas se mantengan dentro y entre éstos (Appeldoorn *et al.*, 2011).

Asimismo, la combinación de atributos de resiliencia y susceptibilidad, producción y fragilidad, productividad y vulnerabilidad a la sobreexplotación,

hace del manejo de los sistemas arrecifales, un reto científico (Birkeland, 2015).

3.2. Percepción Remota

La percepción remota (PR) ambiental es la medición, sin tener que estar en contacto con el objeto de interés, de las características espectrales de la Tierra, normalmente, mediante sensores instalados en plataformas, usados para inferir la naturaleza y características del terreno o superficie marina, o atmosfera, al momento de la observación (Mather & Koch, 2011). La PR consiste en la colección e interpretación de la información, primeramente, mediante la cuantificación de la radiación electromagnética que es naturalmente emitida o reflejada por la Tierra, que finalmente es captada por un sensor remoto (ESRI, 2000). Por lo que, es una manera muy eficiente para obtener datos de forma muy frecuente y sinóptica, de la superficie terrestre y oceánica (Ouellette & Getinet, 2016).

Una imagen adquirida remotamente esta compuesta de una matriz rectangular de medidas de flujo de radiacion electromagnetica emanada, en un pixel individual, por ello cada valor en el pixel representa la magnitud de la radiacion electromagnetica resultante de un área (Mather & Koch, 2011). Esa radiacion contiene informacion acerca de la naturaleza del material presente en el área del pixel, la posicion geográfica del área del pixel y el estado de la atmosfera a través del cual ha pasado la radiación electromagnética (Mather & Koch, 2011).

La energía electromagnética que llega a la Superficie de la Tierra, desde el Sol, es reflejada, transmitida y/o absorbida. La energía reflejada atraviesa la atmosfera e interactúa con esta; esa parte es la que entra al campo de visión del sensor, detectada y transformada en valores numéricos que son transmitidos a una estación terrestre. La cantidad y distribución espectral de la energía reflejada es usada en PR para inferir acerca de la naturaleza de la superficie analizada (Mather & Koch, 2011).

Los objetos sobre la superficie de la Tierra tienen características únicas de interacción con la radiación incidente, descritas por la respuesta espectral del objeto, presentando diferencias a lo largo del rango de longitud de onda (espectro electromagnético). Debido a que los objetos en la Tierra (medio terrestre, acuático

y atmosférico) reflejan, absorben, transmiten o emiten en diferentes proporciones, es posible su identificación particular (Mather & Koch, 2011).

3.3. Teoría del color

La percepción del color comienza cuando la luz alcanza la retina, en la pared posterior del ojo, donde están contenidos los fotorreceptores y la zona del nervio óptico. Los bastones y los conos tienen unos segmentos exteriores que contienen pigmentos específicos sensibles a la luz en los bastones, se encuentra, principalmente, rhodopsin (sensible a la oscuridad), y los conos contienen iodopsin (especialmente sensible al rojo, verde y azul). Cuando la luz choca con estos pigmentos, señales eléctricas son generadas, induciéndose la sinapsis (Hossler, 2014).

Para Goethe (1749 – 1832) a través de los colores y la luz, se manifiesta la naturaleza al sentido de la vista (Franco Taboada, 2015). Sin embargo, el ojo no percibe forma alguna, por cuanto la luz, la oscuridad y el color constituyen, juntos, lo que permite a la vista diferenciar los objetos y sus distintas partes, de ese modo, se construye el mundo visible, basándose en esos tres factores. De acuerdo con Goethe existe una polaridad generada por la presencia de luz y la oscuridad, en el cual, el negro representa la oscuridad (reposo visual, pasiva) y el blanco la presencia de luz (excitación del órgano visual, activa), siendo que los demás colores se originan por las modificaciones que sufre la luz debido a factores extrínsecos, y no se desarrollan a partir de la luz, sino por su intermedio (Neuschlosz, 1949; Calvo Ivanovic, 2014).

El color se explica desde la física como una función de la luz (Zelanski, Pat, & Alonso, 2001). El fenómeno del color de acuerdo con Sir Isaac Newton (1642-1726) implica que la luz blanca está compuesta del conjunto de los colores espectrales (figura 1-A), rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul y violeta (Neuschlosz, 1949), hecho que se logró demostrar al hacer converger, en un segundo prisma, cada uno de los rayos de los colores espectrales para formar nuevamente la luz blanca que se había separado con el primer prisma

(Zelanski, Pat, & Alonso, 2001), por síntesis aditiva de los colores luz (figura 1-B).

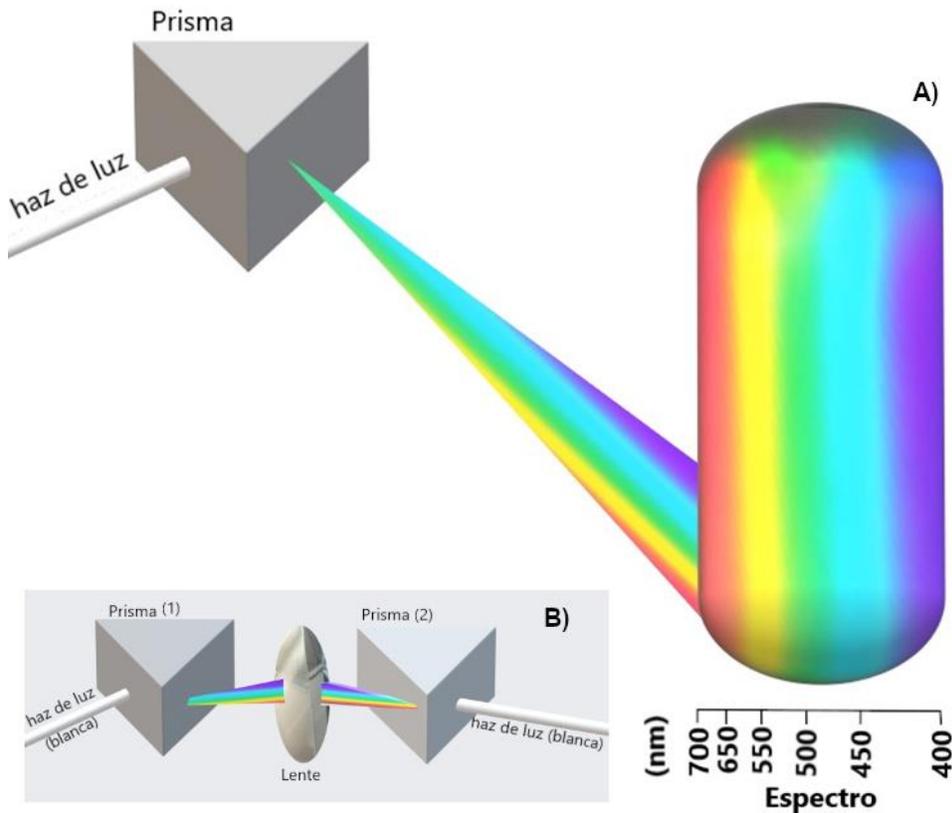


Figura 1. Experimentos cruciales sobre el comportamiento físico de la luz, empleados para explicar el fenómeno del color por I. Newton. Se aprecia el haz de luz atravesando un prisma, así como, la forma oblonga del espectro visible; la imagen sobre la forma cilíndrica es original del experimento mismo: A. dispersión de un haz de luz blanca en los matices del espectro al ser refractados ($n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$) con un prisma y, B. convergencia de los rayos previamente separados mediante un lente a otro prisma para formar de nuevo el haz de luz blanca, reintegración.

La luz blanca consta de rayos de diferente color cuya refrangibilidad varía del uno al otro; hecho deducido por *Newton*, y también, por *Cartesius Renatus* (1596-1650) y *Snellius Willebrord* (1580-1626), cuyos resultados, los llevo a establecer la ley general de la refracción de la luz (Neuschlosz, 1949). Además, al separar uno de los colores que emerge del prisma, haciéndolo pasar por otro prisma, demostró que, sin importar cuantos vidrios, espesores y formas atraviere, el haz de luz sigue siendo del mismo color (figura 2), como lo demostró *Newton I.* (Claro Huneus, 2014).

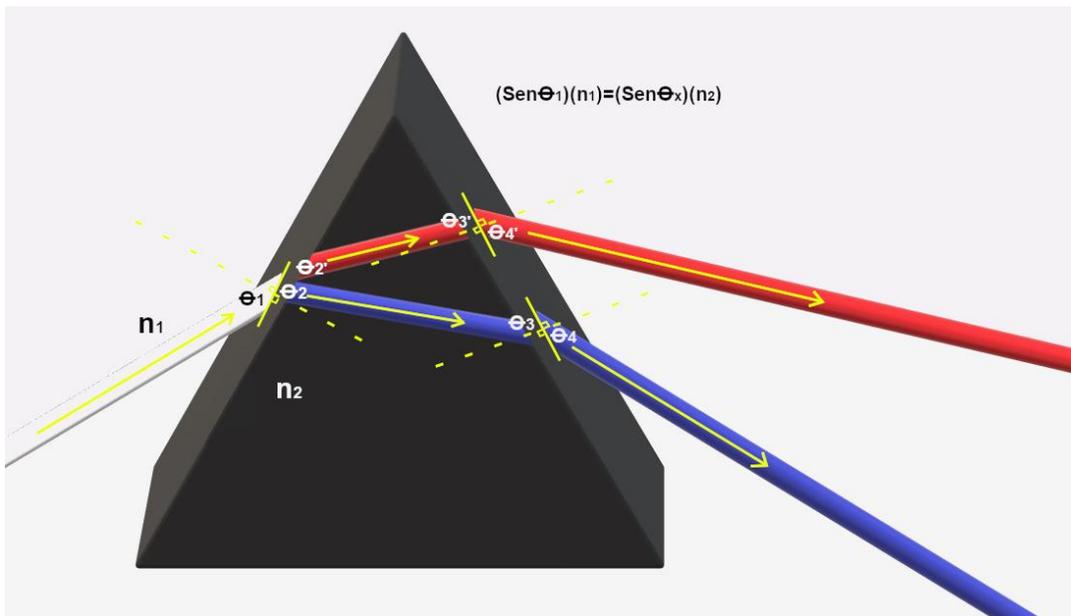


Figura 2. Haz de luz incidiendo sobre un prisma triangular, representando la refracción del rojo y el azul: se aprecia que los rayos emergentes cambiaron su ángulo, lo que los separa y permite que sean visibles, pues, al pasar las diferentes longitudes de onda de un medio a otro, los rayos de luz se refractan diferente: n_1 y n_2 corresponden a los distintos índices de refracción en cada uno de los medios (en el vacío y en el prisma, respectivamente) y Θ hace referencia a los ángulos de cada haz de luz desviado con respecto a la línea normal la cual es perpendicular a la superficie de incidencia del haz de luz blanca.

Así mismo, *Newton I.* demostró que la luz blanca es resultado de la suma de los colores primarios. Además, distinguió, inicialmente, dos tipos de colores la distinción escolástica entre colores enfáticos (producidos con prismas) y los reales (propios de los cuerpos, desvelados, pero no producidos por la luz; más bien, por síntesis sustractiva de los colores luz). Newton logró proyectar una luz que se manifestaba más oblonga que esférica, lo que evidencia la diferente refrangibilidad de los distintos rayos. Además, los sometió a una segunda refracción, lo que muestra la inalterabilidad de los colores primarios (Pimentel, 2015).

Dado que el color, físicamente hablando, es luz, es importante mencionar que Albert Einstein (1879-1955), postuló que la Teoría Ondulatoria presentaba ciertas inconsistencias, pues, la luz presentaba características de onda y corpúsculo. Posteriormente, Compton Arthur Holly (1892-1962) demostró que los fotones tienen masa. Sin embargo, más adelante Broglie Louis en 1924, basándose en la Teoría de la relatividad de Einstein, identificó

el dualismo corpúsculo-onda, postulando que todas las partículas elementales manifiestan un dualismo onda-corpúsculo.

3.4. Firmas espectrales del paisaje bentónico arrecifal

La radiación electromagnética (EMR) consiste en toda la energía que se emite a la velocidad de la luz en un patrón armónico de onda. La luz visible es solo una parte categórica del EMR, así como, las ondas de radio, infrarrojo y rayos gama (en conjunto comprenden al Espectro electromagnético). En términos tanto de su longitud de onda como de la frecuencia, varían las ondas unas con respecto a las otras. La longitud de onda se define como la distancia, en cuanto a posición, entre dos ciclos próximos, mientras que, la frecuencia es el número de ciclos que pasan por un mismo punto en un periodo de tiempo dado (1 ciclo por s = 1 Hz) (Khorram *et al.*, 2012).

Cuando la EMR hace contacto con la materia (p. e. agua, pastos marinos, arrecifes coralinos, manglar, etc.), ocurren los fenómenos de la absorción, reflexión, *scattering* (o emisión) de EMR por la materia o la transmisión del EMR a través de la materia. Cada material cuenta con propiedades de emisión y/o reflectancias particulares, colectivamente conocidas como firmas espectrales (o perfil), siendo lo que hace posible distinguir cierto material de entre otros (Khorram *et al.*, 2012).

Para estudiar los sistemas bentónicos se recolectan datos del espectro visible, debido a que normalmente penetran el agua $\approx 15\text{-}30$ m. La penetración de la luz va a depender de la longitud de onda, siendo más grande en el azul ($\approx 450 - 480$ nm) que en el rojo ($\approx 625 - 700$ nm). Así mismo, el grado con el que penetre la luz dependerá de las propiedades ópticas del agua (p. e. materia orgánica o sedimentos en suspensión) (Mumby *et al.*, 2004). El rango más eficaz para el estudio de las plantas bentónicas (ej. pastos marinos y macroalgas) corresponde a los $\approx 430\text{-}900$ nm (Fyfe, 2003). El rango adecuado para estudiar ópticamente la calidad del agua está entre los $\approx 450\text{-}800$ nm (Brando y Dekker, 2003).

Hochberg *et al.* (2003) encontraron que cada componente del paisaje bentónico arrecifal presenta propiedades de reflectancia distintivas que se encuentran en rangos de longitudes de onda bien definidos. Sus análisis de

clasificación demostraron que los componentes fundamentales son estadísticamente separables e identificables, basándose en el espectro de reflectancia (dada la frecuencia de ocurrencia de la segunda derivada). Además, identificaron tres patrones generales del comportamiento espectral de las colonias de coral: [1] un triple pico entre los ≈ 570 - 600 - 650 nm, con su máximo en los ≈ 570 nm (coral duro marrón), [2] un pico máximo entre los ≈ 600 - 650 nm, con un mínimo local de ≈ 580 nm (coral duro azul) y [3] tanto la arena como el coral blanqueado son similares en cuanto a su forma espectral, pero su magnitud es intermedia entre la de los corales sanos y la arena, correspondiendo a los ≈ 500 - 625 nm. Además, los autores encontraron que la arena es considerablemente más brillante que el coral, las macroalgas y los pastos marinos, encontrándose en el rango de los ≈ 500 - 625 nm. La arena tiene una reflectancia muy grande con mínimos valores, 20% de ellos, en los ≈ 400 nm, y máximos en los ≈ 700 nm para el 80% de los valores restantes.

Por su parte, tanto las algas verdes carnosas como los pastos marinos presentan una reflectancia entre los ≈ 550 - 560 nm, mientras que, las algas calcáreas incrustantes cuentan con formas espectrales similares a las algas rojas carnosas, caracterizadas por presentar dos grandes picos en los rangos que van de los ≈ 435 - 490 y ≈ 500 - 565 nm, igualmente, las algas pardas cuentan con el mismo patrón entre ≈ 435 - 490 nm. Los corales blandos son similares a las algas pardas, en cuanto a reflectancia espectral, no obstante, el coral blando cuenta con un pico cerca de los ≈ 570 nm, similar al coral duro marrón (Hochberg *et al.*, 2003).

3.5. Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)

Un VANT (RPAS, UAS o UAV por sus siglas en inglés), comúnmente conocido como *Drone* (o *buzz bee*) es un sistema caracterizado por una aeronave sin un operador humano a bordo y una infraestructura de apoyo (estación en tierra) (Gaggioli e Hidalgo, 2018) que realiza vuelos controlados mediante un control remoto o vuela autónomamente basándose en planes de vuelo pre-programados en su memoria (Guardado, Téllez y Herrera, 2017). Con el uso de VANT y/o instrumentos satelitales, se busca establecer

relaciones entre las mediciones obtenidas por estas plataformas (Mather & Koch, 2011). Los VANT reúnen los avances de la ciencia y tecnología de punta: inteligencia artificial, robótica, navegación, guiado y control, comunicaciones, aerodinámica, materiales, óptica y propulsión (Freire, 2009). Se les ha utilizado para el estudio y apoyo en tareas civiles, como agricultura de precisión, obtención de datos atmosféricos, geomorfología, caracterización de infraestructuras en situaciones de riesgo, emergencia y condiciones climáticas adversas. También han sido utilizados en otros campos de la realidad económica y social (Rangel, 2015).

Los satélites proveen de observaciones regulares y temporales de zonas costeras a diferentes escalas (Meaden & Aguilar, 2013), pero en general no permiten obtener, ya sea por el costo o capacidad de la plataforma, información de muy alta resolución espacial y temporal. En este sentido, los VANT pueden adquirir imágenes con resoluciones espaciales en el orden de cm y temporales con frecuencias desde horas hasta años, garantizando una continuidad temporal a un costo relativamente bajo, en términos generales. Haciendo que, los VANT sean aplicados cada vez más en el monitoreo ambiental por su alta resolución espacial y flexibilidad en la programación de vuelos (Wu *et al.*, 2019), al permitir un control directo sobre la disponibilidad de los datos (Green *et al.*, 2000), permitiendo realizar muestreos de manera eficiente y rentable (Lally *et al.*, 2019).

Conjuntamente, los VANT cuentan con capacidad para despegar y aterrizar en áreas sin pistas de superficie adecuadas, y se les puede ocupar en condiciones de alto riesgo (Watts *et al.*, 2012); no obstante, tanto su capacidad para despegar y aterrizar, como su empleo en condiciones de alto riesgo van a depender del tipo de VANT (ej. ala fija, ala rotatoria o ala híbrida) que se emplee y de las condiciones al momento del muestreo. Los VANT equipados con cámaras permiten la producción de un modelo de superficie continuo (ej. *Digital Elevation Model*), cuya principal ventaja es la obtención de una nube de datos continua, incluso en aquellos lugares donde es inaccesible, permitiendo un análisis exhaustivo. Además, los productos obtenidos mediante la carga de sensores sobre plataformas VANT tienen mayor resolución, menor costo, mucho más versatilidad y aplicabilidad que los obtenidos

mediante métodos clásicos (ej. mediante plataformas satelitales) (Yuste Martín *et al.*, 2013).

Por otro lado, el uso de los VANT para obtener imágenes ha evolucionado a la par con el desarrollo de algoritmos (mediante software especializado), que facilita la exportación de las imágenes, procesándolas analíticamente para leer valores RGB de píxeles (Edwards *et al.*, 2017). Simultáneamente, según Griffiths & Burningham (2019), los desarrollos en la fotogrametría con VANT se han alineado con dos impulsores fundamentales: primero, los avances en la tecnología de los VANT y la calidad de las cámaras para el consumidor han permitido que con un presupuesto bajo se puedan recopilar imágenes aéreas de alta calidad; en segundo lugar, el desarrollo en el campo de los Sistemas de Visión por Computador ha resultado en el desarrollo de programas de procesamiento como *Structure from Motion (SfM)*.

Finalmente, para que las técnicas de PR sean aplicadas exitosamente en programas de evaluación y monitoreo, la interpretación de los datos de las imágenes obtenidas mediante VANT debe ser repetible por otros usuarios, racionalmente de inicio a fin (Schrader & Duniway, 2011), empleando tanto los mismos datos como las mismas técnicas.

3.6. Sistemas de Información Geográfica

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una colección organizada de hardware, software, datos geográficos, mediante los cuales se almacenan, descargan, manipulan, analizan y despliegan todas las formas de información geográficamente referenciadas (ESRI, 2000). Una base de datos de SIG incluye datos de localización espacial y formas de características geográficas almacenadas como puntos, líneas, áreas, píxeles, celdas del grid o TIN, así como sus atributos (ESRI, 2000).

Los SIG se utilizan para el procesamiento, transformación y análisis espacial de datos georreferenciados para resolver problemas definidos. También, permiten elaborar predicciones, políticas y decisiones (Wright *et al.*,

1997). Finalmente, la tecnología en SIG se ha venido convirtiendo en una herramienta muy importante para investigaciones científicas, manejo de recursos y planificación ambiental.

4. Antecedentes

Joseph Niépce fue el primero en producir una fotografía permanente en 1826-27 (Hirsch, 2017). La primera imagen satelital de la Tierra fue tomada el 14 de agosto de 1959 por el satélite estadounidense Explorer 6 (SIGSA, 2019). Sin embargo, fue el lanzamiento de Landsat 1 en 1972, lo que marcó el inicio de una nueva era para la PR, con acceso a imágenes a gran escala de la Tierra, para mapear e inventariar sus recursos (Rocchio, 2019). Cabe destacar que Landsat 1 contaba con dos instrumentos principales: un sistema de cámaras llamado *Return Beam Vidicon (RBV)*, y el escáner multiespectral (*MSS*), el cual almacenaba datos en cuatro bandas, verde, rojo y dos infrarrojas (Rocchio, 2019). Posteriormente, es en los 1980s cuando se empiezan a usar las plataformas aéreas para estudios en el campo de la PR (Khorram *et al.*, 2016; Scoffin, 1982), luego en los 1990s aparecen los *Predator*, un VANT con sistema de posicionamiento GPS que fue utilizado para geolocalización y vigilancia (Guardado, Téllez y Herrera, 2017). Más recientemente, el 19 de abril del 2021 un VANT llamado *Ingenuity*, como parte de una misión de la NASA, completo exitosamente su primer vuelo en Marte. Así, los VANT han sido aplicados en muchos contextos, incluida la caracterización de sistemas bentónicos.

La PR, en combinación con los SIG ha sido empleada en una gran diversidad de trabajos de investigación para la evaluación y caracterización de los sistemas bentónicos arrecifales. Awak *et al.* (2016), llevaron a cabo una clasificación no supervisada, así como, desarrollaron un método para determinar la cobertura de coral vivo y muerto. De igual manera, destacan los trabajos de Otero *et al.* (2019), quienes, recientemente, analizaron la regeneración de un bosque de manglar en una reserva, auxiliándose con técnicas de PR.

Por otro lado, también sobresalen los trabajos focalizados en la mejora de la calidad de los mapas, por mencionar algunos ejemplos, están los trabajos de

Tokotoko *et al.* (2018), Ben *et al.* (2016) y Zhang (2014), donde desarrollaron exitosamente propuestas en cuanto a correcciones de inexactitud espacial empleando algoritmos de clasificación supervisada, evaluaciones de sensores y la combinación de fuentes de datos variadas, con la finalidad de incrementar tanto la exactitud como la calidad de los análisis de PR en los sistemas bentónicos arreciales.

Los VANT proveen de una plétora de soluciones y nuevas oportunidades para el monitoreo de los ecosistemas. Recientemente se les ha equipado con cámaras multiespectrales para obtener imágenes RGB, que son posteriormente procesadas con algoritmos fotogramétricos *SfM* (Wijesingha *et al.* 2019). Griffiths y Burningham (2019) empleando técnicas de fotogrametría mitigaron la distorsión sistemática en la estimación de la biomasa de pastizales con diferentes composiciones derivadas de prácticas de manejo distintas. También se les ha empleado para registrar y analizar el movimiento de arcillas y clastos en la costa, siendo el caso de Horacio *et al.* (2019), quienes lo hicieron combinando los VANT con fotografías históricas y LiDAR, procesándolas con algoritmos *SfM*. Rupasinghe *et al.* (2019) evaluaron dos metodologías de clasificación de píxeles, supervisada y no supervisada, determinando el rendimiento de los mapeos con cámaras hiperespectrales montadas en VANT, a partir de una clasificación de la vegetación costera. Y más recientemente Monteiro *et al.* (2021) reportaron la importancia de los VANT en el monitoreo de los hábitats costeros, combinando datos fisiográficos y principales enlaces entre organismos para identificar sus biotipos y extrapolar su distribución espacial basándose en un pareo tanto de condiciones como de correlaciones.

En el Caribe Mexicano, se han hecho algunos estudios en los que se llevó a cabo la caracterización del paisaje mediante el uso de PR. Sobresalen las investigaciones de Gutiérrez *et al.* (1993), Arias *et al.* (2012), Andréfouët *et al.* (2003), Cuevas *et al.* (2002), Rioja-Nieto y Sheppard (2008), Contreras *et al.* (2012), Martínez *et al.* (2015), Cruz-Vázquez *et al.* (2019) y Ortiz-Cajica *et al.* (2020) por mencionar algunos, siendo que, de manera general, en estos

trabajos se caracterizó el paisaje marino del Caribe Mexicano empleando atributos geomorfológicos (ej. laguna, cresta arrecifal, terraza continental, etc.), así como, componentes bentónicos (ej. coral duro, coral blando, pastos marinos, etc.) Así mismo, Cerdeira *et al.* (2012) aplicaron técnicas de PR a partir de imágenes del WorldView-2 y verificación de campo para producir mapas temáticos del sistema bentónico arrecifal del Parque Nacional de Pto. Morelos. En Akumal, Garza *et al.* (2004) utilizaron métodos de clasificación supervisada para construir mapas temáticos de alta exactitud a partir de análisis de regresión generalizada y metodología de predicción espacial (GRASP).

5. Área de Estudio

El Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos se encuentra entre las coordenadas extremas 21°00'00" y 20°48'33" latitud norte y 86°53'14.40" y 86°46'38.94" longitud oeste, en la costa del poblado de Pto. Morelos en el Estado de Quintana Roo. Mientras que Akumal se encuentra situado un poco más al Sur, entre las coordenadas 20°24'00" latitud norte y 87°19'00" longitud Oeste (Barrera & Namihira, 2004), formando parte del municipio de Tulum (figura 3 y 4).

El litoral del *Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos* alberga una gran diversidad de especies marinas, entre las que se reconocen varias especies, tales como *Eretmochelys imbricata*, *Acropora cervicornis* y *Plexaura homomalla*, que se encuentran registradas dentro de algún estatus de protección, conforme a la *NOM-059-SEMARNAT-2010* (DOF, 2010). Los arrecifes tanto de Akumal como los de Pto. Morelos forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano, considerada como la segunda barrera arrecifal más grande del mundo. Así mismo, forman parte de La Rivera Maya (INE & SEMARNAP, 2000; Barrera & Namihira, 2004) y la Reserva de la Biósfera Caribe Mexicano (DOF, 2016a).

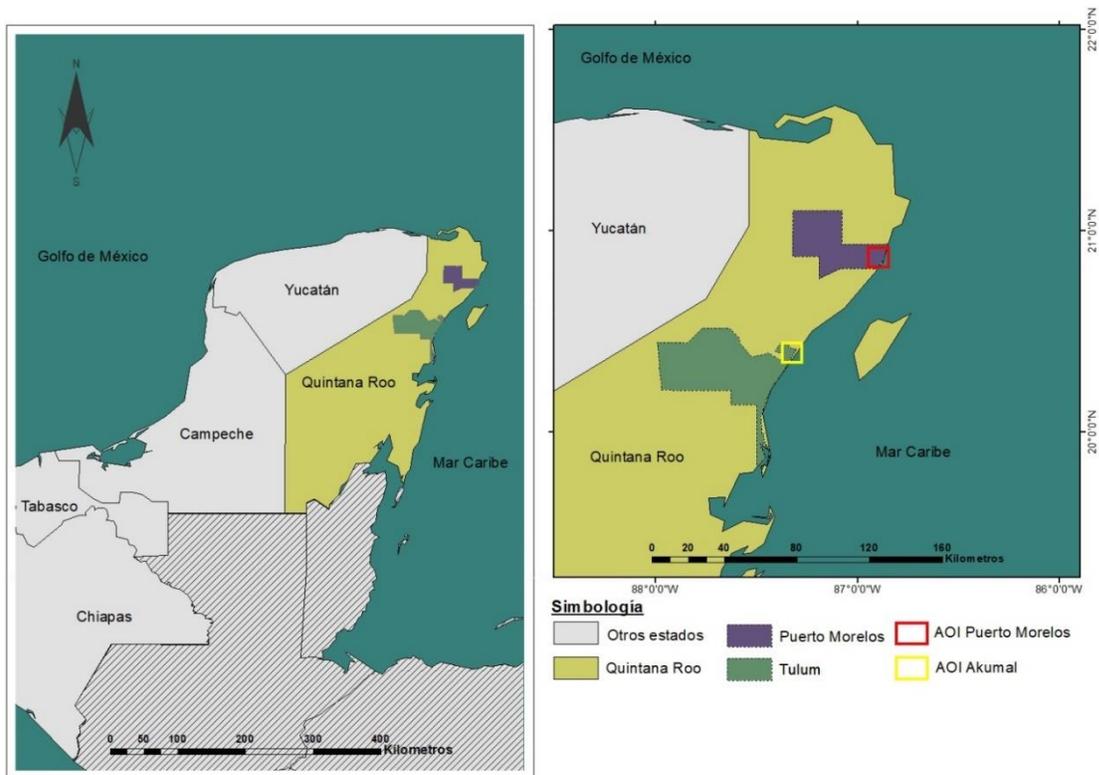


Figura 3. Área de estudio en las localidades de Akumal y Pto. Morelos, Quintana Roo, en el Caribe Mexicano.

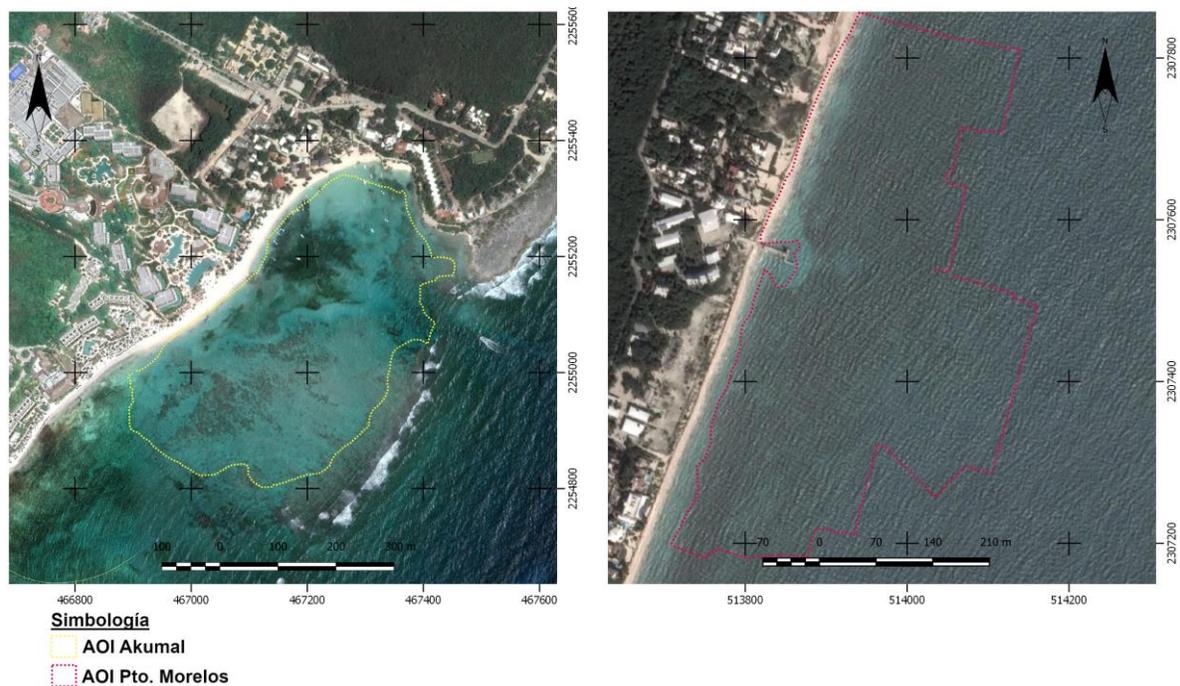


Figura 4. Acercamiento a ambas áreas de estudio: las líneas punteadas hacen referencia al área trabajada, a la izquierda Akumal y a la derecha Pto. Morelos.

El *Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos* fue creado en 1996, y se encuentra dividido en nueve zonas: I. uso recreativo, II. uso educativo e interpretación ambiental, III. canal de seguridad, IV. zona para navegación en la laguna arrecifal, V. zona para navegación, VI. uso recreativo semi-intensivo, VII. uso recreativo especial, VIII. uso pesquero concesionado, IX. uso científico (INE & SEMARNAP, 2000). Además, su perfil arrecifal, se encuentra dividido en seis zonas: orilla, laguna, arrecife posterior, cresta arrecifal, arrecife frontal y plataforma arenosa (INE & SEMARNAP, 2000).

Akumal cuenta con una Zona de Refugio Pesquero en Aguas Marinas de 988 hectáreas (DOF, 2015), que forma parte de un área de refugio para la protección de especies en la porción marina del municipio de Tulum denominada Bahía de Akumal (DOF, 2016b). El programa de manejo se estableció en el 2017, dividiendo la Bahía de Akumal en tres subzonas: I. Franja Marino Costera, II. Bahía Akumal y III. X'Acacel X'Acacelito (DOF, 2017).

La línea de costa en el Caribe Mexicano es semiárida, con suelos oligotróficos con características kársticas (Rioja *et al*, 2018).

En el Océano Atlántico, las variaciones estacionales, y de las capas superiores de la estructura de la termoclina están fuertemente relacionadas a las variaciones de los vientos, particularmente los relacionados con los cambios estacionales en la Zona Intertropical de Convergencia. Una red de transporte de calor del sur al norte del hemisferio llega al mar caribe, generando un clima cálido y húmedo en la región, que es importante durante el invierno del hemisferio norte. Tres masas de agua existen en el Caribe: agua cálida superficial del caribe (CSW), la submarina subtropical (SUW) y el agua central atlántica tropical (TACW). Las características de estas masas de agua se ven modificadas por la interacción con agua dulce costera y la circulación en el caribe mexicano (Rioja *et al*, 2018).

6. Hipótesis

Con base a las herramientas de manejo implementadas en las dos áreas de estudio, se espera que las imágenes multiespectrales obtenidas por VANT (equipados con cámaras multiespectrales) permitan la construcción de

ortomosaicos multiespectrales (RGB-NIR) para elaborar mapas temáticos del hábitat para caracterizar el paisaje bentónico arrecifal a ultra resolución espacial (en el orden de cm) con un bajo nivel de incertidumbre. Así mismo, el uso de correcciones atmosféricas y de columna de agua, incrementará significativamente ($p < 0.05$) la exactitud de los mapas temáticos obtenidos del paisaje bentónico arrecifal.

7. Objetivos

7.1. Objetivo general

Determinar la capacidad de imágenes multiespectrales pre-procesadas obtenidas por VANT para la caracterización del paisaje bentónico arrecifal.

7.2. Objetivos específicos

Obtener imágenes multiespectrales (RGB-NIR) de ultra alta resolución espacial del paisaje bentónico arrecifal en el Parque Nacional Arrecife de Pto. Morelos y Akumal.

Construir ortomosaicos multiespectrales mediante el uso de técnicas de fotogrametría digital.

Aplicar técnicas de pre-procesamiento de imágenes (corrección atmosférica, *deglint* y de columna de agua) en los ortomosaicos obtenidos.

Obtener estimaciones cuantitativas del porcentaje de cobertura de sustratos bentónicos en los sitios de estudio.

Construir Mapas temáticos del hábitat bentónico a partir de la clasificación supervisada de los ortomosaicos multiespectrales.

Determinar el efecto del uso de técnicas de pre-procesamiento en la incertidumbre de las imágenes de los mapas temáticos.

8. Materiales y métodos

8.1. Identificación de sitios de entrenamiento y obtención de imágenes multispectrales

Se realizó una clasificación no supervisada (algoritmo ISODATA) para el AOI de Akumal y Pto. Morelos utilizando una imagen raster del *World View 2* y *Landsat 7* para cada sitio, respectivamente. Este proceso se llevó a cabo con la finalidad de identificar las áreas homogéneas en las áreas de estudio y establecer un muestreo estratificado de sitios de entrenamiento (80 sitios para Akumal y 70 para Pto. Morelos), que posteriormente fueron utilizados para la clasificación supervisada (algoritmo clasificador de máxima probabilidad) de las imágenes obtenidas por drones. En ambos casos, para la clasificación no supervisada se utilizaron 10 clases, con un máximo de 10 iteraciones y un criterio de convergencia de 0.95 (figuras 5 y 6).

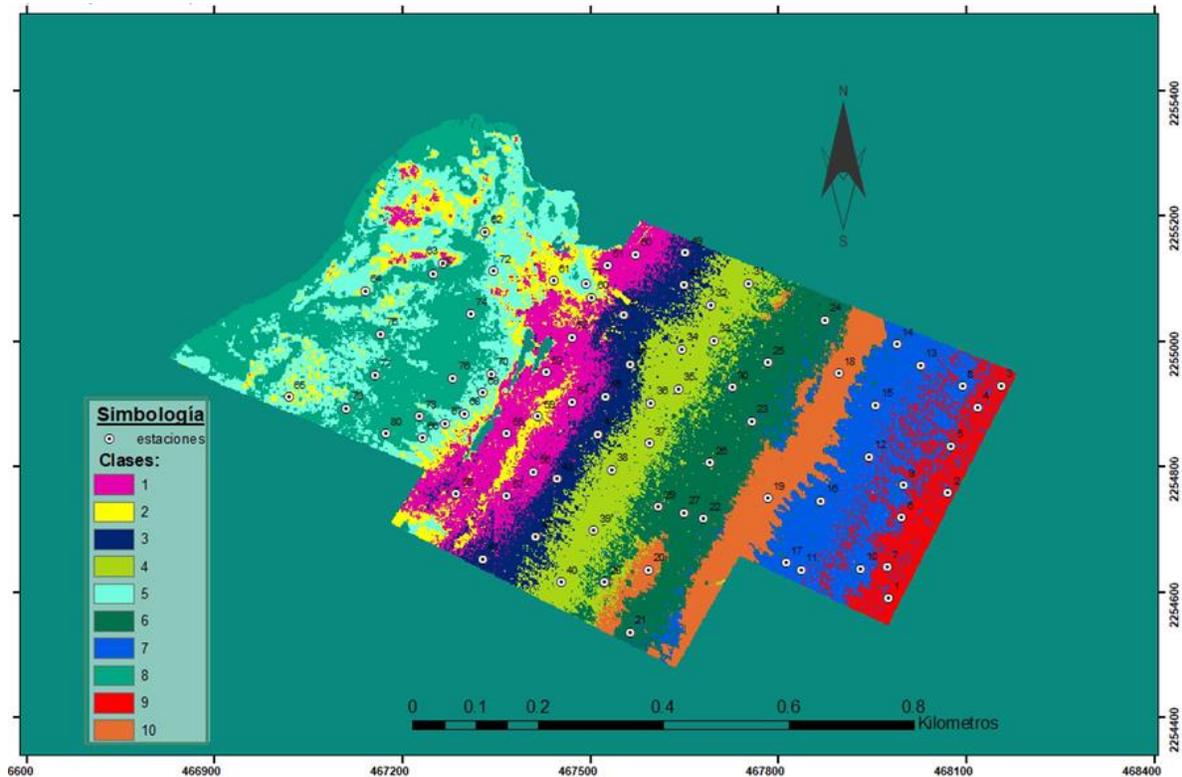


Figura 5. Ubicación de los sitios de entrenamiento identificados mediante el uso de un muestreo estratificado basado en la clasificación no supervisada con 10 clases de una imagen RGB del 2013 obtenida por la plataforma *World View 2*, para el AOI en Akumal, Quintana Roo.

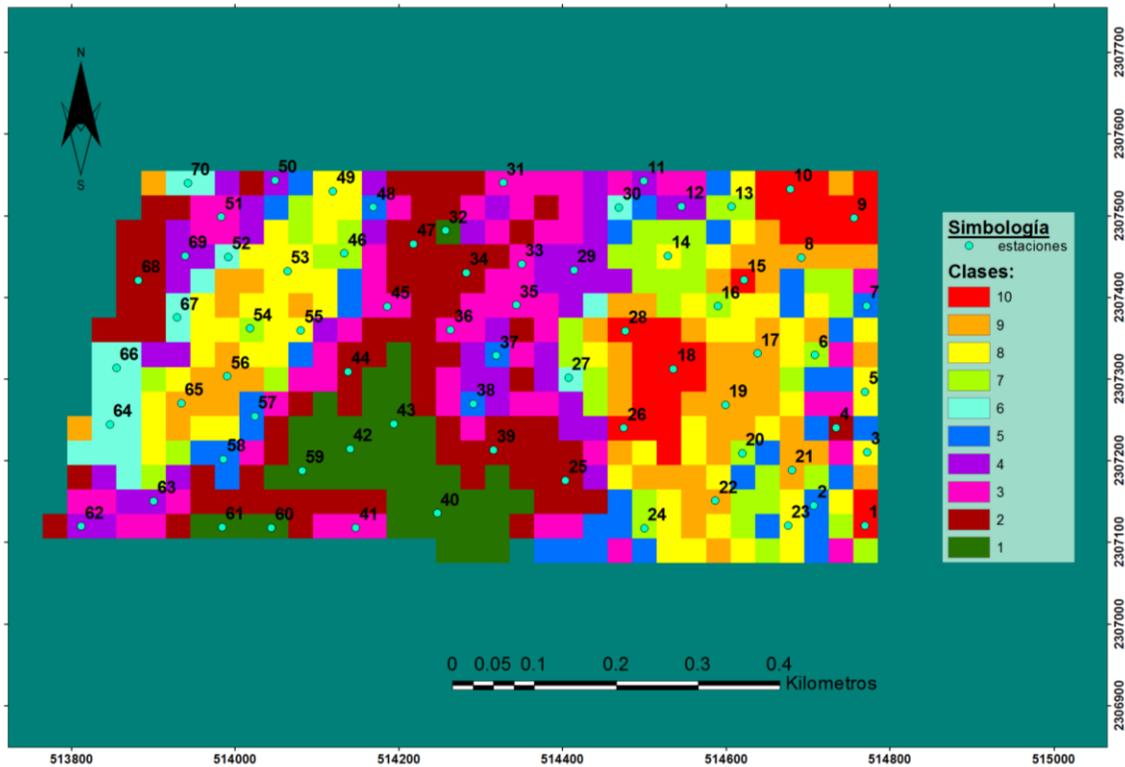


Figura 6. Ubicación de los sitios de entrenamiento identificados mediante el uso de un muestreo estratificado basado en la clasificación no supervisada con 10 clases de una imagen RGB del 17 de noviembre del 2009 obtenida por la plataforma *Landsat 7* para el AOI en Pto. Morelos, Quintana Roo.

Una vez definida la ubicación de los sitios de entrenamiento, se utilizó un VANT de ala rotatoria *Matrice 100* equipado con una cámara multiespectral *Micasense RedEdge-MX (RGB-RedEdgeMX-NIR)* para obtener imágenes multiespectrales en tres áreas de c.a. 0.25 km², desde la costa hasta <25 m de profundidad. El VANT fue desplegado (con un vuelo a 100 msnm) tanto desde una embarcación como del muelle (en Pto. Morelos) y desde una punta rocosa en Akumal, posteriormente, se programó una misión que permitió la colecta de imágenes considerando el 80% de sobreposición entre éstas, lo cual es necesario para su análisis (Pix4D, 2017). La colecta de imágenes con VANT se realizó en Akumal el 22 de junio del 2019 a las 17:30 hrs (figura 7) y en Pto. Morelos se hizo a las 9 hrs del 25 de agosto del mismo año (figura 8).

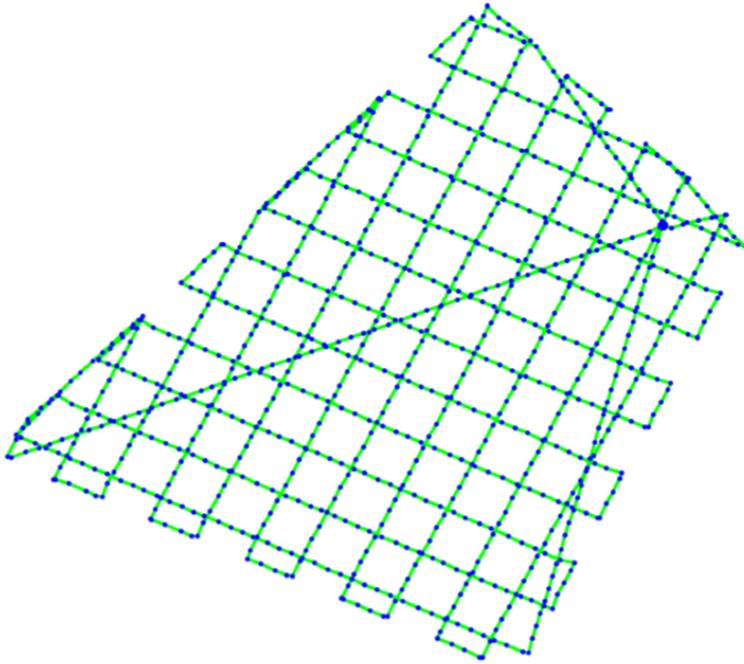


Figura 7. Plan de vuelo empleado en Akumal, Quintana Roo. La línea verde indica la trayectoria seguida por VANT matrice 100, los puntos azules indican el centro de la posición de las imágenes obtenidas. Se realizaron dos vuelos, uno de Norte a Sur y otro de Este a Oeste, en la porción más próxima a la costa.

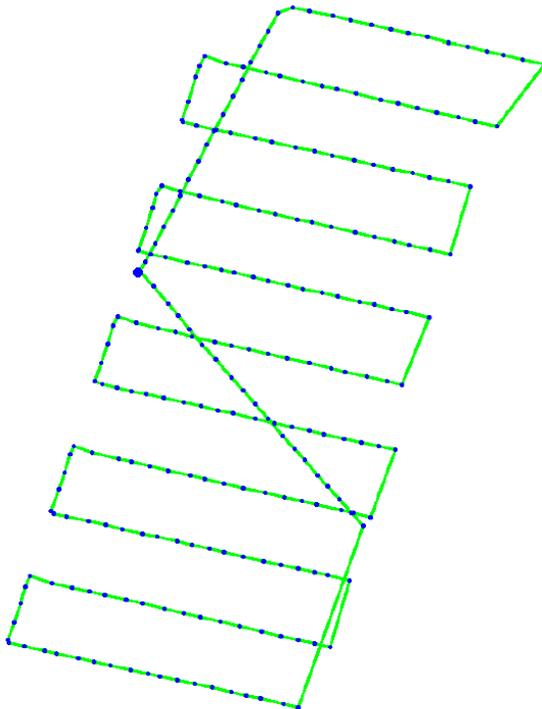


Figura 8. Plan de vuelo empleado en Pto. Morelos, Quintana Roo. La línea verde indica la trayectoria seguida por VANT matrice 100, los puntos azules indican el centro de la posición de las imágenes obtenidas. Vuelo realizado en la porción más próxima a la costa, de Este a Oeste.

Con el programa Pix4Dmapper 4.5.6, el cual utiliza algoritmos de procesamiento fotogramétrico SfM, se construyeron ortomosaicos multiespectrales con una resolución espacial de siete cm. Estos ortomosaicos fueron calibrados con un panel de reflectancia (MicaSense), cuya superficie genera una reflexión difusa, para obtener valores de reflectancia. Los ortomosaicos obtenidos fueron corregidos atmosféricamente mediante la técnica de substracción del píxel más oscuro (Chavez, 1996). Debido a que no fue posible reconstruir el mosaico en las zonas profundas para el ortomosaico de Pto. Morelos, los datos para realizar la corrección atmosférica se extrajeron de una imagen multiespectral, obtenida durante el mismo vuelo, que se sabe proviene de una zona profunda. Así mismo, se hicieron correcciones de brillo (*Deglint*) (Hedley, Harborne, & Mumby, 2005) y de columna de agua (Green *et al.*, 2000), en ese orden, de acuerdo con lo recomendado por Green, Mumby, Edwards, & Clark (2000) y Hedley, Harborne, & Mumby (2005). El pre-procesamiento de las imágenes se realizó con el módulo Model Maker del programa Erdas Imagine 2016. El cálculo de los coeficientes se llevó a cabo con el programa Excel.

8.2.Pre-procesamiento de imágenes

8.2.1. Corrección del efecto atmosférico

Las partículas suspendidas en la atmosfera pueden modificar los valores de los pixeles capturados por las cámaras multiespectrales (Khorram *et al.*, 2016). Esa modificación es conocida como efecto atmosférico, el cual afecta a las imágenes al dispersar, absorber y refractar la luz (Chavez, 1988).

El objetivo de la corrección atmosférica es cuantificar la reflectancia de la zona de interés y el brillo de la atmosfera (Hadjimitsis *et al.*, 2010). Se han desarrollado tanto métodos simples como sofisticados para llevar a cabo la corrección atmosférica. El método de Chávez (1996) proporciona correcciones razonables en las bandas RGB, en escenas sin nubosidad. Además, desde un punto de vista operacional, este método, es relativamente fácil de implementar y es preferible a técnicas más sofisticadas que requieren

de la adquisición de datos atmosféricos o meteorológicos (Hadjimitsis *et al.*, 2004).

El método de corrección atmosférica (ecuación 1) desarrollado por Chávez (1996) es un método de corrección absoluta basado en la imagen que disminuye el efecto atmosférico. El método se basa en que áreas cubiertas con materiales con alta absorbancia (agua, zonas de sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy próxima a cero. Por lo tanto, el número digital (DN, por sus siglas en inglés) corregido, será la diferencia para cada banda del DN alto menos el DN promedio obtenido en áreas donde la luz se absorba (ej. zonas de agua profunda y con alta transparencia), obteniendo, al final, una imagen en donde se desprecia la aportación de la atmosfera (Rejas, 2008; Hadjimitsis *et al.*, 2004; Riaño *et al.*, 2000). La técnica es denominada substracción del objeto oscuro con estimación de la transmitancia (Schowengerdt, 2007), píxel más oscuro (DP) o método de histograma mínimo (Hadjimitsis *et al.*, 2004).

$$A'_i = L_i - L_{si}$$

Ecuación 1. Ecuación empleada para corregir atmosféricamente los ortomosaicos, donde: A'_i hace referencia a la reflectancia atmosféricamente corregida; L_i es la reflectancia del píxel para la banda i ; L_{si} es la reflectancia media en aguas profundas para la banda i ($L_{si} = \bar{x}_i + s_i$, donde \bar{x}_i es la media aritmética y s_i corresponde a la desviación estándar).

8.2.2. Corrección del brillo, *deglint* (remoción del *sunlint-NIR*)

La reflexión del Sol en la superficie del agua es una gran fuente de variación, en cuanto a los datos correspondientes a los píxeles, generando zonas con patrones de brillo en las imágenes, conocidas como *sunlint*. Además, se debe tomar en cuenta que la información del NIR, proveniente de las áreas afectadas por este fenómeno, no contiene datos de reflectancia referentes al sistema bentónico, ya que no penetra la superficie del agua (Goodman, Purkis, & Phinn, 2013).

Dentro de las condiciones necesarias para realizar una corrección de *sunlint* se encuentran: a. cielos despejados (previa corrección atmosférica), b. aguas poco profundas, y c. imágenes de alta resolución. Se emplea el infrarrojo cercano (NIR) que va de los 700 a 910 nm, con el objetivo de remover la señal referente al *glint*, dejando únicamente, los componentes espectrales derivados de la reflectancia proveniente de la columna de agua. El modelo asume que el brillo del NIR está compuesto, solo, por *sunlint*, y la proporción de este en RGB esta linealmente relacionada (Hedley, Harborne, & Mumby, 2005). Teóricamente, el brillo NIR es de

esperarse que sea cero. No obstante, en la practica el valor mínimo del NIR, en toda imagen, es mayor a cero. La fórmula utilizada para realizar la corrección se presenta en la ecuación 2.

$$R'_i = R_i - b_i(R_{NIR} - Min_{NIR})$$

Ecuación 2. Ecuación empleada para la remoción del *sunlint* (*deglint*) en los ortomosaicos, donde: R'_i es la reflectancia con remoción del *sunlint*; R_i corresponde a la banda i (cada una de las bandas); b_i es la pendiente de la regresión; R_{NIR} es el valor del píxel en NIR; Min_{NIR} hace referencia al NIR del ambiente (valor mínimo del NIR).

Cuando se presenta el efecto del brillo ocasionado por el sol, es importante, realizar la corrección; ya que puede generar confusión en los algoritmos de clasificación de las características bentónicas (Goodman, Purkis, & Phinn, 2013).

8.2.3. Corrección de la columna de agua

La corrección del efecto de la columna de agua se fundamenta en la disminución exponencial en la intensidad de la luz conforme esta penetra la columna de agua (atenuación). Es un paso imperativo en el pre-procesamiento, para el estudio del sistema arrecifal utilizando PR, debido a la confusión en las firmas espectrales que puede generar (ej. la firma espectral de la arena a 20 m puede ser similar a la de los pastos marinos). Esto incrementaría la incertidumbre en la elaboración de una clasificación temática multiespectral del paisaje bentónico arrecifal (Green, Mumby, Edwards, & Clark, 2000). Los métodos de corrección de este efecto se emplean para la elaboración de mapas temáticos de alta calidad (Mumby *et al.*, 1998).

El grado con el que se va atenuando la luz va a ser distinto, dependiendo de la longitud de onda electromagnética (ej. mientras que el espectro del azul, al penetrar el agua, se atenúa lentamente, el rojo sufre una mucho más rápida atenuación). El decaimiento exponencial de la intensidad de la luz con el incremento en la profundidad resulta de la absorción y el *scattering*. Además, la radiancia medida por el sensor dependerá tanto de la reflectancia del substrato como de la profundidad. A una profundidad de 2 m,

el espectro de la arena debería de ser muy diferente que a una profundidad de 20 m (Green, Mumby, Edwards, & Clark, 2000).

Lyzenga (1978, 1981) para compensar el efecto de la variable de profundidad, al elaborar mapas con características del fondo marino, desarrolló una aproximación simple basada en imágenes (ecuación 3). Con este método, se genera un índice de fondo de profundidad invariable para cada par de bandas espectrales (RB, RG y GB). El modelo asume que la atenuación de la luz va acompañada de una curva de atenuación de la luz exponencial conforme se incrementa la profundidad (Mumby *et al.*, 1998).

$$P = \ln(L_i) - \frac{\left[\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2\sigma_{ij}} + \sqrt{\left(\left(\frac{\sigma_{ii} - \sigma_{jj}}{2\sigma_{ij}} \right)^2 + 1 \right)} \right] \cdot \ln(L_j)}{\frac{K_i}{K_j}}$$

Ecuación 3. Ecuación para calcular el Índice de profundidad invariable del fondo (P), donde: L es la reflectancia del píxel para una banda (subíndices i y j hacen referencia a bandas espectrales diferentes); σ_{ii} es la varianza de la banda i ; σ_{jj} es la varianza de la banda j ; σ_{ij} es la covarianza de las bandas i y j ; $\frac{K_i}{K_j}$ es la razón del coeficiente de atenuación y a es el coeficiente de atenuación.

8.3. Construcción de mapas temáticos

Se visitaron 70 estaciones de muestreo (sitios de entrenamiento) en Pto. Morelos y 80 en Akumal. Las estaciones de muestreo fueron georreferenciadas con un *GPS Garmin Etrex 10* (en Akumal) y *Garmin GPSmap 60CSx* (en Pto. Morelos). Así mismo, se utilizó una sonda *Hawkeye h22px* con la finalidad de determinar la profundidad, procurando no exceder 25 m. En cada sitio de entrenamiento se obtuvo un video de c.a. 15 s, perpendicular al substrato con una cámara *SeaViewer 6000* (*Underwater Video Systems*) en Pto. Morelos. En Akumal, por las condiciones de baja profundidad, se utilizó una cámara *Garmin Virb Ultra 30* que era transportada por un nadador con snorkel y aletas. De cada video se analizaron tres cuadros (inicio, medio y final) para determinar el porcentaje de cobertura promedio de corales duros, corales blandos, pastos marinos, esponjas, macroalgas y substrato arenoso (Ortiz-Cajica *et al.*, 2020). Para el análisis de los videos se utilizó el programa *Vidana 1.0.1beta* (*Marine Spatial Ecology Lab*). Debido a que el tamaño

de los ortomosaicos se redujo, se emplearon 26 sitios de entrenamiento para Akumal y 14 para Pto. Morelos.

Las estaciones de muestreo (o sitios de entrenamiento) se agruparon en distintas clases identificadas mediante métodos jerárquicos, utilizando el índice de Bray-Curtis (Sheppard, 1995), usando *PRIMER 6.1.14*. De este modo, los sitios de entrenamiento (agrupados por clase) se utilizaron para llevar a cabo la clasificación supervisada de los ortomosaicos multiespectrales obtenidos y construir mapas temáticos del hábitat. Los sitios de entrenamiento se agregaron a los ortomosaicos utilizando el método de sembrado de pixeles, con un área correspondiente a 1000 pixeles y una distancia espectral euclidiana de 10 (LLC, 2006).

Se construyeron mapas basados en ortomosaicos multiespectrales con distintos niveles de pre-procesamiento, sin procesar, con corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua (empleando el software *ERDAS IMAGINE 2016*), aplicando las técnicas de pre-procesamiento de manera progresiva (primero, la corrección atmosférica, posteriormente, el *deglint* y, por último, la corrección de columna de agua). Además, en las clasificaciones se empleó el algoritmo conocido como clasificador de máxima probabilidad (o máxima verosimilitud) (LLC, 2006), y se evaluó su incertidumbre mediante matrices de error (Congalton, 1991).

Utilizando el coeficiente Tau, se estableció si existen diferencias significativas ($p < 0.05$) en la exactitud de los mapas (Ma & Redmond, 1995), considerando las distintas correcciones utilizadas: atmosférica, brillo (*deglint*) y de columna de agua. De acuerdo con la exactitud general más elevada entre los distintos niveles de pre-procesamiento, se seleccionó el ortomosaico para la elaboración de un mapa temático para cada AOI, usando ArcMap 10.6, describiendo las características del paisaje bentónico arrecifal considerando el 80% de los sitios de entrenamiento. En estos mapas, se calculó la exactitud general, así como sus respectivos coeficientes kappa

utilizando datos independientes de la clasificación, a partir del 20% de los sitios de entrenamiento, apartados previamente al azar.

9. Resultados

9.1. Construcción de ortomosaicos multispectrales

En las figuras 9 A y B, se muestra que no se encontraron problemas con la identificación de puntos de coincidencia para la elaboración de los ortomosaicos, mostrando que la superposición de esas imágenes fue la indicada, con más de cinco imágenes por píxel.

El ortomosaico de Akumal está hecho con 3865 imágenes georreferenciadas, previamente calibradas, con una media de puntos de coincidencia (*matching*) de 2514.46 por imagen con una distancia promedio del suelo (GSD) de 7.47 cm para un área de 0.362 km² (figura 10). Mientras, para Pto. Morelos se emplearon 1219 imágenes, igualmente calibradas, con una media de puntos de coincidencia de 3578.69 por imagen con un GSD de 7.52 cm para un área de 0.161 km² (figura 11). Ambos ortomosaicos se redujeron, respecto al área de interés, por las condiciones de viento y cobertura de *Sargassum spp.*, presentes al momento de realizar el muestreo, las cuales no permitieron construir el ortomosaico en las zonas más profundas de las AOI.

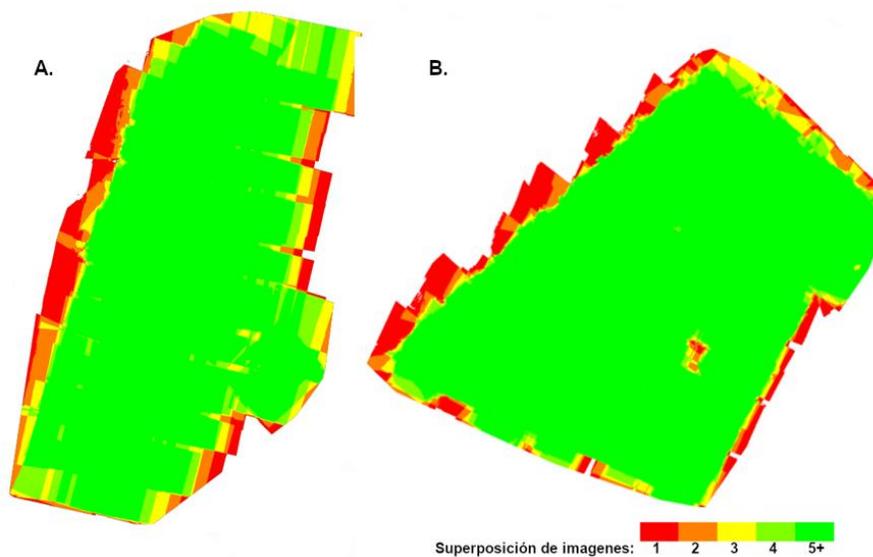


Figura 9. Cálculo del número de superposición de imágenes por cada píxel del ortomosaico de Pto. Morelos (A) y Akumal (B); del rojo al amarillo se indica bajo superposición de las imágenes y las áreas verdes indican un alto nivel, con más de cinco imágenes por píxel.

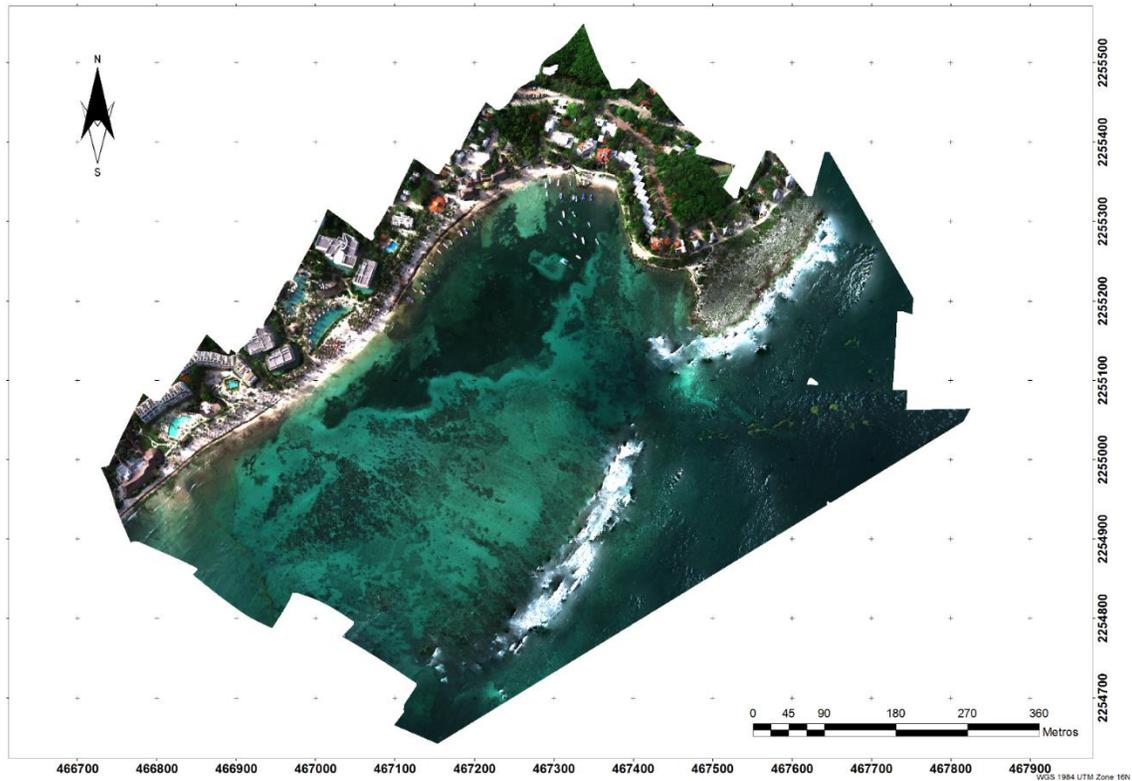


Figura 10. Akumal, Quintana Roo: ortomosaico multiespectral (RGB-NIR), sin pre-procesar, elaborado con técnicas fotogramétricas *SfM*, mediante Pix4D.

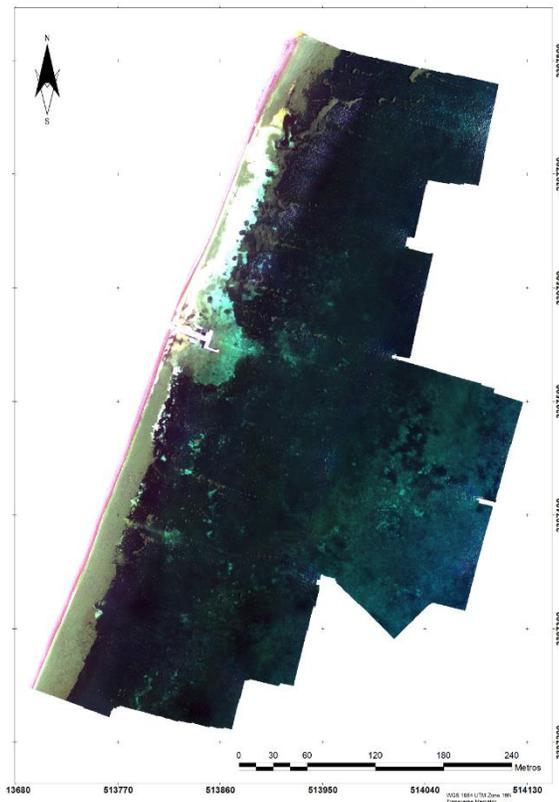


Figura 11. Pto. Morelos, Quintana Roo: ortomosaico multiespectral (RGB-NIR), sin pre-procesar, elaborado con técnicas fotogramétricas *SfM*, mediante Pix4D.

9.2. Pre-procesamiento de imágenes multiespectrales

En ambos ortomosaicos multiespectrales se removió el área referente al medio terrestre, además de áreas con boyas, cubiertas por *Sargassum* spp., con personas, embarcaciones, etc., con la finalidad de que el AOI corresponda únicamente a los elementos sumergidos en la columna de agua. Así mismo, ambos ortomosaicos fueron sometidos a una corrección geométrica mediante el uso de GCP (puntos de control) y una ecuación polinomial de primer orden, para eliminar distorsiones en las imágenes.

Para Akumal, en la figura 12 se muestra el ortomosaico con corrección atmosférica, en la figura 13 se expone el ortomosaico con corrección atmosférica y *deglint* y en la figura 14 se muestra el ortomosaico con la atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua (anexo 2):



Figura 12. Ortomosaico multiespectral (RGB-NIR) de Akumal, Quintana Roo, con previa corrección atmosférica.



Figura 13. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica y *deglint*, de Akumal, Quintana Roo.

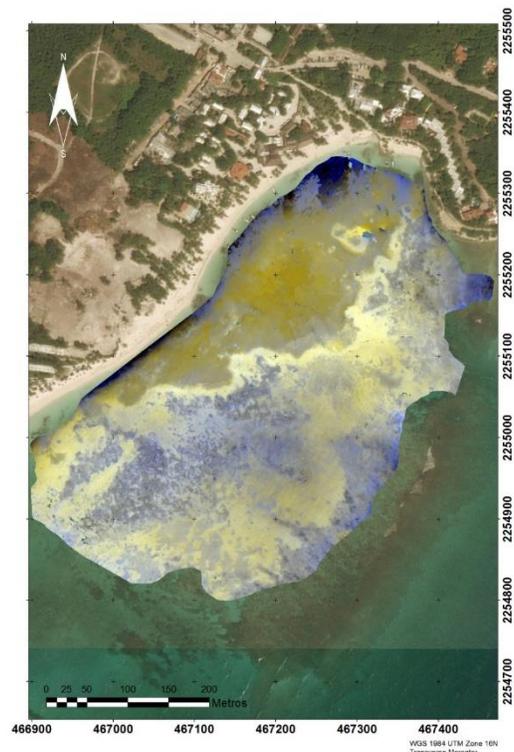


Figura 14. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua, sobre el cual se realizó una clasificación supervisada para el AOI de Akumal, Quintana Roo.

Y para Pto. Morelos, en la figura 15 se muestra el ortomosaico con corrección atmosférica, en la figura 16 se expone el ortomosaico con corrección atmosférica y *deglint* y en la figura 17 se muestra el ortomosaico con la atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua (anexo 2):



Figura 15. Ortomosaico multispectral (RGB), con previa corrección atmosférica, de Pto. Morelos, Quintana Roo.

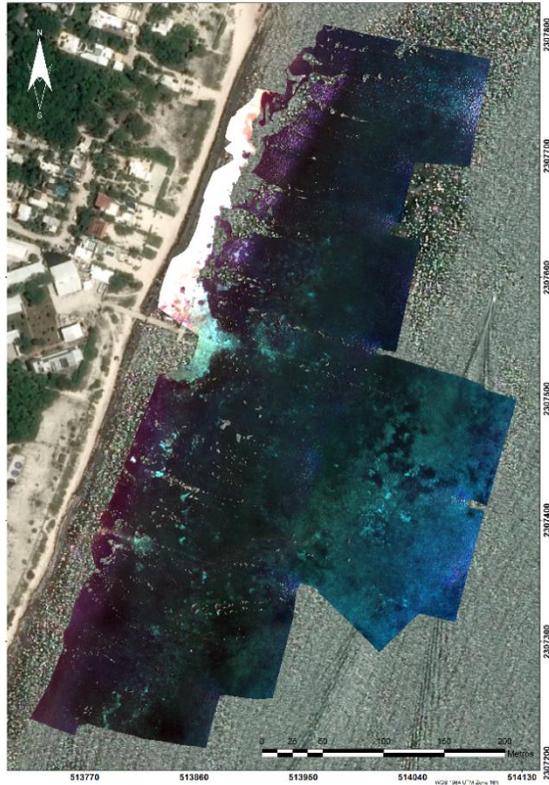


Figura 16. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica y *deglint*, de Pto. Morelos, Quintana Roo.



Figura 17. Ortomosaico multiespectral (RGB), con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua, de Pto. Morelos, Quintana Roo.

9.3. Caracterización del paisaje bentónico arrecifal

9.4. Análisis de Videos

La identificación de los distintos sustratos está basada en Ortega, Godínez y Garduño (2001), guiándose del *Programa Nacional Arrecife de Puerto Morelos* (INECOL y SEMARNAP, 2000) y del método de monitoreo *AGRRA program* (Lang y Kenneth, 2013) (No se usaron claves taxonómicas, por falta física de los especímenes). Las especies de las praderas de pastos marinos se identificaron por su patrón de distribución geográfica natural. Dada la dificultad para identificar algas mediante imágenes, este grupo se generalizó como macroalgas.

Se integraron los datos de cobertura de *Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme*, en el complejo parafilético denominado pastos marinos, puesto que, se ha demostrado que en sus reflectancias las diferencias intraespecíficas de las praderas de pastos marinos resultan difíciles de identificar (Fyfe, 2003).

Algunas imágenes representativas extraídas de los videos analizados se muestran en el anexo 1.

9.5. Caracterización de los tipos de hábitats

La determinación de los tipos de hábitats se llevó a cabo mediante un análisis jerárquico empleando el índice de Bray-Curtis utilizando el método de agrupamiento promedio, partiendo del 80% de similitud entre los sitios de entrenamiento. Debido a que no fue posible construir el ortomosaico en toda el AOI en ambas zonas de estudio, 26 sitios de entrenamiento se utilizaron en Akumal (figura 18) y 14 en Pto. Morelos (figura 19).

Posteriormente, partiendo del análisis jerárquico de Bray-Curtis, se identificaron las clases delimitándolas con intervalos del porcentaje de cobertura: $\geq 10 < 30\% = \text{Cobertura Baja}$, $\geq 30 < 60\% = \text{Cobertura Media}$, $\geq 60 < 80\% = \text{Cobertura Alta}$ y $\geq 80\% = \text{Dominado}$. Se redujo la ambigüedad al realizar el redondeo de los porcentajes a números enteros y no tomando en cuenta, en las clasificaciones, aquellas coberturas inferiores al 10% de presencia. Así mismo, al generar las firmas espectrales, se identificó que, espectralmente, algunas clases eran bastante similares, por lo que aquellas que, además de parecerse mucho espectralmente,

contaban con características (porcentajes de cobertura) de sustrato muy similares, se unieron en una sola firma espectral.

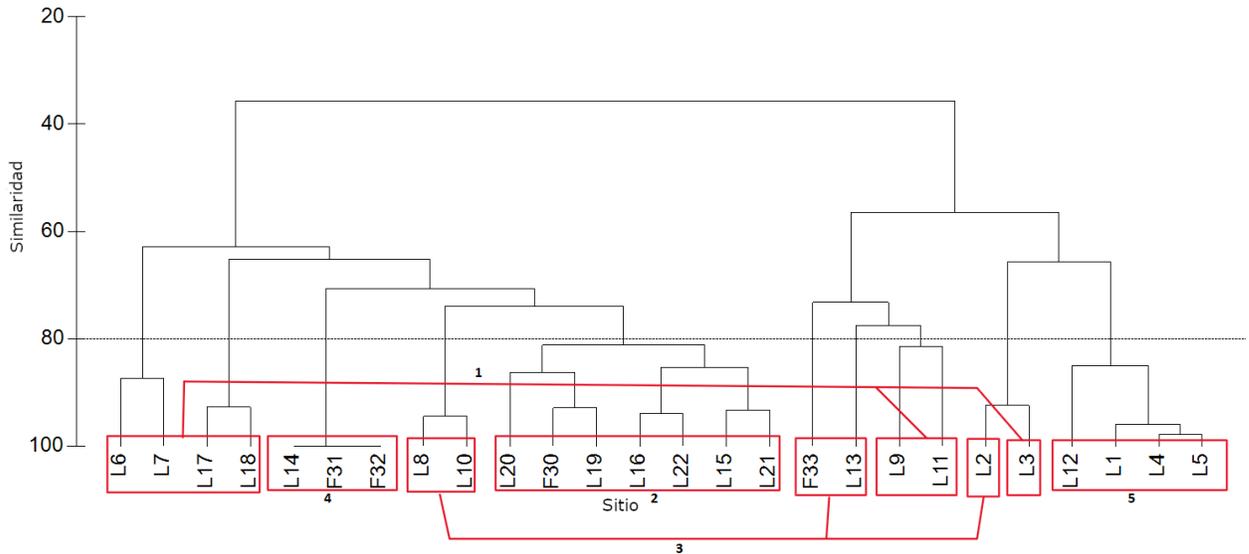


Figura 18. Akumal, Quintana Roo: análisis jerárquico mediante el índice de Bray-Curtis (de la raíz cuadrada de los datos): se destaca 80% de similitud y las clases que se generaron partiendo de ese criterio. La línea punteada (...) Indica el 80% de similitud, las líneas rojas indican la agrupación de clases.

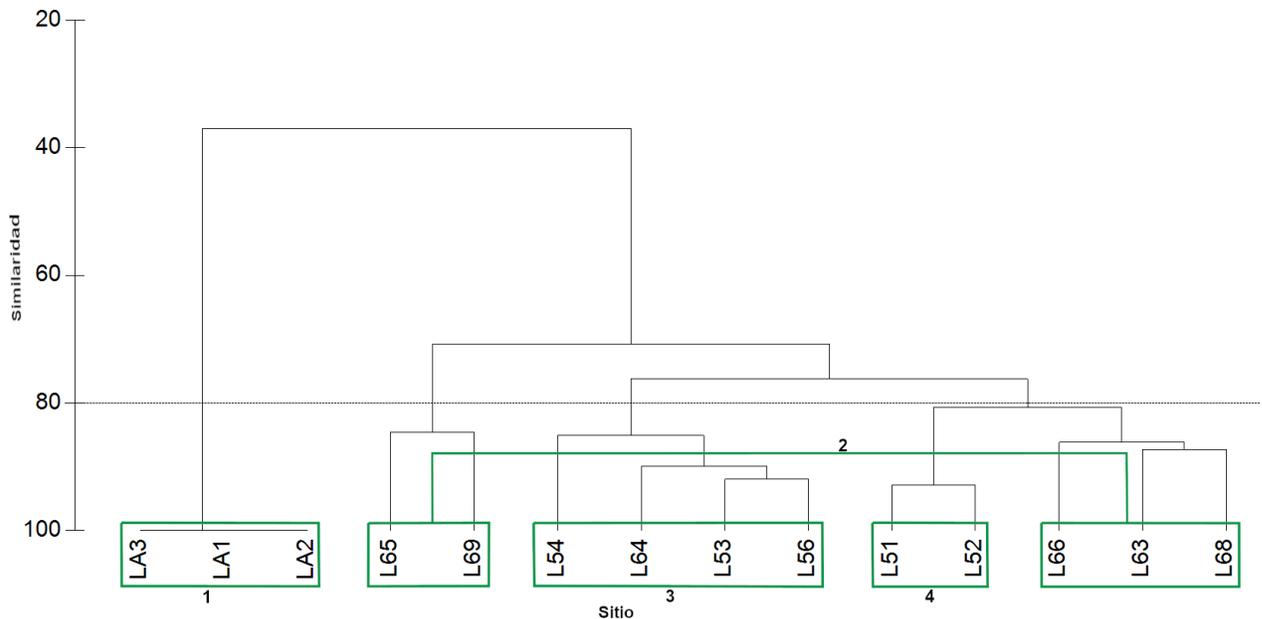


Figura 19. Pto. Morelos, Quintana Roo: análisis jerárquico mediante el índice de Bray-Curtis (de la raíz cuadrada de los datos): se destaca 80% de similitud y las clases que se generaron partiendo de ese criterio. La línea punteada (...) Indica el 80% de similitud, las líneas verdes indican la agrupación de clases.

Para el ortomosaico de Akumal, se identificaron cinco clases (figura 20 y tabla 1).

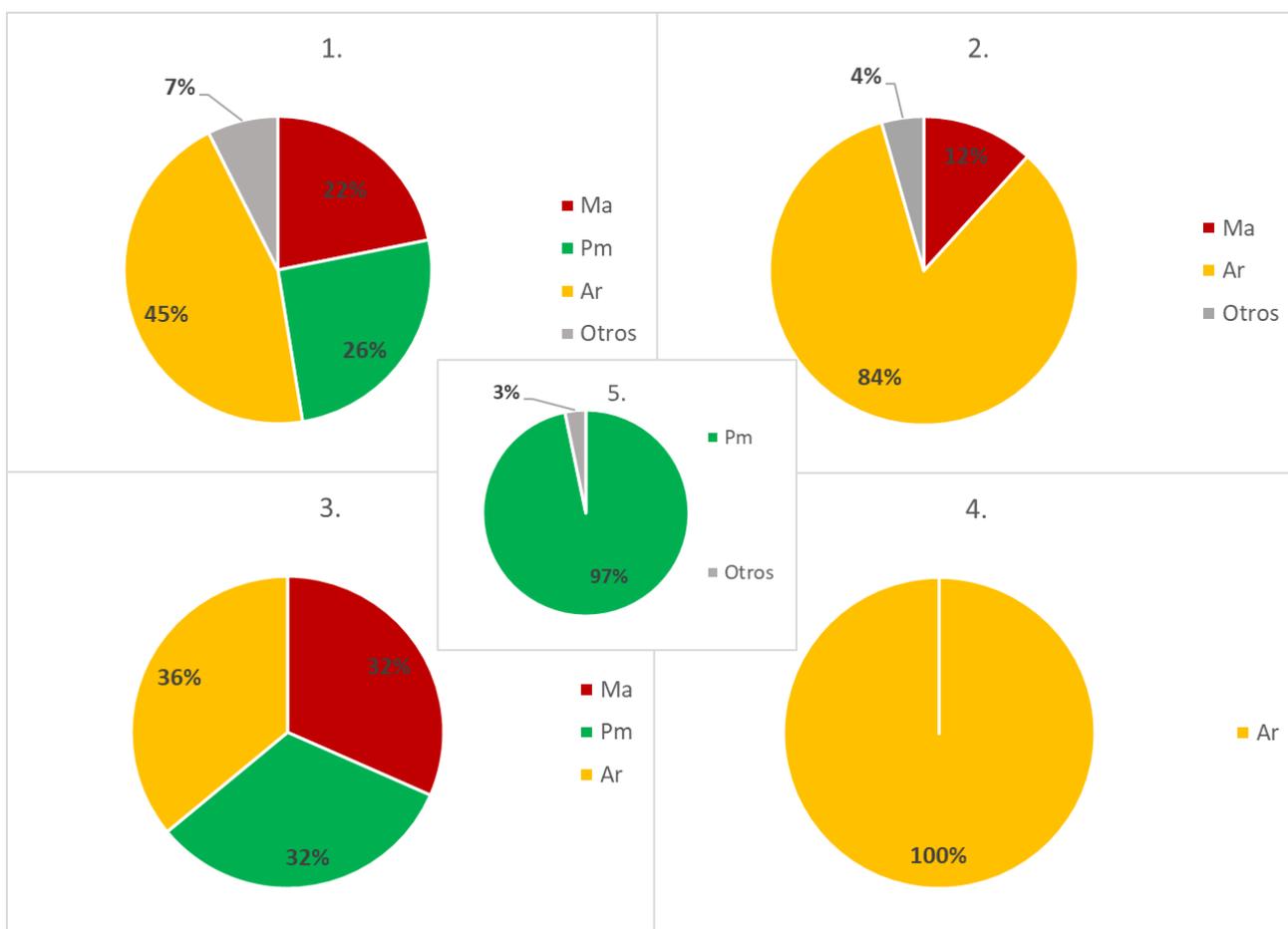


Figura 20. Akumal, Quintana Roo: porcentajes de cobertura para cada una de las clases: Ma, macroalgas; Pm, pastos marinos; Es, esponjas; Cb, coral blando; Cd, coral duro; Ar, sustrato. La categoría de otros corresponde a coberturas conjuntas menores al 5% (ej. coral blando, coral duro, esponjas y sustrato arenoso).

Tabla 1. Tipos de hábitats del sistema bentónico arrecifal, basados en porcentajes de cobertura del AOI de Akumal ($\geq 10 < 30\%$ = cobertura baja, $\geq 30 < 60\%$ = cobertura media, $\geq 60 < 80\%$ = cobertura alta, $\geq 80\%$ = dominado).

Clase	No.
Cobertura media de sustrato arenoso; cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas	1
Dominado por sustrato arenoso; cobertura baja de macroalgas	2
Cobertura media de sustrato arenoso, media de pastos marinos y media de macroalgas	3
Dominado por sustrato arenoso	4
Dominado por pastos marinos	5

Para el ortomosaico de Pto Morelos, se identificaron cuatro clases (figura 21 y tabla 2).

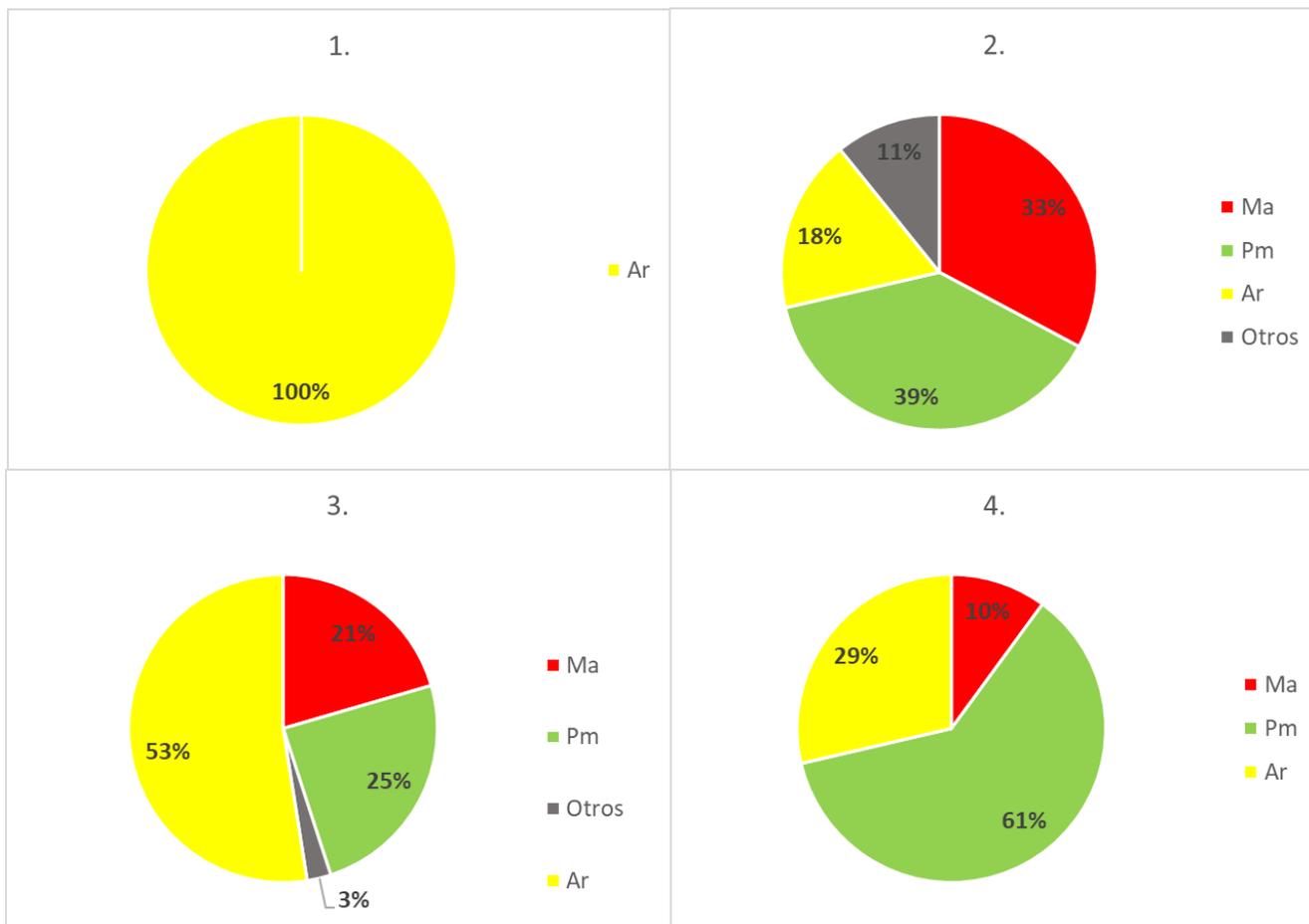


Figura 21. Pto. Morelos, Quintana Roo: porcentajes de cobertura para cada una de las clases: Ma, macroalgas; Pm, pastos marinos; Es, esponjas; Cb, coral blando; Cd, coral duro; Ar, arena. La categoría de otros corresponde a coberturas conjuntas menores al 5% (ej. coral blando, coral duro y esponjas).

Tabla 2. Tipos de hábitats del sistema bentónico arrecifal, basados en porcentajes de cobertura del AOI de Pto. Morelos ($\geq 10 < 30\%$ = cobertura baja, $\geq 30 < 60\%$ = cobertura media, $\geq 60 < 80\%$ = cobertura alta, $\geq 80\%$ = dominado).

Clase	No.
Dominado por sustrato arenoso	1
Cobertura media de pastos marinos y media de macroalgas; cobertura baja de sustrato arenoso	2
Cobertura media de sustrato arenoso; cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas	3
Cobertura alta de pastos marinos; cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas	4

9.6. Matrices de error y coeficiente Tau

En un principio, al realizar la clasificación supervisada del ortomosaico multiespectral de Akumal, se obtuvo una exactitud general de las firmas espectrales (empleando todos los sitios de entrenamiento) de 58.76 ($kappa = 0.469$ y $T_e = 0.488$) para el ortomosaico sin correcciones. Además, fue la clase cuatro la que tuvo la exactitud de utilización más elevada con 98.09, mientras que la clase uno con 62.49 tuvo la mayor exactitud de producción (tabla 3).

Tabla 3. Matriz de error de las firmas espectrales sin correcciones del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Clase 1	62.49	16.19	7.60	0.16	13.57
Clase 2	37.49	56.97	0.86	0.50	4.19
Clase 3	25.82	1.60	61.32	0.00	11.26
Clase 4	15.87	21.90	0.13	60.60	1.50
Clase 5	30.48	1.08	15.53	0.53	52.40
Exactitud de utilización	<u>36.30</u>	58.29	71.77	<u>98.09</u>	63.20
Exactitud de producción	<u>62.49</u>	56.97	61.32	60.60	<u>52.40</u>

Posteriormente, se realizó una corrección atmosférica, (exactitud general =58.78, $kappa = 0.469$ y $T_e = 0.488$). Manteniéndose la mayor exactitud de producción en la clase uno con 62.49 y la mayor exactitud de utilización se conservó para la clase cuatro con 98.09. (tabla 4).

Tabla 4. Matriz de error de las firmas espectrales con previa corrección atmosférica del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Clase 1	62.49	16.19	7.60	0.16	13.57
Clase 2	37.49	56.97	0.86	0.50	4.19
Clase 3	25.82	1.60	61.32	0.00	11.26
Clase 4	15.77	21.90	0.13	60.70	1.50
Clase 5	30.48	1.08	15.53	0.53	52.40
Exactitud de utilización	<u>36.32</u>	58.29	71.77	<u>98.09</u>	63.20
Exactitud de producción	<u>62.49</u>	56.97	61.32	60.70	<u>52.40</u>

Al realizar el *deglint* sobre el ortomosaico, con corrección atmosférica, se obtuvo una exactitud general, un poco menor a las anteriores, de 57.33 ($\kappa = 0.440$ y $T_e = 0.460$). Cuya mayor exactitud de utilización y producción fue para la clase cuatro (tabla 5).

Tabla 5. Matriz de error de las firmas espectrales con previa corrección atmosférica y *deglint* del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Clase 1	50.44	26.74	11.54	0.64	10.63
Clase 2	32.04	61.23	0.84	1.53	4.36
Clase 3	28.38	1.80	62.12	0.00	7.70
Clase 4	12.13	18.90	0.13	67.37	1.47
Clase 5	33.40	3.48	16.70	0.95	45.48
Exactitud de utilización	<u>32.25</u>	54.60	68.01	<u>95.57</u>	65.31
Exactitud de producción	50.44	61.23	62.12	<u>67.37</u>	<u>45.48</u>

Al realizar la corrección de columna de agua, se consiguió una exactitud general de 59.51 ($\kappa = 0.467$ y $T_e = 0.483$). Además, la clase cuatro mantuvo el máximo tanto de exactitud de utilización como de producción con 93.79 y 70.43, respectivamente (tabla 6).

Tabla 6. Matriz de error de las firmas espectrales con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua del ortomosaico de Akumal, Quintana Roo. La clase uno corresponde a cobertura media de sustrato arenoso; la clase dos, dominado por arena y cobertura baja de macroalgas; la clase tres, con cobertura media de arena, cobertura media de pastos marinos y cobertura media de macroalgas; la clase cuatro, dominado por arena; la clase cinco, dominado por pastos marinos.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Clase 1	51.61	22.24	13.97	0.91	11.26
Clase 2	31.27	61.89	0.73	2.60	3.51
Clase 3	25.42	0.92	65.44	0.00	8.22
Clase 4	10.93	17.07	0.20	70.43	1.37
Clase 5	30.55	3.90	16.25	1.15	48.15
Exactitud de utilización	<u>34.46</u>	58.37	67.75	<u>93.79</u>	66.41
Exactitud de producción	51.61	61.89	65.44	<u>70.43</u>	<u>48.15</u>

Por otro lado, al realizar la clasificación supervisada del ortomosaico multiespectral de Pto. Morelos, se obtuvo una exactitud general de las firmas espectrales (empleando todos los sitios de entrenamiento) de 78.30 ($\kappa = 0.723$ y $T_e = 0.731$) para el ortomosaico sin correcciones. La exactitud de producción más elevada fue obtenida por la clase uno con 95.97 y la exactitud de utilización máxima fue de 92.62 por la clase tres (tabla 7).

Tabla 7. Matriz de error de las firmas espectrales sin correcciones del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Clase 1	95.97	4.03	0.00	0.00
Clase 2	5.77	84.09	0.02	10.12
Clase 3	18.01	5.17	70.95	5.87
Clase 4	8.84	23.31	5.64	62.21
Exactitud de utilización	74.63	<u>72.12</u>	<u>92.62</u>	79.55
Exactitud de producción	<u>95.97</u>	84.09	70.95	<u>62.21</u>

Posteriormente, se le realizó una corrección atmosférica, cuya exactitud general de sus firmas espectrales fue de 78.22 ($\kappa = 0.721$ y $T_e = 0.728$). Con la clase tres y la clase uno de exactitudes más elevadas, en cuanto a exactitud de utilización y producción, respectivamente con 92.49 en la clase tres y 96.01 en la clase uno (tabla 8).

Tabla 8. Matriz de error de las firmas espectrales con corrección atmosférica del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Clase 1	96.01	3.99	0.00	0.00
Clase 2	5.75	83.74	0.02	10.49
Clase 3	17.83	5.03	71.09	6.05
Clase 4	9.37	22.84	5.75	62.04
Exactitud de utilización	74.45	<u>72.44</u>	<u>92.49</u>	78.95
Exactitud de producción	<u>96.01</u>	83.74	71.09	<u>62.04</u>

Al realizar el *deglint* sobre el ortomosaico, con corrección atmosférica, se obtuvo una exactitud de 72.24 ($\kappa = 0.616$ y $T_e = 0.615$). Presentándose la exactitud de utilización mayor en la clase tres de 89.89 y la mayor exactitud de producción la tuvo la clase uno con 96.15 (tabla 9).

Tabla 9. Matriz de error de las firmas espectrales con corrección atmosférica y *deglint* del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Clase 1	96.15	3.79	0.00	0.07
Clase 2	6.05	64.32	0.44	29.19
Clase 3	18.52	0.27	64.67	16.54
Clase 4	11.89	17.44	6.84	63.83
Exactitud de utilización	72.50	74.95	<u>89.89</u>	<u>58.22</u>
Exactitud de producción	<u>96.15</u>	64.32	64.67	<u>63.83</u>

Al realizar la corrección de columna de agua, se presentó un incremento, con una exactitud general de 73.43 ($\kappa = 0.630$ y $T_e = 0.629$). Por su parte, la clase uno arrojó la exactitud de producción máxima con 95.95 y la clase tres la máxima exactitud de utilización con 90.93 (tabla 10).

Tabla 10. Matriz de error de las firmas espectrales con corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua del ortomosaico de Pto. Morelos, Quintana Roo. La clase uno, dominado por sustrato arenoso; la clase dos, cobertura media de pastos marinos, media de macroalgas y cobertura baja de arena; la clase tres, con cobertura media de sustrato arenoso, cobertura baja de pastos marinos y baja de macroalgas; la clase cuatro, cobertura alta de pastos marinos, cobertura baja de sustrato arenoso y baja de macroalgas.

Sustrato	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4
Clase 1	95.95	3.95	0.00	0.10
Clase 2	4.56	65.03	0.42	29.99
Clase 3	15.87	0.27	66.30	17.56
Clase 4	9.81	17.54	6.19	66.45
Exactitud de utilización	76.03	74.92	<u>90.93</u>	<u>58.24</u>
Exactitud de producción	<u>95.95</u>	65.03	66.30	<u>66.45</u>

En la tabla 11 se presentan los valores de exactitud obtenidos para ambos sitios de muestreo con distintos niveles de pre-procesamiento.

Tabla 11. Resultados de los cálculos de coeficiente Tau (T_e), exactitud general, *percentage of agreement* (P_o) y *random agreement* (P_r) de cada uno de los ortomosaicos, tanto para Akumal como para Pto. Morelos.

	Corrección	T_e	Varianza (T_e)	Exactitud general	P_o	P_r
Akumal	Sin corrección	0.4875962	0.000014536	58.755428571	0.590076923	0.2
	Corrección atmosférica	0.4877404	0.000014535	58.775428571	0.590192308	0.2
	Deglint	0.4597596	0.000014748	57.326619048	0.567807692	0.2
	Corrección de columna de agua	0.4834615	0.000014572	59.504666667	0.586769231	0.2
Pto. Morelos	Sin corrección	0.7307867	0.000020570	78.304420386	0.798090041	0.25
	Corrección atmosférica	0.7284931	0.000020441	78.220342656	0.796369824	0.25
	Deglint	0.6152392	0.000025877	72.239811237	0.711429382	0.25
	Corrección de columna de agua	0.6293250	0.000025300	73.434209901	0.721993761	0.25

Al comparar las clasificaciones obtenidas estadísticamente utilizando los coeficientes T_e , se observa que, en Akumal, no existen diferencias significativas ($p > 0.05$) entre el ortomosaico sin procesar y el corregido atmosféricamente, con corrección atmosférica y corrección de columna de agua y sin procesar con corrección de columna de agua. En las otras combinaciones, se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la exactitud obtenida (Tabla 12, figura 22).

En Pto Morelos, no se observaron diferencias significativas entre el ortomosaico sin corregir y el corregido atmosféricamente, en las otras combinaciones se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la exactitud obtenida (Tabla 12, Figura 23).

Por lo anterior, podría no ser necesario realizar técnicas de pre-procesamiento en ortomosaicos multiespectrales para mejorar la exactitud de mapas temáticos en estos sistemas bentónicos. Sin embargo, el bajo número de sitios de entrenamiento, para ambos sitios, podría estar afectando a los valores de exactitud.

Tabla 12. Valores calculados para la prueba de hipótesis en la determinación de las significancias entre los ortomosaicos con clasificación supervisada de Akumal y Pto. Morelos. S/C, sin correcciones; CATM, con corrección atmosférica; DGLT, con *deglint*; CCA, con corrección de columna de agua. El símbolo rojo hace referencia a significativamente diferentes (\neq) y el amarillo referencia a no significativamente diferentes ($=$).

	Matrices		Z	P	Pv
Akumal	S/C - CATM	☐	0.03	0.511966473	0.976067053
	CATM - DGLT	⚡	5.17	0.999999883	0.000000234
	DGLT - CCA	⚡	4.38	0.999994066	0.000011868
	DGLT - S/C	⚡	5.14	0.999999863	0.000000275
	CCA-CATM	☐	0.79	0.785236116	0.429527768
	CCA - S/C	☐	0.77	0.779350054	0.441299893
Pto. Morelos	S/C - CATM	☐	0.36	0.640576433	0.718847134
	CATM - DGLT	⚡	16.64	1	0
	DGLT - CCA	⚡	1.97	0.975580815	0.048838371
	DGLT - S/C	⚡	16.95	1	0
	CCA-CATM	⚡	14.66	1	0
	CCA - S/C	⚡	14.98	1	0

	Criterio Z	Criterio Pv	Decisión
⚡ Significativamente diferentes:	$Z > 1.96$	$Pv < 0.05$	Rechazo H_0
☐ No significativamente diferentes:	$Z < 1.96$	$Pv > 0.05$	No rechazo H_0

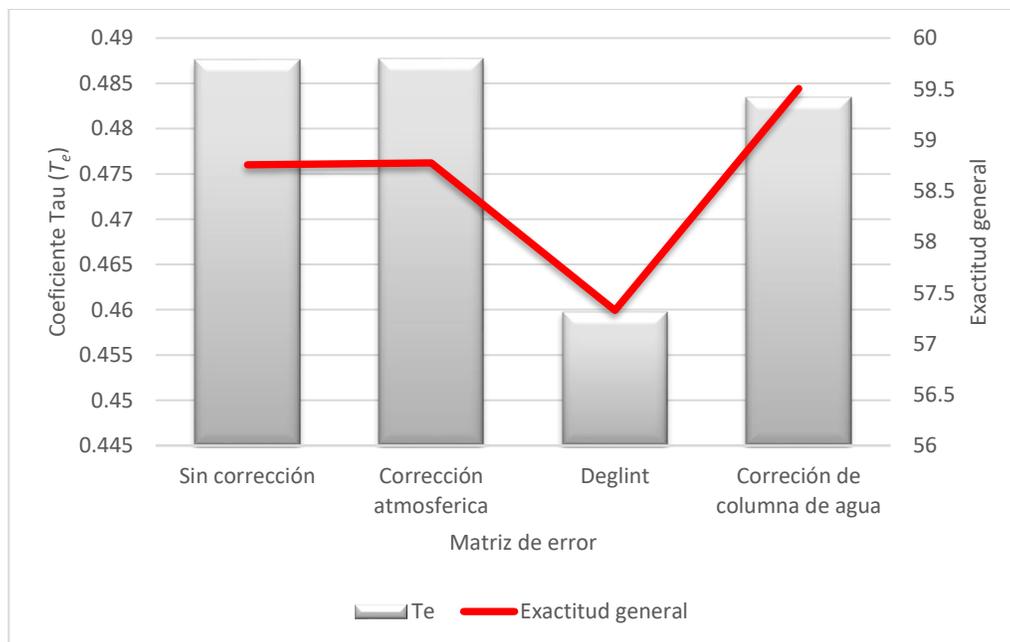


Figura 22. Akumal, Quintana Roo: comparación entre los coeficientes Tau (T_e) y la exactitud general para cada uno de los ortomosaicos desde el no corregido, con corrección atmosférica, con *deglint*, hasta la corrección de columna de agua; datos derivados de la clasificación supervisada para cada una de sus respectivas matrices de contingencia (tabla 11).

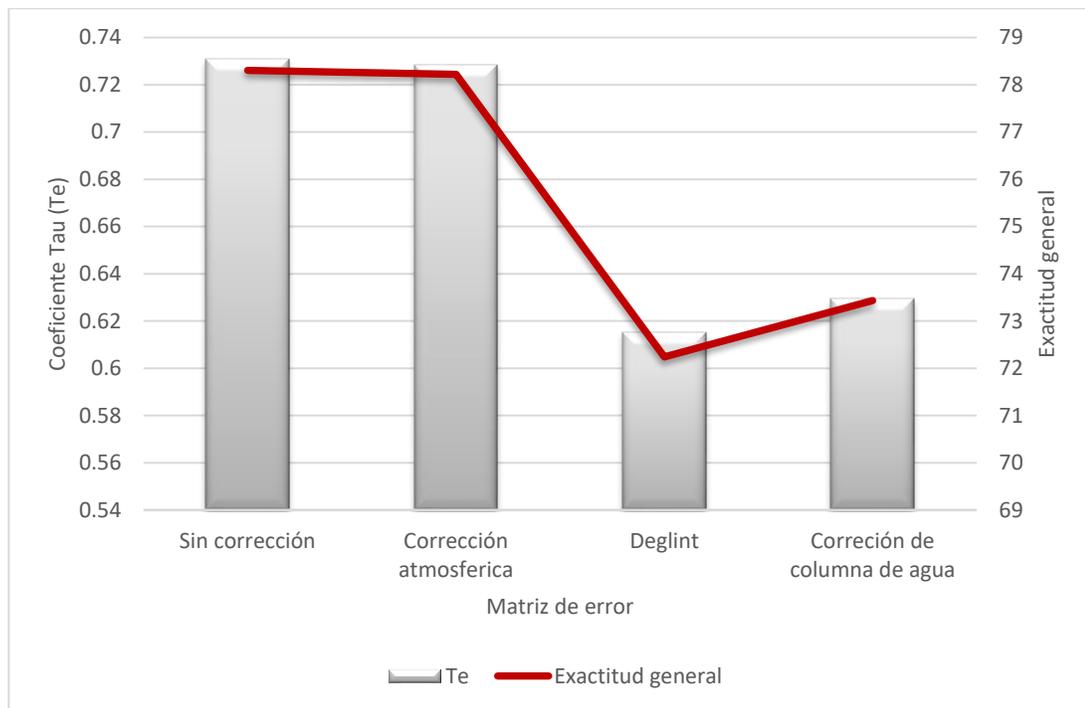


Figura 23. Pto. Morelos, Quintana Roo: comparación entre los coeficientes Tau (T_e) y la exactitud general para cada uno de los ortomosaicos desde el no corregido, con corrección atmosférica, con deglint, hasta la corrección de columna de agua; datos derivados de la clasificación supervisada para cada una de sus respectivas matrices de contingencia (tabla 11).

9.7. Mapas temáticos de las AOI (Akumal y Puerto Morelos)

El mapa temático de Akumal, Quintana Roo, con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua (con el 80% de los sitios de entrenamiento), presenta una exactitud general del 83.33% con coeficiente kappa de 0.78, los cuales fueron calculados a partir del 20% de los sitios de entrenamiento, de manera independiente (figura 24). Sin embargo, al no presentar diferencias significativas con respecto a la clasificación del ortomosaico no corregido, se considera que son iguales.

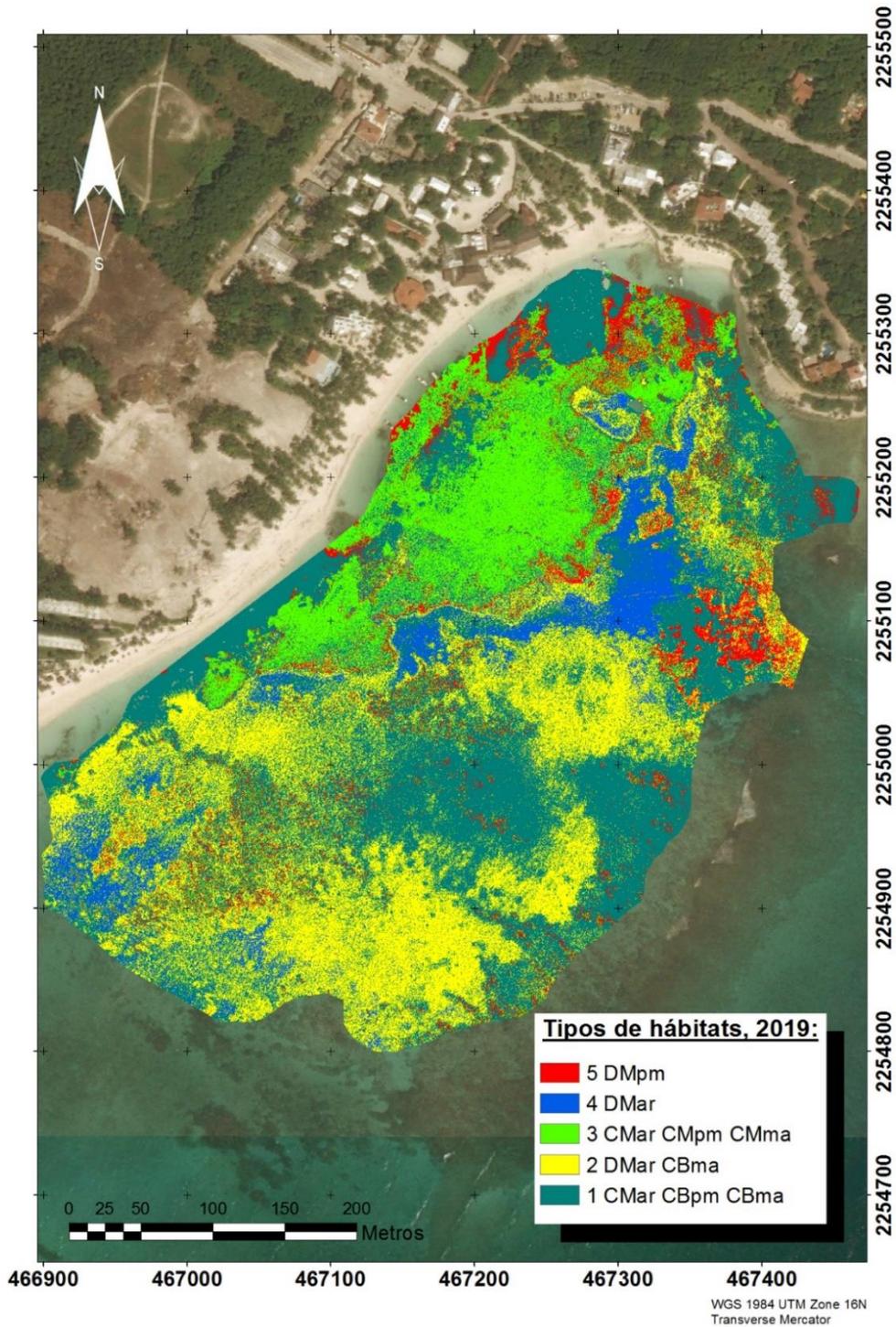


Figura 24. Akumal, Quintana Roo: clasificación supervisada con previa corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua (elaborado con 80% de los sitios de entrenamiento): DMpm, dominado por pastos marinos; DMar, dominado por arena; CMma, cobertura media de macroalgas; CMpm, cobertura media de pastos marinos; CMar, cobertura media de arena; CBma, Cobertura baja de macroalgas; CBpm, cobertura baja de pastos marinos. Exactitud general del 83.33% con coeficiente kappa de 0.78 (evaluado con el 20% de los sitios de entrenamiento, de manera independiente).

El mapa temático de Akumal tiene un área total de 17.09 *ha*, de la cual: la clase uno cuenta con el 44%, al tener 7.6 *ha*; la clase dos, un 29% del área, correspondientes a 4.95 *ha*; la clase tres cubre el 14% con 2.34 *ha*; la clase cuatro con 0.93 *ha*, cubre el 6%; y la clase cinco, se encuentra cubriendo el 7%, al contar con 1.26 *ha* (figura 25).

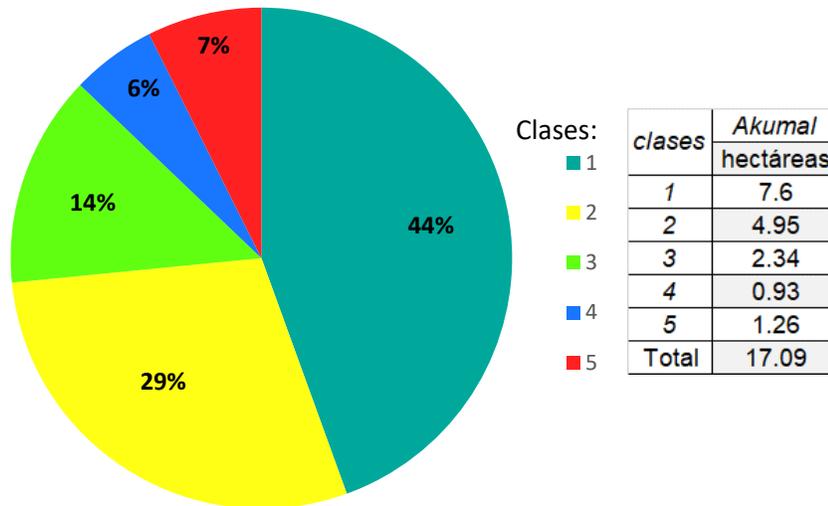


Figura 25. Diagrama de pastel sobre el porcentaje del área total de 17.09 *ha* para cada una de las clases del mapa final (con corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua) desarrollado a partir de una clasificación supervisada con el 80% de los sitios de entrenamiento para el ortomosaico multiespectral de Akumal.

Por otro lado, el mapa temático de Pto. Morelos, Quintana Roo, sin correcciones, elaborado con el 80% de los sitios de entrenamiento, presenta una exactitud general del 75% con coeficiente kappa de 0.67, los cuales fueron calculados a partir del 20% de los sitios de entrenamiento, de manera independiente (figura 26).

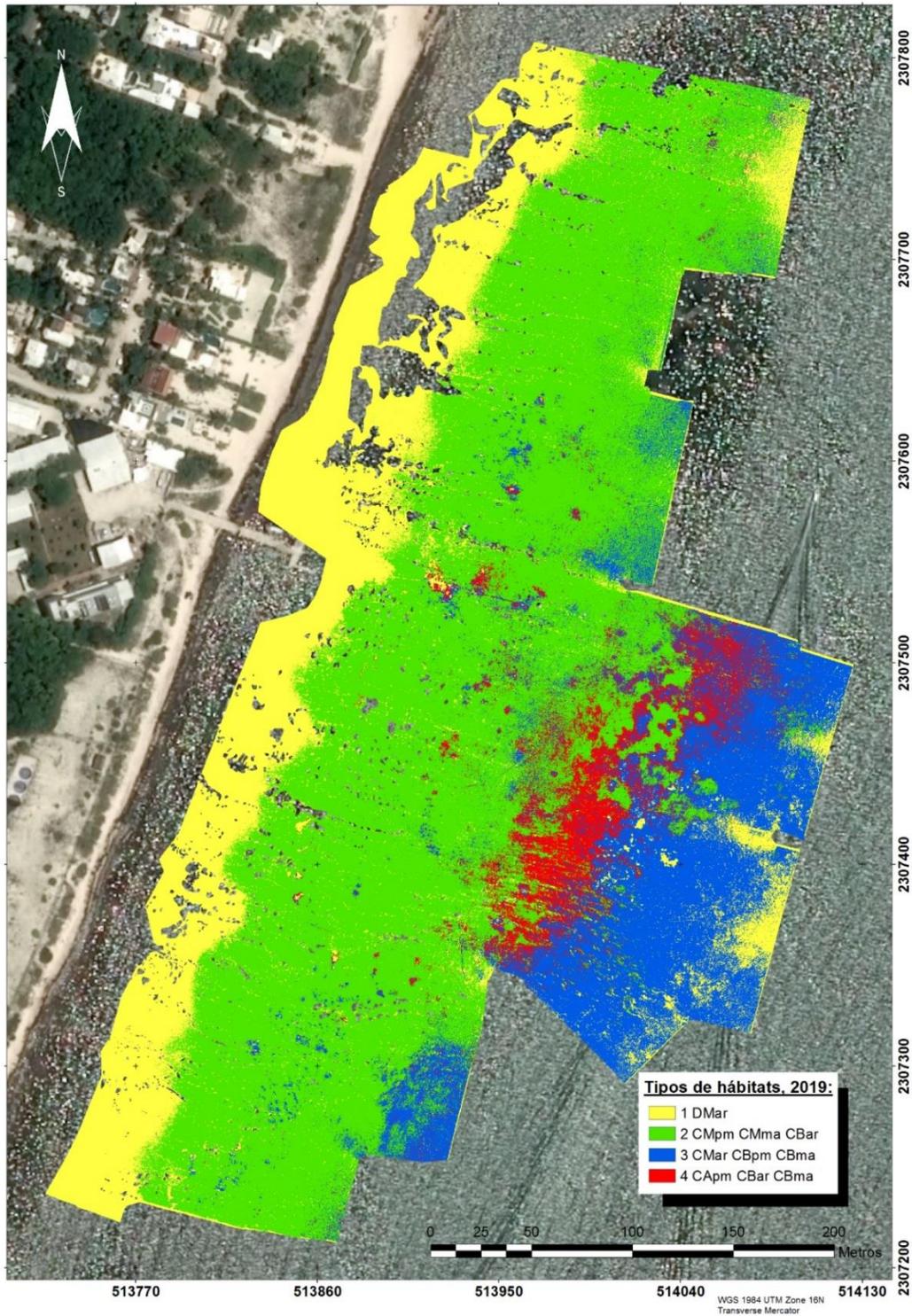


Figura 26. Pto. Morelos, Quintana Roo: clasificación supervisada sin aplicar técnicas de pre-procesamiento (elaborado con 80% de los sitios de entrenamiento): DMar, dominado por arena; CMpm, cobertura media de pastos marinos; CMma, cobertura media de macroalgas; CBar, cobertura baja de arena; CMar, cobertura media de arena; CBpm, cobertura baja de pastos marinos; CBma, cobertura baja de macroalgas; CApm, cobertura alta de pastos marinos. Exactitud general del 75% con coeficiente kappa de 0.67 (evaluado con el 20% de los sitios de entrenamiento, de manera independiente).

El mapa temático de Pto. Morelos tiene un área total de 12.14 *ha*, de la cual: la clase uno cuenta con el 24%, al tener 2.96 *ha*; la clase dos, un 55% del área, correspondientes a 6.61 *ha*; la clase tres cubre el 16% con 1.96 *ha*; la clase cuatro, se encuentra cubriendo el 5%, al contar con 0.60 *ha* (figura 27).

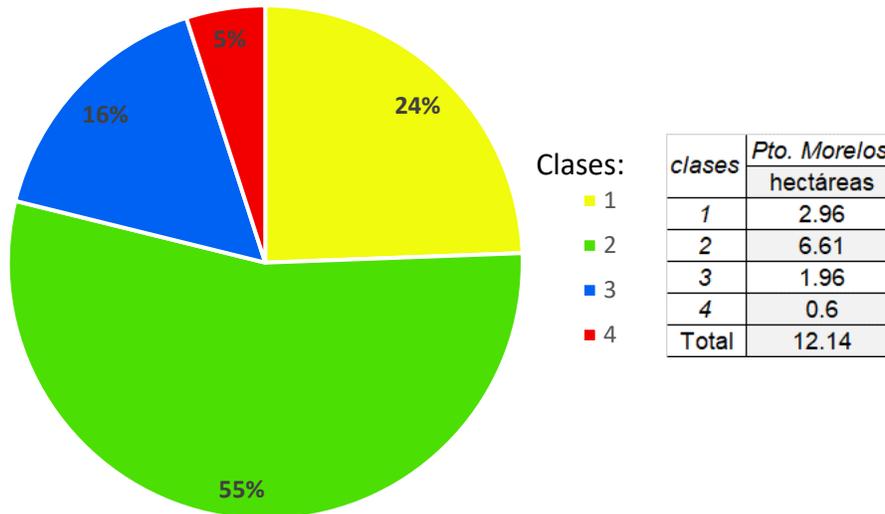


Figura 27. Diagrama de pastel sobre el porcentaje del área total de 12.14 *ha* para cada una de las clases del mapa final (sin aplicar técnicas de pre-procesamiento) desarrollado a partir de una clasificación supervisada con el 80% de los sitios de entrenamiento para el ortomosaico multiespectral de Pto. Morelos.

10. Discusión

10.1. Imágenes y ortomosaicos multiespectrales (RGB-NIR) de ultra alta resolución espacial

Se obtuvieron mapas temáticos del hábitat para caracterizar el paisaje bentónico arrecifal con una resolución espacial <10 cm, un bajo nivel de incertidumbre, con exactitudes generales entre 83.33% ($\kappa = 0.78$) para Akumal, y 75% ($\kappa = 0.67$) para Pto. Morelos, los cuales se encuentran dentro de un rango considerado apropiado (Landis & Koch, 1977; Green *et al.*, 2000). Al comparar estadísticamente los mapas obtenidos, utilizando el cálculo de los coeficientes T_e (Ma & Redmond, 1995), se identificó que no hay un incremento significativo ($p > 0.05$) en la exactitud de los mapas temáticos obtenidos por VANT equipados con cámaras multiespectrales aplicando las técnicas de pre-procesamiento (correcciones

atmosférica, *deglint* y de columna de agua) tanto para Akumal como para Pto. Morelos.

Las técnicas de fotogrametría se emplearon satisfactoriamente, ya que fue posible construir los ortomosaicos multiespectrales a partir de imágenes obtenidas mediante un dron con cámaras multiespectrales (RGB-NIR). Sin embargo, en ambas AOI no se pudo resolver el modelo en zonas con una profundidad mayor a 4.5 m. En ambas AOI se presentó el arribo masivo del *Sargassum spp* en el 2019. Además, como se puede apreciar en la figura 28, el viento era intenso durante el mes de junio y agosto del 2019 sobre la región del Caribe (CONAGUA, 2019), quizá incrementando la turbidez de la columna.

Las partículas suspendidas y las sustancias disueltas, el efecto del viento, así como la coloración rojiza observada en la columna de agua alrededor del *Sargassum spp* al momento del muestreo, probablemente restringieron la penetración la luz (Dekker *et al.*, 1992). De este modo, tanto la turbidez como la profundidad >30 m, en consecuencia, no permitieron a los algoritmos SfM obtener suficientes puntos de coincidencia entre las imágenes multiespectrales para resolver los modelos y construir los ortomosaicos en las zonas profundas.

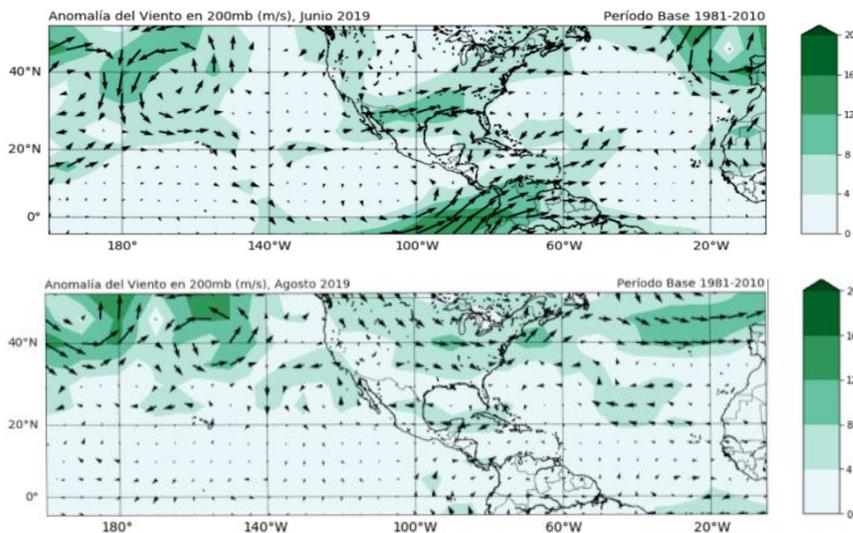


Figura 28. anomalías del viento (200mb) en el mes de junio (arriba) del 2019 y agosto (debajo). Datos: NCEP Daily Global Analyses. Tomado del Reporte del clima de México (CONAGUA, 2019).

10.2. Perspectivas de la aplicación de técnicas de pre-procesamiento

Se sabe que, en el caso de usar imágenes satelitales para construir mapas temáticos, al aplicar técnicas de pre-procesamiento es posible mejorar considerablemente su exactitud (e.j. Manessa *et al.*, 2014; Manuputty *et al.*, 2017). Sin embargo, en el caso de imágenes obtenidas por VANT, al aplicar las técnicas de pre-procesamiento no se encontraron mejoras significativas ($p < 0.05$) en la exactitud general de los mapas.

Manuputty *et al.* (2017) construyeron dos mapas de ecosistemas de pastos marinos a partir de imágenes satelitales del *WorldView-2*, utilizando seis bandas, dentro de las que se encuentran las bandas RGB-NIR, con exactitudes generales de 72% y 83%. Así mismo, Ortiz-Cajica (2020) aplicó técnicas de pre-procesamiento (Correcciones atmosférica, *deglint* y de columna de agua) a unas imágenes satelitales del *Spot 7* e *Ikonos* con lo que obtuvo un mapa de la laguna arrecifal con un coeficiente kappa de 0.79.

Por otro lado, Manessa *et al.* (2014) encontraron que al incrementar el número de bandas del espectro visible se mejora la exactitud general de las clasificaciones del fondo marino en aguas poco profundas, aplicando las técnicas de pre-procesamiento (correcciones atmosférica y de columna de agua). Puesto que, únicamente se emplearon las bandas RGB-NIR, sin embargo, al emplear más bandas, la identificación de los estratos bentónicos podría ser más específica. Sería interesante estudiar el comportamiento de los datos empleando más bandas, si es que en algún momento se desarrollan cámaras multiespectrales transportadas por VANT con una mayor resolución espectral.

La corrección atmosférica podría no ser necesaria, debido a que la toma de las imágenes a 100 msnm no presenta una influencia considerable del efecto atmosférico, en el cual se busca disminuir el efecto generado por las partículas suspendidas en la atmósfera que pueden modificar los valores de los píxeles (Khorram *et al.*, 2016). La implementación del NIR para remover el *sunlint*, con el método de Hedley, Harborne y Mumby (2005) en ambos casos disminuyó significativamente ($p < 0.05$) la exactitud de las firmas espectrales. De acuerdo con

Muslim *et al.* (2019) aplicando el *deglint* únicamente a las imágenes de las áreas afectadas, se pueden obtener exactitudes más elevadas, en comparación con modelos en los que la corrección se le realiza al ortomosaico completo.

10.3. Perspectivas de los mapas temáticos desarrollados

Para Akumal se hizo el mapa temático con las tres correcciones consecutivas (corrección atmosférica, *deglint* y corrección de columna de agua), al no existir diferencias significativas entre el ortomosaico sin pre-procesar y el ortomosaico con todas las técnicas aplicadas, son iguales. De acuerdo con ese criterio, se elaboró con el 80% de los sitios de entrenamiento el mapa temático para Akumal. En el ortomosaico de Pto. Morelos, se empleó el 80% de los sitios de entrenamiento con el ortomosaico sin la aplicación de las técnicas de pre-procesamiento.

Otros estudios han utilizado VANT para caracterizar el paisaje marino con resultados similares a los presentados aquí. Por ejemplo, utilizando *Artificial Neural Network* (ANN) Collin *et al.* (2018) obtuvieron una exactitud general del 75% usando LiDAR en combinación con un VANT equipado con una cámara RGB para generar mapas sobre el estado del arrecife. Casella *et al.* (2017) emplearon VANT equipado con una cámara RGB con lentes modificados para generar fottomosaicos ortorectificados y un modelo digital de elevación con una resolución vertical de 0.78; sus resultados revelan que con las condiciones indicadas (aguas tranquilas, baja intensidad de los vientos y mínimo *sunglint*) es posible obtener datos batimétricos del sistema bentónico arrecifal coralino de aguas poco profundas. Sin embargo, hasta donde ha sido posible revisar, este es un trabajo pionero en el uso de cámaras multiespectrales transportadas por VANT para caracterizar el paisaje bentónico arrecifal.

De acuerdo con Hamylton (2017), *SfM* trabaja mejor a altitudes de 60 m (contrastando con aquellas a 120 m) de altura de vuelo, empleando VANT para su obtención, ya que, al estar más cerca del sistema arrecifal, en consecuencia, se recolectan imágenes más detalladas; lo cual, se infiere

favoreció en que la capacidad de imágenes multiespectrales obtenidas por VANT para la caracterización del paisaje bentónico arrecifal fuera de muy buena calidad. Sin embargo, se ha observado que al obtener imágenes de zonas marinas con menos de 90 m de altitud en zonas profundas en aguas transparentes como las que caracterizan el Caribe mexicano (>6 m), el algoritmo no logra construir el modelo, posiblemente debido a que la cámara se enfoca en la superficie y no en el fondo, en razón de lo cual, es necesario realizar experimentos al respecto. Al construir los mapas temáticos del hábitat bentónico, a partir de la clasificación supervisada de los ortomosaicos multiespectrales, de acuerdo con el rango mencionado por Landis & Koch (1977) se produjeron mapas con una concordancia considerable (Kappa de 0.61 – 0.80) (tabla 13).

Es importante mencionar que, se infiere que la problemática derivada del sargazo redujo en cierta proporción las exactitudes de las clasificaciones, puesto que, pese a que se removieron las masas de esta en la superficie, en campo se apreció que también generaban tonalidades rojizas en la columna de agua (materia orgánica disuelta, posiblemente del mismo sargazo), sería prudente investigar ese rubro en futuros trabajos con cámaras multiespectrales.

Tabla 13. Intervalos para la interpretación del coeficiente kappa (Landis & Koch, 1977).

<i>Coeficiente Kappa</i>	<i>Fuerza de la concordancia</i>
0	Pobre
0.01 - 0.20	Ligera
0.21 - 0.40	Aceptable
0.41 - 0.60	Moderada
0.61 - 0.80	Considerable
0.81 - 1.00	Casi perfecta

11. Conclusiones y Recomendaciones

11.1. Conclusiones

Las ventajas de los VANT equipados con cámaras multiespectrales (*RGB-NIR*) permitieron la construcción de mapas temáticos para caracterizar el sistema bentónico, particularmente, en la zona referente a la laguna arrecifal con un bajo

nivel de incertidumbre con exactitudes generales entre 83.33% ($\kappa = 0.78$) para Akumal, y 75% ($\kappa = 0.67$) para Pto. Morelos.

Calcular las diferencias significativas entre los coeficientes Tau (Ma & Redmond, 1995) de los ortomosaicos con distintos niveles de pre-procesamiento permitió identificar que: [1] Las técnicas de pre-procesamiento podrían no ser necesarias, al no obtenerse mejoras significativas y [2] en este caso, la aplicación del deglinter redujo la exactitud general de las firmas espectrales significativamente. Así mismo, la calidad de los mapas elaborados con cada una de las técnicas de pre-procesamiento va a depender en cada caso de las condiciones ambientales al momento del vuelo. De este modo, se infiere que, si las condiciones ambientales son adecuadas, aplicar las técnicas de pre-procesamiento podría no ser necesario para obtener mapas con exactitudes considerablemente buenas, al emplear VANT para la obtención de las imágenes multiespectrales a los 100 msnm.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la hipótesis formulada, *“Empleando imágenes multiespectrales obtenidas por VANT (equipados con cámaras multiespectrales), se pueden construir mapas temáticos del hábitat para caracterizar el paisaje bentónico arrecifal a ultra resolución espacial (en el orden de cm) con un bajo nivel de incertidumbre”*, fue válida. Y la hipótesis nula referente a *“El uso de correcciones atmosféricas y de columna de agua, incrementará significativamente ($p < 0.05$) la exactitud de los mapas temáticos obtenidos del paisaje bentónico arrecifal”* fue rechazada, puesto que no se encontraron incrementos significativos en la exactitud de los ortomosaicos para ambas AOI.

En Akumal se lograron identificar cinco hábitats, siendo la clase uno con cobertura media de arena y cobertura baja tanto de pastos marinos como de macroalgas la que domino, con 44% (7.6 ha) del área cubierta por su ortomosaico multiespectral. Mientras que en Pto. Morelos se identificaron cuatro hábitats, de los cuales la clase dos con cobertura media tanto de

pastos marinos como de macroalgas y cobertura baja de arena fue la que presento el área más extensa, con 55% (6.6 ha) de todo su ortomosaico.

Obtener imágenes multiespectrales (RGB-NIR) de ultra alta resolución espacial en el orden de centímetros para construir ortomosaicos mediante el uso de técnicas de fotogrametría digital, permite el desarrollo de mapas temáticos de muy alta calidad, un análisis de los patrones espaciales de cambio más preciso, así como, respuestas más rápidas a fenómenos que pudieran estar afectando, en este caso, al sistema bentónico arrecifal, gracias a las ventajas inherentes en la obtención de este tipo de datos mediante un VANT. Así, la caracterización del paisaje bentónico arrecifal, con este tipo de tecnologías se vuelve más flexible, permitiendo tener un monitoreo de estos sistemas, en un tiempo más corto con alta resolución espacial.

La implementación de los VANT equipados con cámaras multiespectrales en las estrategias de manejo y conservación, particularmente para los sistemas bentónicos, puede generar beneficios en cuanto a la rapidez de respuesta a problemas específicos. El uso de estas herramientas genera ventajas importantes en determinados casos pudiendo complementarse muy bien con métodos satelitales u otras tecnologías.

Por último, se planteó, con este proyecto, determinar la capacidad de imágenes multiespectrales para la caracterización del paisaje bentónico arrecifal, empleando VANT para su obtención, lo cual se logró cumplir satisfactoriamente con la obtención de dos mapas temáticos de muy alta calidad, cumpliéndose con todos los objetivos planteados.

11.2. Recomendaciones

Por último, se recomienda lo siguiente:

- I. Anticipar un par de días extras para el muestreo con VANT; para poder correr un pre-análisis de las imágenes multiespectrales recuperadas que, con software especializado, permita determinar *in-situ* la calidad de las imágenes para la construcción del ortomosaico multiespectral, logrando así obtener un ortomosaico de dimensiones esperadas.

- II. Es recomendable ajustar los niveles de color; seleccionando el píxel más oscuro visualmente (niveles de salida) y el más claro (niveles de entrada), de este modo, los *data frame* de los videos seran analizados con mayor certeza, incrementando considerablemente la apreciación de los objetos en el fondo y reduciendo el sesgo por error de identificación.
- III. En futuros trabajos se recomienda implementar un Análisis de Componentes Principales, ya que Manuputty *et al.* (2017), a partir de imágenes satelitales, obtuvieron mapas con mejoras considerables en su exactitud general, aplicando esta técnica de pre-procesamiento.
- IV. Se sugiere se incluya información adicional (ej. sedimentología, topografía y/o turbidez), en los sitios de entrenamiento, para obtener mapas temáticos más detallados sobre los distintos tipos de hábitats. En ese sentido, desarrollar una clasificación supervisada con mayor contexto espacial.

12. Referencias

- Almada-Villela, P. C., Sale, P. F., Gold-Bouchot, G., & Kjerfve, B. (2003). *Manual de métodos para el programa de monitoreo sinóptico del SAM. Proyecto para el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM)*. Belice: Coastal Resources Multi-complex Building.
- Andréfouët, S., Kramer, P., Torres Pulliza, D., Joyce, K. E., Hochberg, E. J., Garza Pérez, R., . . . Muller Karger, F. E. (2003). Multi-site evaluation of IKONOS data for classification of tropical coral reef environments. *Remote Sensing of Environment*, 88, 128 - 143.
- Appeldoorn, R. S., Ruíz, I., & Pagan, F. E. (2011). From Habitat Mapping to Ecological Function: Incorporating Habitat into Coral Reef Fisheries Management. *Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, 63, 10 - 17.
- Arias González, J., Acosta González, G., Membrillo, N., Garza Pérez, J. R., & Castro Pérez, J. M. (2012). Predicting spatially explicit coral reef fish abundance,

richness and Shannon-Weaver index from habitat characteristics. *Biodivers. Conserv.*, 21, 115 - 130.

Awak, D. S., Lumban Gaol, J., Subhan, B., Madduppa, H. H., & Arafat, D. (2016). Coral reef ecosystem monitoring using remote sensing data: case study in Owi Island, Biak, Papua. The 2nd International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental Monitoring 2015, LISAT-FSEM 2015. *Procedia Environmental Sciences*, 33, 600 - 606.

Barrera Escorcía, G., & Namihira Santillán, P. E. (2004). Microbiological contamination in the Akumal coastal zone, Quintana Roo State, Mexico. *Hidrobiológica*, 14(1), 27 - 35.

Bellwood, D. R., Hughes, T. P., Folke, C., & Nyström, M. (24 de Junio de 2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429, 827 - 833.

Ben Romdhane, H., Marpu, P. R., Ghedira, H., & Ouarda, T. M. (12-19 de July de 2016). Mapping of coral reef environment in the Arabian Gulf using multispectral remote sensing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences: XXIII ISPRS Congress., XLI-B8*, 1111 - 1113.

Birkeland, C. (2015). Reef Biology and Geology – Not Just a Matter of Scale. En C. Birkeland (Ed.), *Coral Reefs in the Anthropocene* (págs. 1-16). Honolulu, Hawaii, USA: Springer.

Bortolot, Z. J., & Wynne, R. H. (November de 2005). Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *ELSEVIER, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(6), 342-360.

Brando, V. E., & Dekker, A. G. (06 de Junio de 2003). Satellite Hyperspectral Remote Sensing for Estimating Estuarine and Coastal Water Quality. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(6), 1378-1387.

- Calvo Ivanovic, I. (Diciembre de 2014). Cuatro aproximaciones a la teoría de los colores de Johann Wolfgang von Goethe. *Diseña(8)*, 94-101. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144576>
- Casella, E., Collin, A., Harris, D., Ferse, S., Bejarano, S., Parravicini, V., . . . Rovere, A. (2017). Mapping coral reefs using consumer-grade drones and structure from motion photogrammetry techniques. *Coral Reefs*, 36, 269 - 275.
- Cerdeira Estrada, S., Heege, T., Kolb, M., Ohlendorf, S., Uribe, A., Müller, A., . . . Martell, R. (2012). Benthic habitat and bathymetry mapping of shallow waters in Puerto Morelos reefs using remote sensing with a physics based data processing. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 4383 - 4386.
- Chadwick, N. E., & Morrow, K. M. (2011). Competition among sessile organisms on coral reefs. En Z. Dubinsky, & N. Stambler, *Coral reefs: An ecosystem in transition* (págs. 347-371). Springer. Doedrecht.
- Chavez Jr., P. S. (1988). An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 24(3), 459 - 479.
- Chavez Jr., P. S. (Septiembre de 1996). Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025 - 1036.
- Christensen, J. D., Jeffrey, C. F., Caldow, C., Monaco, M. E., Kendall, M. S., & Appeldoorn, R. S. (2003). Cross-Shelf Habitat Utilization Patterns of Reef Fishes in Southwestern Puerto Rico. *Gulf and Caribbean Research*, 14(2), 9 - 27.
- Claro Huneeus, F. (2014). Newton. En F. Claro Huneeus, *De Newton a Einstein y algo más* (págs. 29-30). Santiago, Chile: Ediciones Universidad Católica de Chile.
- Cocheret de la Morinière, E., Pollux, B., Nagelkerken, I., & van der Velde, G. (2002). Post-settlement Life Cycle Migration Patterns and Habitat Preference of Coral

Reef Fish that use Seagrass and Mangrove Habitats as Nurseries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 309 - 321.

Collin, A., Ramambason, C., Pastol, Y., Casella, E., Rovere, A., Thiault, L., . . . Davies, N. (2018). Very high resolution mapping of coral reef state using airborne bathymetric LiDAR surface-intensity and drone imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 39(17), 5676 - 5688.

CONAGUA. (2019). *Reporte del Clima en México Agosto 2019 (Año 9 No. 8)*. México, D. F.: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología, Subgerencia de Climatología y Servicios Climáticos. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Agosto19.pdf>

CONAGUA. (2019). *Reporte del Clima en México Junio 2019 (Año 9 No. 6)*. México, D. F.: Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, Gerencia de Meteorología y Climatología, Subgerencia de Climatología y Servicios Climáticos. Obtenido de <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Junio19.pdf>

Congalton, R. G. (1991). A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sens. Environ.*, 37, 35 - 46.

Connell, J. H. (17 de Enero de 1997). Disturbance and recovery of coral assemblages. *Coral Reefs*, 16, S101 - S113.

Contreras Silva, A. I., López Caloca, A. A., Tapia Silva, F. O., & Cerdeira Estrada, S. (2012). Satellite Remote Sensing of Coral Reef Habitats Mapping in Shallow Waters at Banco Chinchorro Reefs, México: A Classification Approach. En B. Escalante (Ed.), *Remote Sensing-Applications* (págs. 331 - 354). Rijeka, Croatia; Shanghai, China: InTech.

- Cuevas Jiménez, A., Ardisson, P. L., & Condal, A. R. (2002). Mapping of shallow coral reefs by colour aerial photography. *International Journal of Remote Sensing*, 23(18), 3697 - 3712.
- Dekker, A. G., Phinn, S. R., Anstee, J., Bissett, P., Brando, V. E., Casey, B., . . . Roelfsema, C. (2011). Intercomparison of shallow water bathymetry, hydro-optics, and benthos mapping techniques in Australian and Caribbean coastal environments. *Limnology and Oceanography: Methods*, 396 - 425.
- Díaz Peña, M., & Roig Muntaner, A. (1989). Bases de la Mecánica Cuántica. En M. Díaz Peña, & A. Roig Muntaner, *Química Física 1* (1 ed., Vol. 1, págs. 31-33). Madrid, España: Alhambra .
- DOF. (2010). Diario Oficial de la Federación 30/12/2010. *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo*. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. (2015). Diario Oficial de la Federación 13/04/2015. *Acuerdo por el que se establece una zona de refugio pesquero en aguas marinas de jurisdicción federal ubicadas en la zona de Akumal en el Estado de Quintana Roo*. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. (2016a). Diario Oficial de la Federación 07/12/2016. *Decreto por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región conocida como Caribe Mexicano*. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. (2016b). Diario Oficial de la Federación 07/03/2016. *Acuerdo por el que se establece con el nombre de Bahía de Akumal el área de refugio para la protección de las especies que se indican, la porción marina que se señala en el Estado de Quintana Roo*. Estados Unidos Mexicanos.
- DOF. (2017). Diario Oficial de la Federación 06/10/2017. *Acuerdo por el que se da a conocer el Programa de Protección del Área de Refugio para la Protección*

de Especies Marinas denominada Bahía de Akumal, creada por Acuerdo publicado el 7 de marzo de 2016. Estados Unidos Mexicanos.

Edwards, C. B., Eynaud, Y., Williams, G. J., Pedersen, N. E., Zgliczynski, B. J., Gleason, A. C., . . . Sandin, S. A. (2017). Large-area imaging reveals biologically driven non-random spatial patterns of corals at a remote reef. *Coral Reefs*, 36, 1291 - 1305.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2000). *The ESRI Press Dictionary of GIS Terminology*. (K. Heather, Ed.) Redlands, California: ESRI Press.

Flügel, E., & Flügel-Kahler, E. (Diciembre de 1992). Phanerozoic Reef Evolution: Basic Questions and Data Base. *Facies, Carbonate Sedimentology and Paleoecology*, 26, 167 - 277.

Franco Taboada, J. A. (Junio de 2015). De la teoría de los colores de Goethe a la interacción del color de Albers. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica*, 20(25), 48-55.

Freire Buillon, L. G. (2009). *Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS)*. Perfiles IDS, 100P.

Fyfe, S. K. (2003). Spatial and temporal variation in spectral reflectance: Are seagrass species spectrally distinct? *Limnol. Oceanogr.*, 48(1, part 2), 464-479.

Gaggioli, N. N., & Hidalgo, C. E. (21 de Noviembre de 2018). VANT Civiles: Revisión de Literatura. *5to Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica*, págs. 1 - 13.

Gallegos, M. E., Merino, M., Rodriguez, A., Marbá, N., & Duarte, C. M. (1994). Growth patterns and demography of pioneer Caribbean seagrasses *Halodule wrightii* and *Syringodium filiforme*. *Marine Ecology Progress Series*, 109(1), 99-104.

- Garza Pérez, J. R., Lehmann, A., & Arias González, J. E. (2004). Spatial prediction of coral reef habitats: integrating ecology with spatial modeling and remote sensing. *Marine Ecology Progress Series*, 269, 141 - 152.
- Garzón-Ferreira, J., & Díaz, J. M. (2003). The Caribbean coral reefs of Colombia. En J. Cortés, *Latin american coral reefs* (págs. 275-301). Elsevier Science. 497 p.
- Goodman, J. A., Purkis, S. J., & Phinn, S. R. (Edits.). (2013). *Coral Reef Remote Sensing - A Guide for Mapping, Monitoring and Management*. Dordrecht, Heidelberg, New York and London: Springer.
- Green, E. P., Mumby, P. J., Edwards, A. J., & Clark, C. D. (2000). *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management* (Coastal management sourcebooks 3 ed.). (A. J. Edwards, Ed.) Paris: UNESCO.
- Griffiths, D., & Burningham, H. (2019). Comparison of pre- and self-calibrated camera calibration models for UAS-derived nadir imagery for a SfM application. *Progress in Physical Geography*, 43(2), 215 - 235.
- Guannel, G., Arkema, K., Ruggiero, P., & Verutes, G. (2016). The Power of Three: Coral Reefs, Seagrasses and Mangroves Protect Coastal Regions and Increase Their Resilience. *PLOS ONE*, 11(7), 1 - 22.
- Guardado France, R., Téllez Duarte, M. A., & Herrera Gutiérrez, A. R. (31 de Enero de 2017). El uso de drones en ciencias de la tierra. *Reaxion: Ciencia y tecnología universitaria*, 4(2).
- Gutiérrez Carbonell, D., García Sáez, C., Pérez Soto, M. L., Padilla Souza, C., Pizaña Alonso, J., & Macías Ordoñez, R. (1993). Caracterización de los Arrecifes Coralinos de la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Q. Roo. En J. Bezaury Creel (Ed.), *SiAN KA'AN - Serie Documentos No. 1* (Vol. 1, págs. 1 - 47). Mérida, Yucatán, México: amigos de sian ka'an.
- Hadjimitsis, D. G., Clayton, C. R., & Hope, V. S. (2004). An assessment of the effectiveness of atmospheric correction algorithms through the remote

sensing of some reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*, 25(18), 3651 - 3674.

Hadjimitsis, D. G., Papadavid, G., Agapiou, A., Themistocleous, K., Hadjimitsis, M. G., Retalis, A., . . . Clayton, C. R. (2010). Atmospheric correction for satellite remotely sensed data intended for agricultural applications: impact on vegetation indices. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 89 - 95.

Hallock, P. (1997). Reefs and reefs limestones in earth history. En C. Birkeland (Ed.), *Life and Death of Coral Reefs* (págs. 13 - 42). New York: Chapman & Hall.

Hallock, P. (2015). Reef Biology and Geology – Not Just a Matter of Scale. En C. Birkeland (Ed.), *Coral Reefs in the Anthropocene* (págs. 17-42). Honolulu, Hawaii, USA: Springer.

Hamylton, S. M. (2017). Mapping coral reef environments: A review of historical methods, recent advances and future opportunities. *Progress in Physical Geography*, 41(6), 803–833.

Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. (20 de Mayo de 2005). Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107-2112.

Hirsch, R. (2017). Advancing Towards Photography: The Rise of the Reproduction. En R. Hirsch, *Seizing the light: A Social & Aesthetic History of Photography* (3 ed., págs. 1 - 26). New York and London: Routledge, Taylor & Francis Group.

Hochberg, E. J., Atkinson, M. J., & Andréfouët, S. (2003). Spectral reflectance of coral reef bottom-types worldwide and implications for coral reef remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 85, 159-173.

Horacio, J., Muñoz Narciso, E., Trenhaile, A. S., & Pérez Alberti, A. (2019). Remote sensing monitoring of a coastal-valley earthflow in northwestern Galicia, Spain. *Catena*, 178, 276 - 287.

- Horta-Puga, G. (2010). Impactos Ambientales. En J. W. Tunnell Jr., E. A. Chávez, & K. Withers, *Arrecifes coralinos del Sur del Golfo de México* (págs. 183-205). Texas: A&M University Press, Collage Station, 293 p.
- Horta-Puga, G., & Tello-Musi, J. L. (2009). *Sistema Arrecifal Veracruzano: condición actual y programa permanente de monitoreo: Primera Etapa*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. México, D. F.: Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. DM005.
- Horta-Puga, G., Tello-Musi, J. L., Morales-Aranda, A., & Gutiérrez-Martínez, J. F. (2015). *Sistema Arrecifal Veracruzano, condición actual y programa permanente de monitoreo: II Etapa*. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, UBIPRO, CONABIO. México, D. F.: Proyecto CONABIO GM005. Reporte de las campañas de monitoreo C-10, H-11 y H-12.
- Hossler, F. E. (2014). Eye. En *Ultrastructure Atlas of Human Tissues* (1 ed., págs. 749 - 795). John Wiley & Sons, Incorporated. Obtenido de ProQuest Ebook Central <https://ebookcentral.proquest.com>
- Hubbard, D. K. (1997). Reef biology and geology: A matter of scale. En C. Birkeland (Ed.), *Life and Death of Coral Reefs* (págs. 43 - 67). New York: Chapman & Hall.
- Hunt, E. R., Everitt, J. H., Ritchie, J. C., Moran, M. S., Booth, D. T., Anderson, G. L., . . . Seyfried, M. S. (2003). Applications and Research Using Remote Sensing for Rangeland Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(6), 675-693.
- Instituto Nacional de Ecología; Secretaría de Medio Ambiente Recursos Naturales y Pesca. (2000). *Programa de Manejo del Parque Nacional Arrecife de Puerto Morelos*. Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.: Instituto Nacional de Ecología.

- Khorrám, S., Koch, F. H., van der Wiele, C. F., & Nelson, S. A. (2012). *Remote Sensing*. (J. N. Pelton, Ed.) International Space University, U. S. A.: SpringerBriefs in Space Development.
- Khorrám, S., van der Wiele, C. F., Koch, F. H., Nelson, S. A., & Potts, M. D. (2016). *Principles of Applied Remote Sensing* (1 ed.). New York: Springer.
- Lally, H. T., O'Connor, I., Jensen, O. P., & Graham, C. T. (2019). Can drones be used to conduct water sampling in aquatic environments? *Science of the Total Environment*, 670, 569 - 575.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics. International Biometric Society*, 33(1), 159-174.
- Lang, J., & Kenneth, M. (2013). *Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program: Identifying AGRRA Corals: Part 1 Mound and Boulder Corals*. AGRRA.
- Lapointe, B. (1997). Nutrient thresholds for bottom-up control of macroalgal blooms on coral reefs in Jamaica and southeast Florida. *Limnology and Oceanography*, 42(5, part. 2), 1119-1131.
- Larkum, A. W., Orth, R. J., & Duarte, C. M. (2007). *Seagrasses: Biology, Ecology and Conservation*. The Netherlands: Springer.
- Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC. (2006). Advanced Classification. En LLC, *ERDAS IMAGINE Tour Guides* (pág. 730 pp). United States of America.
- Lyzenga, D. R. (1 de Febrero de 1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*, 17(3), 379 - 383.
- Lyzenga, D. R. (1981). Remote sensing of bottom reflectance and water attenuation parameters in shallow water using aircraft and Landsat data. *Remote Sensing*, 2(1), 71 - 82.

- Lyzenga, D. R., Malinas, N. P., & Tanis, F. J. (Agosto de 2006). Multispectral Bathymetry Using a Simple Physically Based Algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(8), 2251-2259.
- Ma, Z., & Redmond, R. L. (Abril de 1995). Tau Coefficients for Accuracy Assessment of Classification of Remote Sensing Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61(4), 435 - 439.
- Manessa, M. D., Kanno, A., Sekine, M., Ampou, E. E., Widagti, N., & As-syakur, A. R. (14 de May de 2014). Shallow-Water Benthic Identification Using Multispectral Satellite Imagery: Investigation on the Effects of Improving Noise Correction Method and Spectral Cover. *Remote Sensing*, 6, 4454-4472.
- Manuputty, A., Lumban Gaol, J., Bahri Agus, S., & Wayan Nurjaya, I. (2017). The utilization of Depth Invariant Index and Principle Component Analysis for mapping seagrass ecosystem of Kotok Island and Karang Bongkok, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 54, 1 - 10.
- Marcos Robles, J. L., Gil Docampo, M. d., Ortiz Sanz, J., Martínez Rodríguez, S., Garrido Larnaga, F., Sánchez Sastre, L. F., . . . Ortiz Sanz, L. (2016). Determinación de biomasa en parcelas de cultivos herbáceos mediante cámaras ópticas levadas por medio de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Proceedings of the 6th IberoAmerican Congress on Qualitative Research (CIAIQ2016), Qualitative Research on Engineering and Technology*, v. 4.
- Martínez Rendis, A., Acosta González, G., Hernández Stefanoni, J., & Arias González, J. (2015). Quantifying the reefscape transformation of a coastal Caribbean coral reef during a phase shift and the associated coastal landscape change. *Marine Ecology*, 37, 697 - 710.
- Masselink, G., & Hughes, M. G. (2003). Coral Reefs and Islands. En G. Masselink, & M. G. Hughes, *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology* (págs. 282 - 306). London: Oxford University Press.

- Mather, P. M., & Koch, M. (2011). *Computer Processing of Remotely-Sensed Images-An Introduction-* (4ta ed.). USA and UK: John Wiley & Sons.
- Millet-Encalada, M., Álvarez-Filip, I., & Reyes-Bonilla, H. (2007). Estructura Comunitaria De Corales Escleractinios En El Parque Nacional Arrecifes De Cozumel. En I. M. Mejía-Ortíz (Ed.), *Biodiversidad acuática de la Isla de Cozumel* (1ra ed., págs. 327-347). Ciudad de México, México: Plaza y Valdés.
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29, 215 - 233.
- Moberg, F., & Folke, C. (1999). Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*, 29, 215 - 233.
- Montaggioni, L. F., Braithwaite, C. J., & Braithwaite, C. (2009). *Quaternary coral reef systems : History, development processes and controlling factors* (1 ed., Vol. 5). Oxford, UK: Elsevier Science & Technology.
- Monteiro, J. G., Jiménez, J. L., Gizzi, F., Přikryl, P., Lefcheck, J. S., Santos, R. S., & Canning-Clode, J. (2021). Novel approach to enhance coastal habitat and biotope mapping with drone aerial imagery analysis. *Scientific Reports, nature reseach*, 11(574), 1 - 13.
- Mumby, P. J., Clark, C. D., Green, E. P., & Edwards, A. J. (1998). Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. *International Journal of Remote Sensing*, 19(1), 203 - 210.
- Mumby, P. J., Edwards, A. J., Arias-González, J. E., Lindeman, K. C., Blackwell, P. G., Gall, A., . . . LLewellyn, G. (Febrero de 2004). Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, 427, 533 - 536.
- Mumby, P. J., Green, E. P., Clark, C. D., & Edwards, A. J. (1998). Digital analysis of multispectral airborne imagery of coral reefs. *Coral Reefs*, 17, 59 - 69.

- Mumby, P. J., Green, E. P., Edwards, A. J., & Clark, C. D. (1997). Coral reef habitat mapping: how much detail can remote sensing provide? *Marine Biology*, 130, 193-202.
- Mumby, P. J., Skirving, W., Strong, A. E., Hardy, J. T., LeDrew, E. F., Hochberg, E. J., . . . David, L. T. (2004). Remote sensing of coral reefs and their physical environment. *Marine Pollution Bulletin*, 48, 219-228.
- Muslim, A. M., Chong, W. S., Safuan, C. D., Khalil, I., & Hossain, M. S. (2019). Coral Reef Mapping of UAV: A Comparison of Sun Glint Correction Methods. *Remote Sensing*, 11(20), 2422.
- Neuschlosz, M. S. (1949). Goethe y las ciencias fisico-naturales. *Anales de la Universidad de Chile*, 147-172.
- Nieto, P. (2013). *Classifying Benthic Habitats and Deriving Bathymetry at the Caribbean Netherlands Using Multispectral Imagery, Case Study of St. Eustatius. Thesis Report GIRS-2013-18*. The Netherlands: Wageningen University and Research Centre.
- Nyquist, J. E. (1997). Unmanned aerial vehicles that even geoscience departments can afford. *Geotimes*, 42(5), 20.
- Ohde, T., & Siegel, H. (2001). Correction of bottom influence in ocean colour satellite images of shallow water areas of the Baltic Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 22(2 y 3), 297 - 313.
- Ortega, M., Godínez Ortega, J., & Garduño, G. (2001). *Catálogo de algas bénticas de las costas mexicanas del Golfo de México y Mar Caribe*. Cuadernos del IBUNAM: UNAM, CONABIO.
- Ortiz Cajica, A. K., Hinojosa Arango, G., Garza Pérez, J. R., & Rioja Nieto, R. (12 de Mayo de 2020). Seascape metrics, spatio-temporal change, and intensity of use for the spatial conservation prioritization of a Caribbean marine protected area. *Ocean and Coastal Management*, 194, 1-10.

- Otero, V., Van De Kerchove, R., Satyanarayana, B., Mohd Lokman, H., Lucas, R., & Dahdouh Guebas, F. (2019). An Analysis of the Early Regeneration of Mangrove Forests using Landsat Time Series in the Matang Mangrove Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Remote sensing*, 11(774), 1 - 18.
- Ouellette, W., & Getinet, W. (2016). Remote sensing for Marine Spatial Planning and Integrated Coastal Areas Management: Achievements, challenges, opportunities and future prospects. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 4, 138 - 157.
- Parrish, J. D. (Diciembre de 1989). Fish communities of interacting shallow-water habitats in tropical oceanic regions. *Marine Ecology Progress Series*, 58, 143 - 160.
- Pimentel, J. (Septiembre de 2015). Teorías de la luz y el color en la época de las luces. De Newton a Goethe. Historia de las concepciones científicas sobre la luz. *ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura*, 1-13.
- Pix4D. (7 de Febrero de 2017). *La exactitud que usted espera con pix4dmapper*. Obtenido de ¿Cuál es la precisión que puedo lograr con Pix4Dmapper?: <https://www.pix4d.com/es/blog/la-exactitud-que-usted-espera-con-pix4dmapper>
- Polidoro, B. A., Carpenter, K. E., Collins, L., Duke, N. C., Ellison, A. M., Ellison, J. C., . . . Hong Yong, J. W. (Abril de 2010). The Loss of Species: Mangrove Extinction Risk and Geographic Areas of Global Concern. *PLoS ONE*, 5(4), 1 - 10.
- Pouteau, R., Collin, A., Archambault, P., & Stoll, B. (2013). Modeling reef health from upstream socio-ecological components using GIS and RS. *IEEE, IGARSS*, 306 - 309.
- Quilter, M. C., & Anderson, V. J. (Julio de 2001). A proposed method for determining shrub utilization using (LA/LS) imagery. *Journal of Range Management*, 54(4), 378-381.

- Raber, G. T., & Schill, S. R. (2019). Reef Rover: A Low-Cost Small Autonomous Unmanned Surface Vehicle (USV) for Mapping and Monitoring Coral Reefs. *Drones*, 3(38), 1 - 22.
- Rangel Vargas, R. (2015). *Implementación de un piloto automático para un UAV (Vehículo Aéreo No Tripulado), monitoreado y controlado por módulos de tecnología Zigbee mediante una estación terrena*. Mexico, D. F.: Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería Eléctrica.
- Rejas Ayuga, J. G. (2008). *Tratamiento Digital Previo de las Imágenes* (1 ed.). España: EOI. Master en Ingeniería Medioambiental y Gestión del Agua.
- Riaño, D., Salas, J., & Chuvieco, E. (2000). Corrección Atmosférica y Topográfica, Información Multitemporal y Auxiliar Aplicadas a la Cartografía de Modelos de Combustibles con Imágenes Landsat-TM. En I. Aguado, & M. Gómez (Edits.), *Tecnologías Geográficas para el Desarrollo Sostenible. IX Congreso del Grupo de Métodos Cuantitativos Sistemas de Información Geográfica y Teledetección* (págs. 222 - 239). España, España: Universidad de Alcala: Asociación de Geógrafos Españoles.
- Rioja Nieto, R., & Álvarez Filip, L. (2019). Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends and conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 616 - 625.
- Rioja Nieto, R., & Sheppard, C. (2008). Effects of management strategies on the landscape ecology of a Marine Protected Area. *Ocean & Coastal Management*, 51, 397 - 404.
- Rioja Nieto, R., Barrera Falcón, E., Hinojosa Arango, G., & Riosmena Rodríguez, R. (2013). Benthic habitat B-diversity modeling and landscape metrics for the selection of priority conservation areas using a systematic approach: Magdalena Bay, Mexico, as a case study. *Ocean & Coastal Management*, 82, 95 - 103.

- Rioja-Nieto, R., & Sheppard, C. (2008). Effects of management strategies on the landscape ecology of a Marine Protected Area. *Ocean & Coastal Management*, 51, 397-404.
- Rioja-Nieto, R., Garza-Pérez, J. R., Álvarez-Filip, L., Mariño-Tapia, I., & Enriquez, C. (2018). The Mexican Caribbean: From Xcalak to Holbox. En C. Sheppard (Ed.), *World Seas: An Environmental Evaluation-Europe, The Americas and West Africa* (2 ed., págs. 637 - 653). Cambridge: Elsevier.
- Rocchio, L. (12 de Abril de 2019). *Landsat Then and Now*. Obtenido de National Aeronautics and Space Administration (NASA), Landsat Science: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/>
- Rooker, J. R., & Dennis, G. D. (1991). Diel, Lunar And Seasonal Changes In A Mangrove Fish Assemblage Off Southwestern Puerto Rico. *Bulletin of Marine Science*, 49(3), 684 - 689.
- Rupasinghe, P. A., Milas, A. S., Arend, K., Simonson, M. A., Mayer, C., & Mackey, S. (2019). Classification of shoreline vegetation in the Western Basin of Lake Erie using airborne hyperspectral imager HSI2, Pleiades and UAV data. *International Journal of Remote Sensing*, 40(8), 3008 - 3028.
- Salvat, B. (Marzo de 1992). Coral reefs - a challenging ecosystem for human societies. *Global Environmental Change*, 2(1), 12 - 18.
- Schowengerdt, R. A. (2007). *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing* (3 ed.). California, USA: Elsevier.
- Schrader, T. S., & Duniway, M. C. (Agosto de 2011). Image Interpreter Tool: An ArcGIS Tool for Estimating Vegetation Cover From High-Resolution Imagery. *Rangelands, Monitoring on Rangelands. Society for Range Management*, 33(4), 35 - 40.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *NOM-059-SEMARNAT-2010*. Estados Unidos Mexicanos: Diario Oficial de la Federación.

- Sheppard, E. (1995). GIS and Society: Towards a Research Agenda. *Cartography and Geographic Information Systems*, 22(1), 5 - 16.
- SIGSA. (12 de Abril de 2019). *¿Sabía usted que?* Obtenido de Percepción Remota: <http://www.sigsa.info/productos/percepcion-remota/sabias-que>
- Spalding, M., Ravilious, C., & Green, E. P. (2001). *World atlas of coral reefs*. Berkeley, California: University of California Press.
- Stevenson, J. C. (1988). Comparative ecology of submersed grass beds in freshwater, estuarine, and marine environments. *Limnology and Oceanography*, 33(4, part 2), 867 - 893.
- Tokotoko, J., Flouvat, F., Goiran, C., Hédouin, L., Collin, A., & Selmaoui Folcher, N. (2018). Supervised classification of satellite images with spatially inaccurate training field data. *International Conference on Data Mining Workshops*, 1381 - 1388.
- U.S. Geological Survey. (2009). *Geographic information systems, remote sensing, and spatial analysis activities in Texas, 2008-09*. Reston, VA: Fact Sheet. Obtenido de <http://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20093039>
- UNESCO. (1999). Applications of Satellite and Airborne Image Data to Coastal Management. En UNESCO, *Lesson 5: Compensating for Variable Water Depth to Improve Mapping of Underwater Habitats: Why it is Necessary* (pág. 185 pp). Paris, France: Coastal Regions and Small Island Papers 4.
- Vázquez Sosa, A., Frausto Martínez, O., & Fraga Verdugo, J. (2015). Pueblos de apoyo en contextos turísticos. Akumal, enclave turístico de la Riviera Maya de Quintana Roo. *Temas Antropológicos, Revista Científica de Investigaciones Regionales*, 37(2), 121 - 139.
- Verweij, M. C., Nagelkerken, I., Hans, I., & Ruseler, S. M. (2008). Seagrass nurseries contribute to coral reef fish populations. *Limnol. Oceanogr.*, 53(4), 1540 - 1547.

- Watkins Russell, L. (2015). *A Methodology for Classification of Benthic Features using WorldView-2 Imagery*. Report prepared for the Ecospatial Information Team: Coral Reef Ecosystem Division, Pacific Islands Fisheries Science Center. Honolulu, HI, under NOAA contract number WE-133F-15-SE-0518. Obtenido de ftp://ftp.soest.hawaii.edu/pibhmc/website/webdocs/documentation/Classification_of_Benthic_Features_using_WorldView_final.pdf
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., & Hinkley, E. A. (2012). Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use. *Remote Sensing*, 4, 1671 - 1692.
- Wijesingha, J., Moeckel, T., Hensgen, F., & Wachendorf, M. (2019). Evaluation of 3D point cloud-based models for the prediction of grassland biomass. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*, 78, 352 - 359.
- Williams, S. L. (1990). Experimental Studies of Caribbean Seagrass Bed Development. *Ecological Monographs*, 60(4), 449-469.
- Wright, D. J., Goodchild, M. F., & Proctor, J. D. (1997). Demystifying the persistent ambiguity of GIS as "tool" vs. "science". *Annals of the Association of American Geographers*, 87(2), 346 - 362.
- Wu, D., Li, R., Zhang, F., & Liu, J. (2019). A review on drone-based harmful algae blooms monitoring. *Environ. Monit. Assess.*, 191:211, 1 - 11.
- Yuste Martín, R., Vargas Velasco, N., & Moya Hernández, J. (2013). Teledetección Ambiental de Alta Resolución mediante aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados. En *6to Congreso Forestal Español (6CFE01-451)* (pág. 22 p). Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Zelanski, P., Pat, F. M., & Alonso, G. S. (2001). Elementos básicos del color. En P. Zelanski, F. M. Pat, & G. S. Alonso, *Color* (1 ed., págs. 13-21). Madrid, España: Tursen/H. Blume.

Zhang, C. (2014). Applying data fusion techniques for benthic habitat mapping and monitoring in a coral reef ecosystem. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104, 213 - 223.

Zieman, J. C., & Zieman, R. T. (1989). *The ecology of the seagrass meadows of the west coast of Florida: a community profile*. U. S.: Fish and Wildlife Service. Biol. Rep. 85(7.25).

13. Anexos

13.1. Anexo 1: Imágenes representativas de los substratos bentónicos

A continuación, algunas imágenes representativas extraídas de los videos analizados de Akumal, Quintana Roo (se les ajustaron los niveles de color para incrementar el nivel de detalle en las imágenes):



Figura SI. Campo dominado por macroalgas y substrato arenoso, así como, algunos corales blandos de categoría morfológica ramosa y abanico.



Figura SII. Campo dominado por pastos marinos (*Syringodium filiforme*).



Figura SIII. Campo dominado por pastos marinos (*Thalassia testudinum*).



Figura SIV. Coral blando y duro de categoría morfológica ramosa y masivo/domo, respectivamente.



Figura SV. Coral duro (de categoría morfológica tipo masivo/domo; *Orbicella annularis*) con secciones del complejo con blanqueamiento total y/o muertas, además, unas secciones pálidas.



Figura SVI. Coral blando de categoría morfológica de tipo pluma y coral duro de categoría morfológica de tipo cerebro, digitiforme, y algunos fragmentos de tipo masivo/domo, principalmente.



Figura SVII. Coral duro (de categoría morfológica tipo masivo/domo) con secciones del complejo con blanqueamiento total y/o muertas, con algas y esponjas incrustantes recubriéndolo; en el fondo, un coral blando de tipo abanico.

A continuación, algunas imágenes representativas extraídas de los videos analizados de Pto. Morelos, Quintana Roo (se les ajustaron los niveles de color para incrementar el nivel de detalle en las imágenes):



Figura SVIII. Dominancia de pastos marinos (*Syringodium filiforme* acompañada con un poco de *Thalassia testudinum*), así como, algunas macroalgas. También se aprecia un equinodermo (*Oreaster reticulatus*) de un tamaño considerable.



Figura SIX. Coral blando (de categoría morfológica de tipo ramoso) con notable dominancia de los pastos marinos (una mezcla de *Thalassia testudinum* con *Syringodium filiforme*).



Figura SX. Coral duro de categoría morfológica de tipo coral de fuego (*Millepora alcicornis*), acompañado por *Syringodium filiforme* y macroalgas.



Figura SXI. Coral blando (de categoría morfológica tipo ramoso) con pastos marinos (*Thalassia testudinum* y *Syringodium filiforme*).



Figura SXII. Coral duro de categoría morfológica ramosa (*Acropora cervicornis*), acompañado por *Syringodium filiforme* y *Thalassia testudinum*.



Figura SXIII. Coral blando ramoso con macroalgas en el fondo.



Figura SXIV. Campo dominado por pastos marinos (*principalmente Syringodium filiforme y un poco de Thalassia testudinum*).

13.2. Anexo 2: cálculos de las técnicas de pre-procesamiento

En la ecuación SI se aprecia que al realizar la corrección atmosférica la *reflectancia media* en aguas profundas, para el ortomosaico de Akumal, fue de 0.006 tanto para la banda uno (Azul) como la dos (Verde), mientras que, para la banda tres (Rojo) fue de 0.002 y para la banda cuatro (NIR) fue de 0.001.

Al realizar el *deglint*, se obtuvo, como se muestra en la ecuación SII, para la banda uno, una *pendiente de la regresión* de 2.7235 con un valor del pixel en el NIR de 0.054, así como, 0.000038 como *valor mínimo del NIR*; para la banda dos, una *pendiente de la regresión* de 3.2679 con un *valor del pixel en el NIR* de 0.025 y un *valor mínimo del NIR* de 0.00034; mientras, para la banda tres, se obtuvo una *pendiente de la regresión* de 2.0223, un *valor del pixel en el NIR* de 0.046, con un *valor mínimo del NIR* de 0.00028.

Referente a la corrección de columna de agua, para el ortomosaico de Akumal se obtuvo (tabla SI) un *coeficiente de atenuación* de 1.035 para el par de bandas uno con la banda dos, además, 3.053 para el par de la banda uno con la banda tres, y 1.071 para la banda dos con la tres; además, la *razón del coeficiente de atenuación* fue de 2.474 para el par de bandas uno con la dos, siendo que, para la banda uno con la tres fue de 6.266, y para el par de la banda dos con la tres de 2.536. Las figuras SXV, SXVI y SXVII muestran los cúmulos de datos que, al estar dispuestos a lo largo de la pendiente, representan una serie de datos provenientes de diferentes profundidades, siendo así, de estos datos se realizaron los cálculos (ecuación SIII) que permiten realizar la corrección de columna de agua.

Corrección atmosférica:

Banda uno:

$$A'_i = L_i - (0.006)$$

Banda dos:

$$A'_j = L_j - (0.006)$$

Banda tres:

$$A'_k = L_k - (0.002)$$

Banda cuatro:

$$A'_l = L_l - (0.001)$$

Remoción del sunlint:

Banda uno:

$$R'_i = R_i - 2.7235(0.053595947 - 0.0000376)$$

Banda dos:

$$R'_j = R_j - 3.2679(0.02545874 - 0.000342773)$$

Banda tres:

$$R'_k = R_k - 2.0223(0.045844482 - 0.000281738)$$

Ecuación SI y SII. Cálculos efectuados con la corrección atmosférica y el *deglint*, Akumal, Quintana Roo. La imagen con el *deglint* con un balance de 0.16, de acuerdo con Watkins Russell (2015).

Cálculos para la banda uno con la dos:

$$P + 12 = \left[\begin{array}{cccc} \ln(L_i) - \left[\frac{0.0181208547361005 - 0.00298786805079961}{2(0.00731109631735484)} + \sqrt{\left(\left(\frac{0.0181208547361005 - 0.00298786805079961}{2(0.00731109631735484)} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \ln(L_j) \right] + 12 & & & \\ \ln(L_1) & " & & \ln(L_1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \ln(L_{1392}) & " & & \ln(L_{1392}) \end{array} \right]$$

Cálculos para la banda uno con la tres:

$$P + 12 = \left[\begin{array}{cccc} \ln(L_i) - \left[\frac{0.0181208547361005 - 0.000475570849290471}{2(0.00288940581797384)} + \sqrt{\left(\left(\frac{0.0181208547361005 - 0.000475570849290471}{2(0.00288940581797384)} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \ln(L_j) \right] + 12 & & & \\ \ln(L_1) & " & & \ln(L_1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \ln(L_{1392}) & " & & \ln(L_{1392}) \end{array} \right]$$

Cálculos para la banda dos con la tres:

$$P + 12 = \left[\begin{array}{cccc} \ln(L_i) - \left[\frac{0.00298786805079961 - 0.000475570849290471}{2(0.0011730630884296)} + \sqrt{\left(\left(\frac{0.00298786805079961 - 0.000475570849290471}{2(0.0011730630884296)} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \ln(L_j) \right] + 12 & & & \\ \ln(L_1) & " & & \ln(L_1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \ln(L_{1392}) & " & & \ln(L_{1392}) \end{array} \right]$$

Exploración de datos:

Mínimo: $(P_{min})+12 = (-11.7197638700425)+12 = 0.280236129957498$

Ecuación SIII. Cálculos semidesarrollados del índice de profundidad invariable para cada uno de los tres pares de datos de las bandas (b1-b2, b1-b3 y b2-b3) del *subset* de los fondos de substrato uniforme (arenales) para el ráster de Akumal, Quintana Roo.

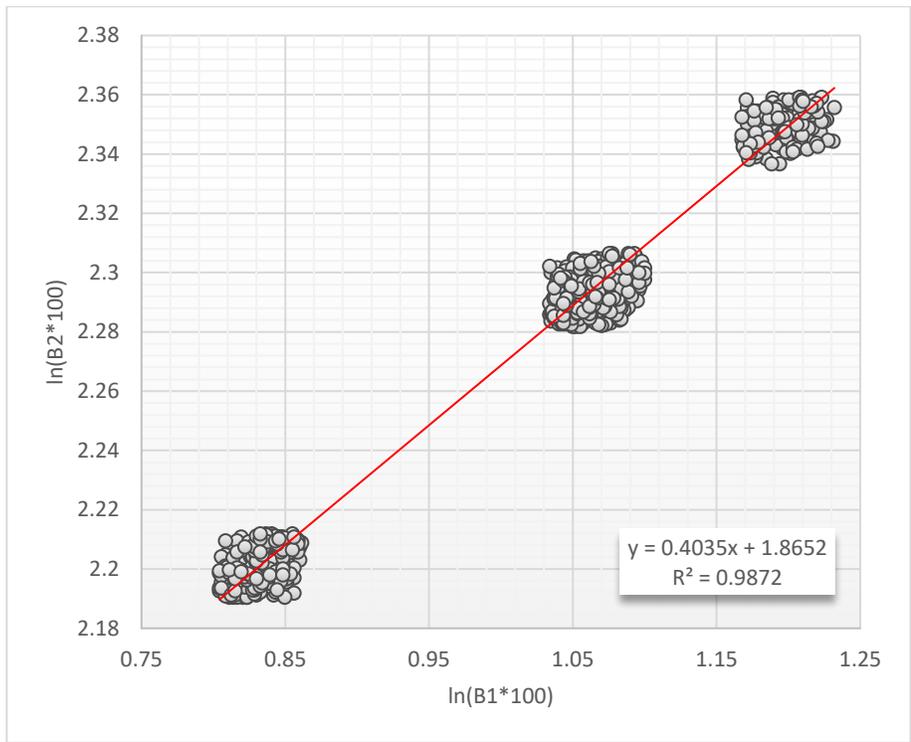


Figura SXV. Akumal, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda uno y dos correspondientes a 1392 pixeles de arenas para cada una de las bandas con una profundidad de entre 5-2 m.

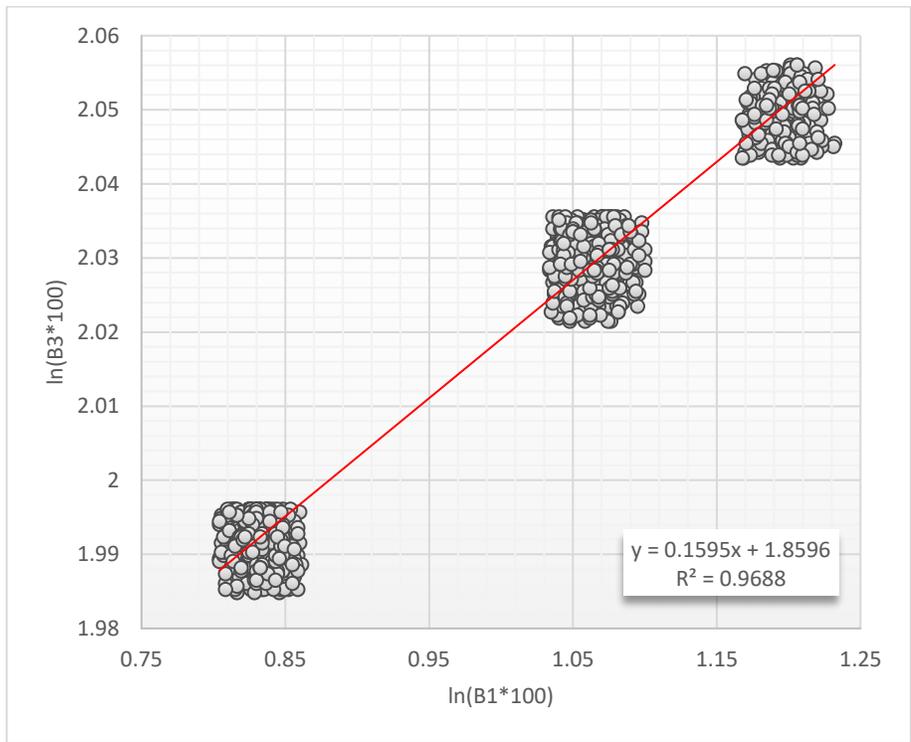


Figura SXVI. Akumal, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda uno y tres, correspondientes a 1392 pixeles de arenas para cada una de las bandas con una profundidad de entre 5-2 m.

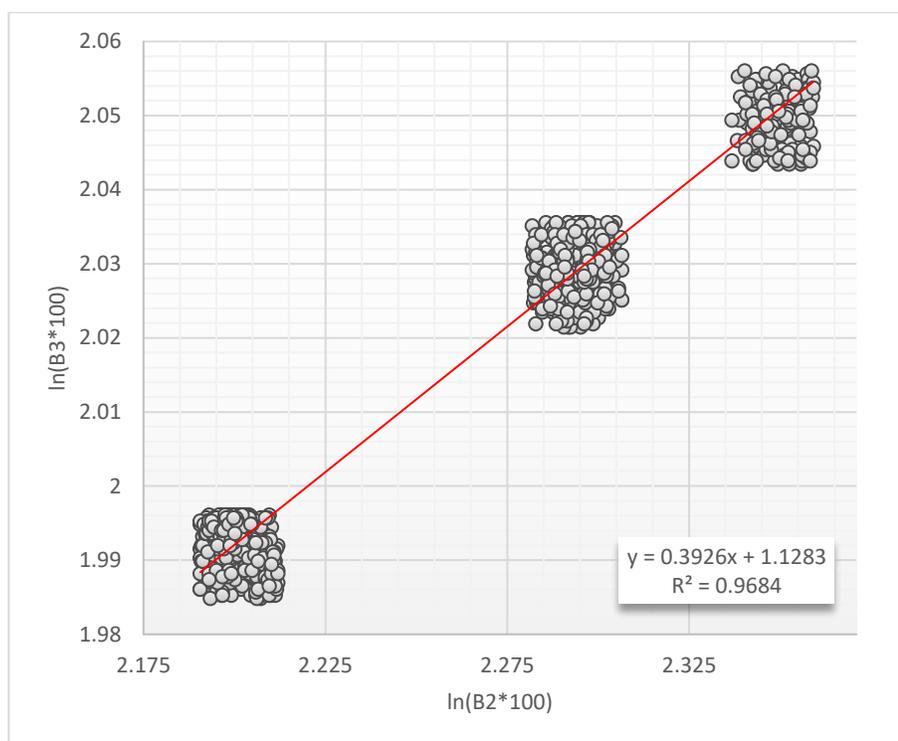


Figura SXVII. Akumal, quintana roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda dos y tres, correspondientes a 1392 pixeles de arenas para cada una de las bandas para una profundidad de entre 5-2 m.

Tabla SI. Datos clave sobre los cálculos efectuados para realizar las correcciones al ortomosaico multiespectral de Akumal, Quintana Roo.

Akumal				
Corrección atmosférica				
Tipo de dato	B1	B2	B3	B4
Reflectancia media en aguas profundas	0.006	0.006	0.002	0.001
Deglint				
	B1	B2	B3	
Pendiente de la regresión	2.7235	3.2679	2.0223	
Valor del píxel en NIR	0.0535959	0.0254587	0.0458445	
Valor mínimo del NIR	0.0000376	0.0003428	0.0002817	
Corrección de columna de agua				
	B1-B2	B1-B3	B2-B3	
Coefficiente de atenuación	1.0349328	3.0534451	1.0708278	
Razón del coeficiente de atenuación	2.4740596	6.2664696	2.5359805	
Covarianza	0.0073111	0.0028894	0.0011731	
	B1	B2	B3	
Varianza	0.0181209	0.0029879	0.0004756	

En la ecuación SIV, se aprecia que al realizar la corrección atmosférica la *reflectancia media* en aguas profundas, para el ortomosaico de Pto. Morelos, fue de 0.372 en la banda uno (*Azul*) y la dos (*Verde*) de 0.347, mientras, para la banda tres (*Rojo*) fue de 0.338 y para la banda cuatro (*NIR*) fue de 0.384. Además, al realizar el *deglint*, se obtuvo, como se muestra en la ecuación SV, para la banda uno, una *pendiente de la regresión* de 3.3681 con un valor del pixel en el *NIR* de 0.014 así como, 0.0059 como *valor mínimo del NIR*; para la banda dos, una *pendiente de la regresión* de 2.8824 con un *valor del pixel en el NIR* de 0.019 y un *valor mínimo del NIR* de 0.0060; mientras, para la banda tres, se obtuvo una *pendiente de la regresión* de 1.2701, un *valor del pixel en el NIR* de 0.012, con un *valor mínimo del NIR* de 0.0057.

Referente a la corrección de columna de agua, para el ortomosaico de Pto. Morelos se obtuvo (tabla SII) un *coeficiente de atenuación* de 0.098 para el par de bandas dos con la banda uno, además, 0.003 para el par de la banda uno con la banda tres, y 0.103 para la banda dos con la tres; además, la *razón del coeficiente de atenuación* fue de 1.102 para el par de bandas dos con la uno, siendo que, para la banda uno con la tres fue de 1.003, y para el par de la banda dos con la tres de 1.108. Las figuras SXVIII, SXIX y SXX muestran los cúmulos de datos que, al estar dispuestos a lo largo de la pendiente, representan una serie de datos provenientes de diferentes profundidades, siendo así, de estos datos se realizaron los cálculos (ecuación SVI) que permiten realizar la corrección de columna de agua.

Corrección atmosférica:

Banda uno:

$$A'_i = L_i - (0.372)$$

Banda dos:

$$A'_j = L_j - (0.347)$$

Banda tres:

$$A'_k = L_k - (0.338)$$

Banda cuatro:

$$A'_l = L_l - (0.384)$$

Remoción del sunlint:

Banda uno:

$$R'_i = R_i - 3.3681(0.014377572 - 0.005867967)$$

Banda dos:

$$R'_j = R_j - 2.8824(0.018827269 - 0.006016633)$$

Banda tres:

$$R'_k = R_k - 1.2701(0.012553529 - 0.005717376)$$

Ecuación SIV y SV. Cálculos efectuados con la corrección atmosférica y el *deglint*, Pto. Morelos, Quintana Roo. La imagen con la corrección atmosférica con un balance de 0.39 y 0.07 a la imagen del *deglint*, de acuerdo con Watkins Russell (2015).

Cálculos para la banda dos con la uno:

$$P + 1 = \left[\begin{array}{cccc} \ln(L_i) - \left[\frac{0.0463320847598233 - 0.0381672964623591}{2(0.0417546851402603)} + \sqrt{\left(\left(\frac{0.0463320847598233 - 0.0381672964623591}{2(0.0417546851402603)} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \ln(L_j) \right] + 1 & & & \\ \ln(L_1) & " & & \ln(L_1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \ln(L_{1680}) & " & & \ln(L_{1680}) \end{array} \right]$$

Cálculos para la banda uno con la tres:

$$P + 1 = \left[\begin{array}{cccc} \ln(L_i) - \left[\frac{0.0381672964623591 - 0.0379060354118987}{2(0.0376476587948241)} + \sqrt{\left(\left(\frac{0.0381672964623591 - 0.0379060354118987}{2(0.0376476587948241)} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \ln(L_j) \right] + 1 & & & \\ \ln(L_1) & " & & \ln(L_1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \ln(L_{1680}) & " & & \ln(L_{1680}) \end{array} \right]$$

Cálculos para la banda dos con la tres:

$$P + 1 = \left[\begin{array}{cccc} \ln(L_i) - \left[\frac{0.0463320847598233 - 0.0379060354118987}{2(0.0409097327724846)} + \sqrt{\left(\left(\frac{0.0463320847598233 - 0.0379060354118987}{2(0.0409097327724846)} \right)^2 + 1 \right)} \cdot \ln(L_j) \right] + 1 & & & \\ \ln(L_1) & " & & \ln(L_1) \\ \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots \\ \ln(L_{1680}) & " & & \ln(L_{1680}) \end{array} \right]$$

Exploración de datos:

Mínimo: $(P_{min})+1 = (-0.807497971619301)+1 = 0.192502028380699$

Ecuación SVI. Cálculos semidesarrollados del índice de profundidad invariable para cada uno de los tres pares de datos de las bandas (b2-b1, b1-b3 y b2-b3) del *subset* de los fondos de substrato uniforme (arenales) para el ráster de Pto. Morelos, Quintana Roo.

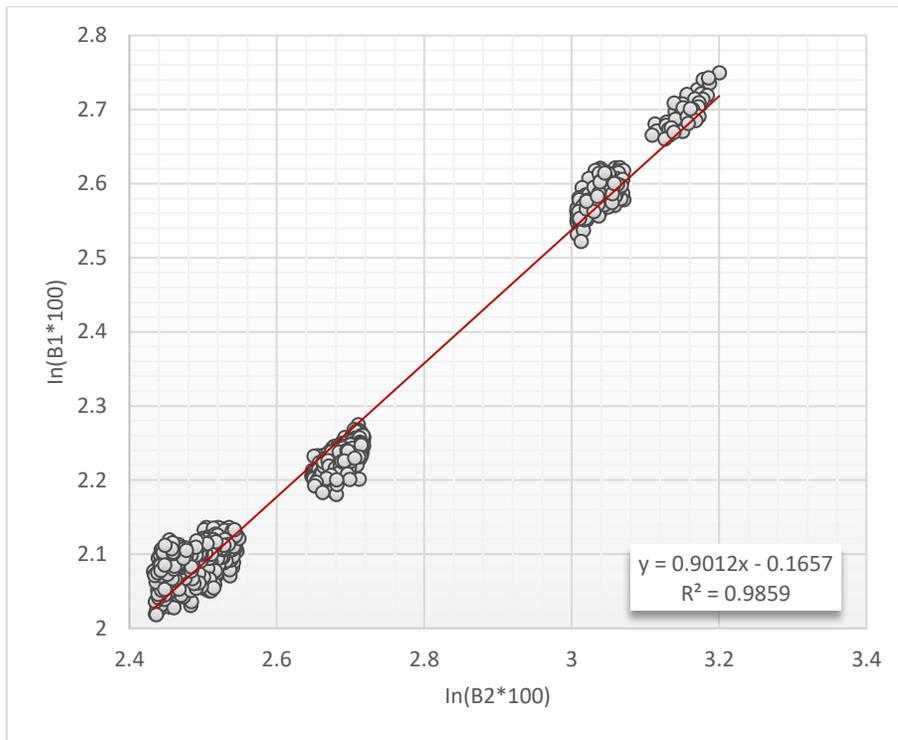


Figura SXVIII. Pto. Morelos, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda dos y uno correspondientes a 1680 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 4-2 m.

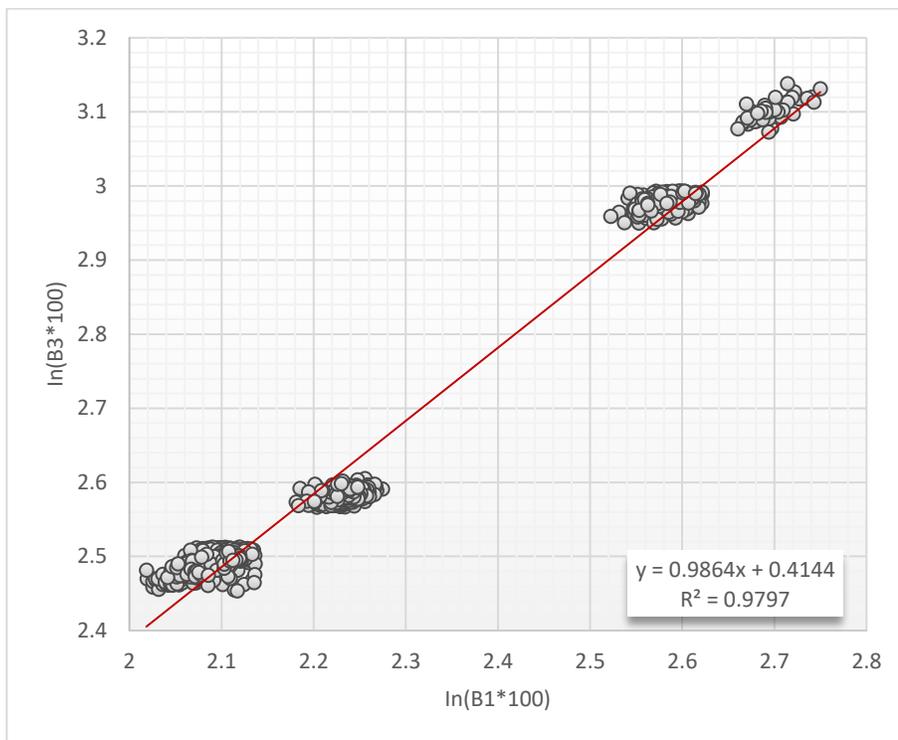


Figura SXIX. Pto. Morelos, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda uno y tres correspondientes a 1680 pixeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 4-2 m.

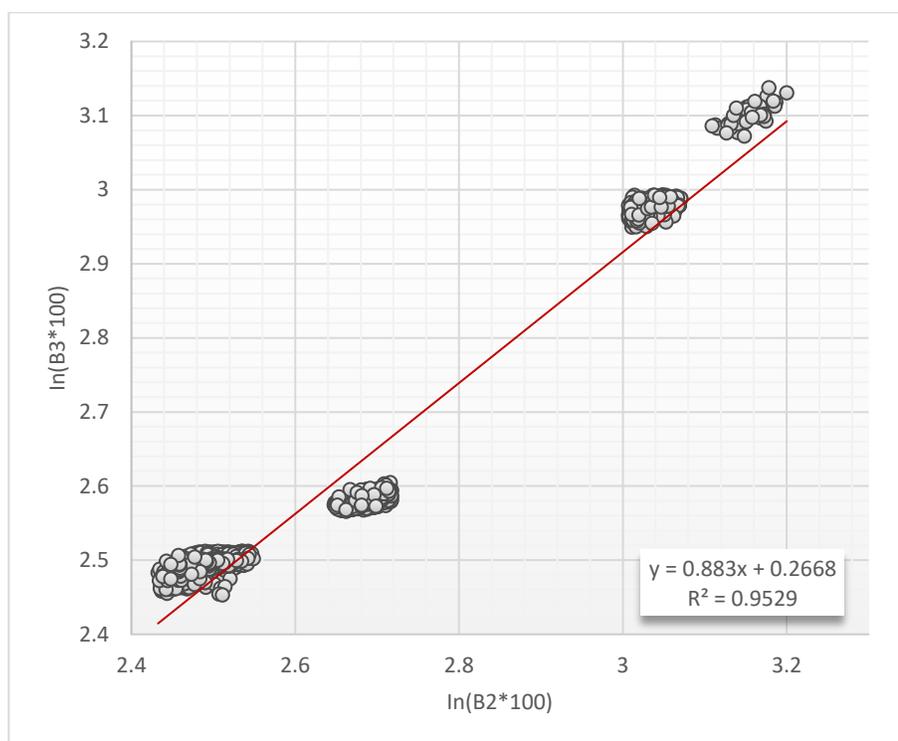


Figura SXX. Pto. Morelos, Quintana Roo: bi-plot del logaritmo natural de la banda dos y tres correspondientes a 1680 píxeles de arenales para cada una de las bandas con una profundidad de entre 4-2 m.

Tabla SII. Datos clave sobre los cálculos efectuados para realizar las correcciones al ortomosaico multiespectral de Pto. Morelos, Quintana Roo.

Puerto Morelos				
Corrección atmosférica				
	B1	B2	B3	B4
Reflectancia media en aguas profundas	0.372	0.347	0.338	0.384
Deglint				
	B1	B2	B3	
Pendiente de la regresión	3.3681	2.8824	1.2701	
Valor del píxel en NIR	0.0143776	0.0188273	0.0125535	
Valor mínimo del NIR	0.0058680	0.0060166	0.0057174	
Corrección de columna de agua				
	B2-B1	B1-B3	B2-B3	
Coefficiente de atenuación	0.0977709	0.0034698	0.1029834	
Razón del coeficiente de atenuación	1.1025391	1.0034758	1.1082722	
Covarianza	0.0417547	0.0376477	0.0409097	
	B1	B2	B3	
Varianza	0.0381673	0.0463321	0.0379060	

“La replicabilidad, por decirlo de alguna manera, es la corte suprema del sistema científico”

Harry Collins (1985, p. 19).