

UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

Centro Universitario de Ciencia Biológicas y Agropecuarias

División de Biología



”Distribución de paisajes submarinos del litoral de Sisal,
Yucatán.”

TESIS

Que para obtener el título de:

LICENCIADO EN BIOLOGÍA

PRESENTA

María Julia Naranjo García

Director de tesis:

Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez

Zapopán, Jalisco, Marzo del 2012

La presente tesis se realizó bajo la dirección del Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, responsable del Programa de Investigación Espacial de Ambientes Costeros y Marinos (PIEsACoM) de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI-Sisal) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el contexto del proyecto "Caracterización de Hábitats Submarinos del Litoral de Sisal, Yucatán y Análisis de la Estructura-Función de sus comunidades" UNAM, DGAPA PAPIIT IN209408,

Dedicatoria

A mis padres: Guillermina García Espinoza y Arturo Naranjo Ibarra

A mi abuela: Doña Julia Espinoza Ríos.

Agradecimientos

Primero y como más importante, quiero agradecer a mi director de Tesis, el Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, por su orientación, sus conocimientos, su paciencia y su amistad.

A mi casa de estudios la Universidad de Guadalajara, al Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de licenciatura.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México por la beca otorgada para la realización de mi tesis de licenciatura durante un año. Agradezco también por el patrocinio del proyecto de investigación “Caracterización de hábitats submarinos del litoral de Sisal, Yucatán y análisis de la estructura-función de sus comunidades” clave IN209408 (2009-2010), bajo la responsabilidad del Dr. Joaquín Rodrigo Garza Pérez, a partir del cual se derivó la investigación de esta tesis

Agradezco el préstamo de las instalaciones y equipo necesario proporcionado por el Programa de Investigación Espacial en Ambientes Costeros y Marinos (PIESACOM), de la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) Sisal de la Facultad de Ciencias de la UNAM, para la investigación y redacción de mi tesis.

Agradezco a la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI) Sisal de la Facultad de Ciencias de la UNAM, por permitirme el uso de las instalaciones y equipo.

A mi asesor el Dr. Fabián Rodríguez Zaragoza, por su tiempo.

A la gente que hizo posible el desarrollo de mis muestreos en campo: Richard Mena, Alex Shirmp y Silvia García.

DEDICATORIA.....	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE TABLAS.....	IX
RESUMEN.....	X
1.- INTRODUCCIÓN.....	13
2.- ANTECEDENTES.	16
2.1 PAISAJES SUBMARINOS DE LA ZONA LITORAL DE SISAL	18
3.- MARCO TEORICO.....	20
3.1 TÉRMINOS DE SIG Y PERCEPCIÓN REMOTA.....	20
3.2 IMÁGENES SATÉLITALES LANDSAT	23
3.3 PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES.....	26
3.4 CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.....	27
3.5 CORRECCIÓN DEL EFECTO DE LA PROFUNDIDAD EN LA COLUMNA DE AGUA	28
3.6 REMOCIÓN DEL BRILLO DE LA SUPERFICIE.....	30
3.7 CLASIFICACIÓN DE IMÁGENES	31
3.8 ANÁLISIS DE DETECCIÓN DE CAMBIO.....	32
4. - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	34
5.- JUSTIFICACIÓN.	34
6.- HIPOTESIS.....	35
7.- OBJETIVOS.....	35
7.1 OBJETIVO GENERAL.....	35
7.2 OBJETIVOS PARTICULARES	35
8.- MATERIALES Y METODOS.....	37
8.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	37
8.2 MÉTODO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS PAISAJES SUBMARINOS EN LABORATORIO.....	41
8.2.1 Adquisición de Imágenes.	41
8.2.2 Preprocesamiento de Imágenes.....	46
8.2.3 Corrección Atmosférica y de Vapor de agua.....	48
8.2.4 Corrección del efecto de la columna de agua.....	48
8.2.5 Técnica de superposición de imágenes	49
8.2.6 Método de Clasificación Supervisada.....	50
8.2.7 Análisis de detección de cambio	52
8.2.8 Análisis estadísticos multivariados.....	53
9 RESULTADOS	55
10 DISCUSIÓN.....	91
10.1 PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	91
10.2 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES	95
11 CONCLUSIONES.....	102

12 LITERATURA CONSULTADA.....	104
13 ANEXOS	109

Lista de figuras

Figura 1. Espectro Electromagnético para Landsat.....	17
Figura 2. Imagen Landsat 7 SLC-off.....	19
Figura 3. Imágenes Landsat ETM con la aplicación de la corrección de la columna de agua.....	22
Figura 4. Ejemplo de imágenes con la aplicación de filtros adaptativos.....	23
Figura 5. Ejemplo de imágenes con la eliminación del brillo de las olas.....	24
Figura 6. Plataforma continental del banco de Campeche.....	31
Figura 7. Área de estudio en el litoral de Sisal, Yucatán.....	33
Figura 8. Escena Landsat ETM de la zona 15 de Yucatán.....	34
Figura 9. Imagen Landsat TM, temporada de secas	36
Figura 10. Imagen Landsat TM, temporada de lluvias	37
Figura 11. Imagen Landsat TM, temporada de nortes.....	38
Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología del procesamiento de imágenes satelitales.....	39
Figura 13. Ejemplo de la superposición de dos imágenes, SLC-off.....	43
Figura 14. Fragmento amplificado de una imagen en escala de grises de la banda R con muestras representativas de fondo con y sin cobertura vegetal.....	45
Figura 15. Mosaico de imagen del año 2002 y 2010.....	49
Figura 16. Imagen RGB de la temporada de secas del año 2000 sin corrección...50	
Figura 17. Imagen RGB de la temporada de secas del año 2000 con corrección.51	
Figura 18. Imagen RGB de la temporada de lluvias del año 2002 sin corrección..52	
Figura 19. Imagen RGB de la temporada de lluvias del año 2002 con corrección.53	
Figura 20. Imagen RGB de la temporada de nortes del año 2009 sin corrección..54	
Figura 21. Imagen RGB de la temporada de nortes del año 2009 con corrección.55	
Figura 22. Fragmento del área de estudio. Imagen RGB de la temporada de secas año 2000.....	57
Figura 23. Fragmento del área de estudio. Imagen RGB de la temporada de secas año 2010.....	58
Figura 24. Mapa de distribución temporada de secas.....	60
Figura 25. Mapa de distribución temporada de lluvias.....	61
Figura 26. Mapa de distribución temporada de nortes.....	62
Figura 27. Mapa de distribución año 2000.....	65
Figura 28. Mapa de distribución año 2010.....	66
Figura 29. Imagen de detección de cambio: secas vs. lluvias paisaje 1 y 2.....	70
Figura 30. Imagen de detección de cambio: secas vs. lluvias paisaje 3 y 4.....	71
Figura 31. Imagen de detección de cambio: secas vs. lluvias paisaje 5 y 6.....	72
Figura 32. Imagen de detección de cambio: lluvias vs. nortes paisaje 1 y 2.....	73
Figura 33. Imagen de detección de cambio: lluvias vs. nortes paisaje 3 y 4	74
Figura 34. Imagen de detección de cambio: lluvias vs. nortes paisaje 5 y 6	75
Figura 35. Imagen de detección de cambio: 2000 vs. 2010.....	77
Figura 36. Diagrama de dispersión CCA.....	79
Figura 37. Aplicación de técnica de mosaico de imágenes del 2002-2010.....	84
Figura 38. Detalle amplificado de una imagen RGB que presenta el patrón de bandas ausentes.....	86
Figura 39. Ejemplos de porciones del área analizada para la temporada de secas del año 2000 contra secas del año 2010.....	93

Lista de tablas

Tabla 1. Paisajes submarinos del litoral de Sisal.....	12
Tabla 2. Bandas para TM.....	18
Tabla 3. Características de las escenas Landsat del área del litoral de Sisal.....	35
Tabla 4. Porcentaje en kilómetros cuadrados temporada de secas 2000.....	63
Tabla 5. Porcentaje en kilómetros cuadrados temporada de lluvias 2002.....	63
Tabla 6. Porcentaje en kilómetros cuadrados temporada de nortes 2009.....	63
Tabla 7. Porcentaje en kilómetros cuadrados año 2000.....	67
Tabla 8. Porcentaje en kilómetros cuadrados año 2010.....	67
Tabla 9. Porcentajes de detección de cambio secas-lluvias.....	69
Tabla 10. Porcentajes de detección de cambio lluvias-nortes.....	69
Tabla 11. Porcentajes de detección de cambio 2000-2010.....	76
Tabla 12. Lista de imágenes descargadas y correcciones aplicadas.....	110
Grafica 1. Relación de la temperatura en el tiempo agosto 2008-mayo 2011.....	80
Grafica 2. Relación de la precipitación en el tiempo agosto 2008-mayo 2011.....	80
Grafica 3. Relación de la temperatura entre temporadas.....	81
Grafica 4. Relación de la precipitación entre temporadas.....	81
Grafica 5. Muestra del promedio de la temperatura y de la cobertura biótica.....	82
Grafica 6. Muestra del promedio de la precipitación y de la cobertura biótica.....	82

"Distribución de paisajes submarinos del litoral de Sisal, Yucatán."

Resumen:

Debido al escaso conocimiento de la dinámica espacial de los paisajes submarinos del litoral de Sisal, Yucatán, una necesidad básica de información es la caracterización de su distribución espacial y temporal. El objetivo de este estudio fue la caracterización de los patrones de distribución de los paisajes submarinos del litoral de Sisal y la estimación de cambio tanto en una escala decadal (2000 y 2010) como a través de las tres temporadas climáticas del año (secas, lluvias y nortes) a partir de imágenes de satélite Landsat ETM+.

El área de estudio se localiza en la costa noroccidental de la península de Yucatán en el puerto de Sisal que está ubicado en el litoral nor-poniente del Estado de Yucatán, en el Golfo de México en las coordenadas geográficas 21°9'55.22"N90°1'54.93.

Se verificaron 89 estaciones de muestreo en un área aproximada de 1,240 Km² y los datos obtenidos fueron analizados con técnicas multivariadas. Para llevar a cabo los objetivos, el trabajo se dividió en dos secciones: La fase de pre-procesamiento en donde las imágenes de satélite fueron inspeccionadas visualmente y se aplicaron diversas técnicas para corrección de imágenes satelitales; y la fase del análisis en donde se generaron mapas de temáticos de paisajes submarinos por medio de la técnica de clasificación supervisada y se realizaron análisis de detección de cambio. Como resultados se obtuvieron tres mapas de distribución de hábitats submarinos correspondientes a cada una de las temporadas climáticas del año y dos mapas de distribución de paisajes submarinos correspondientes a la misma temporada pero utilizando imágenes con diez años de diferencia. Adicionalmente se realizó la estimación de cambio en los paisajes submarinos. Con base en esto se compararon los resultados entre temporadas y a través de una escala decadal. Los resultados indican que la

complejidad de la distribución de los paisajes disminuye notablemente a través de las temporadas climáticas durante el ciclo anual, sin embargo se definió la permanencia del patrón espacial de distribución de los paisajes al menos durante una década.

1.- INTRODUCCIÓN.

La costa, como la transición entre la tierra y el mar es un dominio geológico, ecológico y biológico único, de vital importancia para una diversa gama de formas de vida acuáticas y terrestres, incluida la humanidad (Beatley *et al.*, 2002). Aproximadamente, el 40% de la población mundial vive a menos de 60 km de la costa según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, proporción que tenderá a elevarse en el futuro debido a su continuo y acelerado crecimiento y su migración a las zonas costeras (PNUMA, 2003). Es importante señalar que de los más de cuatro millones de habitantes en la Península de Yucatán, el 90% vive a menos de 100 km de la costa, la tasa de natalidad es mayor (2.2%) al promedio nacional (1.7%), tiene una alta inmigración y se espera que se impulse oficialmente el desarrollo de la costa a través de actividades como el turismo, el transporte marítimo, el desarrollo portuario, la acuicultura y las pesquerías. Por lo anterior, la población y los asentamientos humanos crecerán, y se seguirán dando cambios en el uso del suelo, continuarán los impactos en ecosistemas como manglares, lagunas costeras, playas, dunas, vegetación sumergida e incluso en los arrecifes de coral (Caso, 2004). Las áreas costeras se ven impactadas severamente por conflictos derivados de este uso. Dos terceras partes de tales impactos ocurren sobre ecosistemas de pastos marinos y arrecifes de coral (Island Resources Foundation, 1996). La interacción física, química, biológica y ecológica entre estos dos grandes hábitats ayuda a mantener la integridad y la funcionalidad de los procesos que suceden en el gran ecosistema costero y sus paisajes (Clark, 1992).

El paisaje es definido por Turner, *et al.* (2001) como un área espacialmente heterogénea en al menos un factor de interés, y está conformada por un mosaico de parches individuales. Estos parches son la unidad espacial mínima y con la cual se pueden cuantificar y caracterizar al paisaje el cual puede ser utilizado para describir cualquier espacio en términos de características de la estructura, función y cambio (McGarigal y Marks, 1994).

La estructura, función y cambio son consideradas las tres principales propiedades del paisaje, y su identificación y medida dependen de la escala espacial de observación (Meentemeyer y Box, 1987; Matteucci, 1998). La estructura se refiere a la distribución espacial y las relaciones entre hábitats distintivos en el espacio prescrito; la función se refiere a la interacción entre los elementos espaciales, en particular, el flujo de energía, materiales y organismos entre los componentes y sus hábitats; y el cambio se refiere a la alteración en la estructura y la función a través del tiempo (Meentemeyer y Box, 1987; Matteucci, 1998).

El término paisaje marino (*seascape*) fue introducido por Barlett (1991) para designar conjuntos de ecosistemas ubicados en aguas someras cercanas a la costa. Una de las ramas de la Ecología que se dedica a su estudio es la Ecología del Paisaje y uno de los principales objetivos es estudiar los efectos recíprocos entre el patrón espacial y los procesos ecológicos que se manifiestan a la escala de paisaje (Forman y Godron, 1986; Forman, 1995; Cadenasso y Pickett, 1995, Matteucci, 1998). La ecología del paisaje nos permite evaluar los mecanismos que controlan el mantenimiento de la biodiversidad en el tiempo y espacio. Esta disciplina enfatiza sus estudios en una escala espacial amplia, ya que los patrones de distribución y abundancia de las especies resultan de procesos físicos, y biológicos que actúan simultáneamente sobre grandes extensiones geográficas (Turner, 1989; Turner, *et al.* 2001).

Entre los métodos que la ecología del paisaje emplea para la cuantificación y caracterización de los sistemas naturales, se encuentra un conjunto extenso de métricas, cuya interpretación sirve de base para el análisis e investigación de la ecología del paisaje (Cardille y Turner, 2002; Silva, 2003, Arias-González *et al.*, 2006).

En el contexto de la Ecología del Paisaje, la percepción remota se ha constituido como una herramienta importante para el análisis, facilitando y ampliando, la representación, la interpretación y el análisis de los datos espaciales (Coulson *et al.* 1991; Texeira *et al.*, 1992). Su uso combinado con la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG), ha permitido incrementar las posibilidades de tratar paisajes y regiones en forma integral, aportando en estas investigaciones

una mejor planificación y manejo en su diagnóstico y transformación (Jonson, 1969; Quattrochi y Pelletier, 1991). La generación de mapas ecológicos o de coberturas a partir de muestreos *in situ* y con ayuda de imágenes satelitales y fotografías aéreas, utilizados para valorar ecosistemas terrestres, se han implementado con gran éxito para el mapeo de áreas costeras (Díaz, 1998). La combinación de nuevas tecnologías, como los SIGs, la teledetección, la hidroacústica, la geoestadística y el análisis multivariante, dan una nueva perspectiva al término cartografía, pues las relaciones complejas entre los ecosistemas que integran un paisaje submarino pueden ser explicadas (Johnson y Gage, 1997; Goodchild, 2003).

La descripción de los paisajes de la península de Yucatán, es de gran importancia para la realización de futuras investigaciones en el campo de las ciencias naturales, al diferenciarse en gran medida del resto del territorio de la Republica Mexicana, tanto por sus características físico-geográficas (Butterlin, 1958; Duch, 1988; 1991), como por la diversidad y riqueza de su biota (Orvañanos-Donis, 2010; Flores y Espejel, 1994; Miranda, 1959; Rzedowski, 1978).

2.- ANTECEDENTES.

El conocimiento científico de la porción noroccidental de la península de Yucatán es escaso y disperso (Capurro, 2003), no es hasta los años de 1946 con Umgrove y 1948 con Shepard que se realizan las primeras aportaciones del conocimiento de la geomorfología submarina y hasta la década de los años cincuenta cuando se publican los primeros mapas del relieve submarino y se realiza un mayor número de contribuciones al conocimiento del origen de las formas de este paisaje. En 1969 Logan describe y mapea la plataforma del Banco de Campeche en los márgenes norte y oeste de la plataforma de Yucatán con fines de exploración petrolera, los objetivos generales de la investigación fueron determinar la naturaleza y distribución de los sedimentos de carbonatos presentes en la plataforma y determinar los procesos que han contribuido a la formación de estos sedimentos. En México los primeros trabajos cartográficos del fondo marino, se inician en los años ochenta. La primera carta de morfo-estructura del fondo oceánico mexicano, en escala 1:8 000, 000, se elaboró en esa década por Lugo (1985).

Recientemente, la cartografía submarina realizada por medio de buceo ha adquirido nuevas perspectivas con el creciente uso de la fotografía y el vídeo submarino, incluyendo técnicas estereoscópicas de vídeo usadas para estimación de la talla de organismos (Ruff *et al.*, 1995). En aguas profundas, se pueden tomar las imágenes submarinas desde vehículos de control remoto (*Remote Operation Vehicle – ROV*) (Kenny *et al.*, 2003) o sistemas de video a remolque (*drop-down video system*) (Holt y Sanderson, 2001). La tecnología de posicionamiento bajo el agua también ha sufrido un importante avance con el desarrollo de boyas inteligentes *GPS (GPS Intelligent Buoy – GIB)*, aptas a seguir la posición de un buzo o un *ROV* en un área superior a 1,6 Km² con una precisión de 0,5 m (Sgorbini *et al.*, 2002).

Estudios recientes describen que los elementos del paisaje submarino relativamente homogéneos y reconocibles a partir de las fotografías aéreas se consideraron como hábitats submarinos (Sheppard *et al.*, 1995; Mumby y Harborne, 1999; Green *et al.*, 2000). La forma, la calidad, la variabilidad y los patrones de distribución de las manchas que componen estos paisajes controlan los flujos de energía y materia que mantiene la biodiversidad a lo largo del tiempo y del espacio (Forman y Godron, 1986). El grado de fragmentación de los hábitats y la conectividad entre sus fragmentos regulan las tasas de extinción y colonización de las metapoblaciones en los ambientes terrestres (King, 1999) y marinos.

En las últimas décadas, se han propuesto diversos índices de los patrones de complejidad de los paisajes (Turner, 1989), muchos de estos índices se han empleado experimentalmente para la evaluación estructural de las comunidades bentónicas (Garrabou *et al.*, 1998).

Al igual que los índices de complejidad los estudios relacionados con la detección de cambio en el paisaje son significativos para la investigación integrada del paisaje (Harms *et al.*, 2000), y nos permiten identificar cambios cualitativos y cuantitativos en los patrones del paisaje, por consiguiente se les considera un punto focal en los estudios sobre humedales, lagunas costeras, arrecifes coralinos entre otros (Zhao H. *et al.*, 2010).

En general la detección de cambio consiste en la aplicación de datos multitemporales para analizar cuantitativamente los efectos del tiempo en un objeto o fenómeno en particular (Lu *et al.* 2002). El principal objetivo de la detección de cambio es la comparación de la representación espacial de dos puntos en el tiempo mediante el control de todas las diferencias causadas por diferentes variables (Green *et al.* 1994). La premisa básica es que los cambios en los objetos de interés se traducirá en cambios en valores de reflectancia o texturas locales que puedan separarse de los cambios causados por otros factores tales como diferencias en las condiciones atmosféricas, la iluminación y visualización de ángulos, y la humedad del suelo (Lu *et al.* 2002). Los estudios de detección de cambio han sido utilizados en áreas terrestres para detectar el uso de la tierra y

cubierta vegetal (Perakis *et al.* 2000, Tappan *et al.* 2000, Zhan *et al.* 2000, Kaufmann y Seto 2001, Zomer *et al.* 2001, Lunetta *et al.* 2002, Lee y Lam 2002 y Weng 2002), cambio de bosque o vegetación (Sader *et al.* 2001, Woodcock *et al.* 2001, Lu *et al.* 2002), mortalidad forestal (Lathrop 1997, Radeloff *et al.* 1999, Rigina *et al.* 1999), deforestación (Souza y Barreto 2000, Tucker y Townshend 2000, Wilson y Sader 2002), cambio en humedales (Houhoulis y Michener 2000, Kushwaha *et al.* 2000, Munyati 2000), cambio de paisaje (Zheng *et al.* 1997, Franklin *et al.* 2000, Peralta y Mather 2000, Taylor *et al.* 2000) y en áreas marinas son implementados principalmente en áreas arrecifales o zonas costeras con desarrollo turístico (Fabricius, 2005; Stamski y Field, 2006).

2.1 Paisajes submarinos de la zona litoral de Sisal

Los paisajes submarinos en Sisal, Yucatán están representados en seis clases (Tabla 1) para cada una de las temporadas climáticas de la región (secas, lluvias y nortes). Estos paisajes están determinados por el tipo de cobertura del bentos y el sustrato dominante (Orvañanos-Donis, 2010).

Orvañanos, describe estos seis paisajes constantes a través de las tres temporadas por medio de análisis estadísticos multivariados en los cuales los paisajes tienen una similaridad mayor del 0.75% en la temporada de secas, 0.70% en la temporada de lluvias y 0.85%.

Orvañanos señala que se debe a que los tipos de cobertura bentónica de Sisal no muestran grandes variaciones entre temporadas y las diferencias mínimas que se presentaron estuvieron marcadas principalmente por las variaciones en la abundancia de los diferentes grupos taxonómicos que componen las comunidades bentónicas, lo que demostró que los paisajes son muy homogéneos entre sí.

Tabla 1. Paisajes submarinos del litoral de Sisal, tomada de Orvañanos-Donis 2010

Paisaje	Descripción
Paisaje (1) Algas rojas con parches de algas verdes sobre arena.	Dominancia en la cobertura de algas rojas en las tres temporadas, estas algas se encuentran asociadas al substrato de arena.
Paisaje (2) Praderas de algas mixtas dominada por algas filamentosas/pardas sobre arena	Dominancia en la cobertura de algas filamentosas/pardas en las tres temporadas, presentando siempre una proporción menor de cobertura de algas verdes, estas algas se encuentran asociadas al substrato de arena.
Paisaje (3) Arenal	Está representado por el 100% de substrato inerte y no presenta cobertura biótica.
Paisaje (4) Algas verdes sobre arena	Dominancia de cobertura de algas verdes en las tres temporadas, estas algas se encuentran asociadas al substrato arena.
Paisaje (5) Algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando	Dominancia en la cobertura de algas rojas en las tres temporadas, presentando siempre una proporción menor de cobertura de algas verdes, estas algas se encuentran asociadas al substrato de sedimento blando.
Paisaje (6) Algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena	Dominancia de la cobertura de algas filamentosas/pardas en las tres temporadas, presentando siempre una proporción menor de cobertura de algas verdes, estas algas se encuentran asociadas al substrato de arena.

3.- MARCO TEORICO

3.1 Términos de SIG y percepción remota

Las tecnologías actuales permiten que la información estadística convencional esté cada vez más ligada a criterios espacio-temporales más rigurosos y precisos (Moreira y Fernández- Palacios, 1998). En este ámbito, los Sistemas de información Geográfica (SIG) son herramientas multipropósito que permiten gestionar y analizar la información espacial; con aplicaciones tan variadas como la planificación urbana, la gestión catastral, la ordenación y planificación del territorio, la gestión medioambiental y otros cometidos. Un SIG es un sistema de información diseñado para trabajar con datos georreferenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas (Star, 1990). En un SIG entre otras cosas se puede almacena información cartográfica, con lo que es posible conocer la localización exacta de cada elemento en el espacio y contextualizarlo con respecto a otros elementos, e información alfanumérica, es decir, datos sobre las características o atributos de cada elemento geográfico. Ambos tipos de información están relacionados entre sí, de manera que a cada uno de los objetos espaciales del mapa digital le corresponde un registro en la base de datos. El SIG organiza la información en capas correspondientes a los diferentes aspectos del espacio que interesa estudiar, por ejemplo, relieve, litología, suelos, ríos, carreteras y otros ámbitos (Bosque, 1992; Gutiérrez y Gould, 1994; Ministerio de Medio Ambiente, 1998; Calvín, 1998; Lenton, Fa y Pérez del Val, 2000; Durand *et al.*, 2002). La gran ventaja que proporciona esta herramienta es que puede relacionar las distintas capas de información entre sí, proporcionando nuevas posibilidades para capturar información y elaborar mapas temáticos.

La Percepción Remota (PR) o teledetección espacial se refiere a la extracción de información obtenida a través de sensores sensibles a la radiación emitida o reflejada por los objetos de la tierra. Los fundamentos físicos de PR se basan en la medida de la radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos, como respuesta a la incidencia de una radiación natural como la luz solar o artificial por medio de radares (Chuvieco, 1990). Dicha radiación es captada y clasificada por

su frecuencia y longitud de onda en los diferentes tipos de energía electromagnética recibiendo todos en conjunto el nombre de espectro electromagnético, y denominaciones particulares son dadas para cada una de las porciones del mismo como el ultravioleta, espectro visible, infrarrojo dividido en infrarrojo cercano, medio y térmico; micro-ondas, etc. La radiación electromagnética emitida o reflejada por los objetos puede ser captada por unos dispositivos adecuados que reciben el nombre genérico de "sensores" que son aquellos instrumentos que miden la radiación de forma electrónica, transformando su intensidad en un valor numérico. Este valor numérico o también llamado Nivel Digital (ND) es la traducción de la radiancia de un determinado campo electromagnético recibida por el sensor para cada píxel, estos son la unidad mínima de información digital en una imagen. En resumen las imágenes están conformadas por pixeles que poseen cada uno información de la radiancia electromagnética de los objetos en la tierra (Chuvieco, 1990).

Los sistemas de teledetección difieren en la resolución, es decir, el nivel de detalle con que pueden capturar las imágenes, su frecuencia temporal etc., se consideran cuatro diferentes tipos de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal. La resolución espacial es una medida del objeto de menor tamaño que puede distinguir un sensor. Está determinada por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la Tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor, cuanto menor es el área terrestre representada por cada píxel en una imagen digital mayores son los detalles que pueden ser captados y mayor es la resolución espacial. Este tipo de imágenes se pueden clasificar en baja, mediana y alta resolución; por ejemplo, las imágenes del sensor AVHRR de los satélites NOAA son de baja resolución espacial, 1 x 1 Km de tamaño medio de píxel y permiten realizar estudios a escala de país o regiones, para determinar el estado de la vegetación, monitoreo diario de la temperatura de superficie del mar, etc. Las imágenes de mediana resolución espacial son las capturadas por los satélites Landsat, de 30x30 metros de tamaño medio de píxel, cada imagen abarca una superficie de 180 por 180 Km aproximadamente. La mayor resolución espacial de

este satélite permite hacer estudios a escala local (GRASS, 2005). La resolución espectral hace referencia al intervalo de longitudes de onda del espectro electromagnético que un sensor puede registrar. La resolución radiométrica corresponde al número de valores posibles de una banda y la resolución temporal es la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre. Es decir cada cuanto tiempo pasa el satélite por la misma zona de la Tierra. Este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita (García, 2007). Los satélites de alta resolución son instrumentos muy complejos, con una demanda creciente por sus numerosas aplicaciones en campos muy diversos como: la cartografía, la identificación de recursos naturales, la gestión de riesgos y la defensa. Los más destacados son IKONOS con una resolución espacial 4m, el QuickBird con resolución de 2.44 m y el GeoEye-1 con la resolución más alta, de 1.88 m. (Geoservice 2011, GeoEye, 2011).

Los trabajos relacionados con SIG y PR son diversos, en oceanografía, el SIG se ha utilizado para resolver cuestiones ambientales, tanto en las costas como en mar abierto (Wright y Bartlett, 1999; Urbanski y Szymelfenig, 2003). En ecología se basan en el estudio del paisaje como un mosaico, donde cada mancha corresponde a una categoría diferente y la estructura y la dinámica de las comunidades se pueden analizar a través de las características de cada mancha. Las comunidades bentónicas marinas, al igual que el paisaje terrestre, pueden observarse como un mosaico (Garrabou, 1997). Los SIG se han utilizado en el ámbito marino para diversos propósitos, particularmente en investigaciones pesqueras (Caddy y Carocci, 1999; Maury y Gascuel, 1999; Bian, 2000), gestión de recursos marinos en general (Stanbury y Starr, 1999), estudio de zonas de acuicultura (Congleton Jr. *et al.*, 1999), instalación de arrecifes artificiales (Wright *et al.*, 1998), estudios ambientales, tanto para delimitar problemas (Kitsiou y Karidys, 2000) como para estudios más generales de áreas de interés (Garibaldi y Caddy, 1998; Kitsiou, Coccosis y Karidys, 2002), para implementar medidas de conservación y restauración para la gestión y protección de zonas marinas (García-Gómez *et al.*, 2003; Rioja –Nieto y Sheppard, 2006; Cogan *et al.*, 2009).

Así mismo se han desarrollado diversos estudios utilizando la metodología cartográfica submarina y SIG's a través de técnicas de predicción espacial y el uso de imágenes satelitales (Garza-Pérez *et al.*, 2004; Steiner y Willete, 2009) y mediante estimaciones visuales de la cobertura de diferentes sustratos, de grupos morfofuncionales bentónicos y de variables geomorfológicas y arquitectónicas del fondo marino (Pastor-Guzmán y Maldonado, 2006).

Para la península de Yucatán los trabajos publicados son en su mayoría para caracterizar zonas arrecifales, utilizan los SIG's para generar un mapa batimétrico y la clasificación de tipos de fondo a partir de imágenes de satélite Landsat TM del Arrecife Alacranes en el Banco de Campeche (Liceaga- Correa y Euan-Ávila, 2002). En Quintana Roo se realizó una predicción espacial de los hábitats del arrecife de Akumal, utilizando técnicas de percepción remota para la elaboración de imágenes de predicción espacial (Garza-Pérez, 2004). Así mismo se realizó una caracterización de los hábitats bentónicos de los arrecifes de Banco Chinchorro, Quintana Roo y Alacranes, Yucatán mediante la utilización de SIG (Acosta-González, 2005).

3.2 Imágenes Satelitales Landsat

Los satélites de resolución media como la serie Landsat han tomado fotografías satelitales de los continentes y áreas costeras circundantes de la tierra por más de tres décadas permitiendo el estudio de muchos aspectos de nuestro planeta y la evaluación de los cambios dinámicos causados por procesos naturales y actividades antrópicas (García, 2007).

En lo que a equipamiento se refiere el programa Landsat puede ser estructurado en 3 generaciones, la primera con un explorador de barrido multiespectral MSS (Multispectral Scanner) y un conjunto de tres cámaras vidicon RBV (Return Beam Vidicon), el sensor MSS es un equipo de barrido óptico-electrónico con un campo total de visión de 11.56 grados, lo que a la altura orbital del satélite, le permite

explorar una franja de terreno de 185 Km, divididos a ambos lados de la vertical de la imagen total. El sensor MSS registra seis líneas simultáneamente con cada oscilación del espejo. La radiación recibida por el sistema focal se transmite a un sistema óptico que la descompone en cuatro bandas, y la envía a distintos detectores. La segunda generación Landsat 4 y 5 mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor denominado TM (Thematic Mapper) diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. La tercera generación Landsat 7 (ya que el 6 no llegó a funcionar) cuenta con una versión mejorada de la segunda generación que incorpora una banda pancromática (0.5 a 0.9 μm) con una resolución espacial de 15 m, lo que permite obtener ampliaciones a una escala de hasta 1:25.000. (García, 2007). Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) es un sensor multiespectral radiométrico a bordo del satélite Landsat 7 (Tabla 2). Este sensor ha adquirido información casi ininterrumpida desde Julio de 1999 con un periodo de revisita de 16 días y provee imágenes con 8 bandas espectrales (Figura 1).

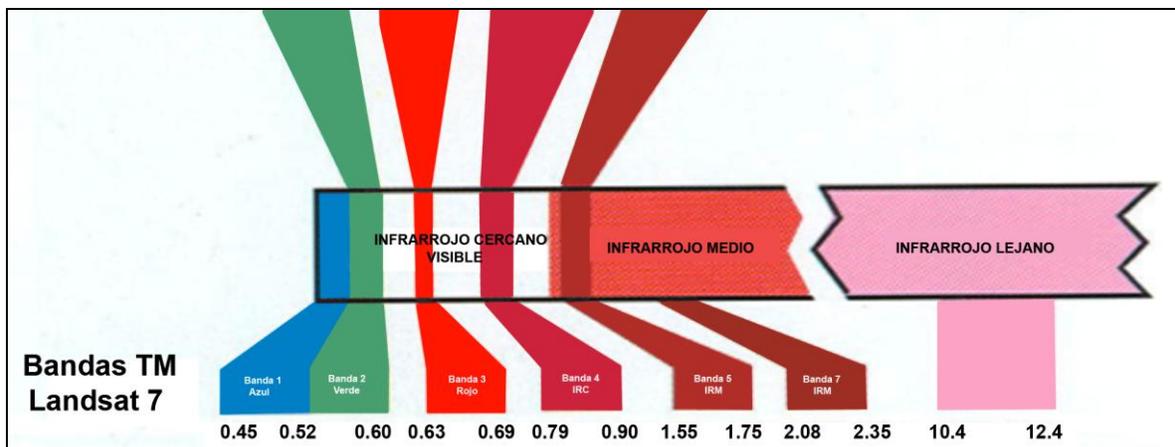


Figura 1. Espectro Electromagnético para Landsat (tomada de Martínez 2005).

Tabla 2. Bandas para ETM+ (Erdas, 2003).

Banda	Características
1, azul	Mapeo de aguas costeras, diferenciación entre suelo y vegetación y diferenciación entre vegetación conífera y decidua
2, verde	Mapeo de vegetación , calidad de agua
3, rojo	Absorción de la clorofila, diferenciación de especies vegetales, áreas urbanas, uso de suelo, agricultura y calidad de agua
4, Infrarrojo Cercano,	delineamiento de cuerpos de agua, mapeo geomorfológico, mapeo geológico, áreas de incendios, áreas húmedas, agricultura y vegetación
5, Infrarrojo medio	uso del suelo, medidas de humedad de la vegetación, diferenciación entre nubes y nieve, agricultura y vegetación
6, Infrarrojo termal	mapeo de stress térmico en plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo, otros mapeos térmicos
7, Infrarrojo medio	Identificación de minerales y mapeo hidrotermal
8, pancromático	Canal pancromático, resolución 15mts, Catastro rural, infraestructuras, Ubicación de centros poblados, hidrología, vías

La resolución espacial es de 30 metros en las bandas visibles e infrarroja cercana (bandas 1-5 y 7). La resolución de la banda pancromática (banda 8) es de 15 metros, y la banda infrarroja termal (banda 6) es de 60 metros. El tamaño aproximado de la escena es de 170 x 183 kilómetros, esta resolución, aunque es alta, en la realidad es menos útil de lo que en un principio se podría pensar. La existencia de nubes ocasiona que las imágenes, debido a su existencia sean inservibles en algunos casos (Fernández- Coppel, 2005). El Landsat 7 cuenta con un Corrector de línea de exploración o Scan Line Corrector (SLC por sus siglas en ingles) que compensa el movimiento del satélite; sin embargo, el SLC dejó de estar operativo en 2003. Un mal funcionamiento del instrumento se produjo el 31 de mayo de 2003 y como resultado, todos los datos de Landsat 7 desde el 14 de julio de 2003 (20:32:40 GMT) hasta la actualidad se capturan en el modo de SLC-off y cada una de las imágenes de la colección aparecen con rayas alternas con valores nulos o datos que faltan en la escena (Figura 2). Se estima que 22 por

ciento de cualquier escena se pierde debido a la falta de SLC, la anchura máxima de la falta de datos a lo largo del borde de la imagen sería equivalente a una línea de barrido completo, o aproximadamente 390 metros a 450. La ubicación exacta de líneas negras varía de una escena a otra (USGS, 2011).

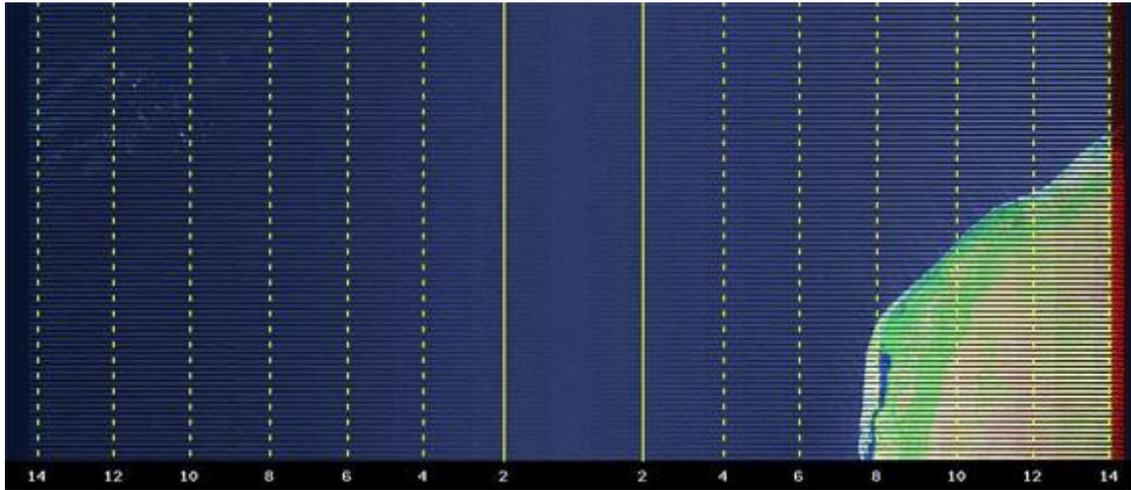


Figura 2. Esta imagen Landsat 7 ha sido mejorada para ilustrar la distribución de los efectos de la imagen debido al modo de SLC-off de la adquisición. La escala numérica en la parte inferior de la imagen representa el ancho (en píxeles de la imagen de 30 metros). Las líneas punteadas indican el ancho (en píxeles de la imagen de 30 metros). Fuente USGS 2011.

Pese a lo anterior varios trabajos han sido publicados sobre teledetección aplicada a ecosistemas sumergidos. Green *et al.* (2000) hacen un estudio para comparar la precisión ofrecida por diversos sensores. Concluyen que las imágenes producidas por el sensor Landsat TM son las más acertadas para delimitar estos ecosistemas, alcanzando una precisión de 60%.

3.3 Procesamiento digital de imágenes

El objetivo del pre-procesamiento de imágenes es asegurar que cada píxel registra fielmente el mismo tipo de medida en la misma ubicación geográfica en el tiempo (Lunetta, 1998). Para llevar a cabo análisis cuantitativos de la reflectancia de la superficie y eliminar Y/O compensar los efectos atmosféricos tales como el vapor de agua, brillo de las olas, visibilidad, son necesarias varias técnicas de corrección. El procesamiento digital de imágenes se desarrolla en las siguientes

etapas: 1) Pre-procesamiento. Son aplicadas técnicas para corrección de distorsiones radiométricas introducidas por el sensor o por la atmósfera. Las imágenes pueden presentar alteraciones radiométricas y geométricas de forma que no coincida con el tono, posición y tamaño de los objetos. Algunas técnicas, para corregir estos efectos, son incorporadas de modo rutinario por las estaciones receptoras de las imágenes, pero en otros casos se requieren correcciones más detalladas como en los estudios multitemporales o cuando se requiere incorporar información auxiliar (Chuvieco, 1996). 2) Procesamiento digital. Esta etapa incluye la utilización de técnicas de realce, transformaciones espectrales, clasificación supervisada y análisis de detección de cambio. 3) Mapeo. Etapa de extracción de información por medio de interpretación visual o clasificación digital donde se generan los productos requeridos. La corrección de las imágenes tiene como propósito poder discriminar, en un primer acercamiento a la imagen, sobre las distintas coberturas que tenemos en ella. (Rodríguez, 2005).

3.4 Corrección Atmosférica

La atmósfera puede afectar la naturaleza de las imágenes de sensores remotos de diferentes formas (Chuvieco, 1996), como los ruidos causados a la señal que llega al satélite luego de haber atravesado la atmósfera, para ello hay técnicas que se aplican en las imágenes que tienden a eliminar los ruidos causados. Una imagen digital está constituida por un arreglo de píxeles y cada uno tiene un atributo de valor numérico que se conoce como número o nivel digital (ND) (Gómez, 2001).

El efecto de la distorsión de la señal produce errores en la localización como en los ND de los píxeles. Otro tipo de error en la imagen es producido por la radiación, la radiación electromagnética captada por los sensores de los satélites atraviesa la atmósfera y es modificada por efecto de la dispersión debido a la interacción con las moléculas y partículas de la atmósfera. La dispersión Rayleigh

es producida por las moléculas de los gases atmosféricos y es una de las principales causas de bruma, lo que genera una disminución del contraste de la imagen. (Tagestad, 2000). La dispersión es el efecto más grave, reduciendo el contraste de la escena y dificultando la detección de detalles, confundiendo la interpretación de las firmas espectrales de la escena (Slater, 1980).

3.5 Corrección del efecto de la profundidad en la columna de agua

La corrección también llamada creación de un Índice Profundidad Invariable del Fondo propuesta por Lyzenga (1978) es esencial para establecer relaciones empíricas cuantitativas de las características del fondo marino. Y puede mejorar la precisión de los mapas de hábitats marinos y la interpretación visual de la imagen. (Lyzenga, 1978; Chávez, 1996; Mumby *et al*, 1998; Zhang *et al*, 1999). Para el mapeo de hábitats submarinos, se recomienda hacer esta corrección para compensar el efecto de la profundidad sobre la señal recibida por el sensor (Figura 3), debido a la atenuación de la luz en la columna de agua y para distinguir de manera más real los hábitats y fondos marinos debido a que los efectos de profundidad dominan la imagen (Green *et al*. 2000).

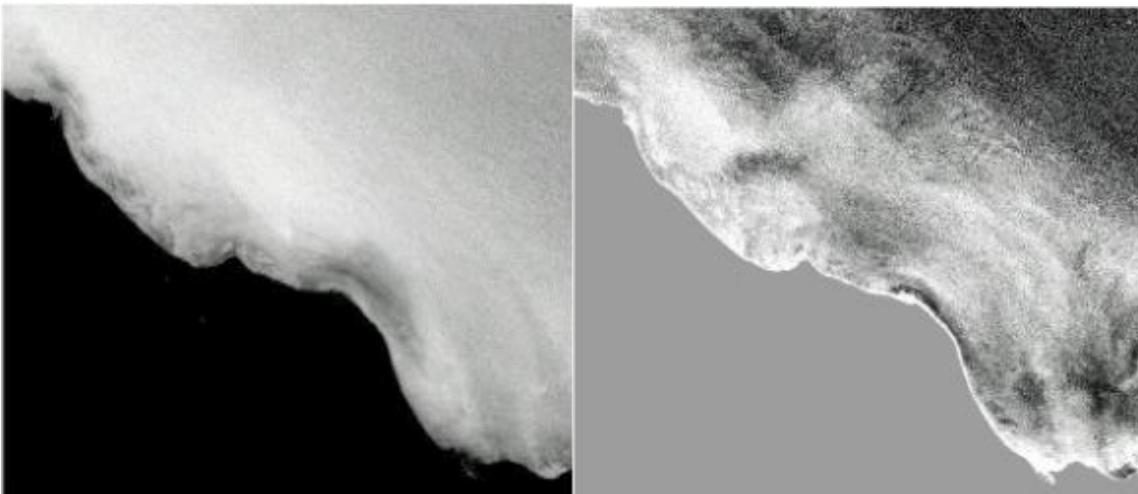


Figura 3. Imágenes de la plataforma continental entre los estados de Río Grande do Norte y Ceará, Brasil. 2003 en una imagen Landsat ETM con la aplicación de la corrección de la columna de agua para identificar tipos de fondos marinos (tomada de Lozano 2003)

El método produce un índice para el tipo de fondo independiente de la profundidad por cada par de bandas espectrales. La técnica fue probada para aguas en las Bahamas y solamente es apropiada donde la claridad del agua es buena (la mayoría de aguas de áreas coralinas y pastos marinos). (Green *et al.* 2000).

Otro método que reduce y optimiza el análisis visual de la imagen y su procesamiento estadístico de los efectos atmosféricos y de la columna de agua es la aplicación de filtros. El filtrado se suele utilizar para mejorar las imágenes mediante la eliminación de ciertas frecuencias espaciales. Una frecuencia espacial describe la variación de brillo, o ND, con la distancia, y las imágenes contienen muchas frecuencias espaciales diferentes. Por ejemplo, la eliminación de la variación de alta frecuencia en una imagen produce una imagen de salida más homogénea (ENVI, 2009).

Los filtros que se pueden aplicar responden a las necesidades y al resultado que se desee obtener en una imagen y pueden aplicarse filtros de textura o adaptativos que serán aplicados en el presente estudio, un filtrado adaptativo reduce el ruido, suavizando y preservando al mismo tiempo las características de alta frecuencia (bordes). El filtrado adaptativo utiliza la desviación estándar de los píxeles dentro de una ventana cuadrada alrededor de cada píxel para calcular un valor nuevo para cada píxel. Normalmente, el valor del píxel original se reemplaza con un nuevo valor calculado en base a los píxeles circundantes válido (aquellos que satisfacen los criterios de desviación estándar).

Los filtros adaptativos preservan la nitidez y el detalle, mientras que eliminan el ruido de la imagen. El filtrado adaptativo comprende varias modalidades: Lee, bit error, frost, gamma, kuan y local sigma (ENVI, 2009). El filtro gamma es uno de los mejores filtros conocidos (Lopes, 1993) y con mejores resultados. El filtro gamma fue propuesto por primera vez por Kuan en 1987 (Zhenghao, 1994) y se utiliza para reducir el moteado (ruido de alta frecuencia), el píxel que se filtra se

sustituye por un valor calculado sobre la base de las estadísticas locales y el resultado es una imagen homogenizada (Figura 4).

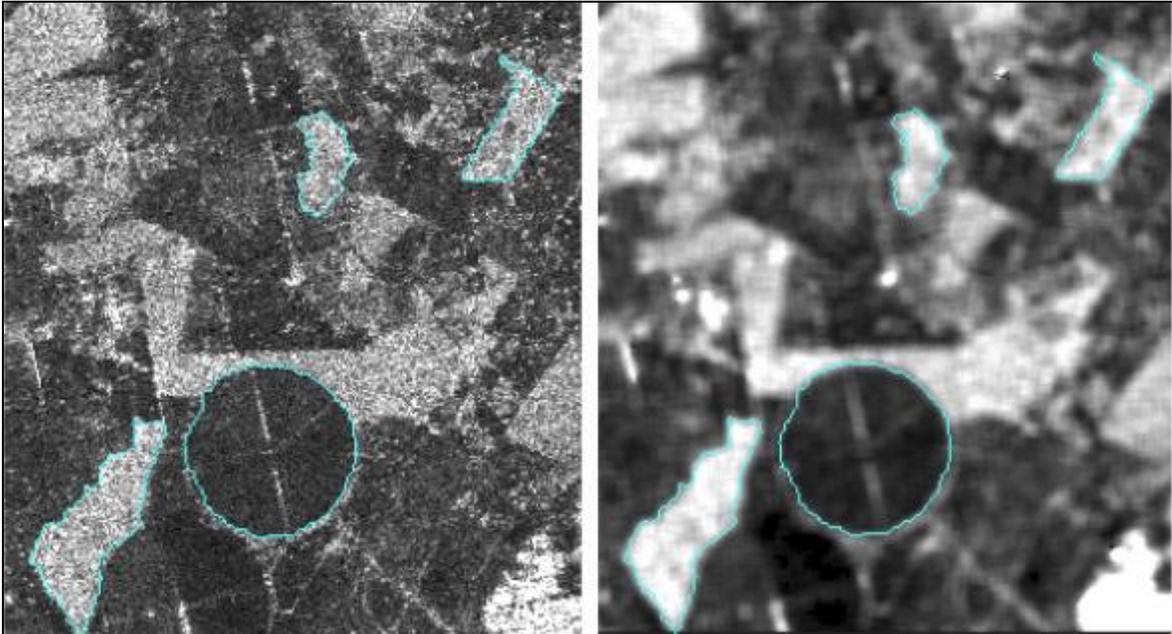


Figura 4. A la izquierda una imagen original SAR; a la derecha la imagen mejorada por la aplicación de filtros adaptativos. (Tomada de Leeuw 2009).

3.6 Remoción del brillo de la superficie

La reflexión especular de la radiación solar sobre la superficie del agua no plana es un grave factor de confusión para los estudios de teledetección en ambientes marinos bentónicos (Hedley *et al.*, 2005). Hochberg *et al.* 2003 proporcionan un método eficaz para la eliminación del brillo del sol en imágenes satelitales utilizando la banda del infrarrojo cercano (NIR).

La remoción o corrección de los efectos del brillo superficial del mar es utilizada para el mapeo de hábitats bentónicos de aguas poco profundas. Consiste en un algoritmo de eliminación de brillo y puede ser aplicada en imágenes que proporcionen 4 bandas espectrales R, G, B y NIR; esta corrección mejora las

características estructurales, el contraste y nitidez del fondo permitiendo una mejor clasificación e interpretación de la imagen (Figura 5).

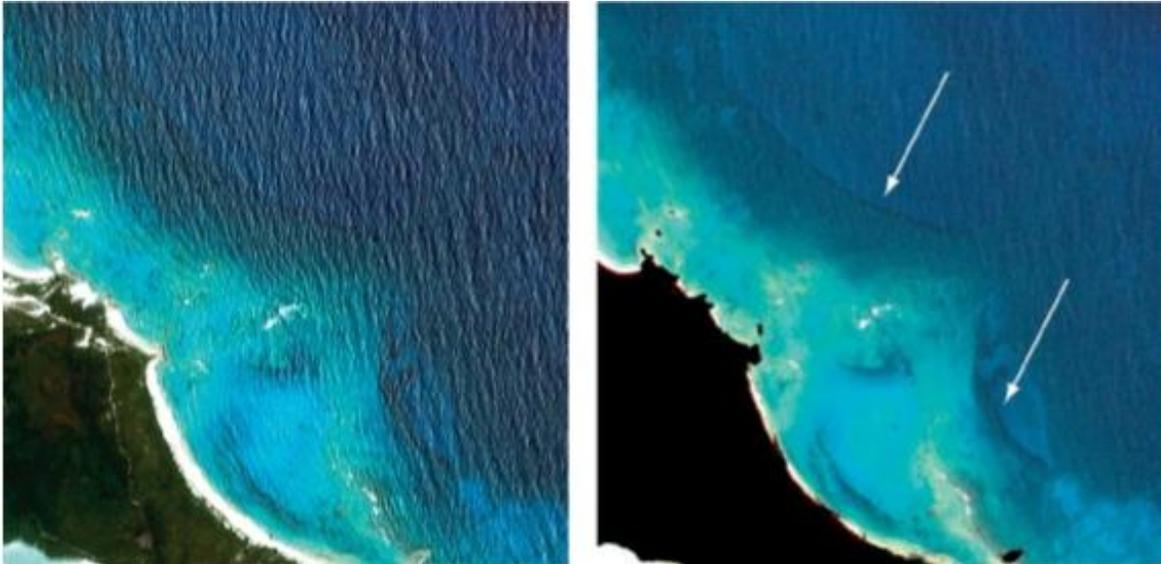


Figura 5. (Izquierda) antes y después (derecha) de la eliminación del brillo de las olas en una imagen Ikonos de Lee Stocking Island, Exuma en las Bahamas. (Tomada de Hochberg, 2003)

3.7 Clasificación de Imágenes

Para la mayor parte de los usuarios de Percepción Remota, la clasificación supone la fase culminante del tratamiento digital de imágenes. El valor de los píxeles adquiridos por el sensor no tienen sentido en sí mismos, sino en cuanto son interpretables; esto es, convertibles a categorías que supongan un mejor conocimiento del territorio (Rodríguez, 2005).

Clasificación es el proceso de extracción de información en imágenes para reconocer patrones y objetos homogéneos con el objetivo de mapear las áreas de

la superficie terrestre o marinas. El resultado final de una clasificación de una imagen es una imagen temática (mapa), donde los píxeles clasificados son representados por símbolos gráficos o colores. Cada color o símbolo está asociado a una clase (área urbana, tipos de florestas, tipos de solo, etc.) definida por el usuario, la clasificación incluye el análisis individual de los atributos numéricos de cada píxel en la imagen (Fonseca *et al.*, 2003; Green *et al.*, 2000). Los métodos de clasificación se dividen en dos grupos: supervisado y no supervisado; el primero parte de un conocimiento previo del terreno, a partir del cual se seleccionan áreas piloto, que se consideran representativas de las categorías o clases de interés; mientras que el método no supervisado procede a una búsqueda automática de grupos de valores homogéneos (clases espectrales, niveles digitales) dentro de la imagen, por lo que queda del usuario la labor de encontrar correspondencias las categorías de interés, centrándose más en la interpretación de dicha imagen (Chuvienco, 1990).

3.8 Análisis de detección de cambio

Para el monitoreo de la dinámica de los paisajes a gran escala uno de los recursos más utilizados es la detección y caracterización de cambio en el paisaje. (Kennedy, 2009). Los Análisis de detección de cambio abarcan una amplia gama de métodos utilizados para identificar, describir y cuantificar las diferencias entre imágenes de la misma escena en diferentes momentos o condiciones, estas diferencias o patrones de cambio se pueden observar mediante el examen visual de mapas clasificados(ENVI, 2009).

La función de detección de cambio se utiliza para compilar una tabla detallada de los cambios entre dos o más imágenes. Los cambios detectados con esta rutina difieren significativamente de una simple diferenciación de las dos imágenes. El análisis se centra principalmente en los cambios del estado inicial, es decir, para cada clase de estado inicial, el análisis identifica las clases en las que los píxeles cambiaron en el estado final de la imagen. El producto final de esta post-clasificación es una máscara de colores por clase que representa al tipo de

cobertura y que coinciden con la detección de cambio del estado final de la imagen, por lo que es fácil de identificar no sólo cuando los cambios ocurrieron, sino también la clase en la que los píxeles cambiaron (ENVI, 2009). Un valor de cero en la máscara indica que no se presenta cambio desde el estado inicial al estado final, valores distintos de cero indican un cambio con el fin de diferenciar los píxeles (ENVI, 2009).

4. - PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los hábitats submarinos en la zona sublitoral de Sisal Yucatán son distintos entre sí debido a variaciones estructurales (substrato, biocenosis, etc.) controladas hasta cierto grado por agentes dinámicos (oleaje, corrientes, viento, etc.) que varían a lo largo del espacio y del tiempo. Los hábitats se pueden considerar como unidades funcionales de los ecosistemas que forman parte del paisaje submarino de la zona y el conocimiento de la dinámica y distribución de estos paisajes y su variación en las diferentes estaciones a lo largo del año, constituye un elemento de información importante para el soporte a decisiones de manejo y conservación de recursos en el área.

5.- JUSTIFICACIÓN.

La falta de conocimiento sobre la dinámica espacial y temporal, y la importancia que representa el entendimiento de su función con respecto a la formación de hábitats generó el interés para el desarrollo de la presente investigación. La contribución de esta investigación se centra primordialmente en la generación de conocimiento básico acerca de la dinámica espacial de los paisajes submarinos, en términos de la posible variación en su distribución a lo largo del tiempo. Esta información es completamente inexistente para el área y ayudará para establecer una línea base de información para la realización de estudios encaminados al conocimiento y preservación de especies que allí habitan, así como continuar con las actividades de investigación para la exploración, protección y toma de decisiones de manejo de los recursos del área.

6.- HIPÓTESIS

1. La distribución de los paisajes submarinos del litoral de Sisal permanecerá constante entre temporadas (lluvias, secas y nortes).
2. El patrón espacial de los paisajes submarinos del litoral de Sisal Yucatán permanecerá estable en una escala decadal sin importar las variaciones anuales de la temperatura del agua, y la precipitación pluvial.

7.- OBJETIVOS

7.1 Objetivo general

Definir y caracterizar los patrones de distribución de los paisajes submarinos en el litoral de Sisal a partir de imágenes de satélite Landsat ETM+ en una escala decadal y a través de las diferentes temporadas climáticas del año.

7.2 Objetivos Particulares

- Definir la distribución de los paisajes submarinos por medio de interpretación de imágenes satelitales para las tres temporadas climáticas del año.
- Evaluar la estabilidad de los patrones de distribución de los paisajes submarinos del litoral de Sisal Yucatán mediante análisis de detección de cambio entre las tres temporadas climáticas.
- Analizar las diferencias anuales de precipitación pluvial y temperatura media de la superficie del mar a través de los registros históricos en la zona.
- Correlacionar las posibles variaciones en la distribución de los paisajes del litoral de Sisal con las posibles variaciones en la temperatura media de la superficie del mar y la precipitación pluvial.

- Evaluar la estabilidad de los patrones de distribución de los paisajes submarinos del litoral de Sisal Yucatán mediante análisis de detección de cambio entre imágenes colectadas con 10 años de diferencia.

8.- MATERIALES Y METODOS

8.1 Área de estudio.

México cuenta con un extenso litoral marítimo, incluyendo dos grandes penínsulas, Yucatán y Baja California. El litoral occidental marítimo de Yucatán se caracteriza por la existencia de una isla de barrera (Capurro, 2003). La topografía submarina del litoral en el lado del Golfo de México es somera y muy plana, mientras que en el costado caribeño es plana y somera hasta la barrera de arrecifes de coral, después de la cual desciende rápidamente a profundidades mayores (Capurro, 2003). El Banco de Campeche es la plataforma continental que se extiende alrededor de la Península de Yucatán. El Banco de Campeche es una planicie submarina extendida y casi plana, limitada al oeste por la cuenca de Tabasco- Campeche y al este por el estrecho de Yucatán (Figura 6). Es una zona somera cuya profundidad se encuentra en el intervalo de 20 a 200 m (Aguirre-Gómez, 2001). Se localiza entre los 18° y 24° Norte, y los 87° y 93° Oeste. Es una región de gran importancia pesquera por ser hábitat natural de numerosas especies de importancia comercial cuya explotación constituye la forma de vida y trabajo de muchos pueblos ribereños.

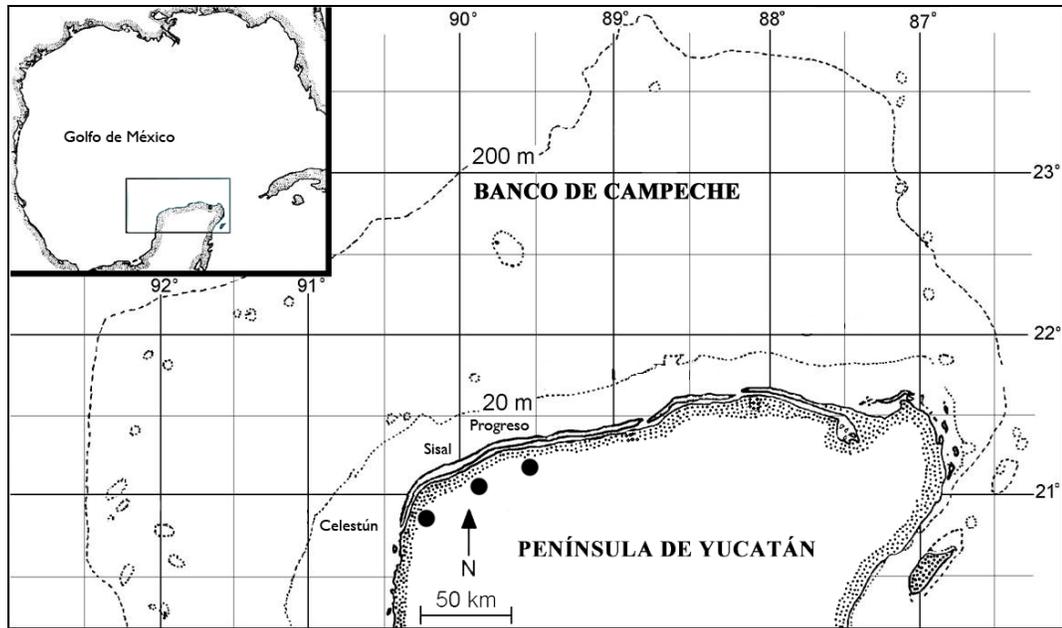


Figura.6. Plataforma continental del Banco de Campeche y puertos inmediatos al área de estudio. (Modificado de Rincón, 2010).

Las características térmicas para la región presentan en general una estrecha relación entre la temperatura superficial del agua con respecto a la temperatura del aire y presenta máximos de 28°C a 29.5 °C durante el verano; en el invierno y al principio de la primavera la temperatura desciende entre los 23.5°C y 25°C. (Piñeiro *et al.*, 2001). La Península de Yucatán es una gran masa calcárea, debido a su posición geográfica tropical carece de las clásicas estaciones climáticas de altas latitudes. Se reconocen tres estaciones principales: una estación de secas con escasez de precipitaciones, una estación lluviosa con altas precipitaciones y el período de noviembre a febrero es conocido en esta parte del Golfo de México como la temporada de nortes y es caracterizada por vientos fuertes (>80 Km/h) poca precipitación y temperaturas relativamente bajas (<22 °C) impuesta por la baja presión de las masas de aire del norte (Herrera-Silveira, 1996). La temporada de nortes, a su vez, se caracteriza por escasas precipitaciones, aire frío, incremento en el oleaje y turbidez del agua, la temperatura promedio es de 23 °C y la precipitación de 40 mm (Tunnell, 1988).

La circulación general del Golfo de México se origina a partir del Mar Caribe, entra por el canal de Yucatán, circula por las costas o cruza directamente el Golfo, y sigue su camino hacia el norte por el estrecho de Florida. Esta circulación es importante fuente de nutrientes, lo que promueve la productividad de los ecosistemas costeros. Adicionalmente como las aguas provienen del fondo oceánico éstas producen una marcada diferencia en las temperaturas del agua en las estaciones de primavera y verano, enfriando la región oriental del Banco de Campeche por uno o dos grados en comparación con la región occidental, lo que puede influir en la distribución de ciertas especies (Piñero *et al*, 2001). Asimismo, la Península de Yucatán y la región del Golfo de México en general, es azotada constantemente por huracanes entre los meses de junio y octubre (Jáuregui, 2003), así como por los ya mencionados Nortes. Estos últimos reducen la temperatura, incrementan el oleaje, la turbidez, y pueden tener velocidades de hasta 120 km/h (Tunnell, 1988), y probablemente influyen en la presente dinámica y distribución de las poblaciones naturales del Golfo.

El área de estudio se localiza en la costa noroccidental de la Península de Yucatán (Figura 7), en el puerto de Sisal que está ubicado en el litoral norponiente del Estado de Yucatán, en el Golfo de México y localizado en el municipio de Hunucmá, a 53 km al noroeste de Mérida. Sus coordenadas geográficas son 21°9'55.22"N, 90°1'54.93"O y cuenta con una extensión de litoral de 27.5 Km. La principal vía de comunicación con la capital del estado es a través de la carretera Mérida-Hunucmá-Sisal y colinda con el límite nororiental de la Reserva Estatal El Palmar.

En promedio la temperatura atmosférica se mantiene entre los 25° y los 30°C grados durante todo el año, mientras que la precipitación anual no rebasa los 500mm (Britton & Morton, 1989). Los ecosistemas predominantes están constituidos por dunas, ciénegas y manglares. Siendo el manglar chaparro el más representativo de la comunidad vegetal.

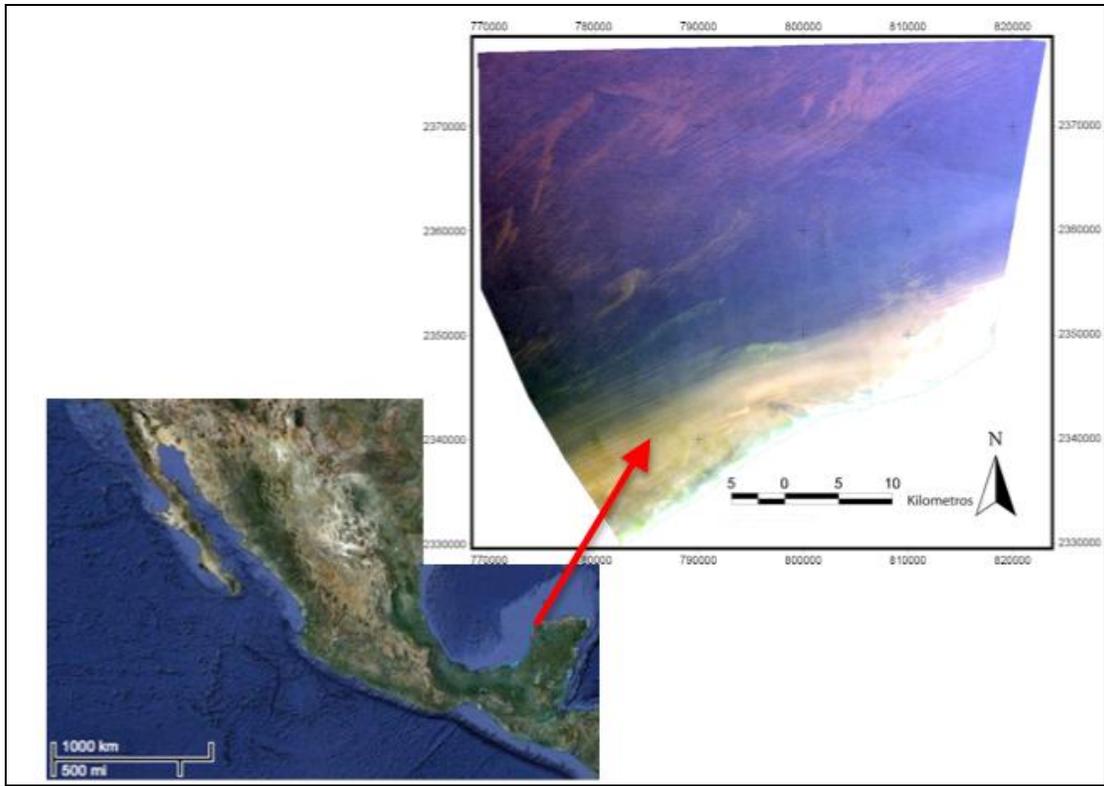


Figura 7. Área de estudio en el litoral de Sisal, costa noroccidental de la Península de Yucatán.

8.2 Método para la caracterización de distribución espacial de los paisajes submarinos en laboratorio.

8.2.1 Adquisición de Imágenes.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizaron imágenes LANDSAT de los sensores ETM+. La escena que cubre el estado de Yucatán se muestra en la Figura 8.

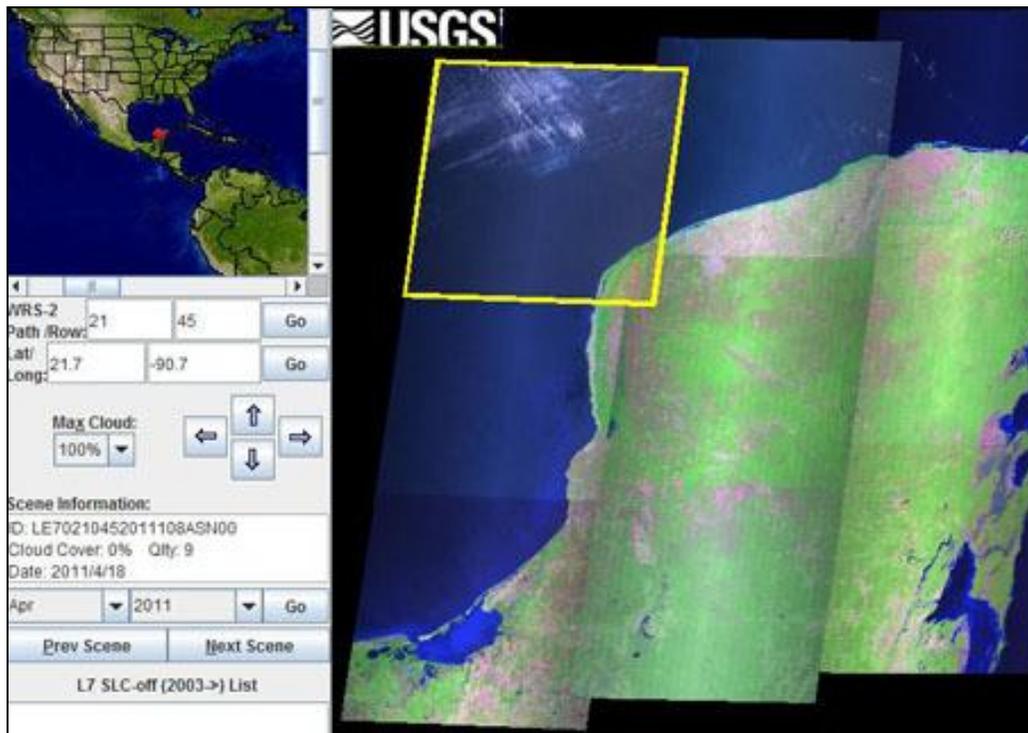


Figura 8. Escena Landsat ETM+ de la zona 15 del estado de Yucatán para el año 2011, Fuente Glovis.USGS.

Las imágenes se obtuvieron desde el sitio oficial del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), cuya dirección es: <http://landsat.usgs.gov>. Se consultaron los directorios de registro de imágenes y se descargaron imágenes Landsat 7 ETM+ de archivo, disponibles para los años 2000 al 2003 y Landsat ETM+ con modalidad SLC off para los años 2003 al 2010. En total se descargaron más de 30 imágenes de las cuales sólo a 22 se les aplicó correcciones (Tabla 4), y sólo tres resultaron adecuadas para su

procesamiento posterior (Figura 9, 10, y 11). Los Parámetros estándar de estas imágenes se muestran en la (Tabla 3).

Tabla 3. Características de las escenas Landsat del área del litoral de Sisal, Yucatán.

Formato de salida:	GeoTIFF
Tamaño del píxel en bandas Reflectivas (bandas 1-5, y 7):	30 m
Tamaño del píxel en bandas térmicas (bandas 6H y 6L):	60m (en imágenes procesadas antes del 25 de feb. de 2010) 30m (en imágenes procesadas después del 25 de feb. de 2010)
Tamaño del píxel en el pancromático (banda 8):	15m
Proyección:	Universal Transverse Mercator (UTM), zona: 15
Datum:	WGS84
Orientación de la imagen:	MAP (North-up)

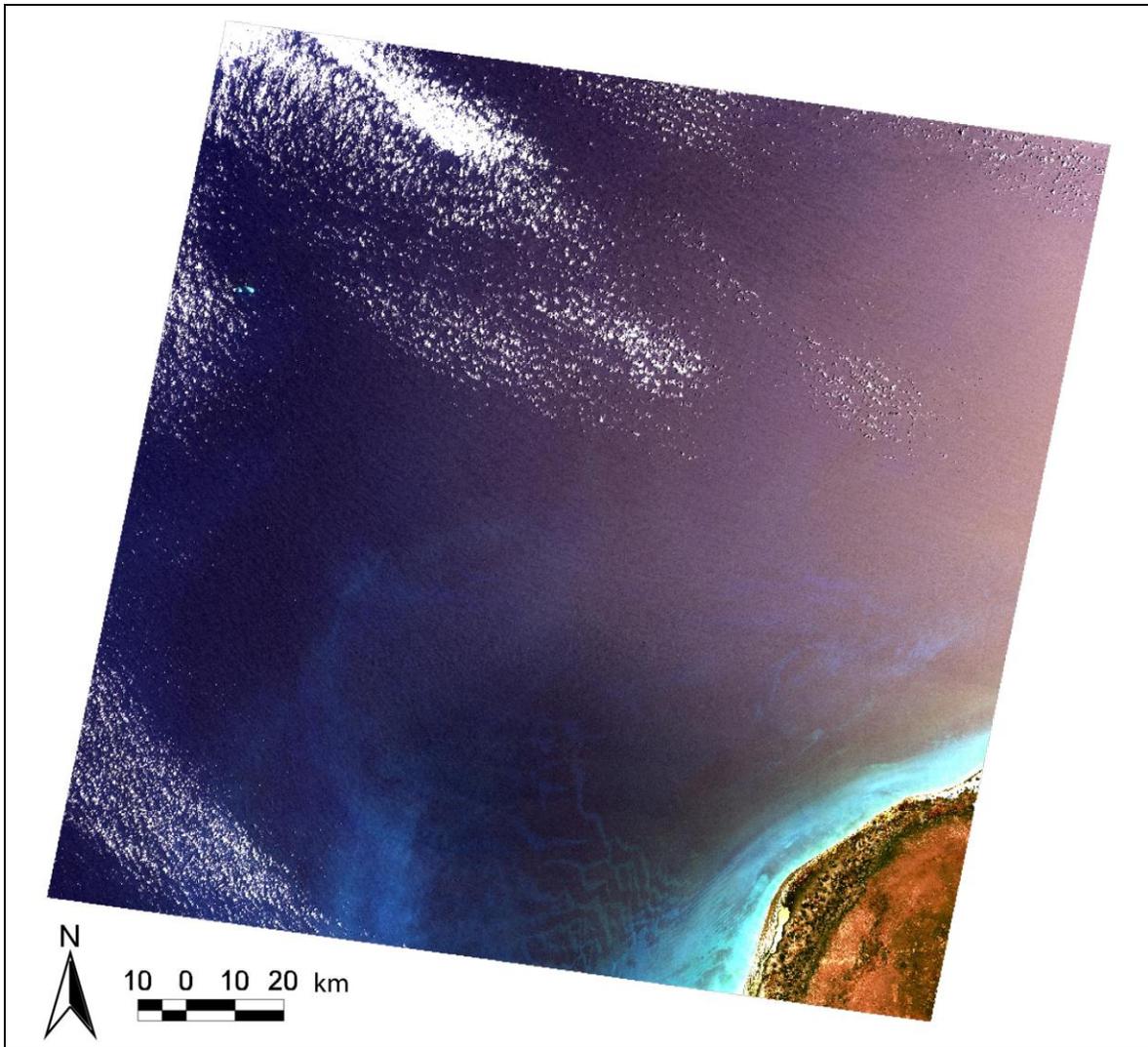


Figura 9. Imagen Landsat ETM+, 2000, ID: LE70210452000110EDC01, WRS Path/ Row:21- 45, Lat/Long: 21.7-90.7, cobertura de nubes: 0.28%, del mes de abril para la temporada de secas. USGS 2010

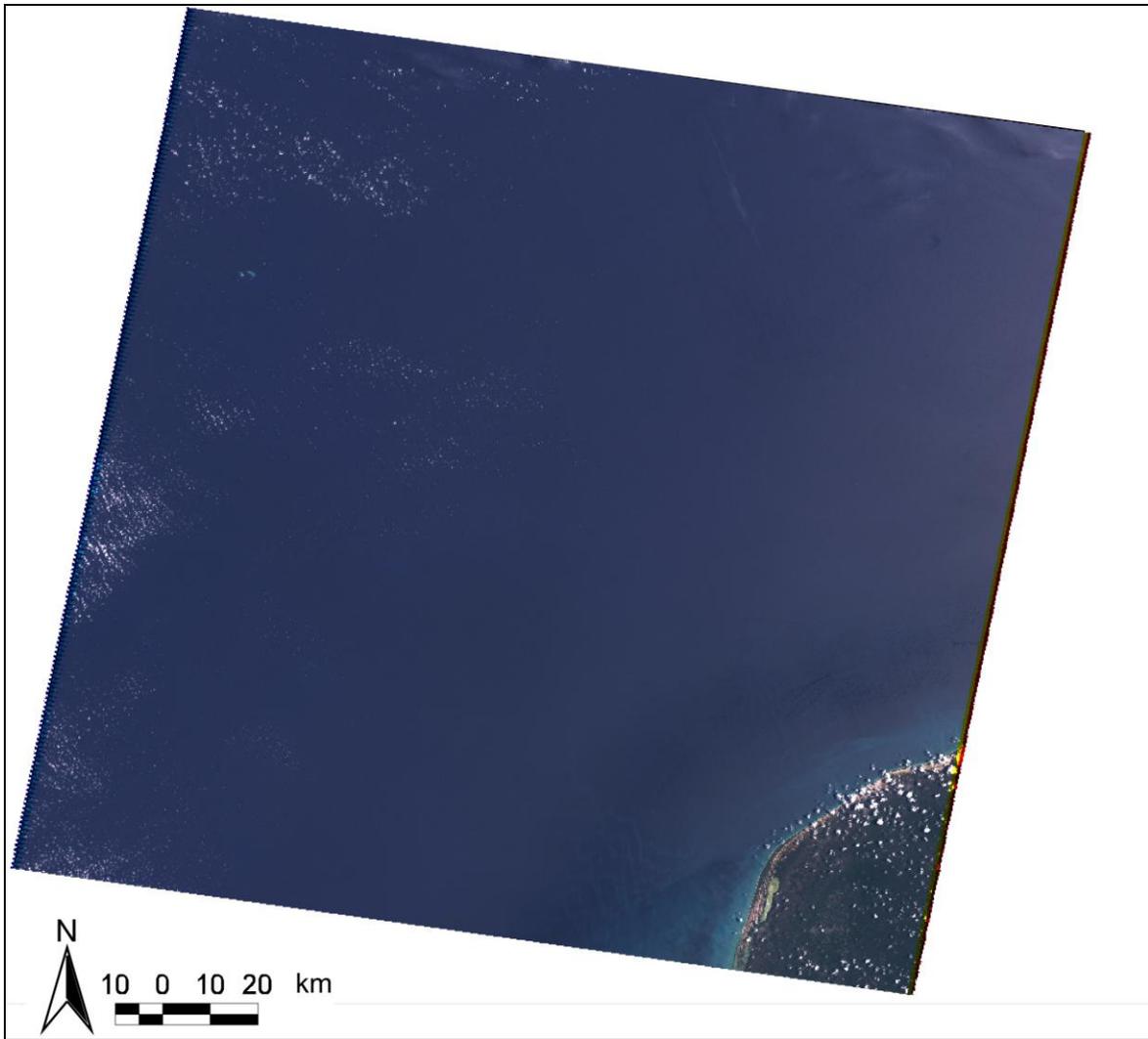


Figura 10. Imagen Landsat ETM+, 2002, ID: LE70210452002211EDC00, WRS Path/ Row:21- 45, Lat/Long: 21.7-90.7, cobertura de nubes: 0.23%, del mes de julio para la temporada de lluvias. USGS 2010

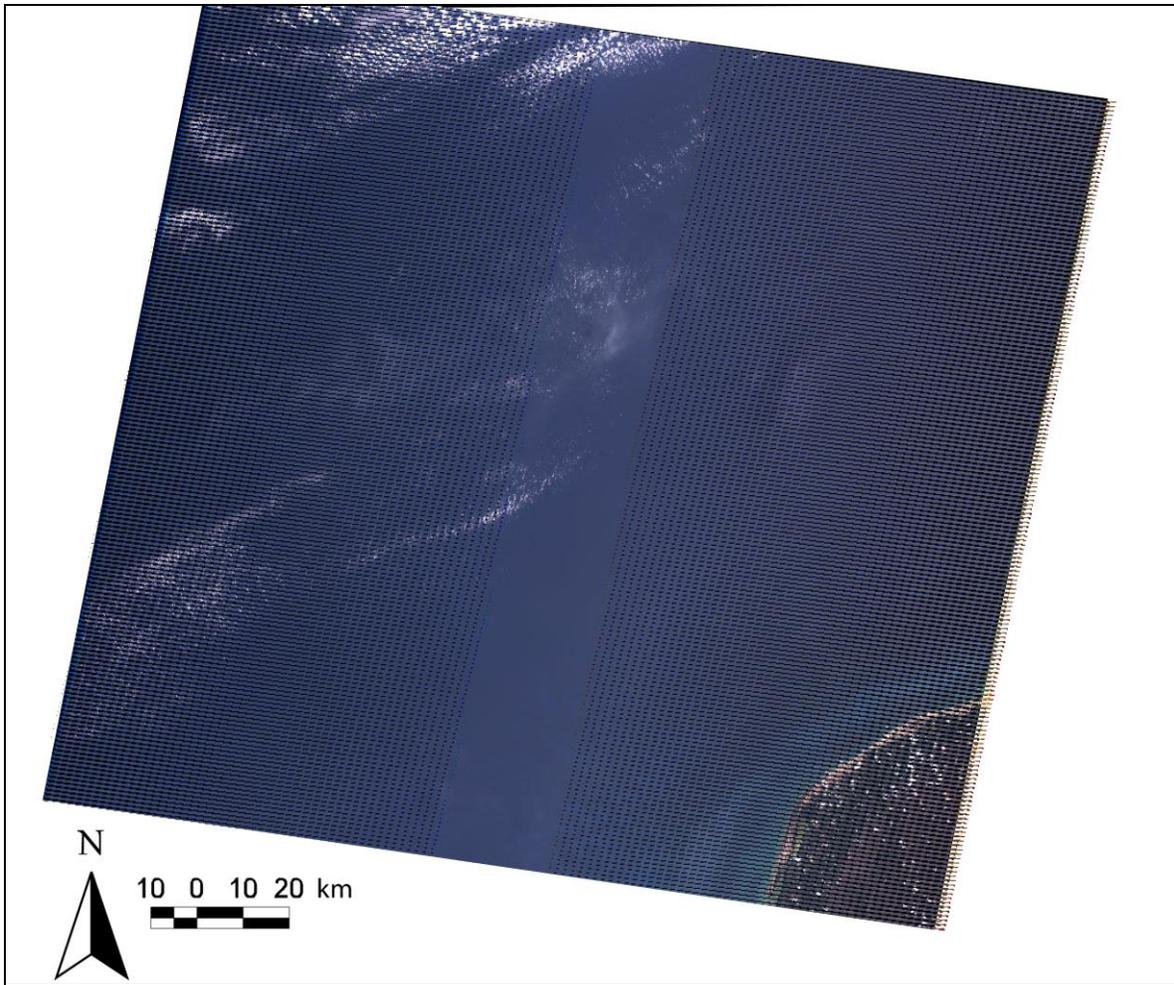


Figura 11. Imagen Landsat ETM+, 2009, ID: LE70210452009006EDC00, WRS Path/ Row:21- 45, Lat/Long: 21.7-90.7, cobertura de nubes: 0.07%, del mes de enero para la temporada de nortes. USGS 2010.

8.2.2 Preprocesamiento de Imágenes.

Para el desarrollo de la corrección de imágenes satelitales se realizaron una serie de pasos sistematizados (Figura 12).

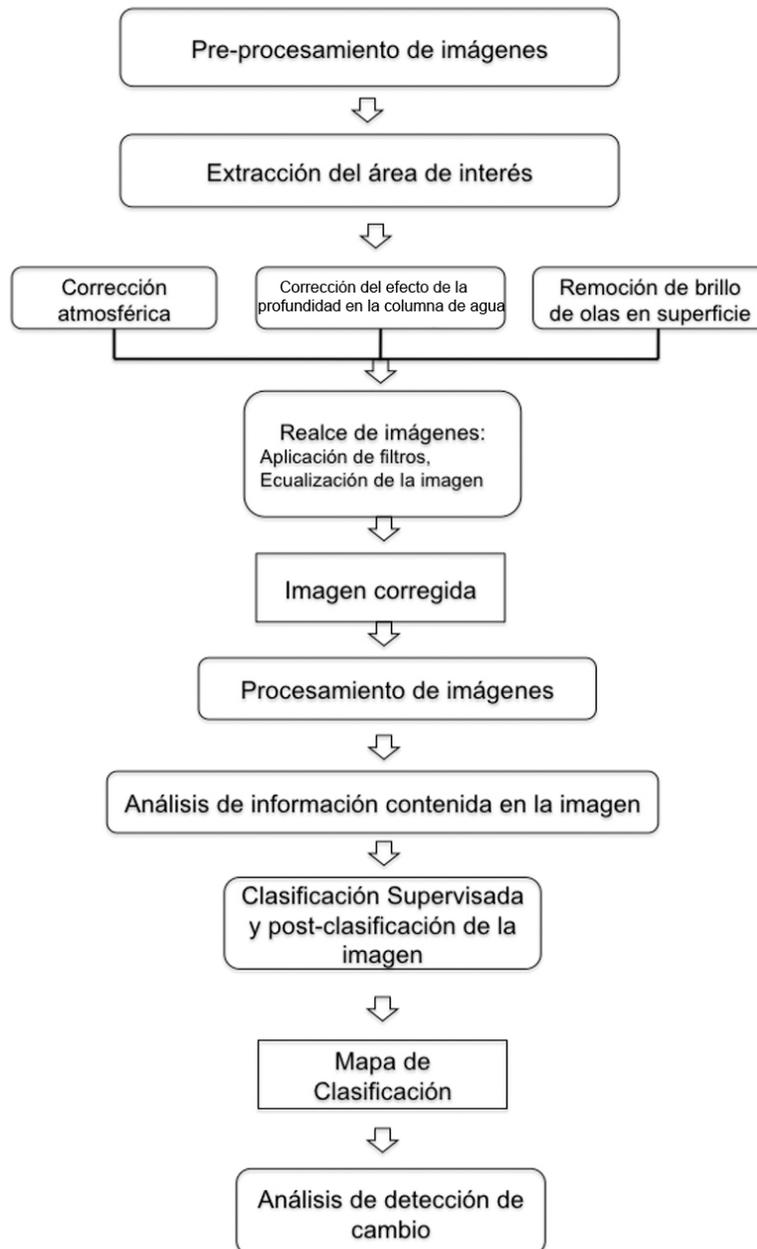


Figura 12. Diagrama de flujo de la metodología del procesamiento de imágenes satelitales.

La selección visual de imágenes se hizo de acuerdo a la calidad de las mismas: aquellas que presentaban mejor visibilidad del fondo, menor cobertura de nubes y de vapor de agua. Se verificó que las imágenes estuvieran georeferenciadas con las coordenadas en el sistema UTM en la zona 15 Norte, datum WGS-84.

Para corregir la georeferencia de algunas de las imágenes se utilizó el software MultiSpec 3.3.

El pre-procesamiento y procesamiento en las imágenes satelitales, incluyendo la clasificación supervisada, corrección atmosférica y del efecto de la profundidad en la columna de agua, fueron realizadas con el software ENVI 4.7 (ITT), Arc View Gis 3.2, (ESRI) y ERDAS Imagine 8.6. (Leica).

La metodología empleada para aplicar la corrección de columna de agua es la propuesta por Lyzenga (1981) y aplicada por Green *et al* (2000) en las islas Turks & Caicos y Armstrong (1993) en las Bahamas, entre otros. La corrección del brillo de las olas se realizó con el software Deglint v1.1 (Hochberg, 2003). El cual consiste en un algoritmo de eliminación de los efectos de la superficie del mar. La corrección se basa en el supuesto de que el agua es virtualmente opaca en la banda del infrarrojo cercano (NIR) del espectro magnético por lo tanto, los píxeles con dicho efecto en el NIR deben de presentar una contribución similar en las bandas del espectro visible (rojo, verde y azul). Para que el programa opere, los píxeles con radianzas máximas y mínimas deben ser identificadas para que el efecto del oleaje de cada píxel pueda ser estimado (Cuevas-Miranda, 2004). Para esto se realiza una selección de la región de interés, las regiones que se utilizan son las que presentan un brillo evidente, el tamaño mínimo de muestra requerido es de dos píxeles. (Hochberg *et al.* 2003), a continuación se aplica la siguiente ecuación:

$$VIS_{\text{deglinted}} = VIS_{\text{initial}} - NIR \cdot \text{slope}$$

Donde VIS_{initial} , es la banda visible inicial de la imagen, NIR es la banda del infrarrojo cercano y slope , es la pendiente de la regresión lineal mencionada

anteriormente; dando como resultado una nueva imagen.

8.2.3 Corrección Atmosférica y de Vapor de agua

La técnica de Corrección atmosférica en el presente estudio fue desarrollada *ex profeso* por Garza- Pérez (en proceso).

El primer paso es crear una nueva banda con la corrección atmosférica básica (resta del valor del píxel más oscuro) de la Banda 5 (Infrarrojo cercano-medio) a la extracción del área de interés (libre de nubes y sombras de nubes (Figura 9). Identificar los valores de un conjunto representativo de píxeles afectados por vapor (Bandas originales 1, 2 y 3 y banda 5 corregida). Calcular regresiones lineales entre los pares de bandas (conjunto de valores extraídos de B5 Corregida vs. B1, B2 y B3).

Aplicar la siguiente ecuación a cada par de bandas:

$$\log n (B_j) - R^2 * \log n (B5corr)$$

donde

B_j equivale a cada banda original (B1, B2, B3) , R^2 es la relación lineal entre cada par de bandas. A continuación se multiplica la banda producto de cada cálculo por la B5 Corregida, para generar un set de tres bandas corregidas para compensar efectos atmosféricos y de vapor de agua.

8.2.4 Corrección del efecto de la columna de agua.

El método fue propuesto por Lyzenga (1981) y fue modificado por Mumby *et al.* (1998). El proceso inicia con las correcciones radiométricas y geométricas, que incluyen la corrección atmosférica y corrección geométrica. A continuación se

identifica un tipo de fondo homogéneo, presente a diferentes profundidades conocidas, de preferencia se utilizan los fondos arenosos por sus altos valores de reflectancia. Para ello se identifica el valor más oscuro a mayor profundidad para cada banda (d_w). Se hacen regresiones lineales entre los pares de bandas (B1-B2-B3) con los valores de los píxeles seleccionados de las tres bandas y se almacenan y transfieren a una hoja de cálculo de Excel para calcular el coeficiente de atenuación.

Después se aplica la siguiente ecuación a cada par de bandas:

$$\text{Índice de Profundidad } ij = \ln (L_i - L_{si}) - [(k_i/k_j) \ln (L_j - L_{sj})]$$

Donde L_i es el valor de radiancia para la banda i , L_j valor de radiancia para la banda j y k_i/k_j es el coeficiente de atenuación para el par de banda $i-j$.

8.2.5 Técnica de superposición de imágenes

Para completar la falta información en las imágenes con el patrón de bandas ausentes debido al SLC-off (scan-line corrector) del satélite, se realizó una técnica de mosaicos o superposición de imágenes referenciadas propuesta por Scaramuzza *et al.* (2004). Esta técnica está basada en la información de cada píxel en la imagen a través de un método geoestadístico de las estimaciones de los valores que están ausentes, la técnica utiliza la media y desviación estándar de los datos de una imagen primaria. En este caso una imagen sin el patrón de bandas ausentes para llenar el vacío de una imagen de relleno o con el patrón de bandas ausentes y supone que con un SLC-On de una imagen primaria se puede estimar el SLC-off de la imagen con bandas ausentes: $Y \approx GX + B$, donde G es igual a la ganancia utilizada para que coincida con el histograma de la imagen primaria a la imagen de relleno, B es igual al sesgo utilizado del histograma y donde coincide la imagen primaria con la imagen de relleno, X es igual al SLC-On de la imagen primaria, Y es igual al SLC-off de la imagen de relleno. Una vez estimadas las diferencias se realizó una transformación lineal entre una imagen y

otra (Figura 13).



Figura 13. Ejemplo de la superposición de dos imágenes, SLC-off (izquierda) adquirida en el 2003 y SLC-On (derecha) adquirida en 2002(Scaramuzza, 2004).

8.2.6 Método de Clasificación Supervisada

Para el presente trabajo se utilizó el método de clasificación supervisada. El software utilizado fue el ENVI 4.7. Como primer paso se define el número de clases que se desea obtener, para este caso se utilizaron los seis paisajes de la tabla 1, cada paisaje representa una clase diferente. Se identifican y delimitan las áreas (muestras) que se consideren representativas de las distintas clases, en ellas se le indicará al software qué áreas de la imagen de las que se conoce su cobertura corresponden a las distintas categorías a las que debe asignar todos los píxeles de la imagen, las muestras se seleccionan en áreas homogéneas para cada una de las clases y son seleccionadas con valores de radianzas similares. Se aplican técnicas de agrupación (paralelepípedos, mínima distancia, distancia de Mahalanobis, máxima verosimilitud) y son utilizados los que presenten el porcentaje de precisión mas alto o un resultado más favorable según los objetivos buscados. Para el presente estudio se utilizó la clasificación de máxima probabilidad (maxlike). El clasificador evalúa la probabilidad de que un píxel

pertenezca a una de las categorías consideradas y lo clasifica en la categoría a la cual tenga mayor probabilidad de pertenecer, asume que esas probabilidades son iguales para todas las clases y que los datos tienen una distribución normal. (ENVI, 2009).

Por otro lado se tiene que considerar que la asignación de clases no siempre es perfecta y algunas clases pueden contener píxeles asignados a dos o más clases diferentes. Esto puede deberse a que algunas coberturas tienen respuestas espectrales similares, o a que el píxel en la realidad puede contener dos o más tipos de cobertura, como sucede con los píxeles de borde. Cada clase es representada en la imagen con un color diferente que puede ser modificado posteriormente.

El software despliega en una ventana de texto algunas estadísticas de la clasificación como el porcentaje que ocupa cada cobertura en la imagen clasificada, el área de la misma expresada en hectáreas, el número total de píxeles por clase, el porcentaje de precisión total y el coeficiente de Kappa.

Para la realización del análisis de clasificación de imágenes con 10 años de diferencia debido a la baja calidad de las imágenes para discernir las coberturas bentónicas se realizó una clasificación binaria que esta sujeta únicamente a la presencia o ausencia de cobertura algal. La clasificación binaria nos permite de una manera muy general observar el patrón que muestran las coberturas en conjunto a través de 10 años de diferencia y así obtener la tasa de cambio con un nivel de precisión más aceptable.

Se tomó como referencia dos clases ópticamente visibles. Las clases pertenecen a fondos con cobertura vegetal representado en las imágenes con píxeles más oscuros que corresponden a los valores de radiancia más bajos con respecto a los fondos sin cobertura vegetal en este caso arenas que están representados en la imagen con píxeles más brillantes y corresponden a los valores de radiancia más altas.

Una característica de la arena es que debido al alto nivel de brillo que presentan sus píxeles en las imágenes satelitales pueden ser utilizadas como referencia y así obtener altos niveles de precisión. (Figura 14).

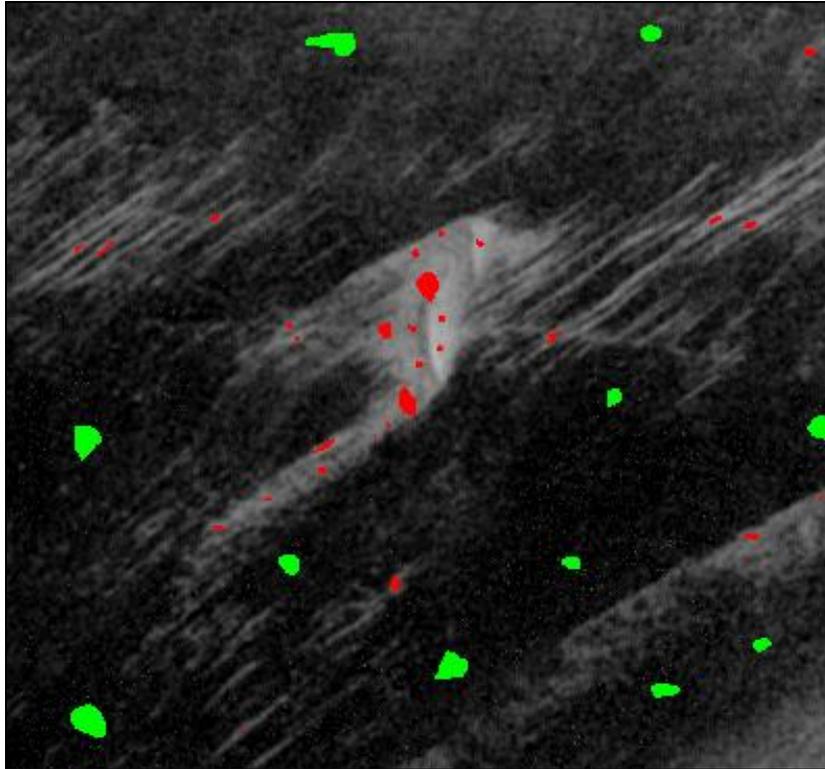


Figura 14. Fragmento amplificado de una imagen en escala de grises de la banda R en donde se muestran en color rojo las muestras representativas para la clase de cobertura vegetal y en verde las muestras representativas para la clase sin cobertura vegetal.

8.2.7 Análisis de detección de cambio

Para que el software ENVI 4.7 pueda operar y hacer el cálculo de los cambios entre un par de imágenes clasificadas, es necesario que representen la misma zona de estudio y que se hayan generado utilizando la misma técnica de clasificación.

Como primer paso se selecciona una imagen de entrada y una imagen de salida, las clases en la imagen de entrada tienen que coincidir con las imágenes de salida; la diferencia se calcula restando la imagen del estado inicial de la imagen del estado final (es decir, final - inicial), y las clases están definidas por los umbrales de cambio. Un cambio positivo identifica los píxeles que se volvieron

más brillantes (brillo del estado final es mayor que el brillo del estado inicial), mientras que un cambio negativo identifica los píxeles que se convirtieron en regulador de intensidad (brillo estado final fue menos de brillo estado inicial).

En el caso de las imágenes que presentan el patrón de bandas ausentes es necesario agregar al análisis una máscara que incluya únicamente a los píxeles deseados.

El resultado es desplegado en un documento de texto con la información estadística del análisis como el porcentaje de cambio por clase, por píxeles y área por clase. El mapa resultante de diferencias de imágenes clasificadas es un código de colores para indicar la magnitud del cambio entre las dos imágenes. Un valor de cero en la máscara indica que ningún cambio se produjo desde el inicial al estado final; valores distintos de cero indican un cambio.

8.2.8 Análisis estadísticos multivariados

Con el objetivo de observar la asociación entre las coberturas y el tipo de fondo respecto a las variables ambientales de temperatura y precipitación pluvial se realizó un análisis de Correspondencia Canónica (CCA) con el software CANOCO versión 4.5 para Windows (Ter Braak & Smilauer, 1998). El análisis de correspondencias canónico (CCA) es un método desarrollado por Ter Braak (1986) e implementado inicialmente en el programa CANOCO por el mismo autor. El análisis de correspondencia canónica restringe la ordenación de una matriz por medio de regresiones lineares múltiples con variables en una segunda matriz; en este sentido este análisis combina los conceptos de ordenación y regresión. El CCA funciona bien para conjunto de datos donde las respuestas de las variables son unimodales y donde la importancia de las variables ambientales ha sido medidas (Rougés, 2009). El CCA se utiliza para el análisis de tablas de contingencia. El primer paso es la conversión de todos los datos a datos proporcionales, a continuación se calcula una matriz de distancias (Shennan, 1997). De la matriz resultante se extraen Eigenectores por una regresión ortogonal, realizada por un valor singular de descomposición (Greenacre, 1984; Madsen, 1988). Los Eigenectores son regresiones lineales, se calculan como

variables en el conjunto de datos original. El primer Eigenvector es calculado para dar cuenta de la mayor parte de la varianza en el conjunto de datos; el segundo Eigenvector es ubicado para describir la mayor varianza del resto, y así sucesivamente. Cada Eigenvector es un eje en un sistema de coordenadas ortogonales; por lo tanto la posición de las variables en este espacio puede ser determinado por coordenadas o por las puntuaciones de los Eigenectores. La puntuación del primer Eigenvector es el valor explicativo más alto comparado con la puntuación de los otros Eigenectores. En el CCA, la variable independiente se establece. El análisis optimiza el resultado de la variación correlacionada con la variable independiente. La mayoría de los modelos que utilizan técnicas de ordenación para predecir la distribución de especies o comunidades están basados en el Análisis de Correspondencia Canónica (CCA). (Ter Braak 1988).

9 RESULTADOS

De acuerdo a la calidad de cada una de las imágenes se aplicaron las correcciones correspondientes, comenzando con la corrección atmosférica para eliminar nubes, vapor de agua y sombras. Posteriormente se aplicó la corrección de la columna de agua y remoción del brillo del agua y finalmente se aplicó el filtro adaptativo del tipo gamma que homogenizo las imágenes.

Para la generación de nuevas imágenes a través de la técnica de mosaico, se utilizaron imágenes sin el patrón de bandas ausentes con la propósito de completar los pixeles ausentes en las imágenes que presentaron este patrón. Sin embargo, debido a que casi la totalidad de las imágenes para nuestra zona de estudio presentan altos porcentajes de cobertura de nubes y baja o nula visibilidad del fondo marino, la técnica no generó resultados aceptables, ya que se obtuvieron imágenes que al ser combinadas dieron como resultado nuevas imágenes de baja calidad en las que se conserva el patrón de distribución espacial pero difieren de manera significativa el valor de la radiancia de los pixeles entre ambas imágenes.(Figura 15).

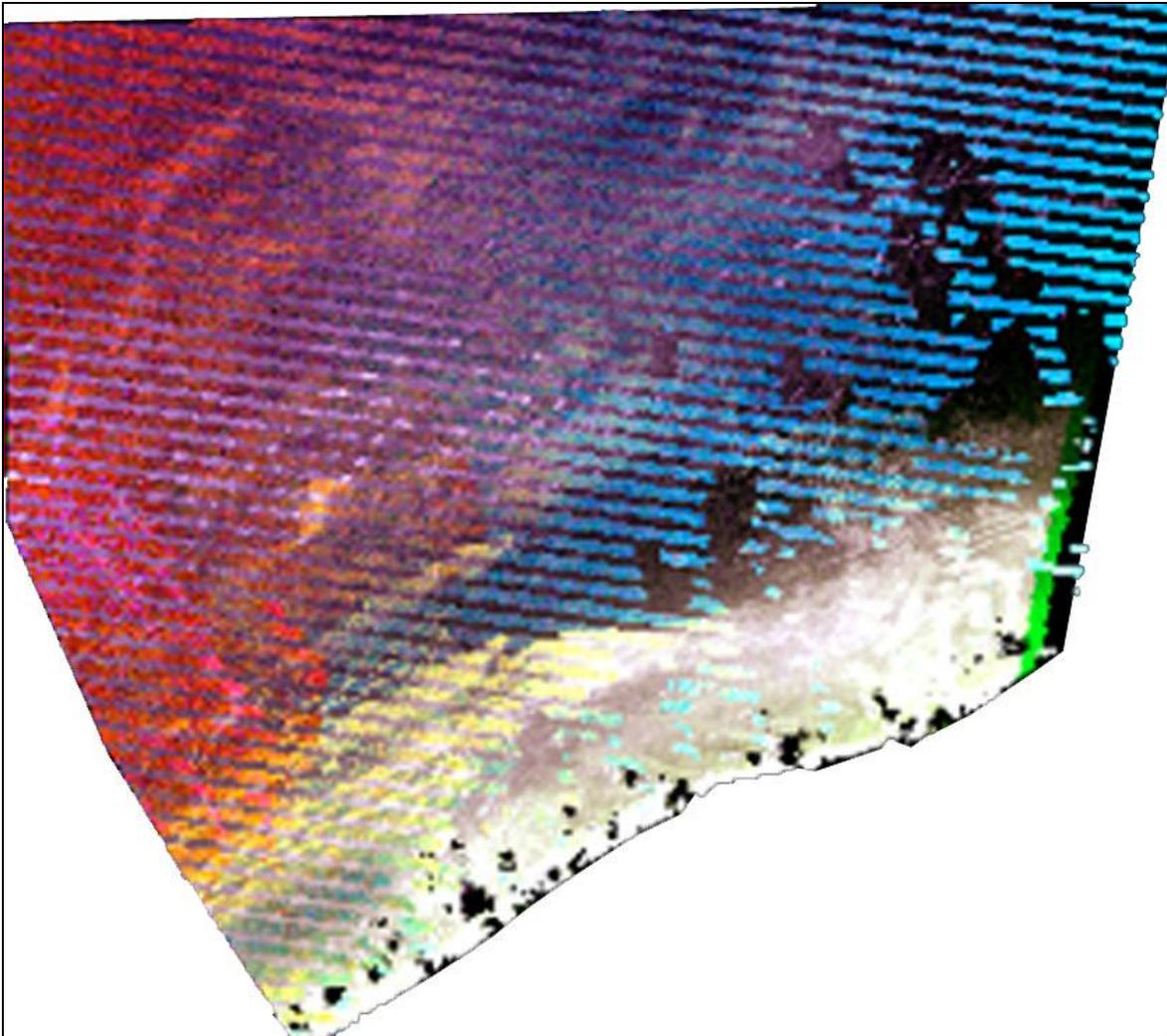


Figura 15. Mosaico de las imágenes que corresponden a la temporada de lluvias, en el fondo se muestra la imagen para el año 2002 sin patrón de bandas ausentes y por arriba de esta la imagen correspondiente al año 2010 con patrón de bandas ausentes.

Se obtuvieron imágenes del área de estudio sin correcciones para cada una de las temporadas (Figuras 16, 18, y 20) y a partir de estas se aplicó las correcciones necesarias y se generaron nuevas imágenes para cada una de las temporadas para su posterior procesamiento (figura 17, 29 y 21).

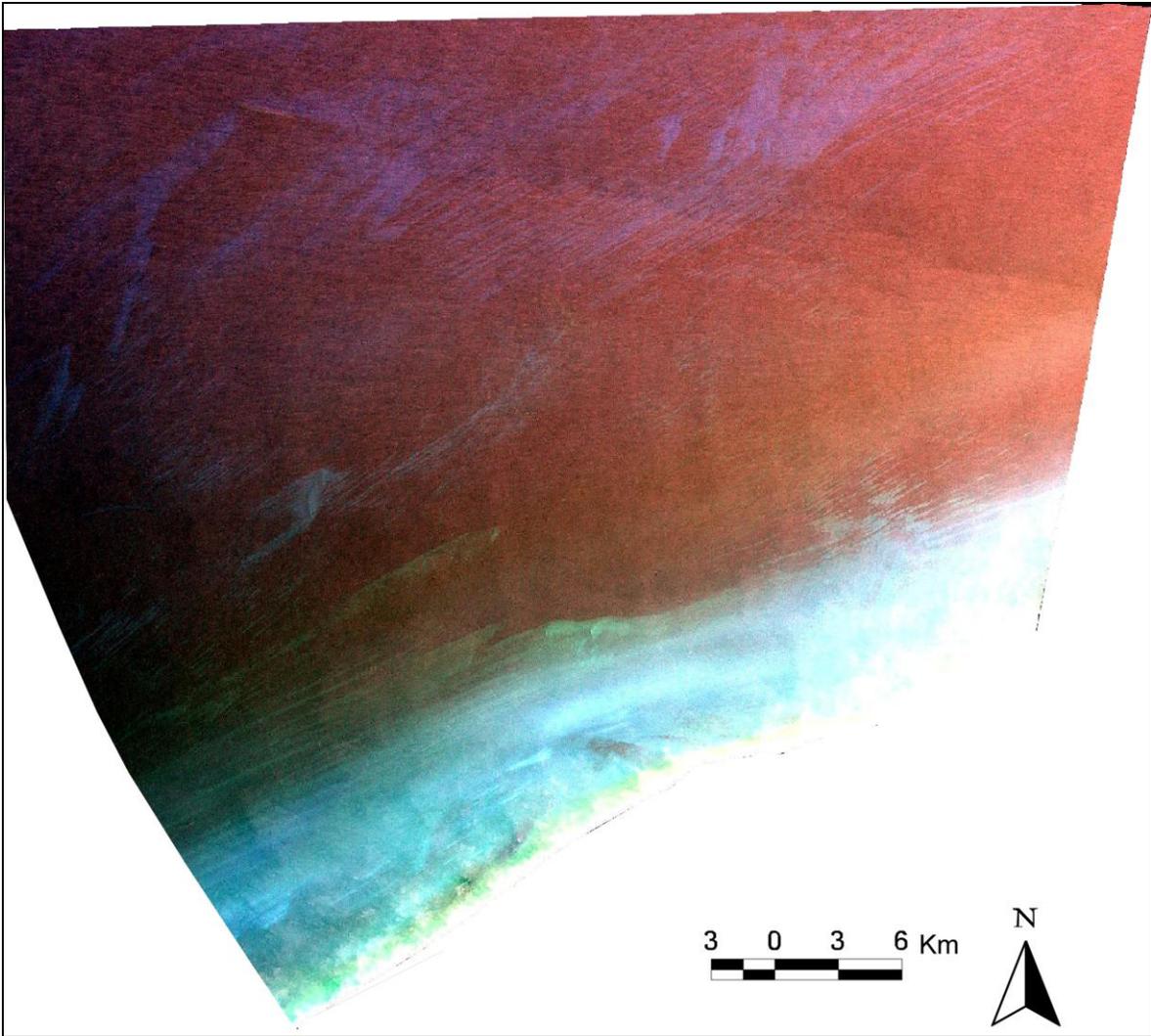


Figura 16. Imagen RGB de la temporada de secas del año 2000, la imagen no presenta ninguna corrección.

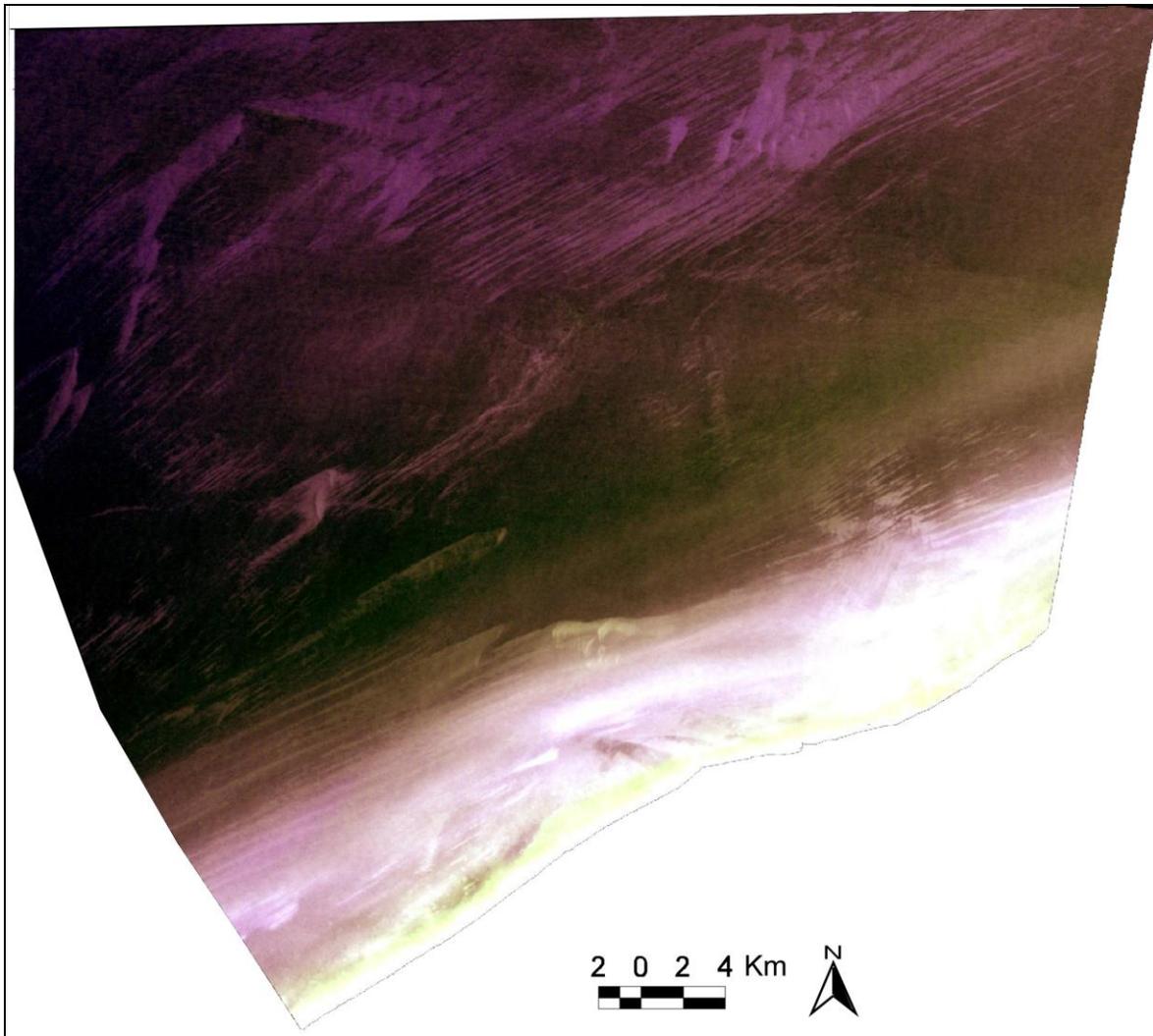


Figura 17. Imagen RGB de la temporada de secas del año 2000. La imagen presenta corrección atmosférica, remoción del efecto de la columna de agua y aplicación de filtro adaptativo gamma. Las imágenes corregidas nos permiten tener mejor visibilidad del fondo marino y obtener un porcentaje de precisión más alto en la clasificación de la imagen.

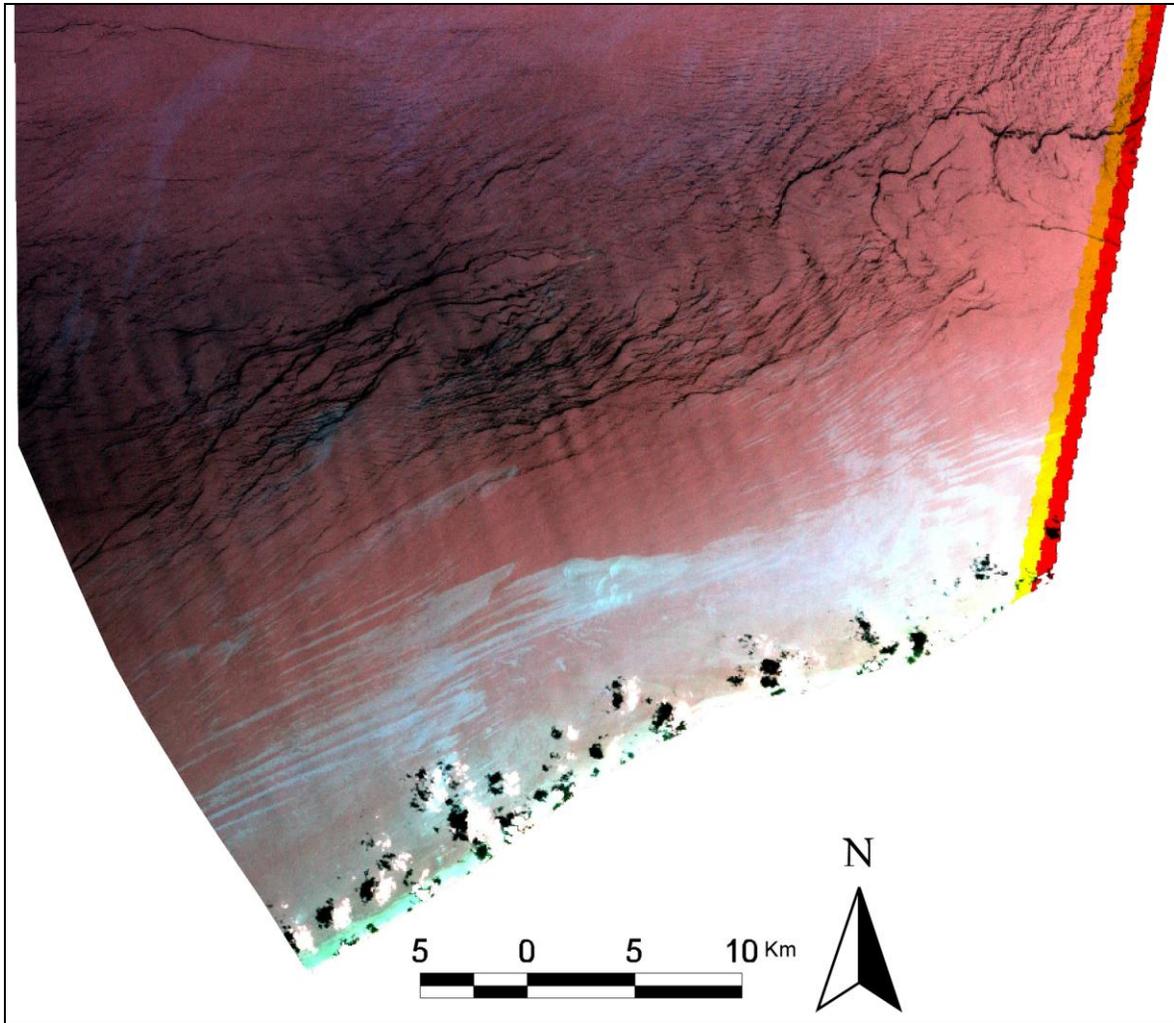


Figura 18. Imagen RGB de la temporada de lluvias del año 2002, la imagen no presenta ninguna corrección.

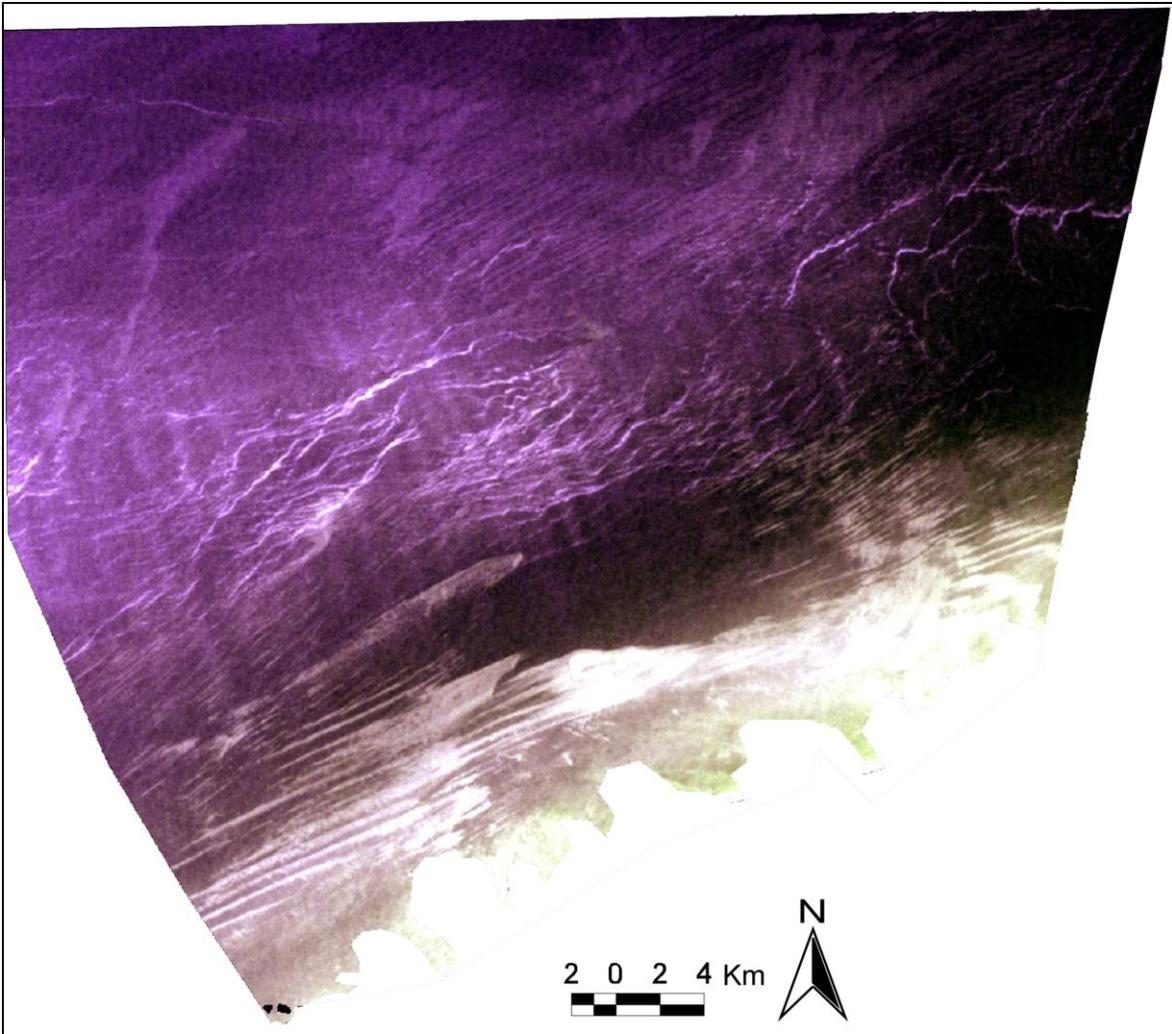


Figura 19. Imagen RGB de la temporada de lluvias del año 2002. La imagen presenta corrección atmosférica, remoción del efecto de la columna de agua, enmascaramiento de nubes y sombras y aplicación de filtro adaptativo gamma.

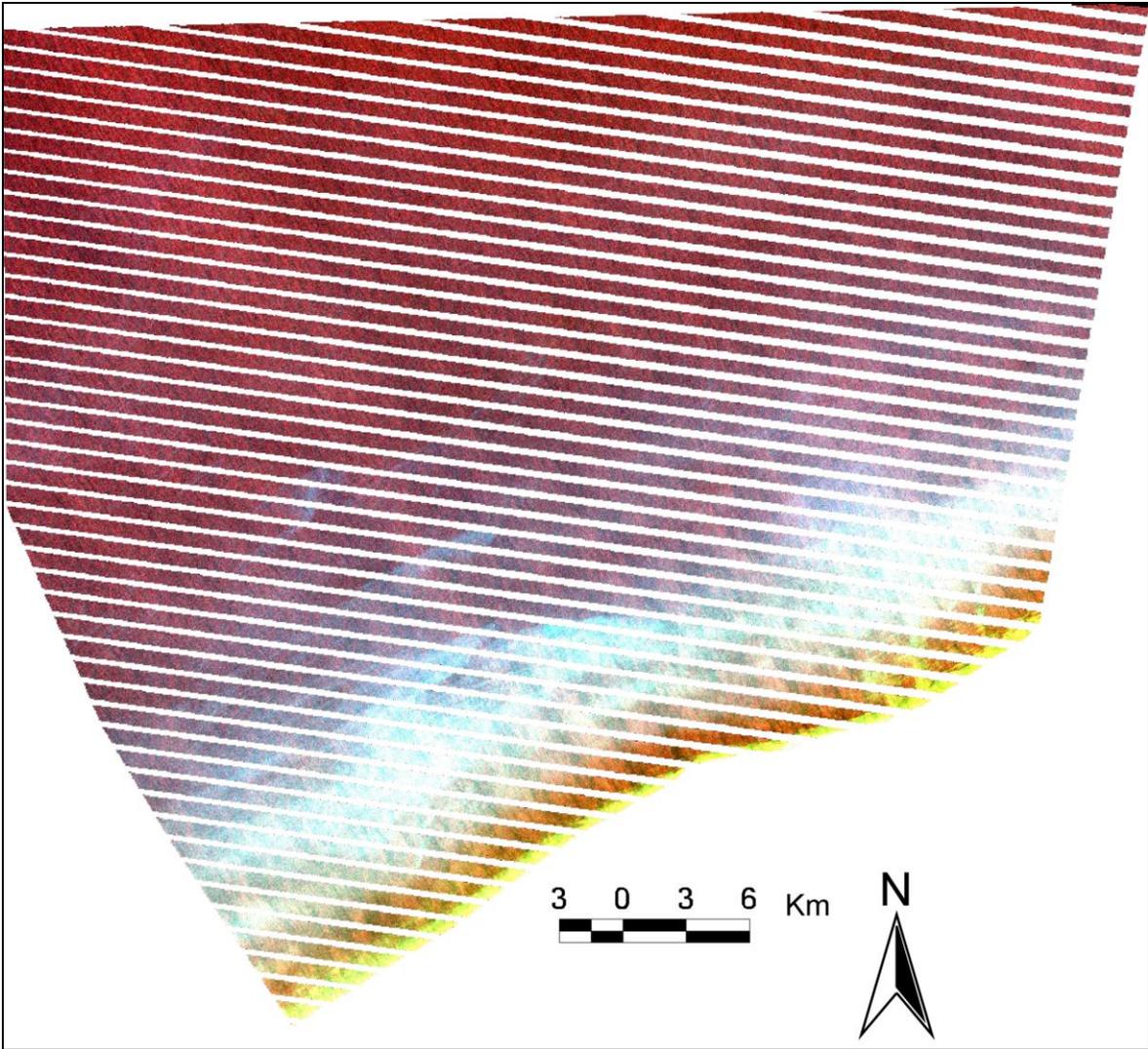


Figura 20. Imagen RGB de la temporada de nortes del año 2009, la imagen no presenta ninguna corrección.

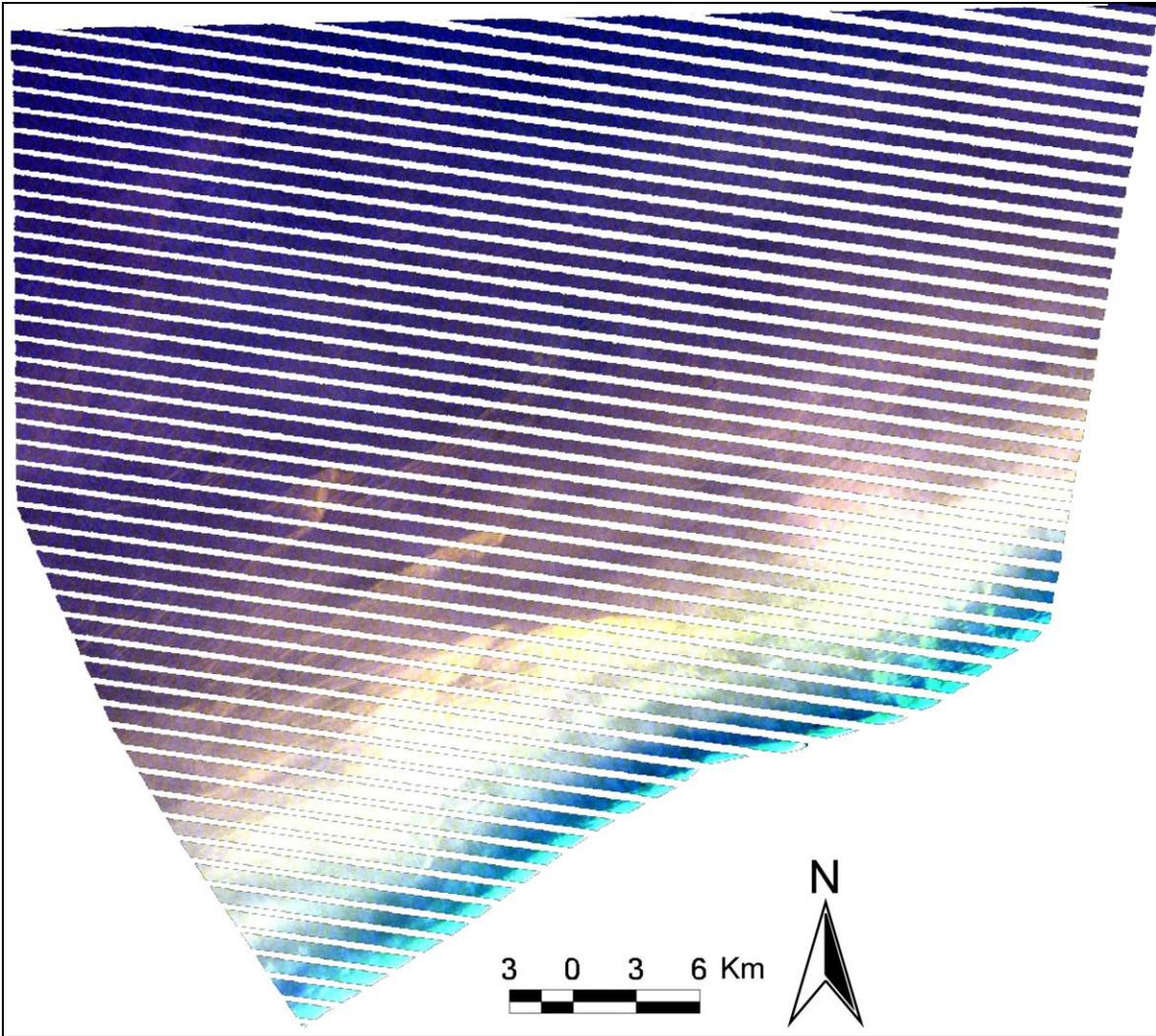


Figura 21. Imagen RGB de la temporada de nortes del año 2009. La imagen presenta corrección atmosférica, corrección del brillo de las olas y aplicación de filtro adaptativo gamma.

Para realizar el análisis de imágenes con 10 años de diferencia, las imágenes disponibles para la temporada de lluvias, así como las imágenes disponibles para temporada de nortes del año 2010, presentaron alto porcentaje de nubes y nula visibilidad del fondo marino, lo cual podría afectar de manera significativa la clasificación supervisada y el análisis de detección de cambio en las imágenes. Por lo tanto, para evitar sesgo en los análisis, se recurrió a la selección de un fragmento representativo del área de estudio donde el fondo se observara con mayor nitidez a través de realización de una máscara. La realización de una máscara consiste en la delimitación y delineación de objetos o zonas en una región de interés (ROI). En este caso se seleccionó una zona homogénea donde se observara fácilmente el fondo marino, libre de nubes y evitando el patrón de líneas ausentes. Las imágenes disponibles del catalogo Landsat con estas características corresponden a la temporada de secas abril del año 2000 y mayo 2010.

Con la aplicación de esta máscara en las imagen del año 2000 y 2010 se generaron dos nuevas imágenes: secas del año 2000 (Figura 22) y secas del año 2010 (Figura 23). A partir de estas imágenes se realizó clasificación supervisada, análisis de detección de cambio y se generaron mapas de distribución en una escala decadal de los paisajes submarinos de Sisal.(Figura 27 y 28).

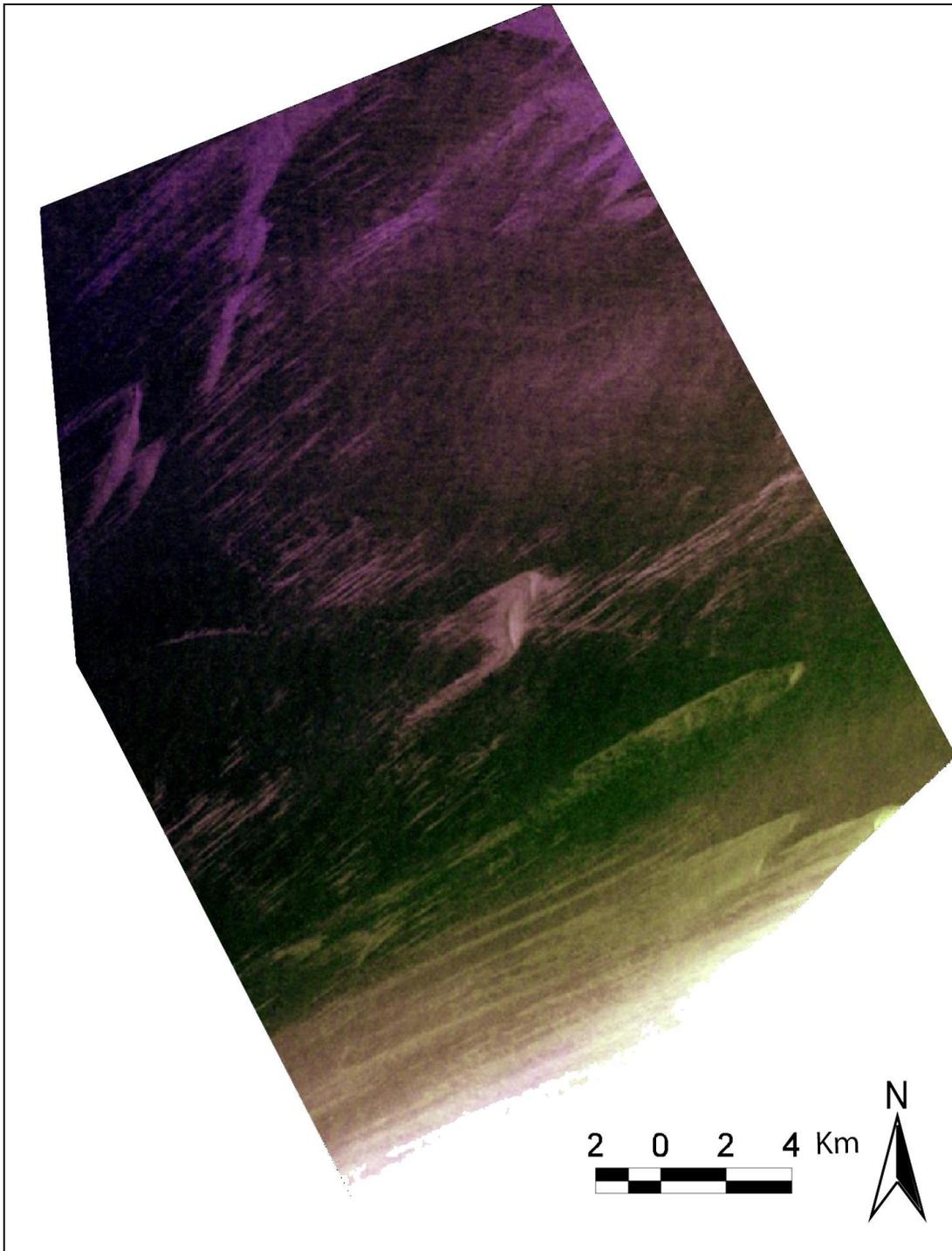


Figura 22. Fragmento del área de estudio. Imagen RGB de la temporada de secas, abril del año 2000. La imagen presenta corrección atmosférica, corrección del brillo de las olas y aplicación de filtro adaptativo gamma.

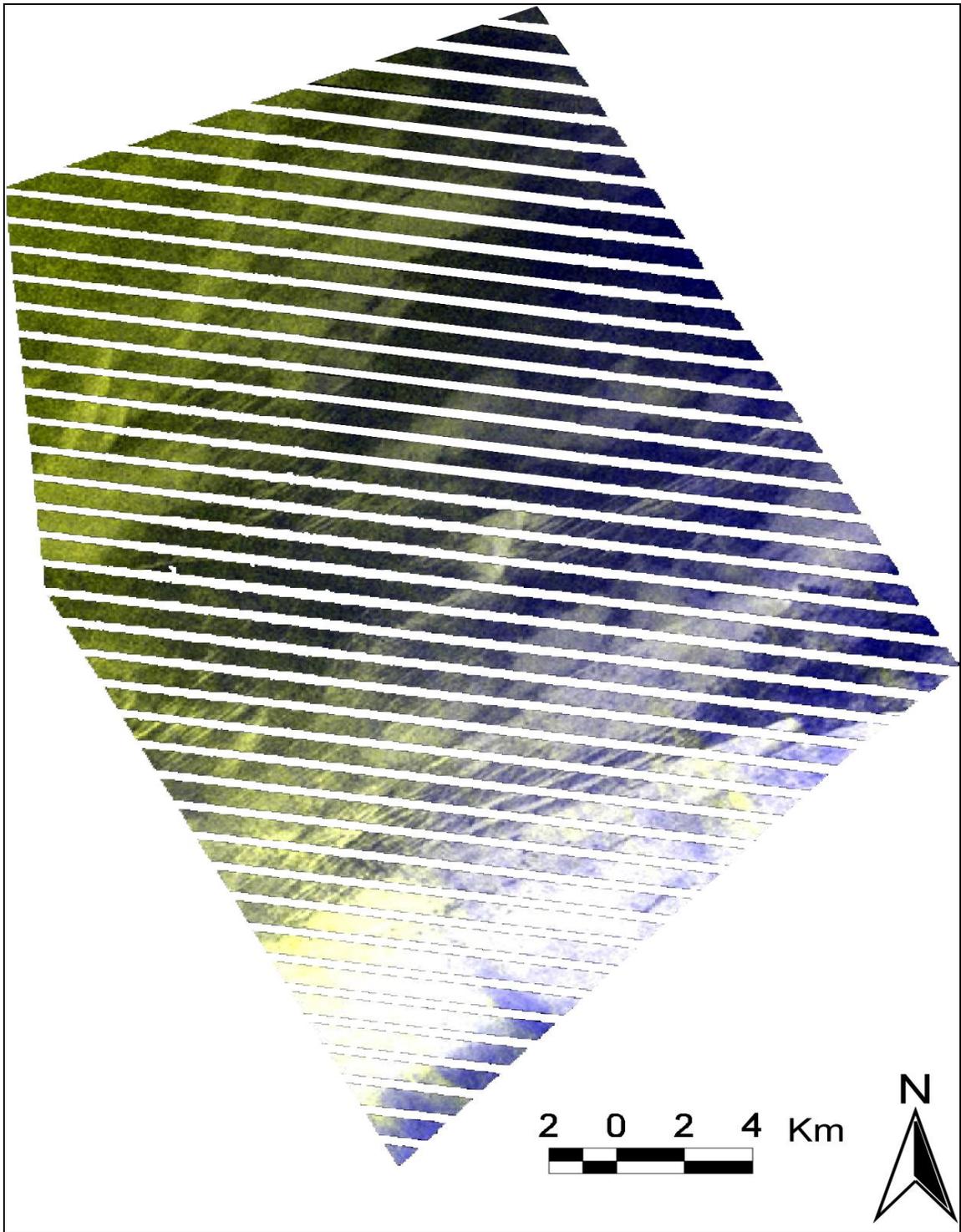


Figura 23. Fragmento del área de estudio. Imagen RGB de la temporada de secas, mayo del año 2010. La imagen presenta corrección atmosférica, corrección del brillo de las olas y aplicación de filtro adaptativo gamma.

Después de obtener las imágenes corregidas para cada una de las temporadas, se aplicó un análisis de clasificación supervisada a cada una (secas, lluvias y nortes). Las clases para los análisis entre temporadas corresponden a los paisajes que se describen en la Tabla 1. Se utilizaron y compararon las siguientes técnicas de clasificación supervisada entre temporadas: paralelepípedos con una precisión general para la temporada de secas del 28.26%, lluvias con 14.59 % y nortes con 19.25%; mínima distancia 19.79%, 25.15% y 29.39%; distancia de Mahalanobis con 25.19%, 32.07% y 0.68% y máxima probabilidad 66.62%, 39.37% y 31.40%, siendo la técnica de máxima probabilidad la que presentó mayor porcentaje de precisión general en todas las imágenes para cada una de las temporadas.

A partir de la aplicación de la clasificación supervisada para cada una de las temporadas se realizaron mapas de distribución de los paisajes submarinos para cada temporada y se muestran en las Figuras 24, 25, y 26. El mapa de distribución para la temporada de secas muestra una distribución de los paisajes con parches más compactos y con dominancia del paisaje 1 que corresponde a algas rojas con parches de algas verdes sobre arena donde predominan las algas rojas y representa el 56.93% de la cobertura bentónica total, el paisaje menos representativo en términos de porcentaje de cobertura corresponde al paisaje 5 con 5.70% de la cobertura total. Para la temporada de lluvias el paisaje predominante fue el 5 que corresponde algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando con 42.55% de la cobertura total y el menos representativo corresponde al paisaje 1 algas rojas con parches de algas verdes sobre arena con 5.14%. El paisaje dominante en la temporada de nortes corresponde a la clase 4 algas verdes sobre arena con 48.33% y el menos representativo corresponde al paisaje 6 algas filamentosas con 1.28% de la cobertura total y se pueden observar en las Tablas 4, 5 y 6.

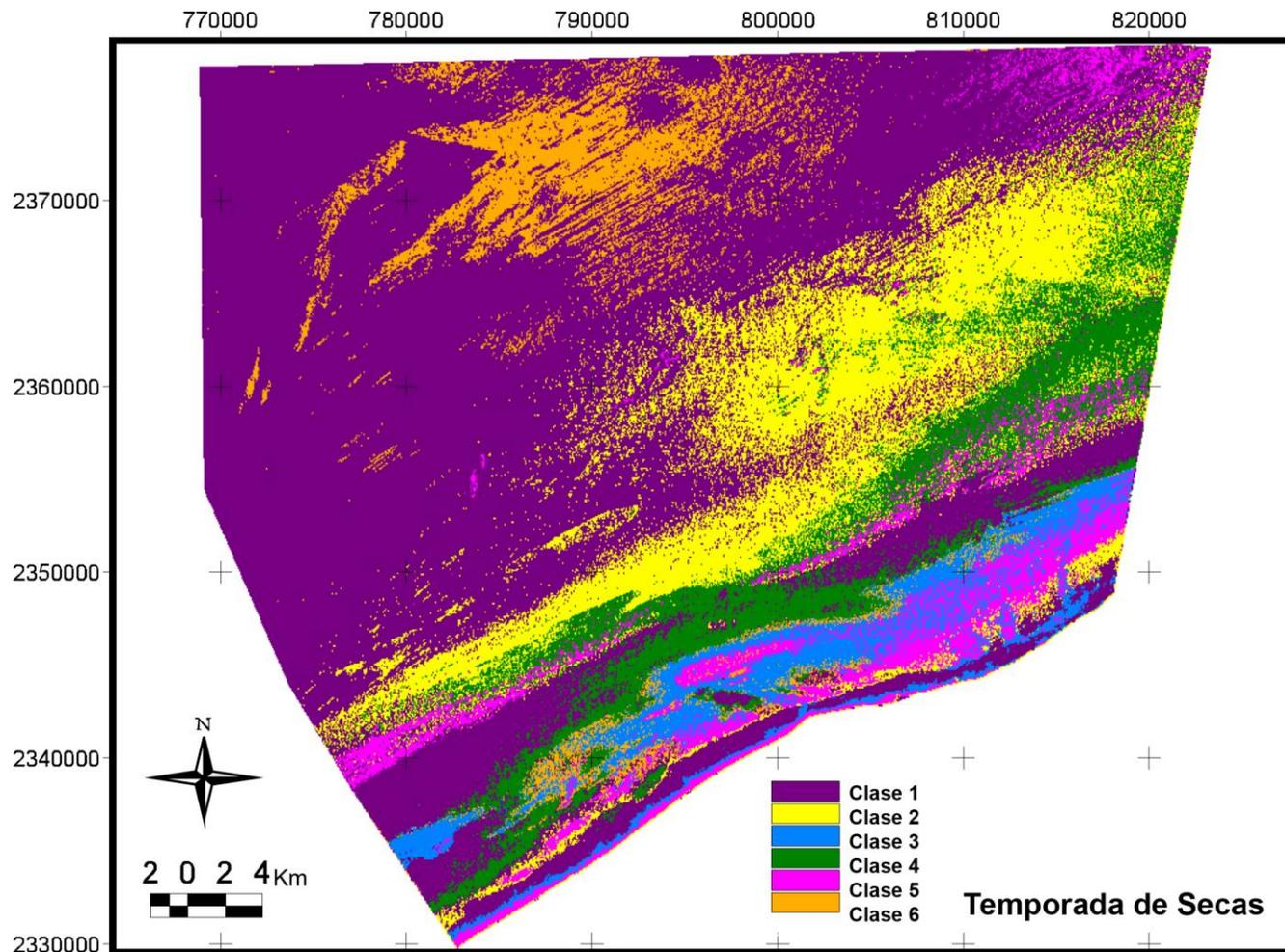


Figura 24. Mapa de distribución generado por el método de clasificación supervisada de la temporada de secas del año 2000. Se obtuvo una precisión general de 66.62%, coeficiente de Kappa ($K^{\wedge} = 0.5668$). Morado (clase1) representada por algas rojas con parches de algas verdes sobre arena, amarillo (clase2) praderas de algas mixtas dominadas por algas filamentosas/pardas sobre arena, azul (clase 3) Arenal, verde (clase4) algas verdes sobre arena, Rosa (clase5) algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando, anaranjado (clase 6) algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena.

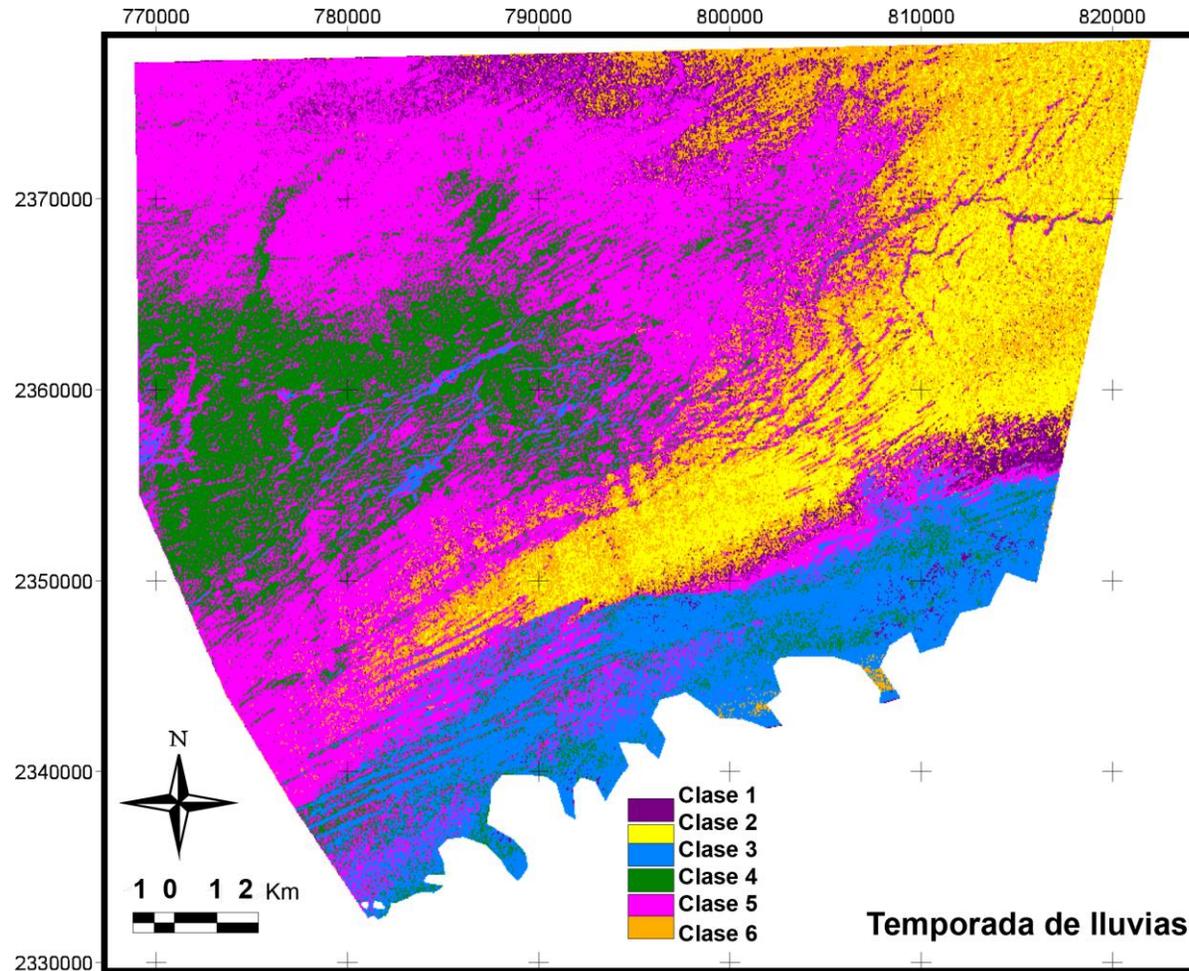


Figura 25. Mapa distribución generado por el método de clasificación supervisada de la temporada de lluvias del año 2002. Se obtuvo una precisión general de 38.84%, coeficiente de Kappa ($K^{\wedge} = 0.2305$). Morado (clase1) representada por algas rojas con parches de algas verdes sobre arena, amarillo (clase2) praderas de algas mixtas dominadas por algas filamentosas/pardas sobre arena, azul (clase 3) Arenal, verde (clase4) algas verdes sobre arena, Rosa (clase5) algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando, anaranjado (clase 6) algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena.

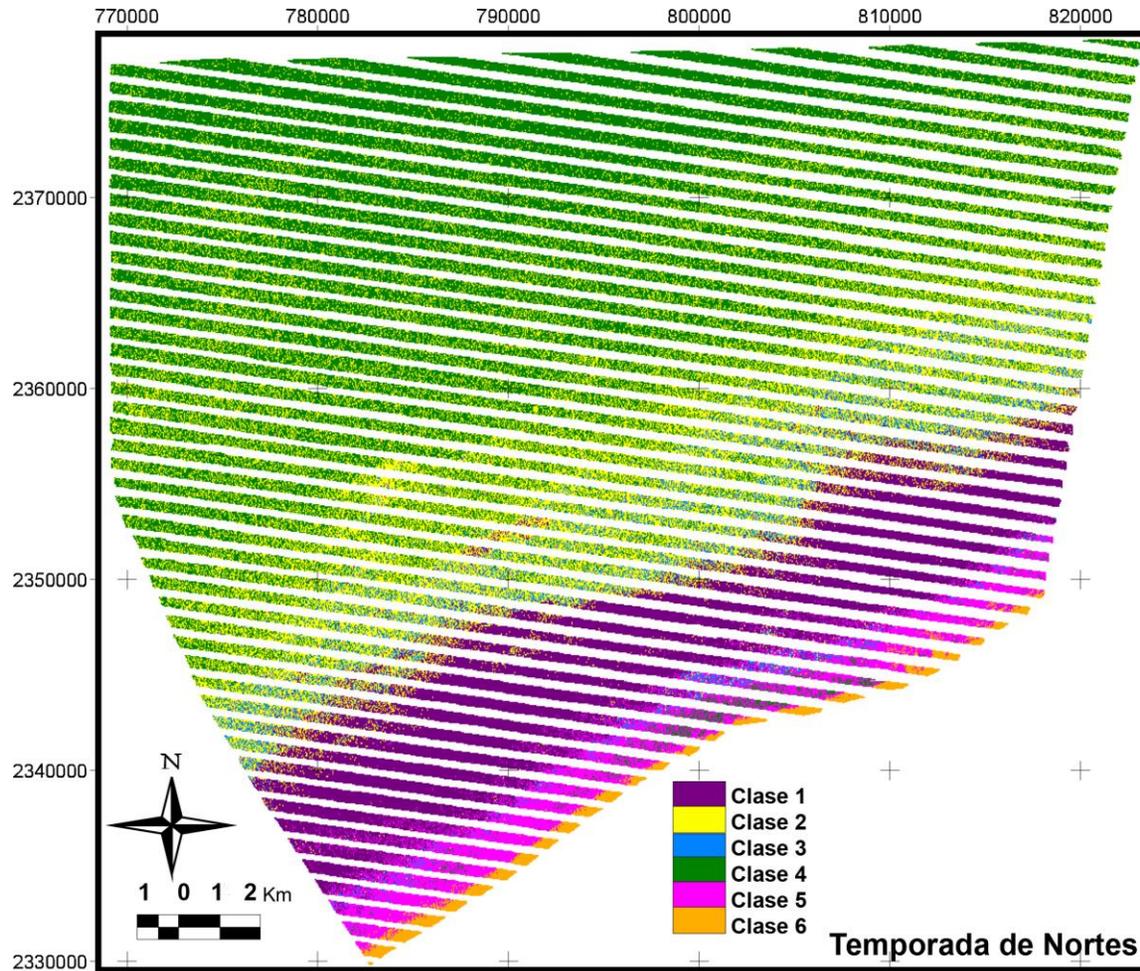


Figura 26. Mapa de distribución generado por el método de clasificación supervisada de la temporada de nortes del año 2009. Se obtuvo una precisión general 32.95%, coeficiente de Kappa ($K^{\wedge} = 0.1728$). Morado (clase1) representada por algas rojas con parches de algas verdes sobre arena, amarillo (clase2) praderas de algas mixtas dominadas por algas filamentosas/pardas sobre arena, azul (clase 3) Arenal, verde (clase4) algas verdes sobre arena, Rosa (clase 5) algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando, anaranjado (clase 6) algas filamentosas/pardas con parches de algas verdes sobre arena.

Tabla 4. Porcentaje en kilómetros cuadrados para la temporada de secas del año 2000

Paisaje	Color	%
Paisaje 1	Morado	56.93
Paisaje 2	Amarillo	16.64
Paisaje 3	Azul	4.36
Paisaje 4	Verde	9.92
Paisaje 5	Rosa	5.70
Paisaje 6	Anaranjado	6.46

Tabla 5. Porcentaje en kilómetros cuadrados para la temporada de lluvias del año 2002

Paisaje	Color	%
Paisaje 1	Morado	5.14
Paisaje 2	Amarillo	12.75
Paisaje 3	Azul	11.88
Paisaje 4	Verde	17.58
Paisaje 5	Rosa	42.55
Paisaje 6	Anaranjado	12.55

Tabla 6. Porcentaje en kilómetros cuadrados para la temporada de nortes del año 2009

Paisaje	Color	%
Paisaje 1	Morado	15.316
Paisaje 2	Amarillo	25.343
Paisaje 3	Azul	4.0662
Paisaje 4	Verde	48.339
Paisaje 5	Rosa	5.6539
Paisaje 6	Anaranjado	1.2809

Los análisis de clasificación supervisada se aplicaron a imágenes con 10 años de diferencia. Se utilizaron y compararon las siguientes técnicas de clasificación supervisada: paralelepípedos con una precisión general para el año 2000 del 66.21% y para el año 2010 del 67.13%, mínima distancia para el año 2000 del 85.57% y para el año 2010 del 78.10%, distancia de Mahalanobis para el año 2000 del 76.53 % y para el año 2010 del 77.06% y máxima probabilidad para el año 2000 del 87.30% y para el año 2010 del 85.10%, siendo la técnica de máxima probabilidad la que presentó mayor porcentaje de precisión general en ambas imágenes. A partir de la aplicación de la clasificación supervisada en imágenes con 10 años de diferencia se realizaron mapas de distribución de los paisajes submarinos y se muestran en las Figuras 27 y 28.

El mapa para el año 2000 presenta un porcentaje de fondo con cobertura vegetal del 76.95% y para el año 2010 de 64.19%, los fondos sin cobertura vegetal presentan 23.05% en el año 2000 y 36.81% para el año 2010 y se muestran en las Tablas 7 y 8.

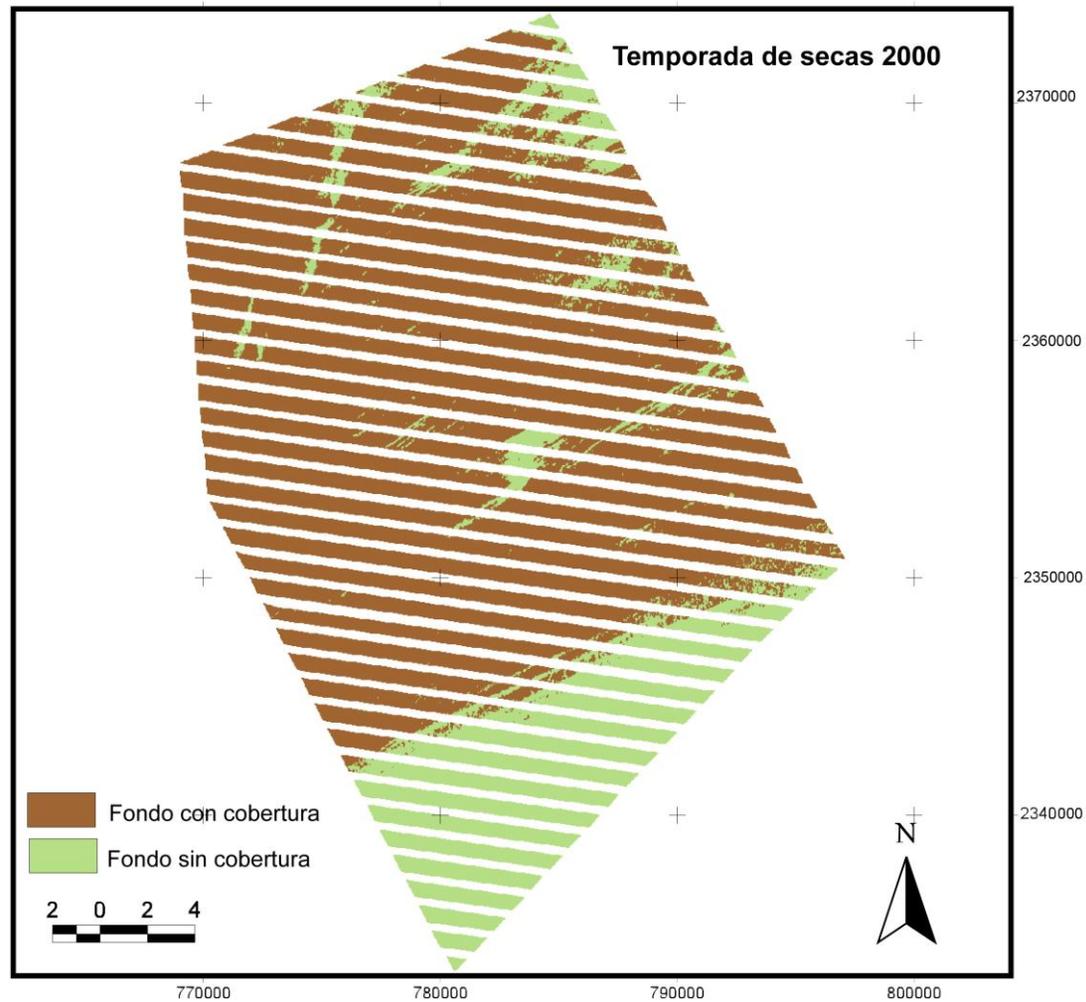


Figura 27 .Mapa de distribución generado por el método de clasificación supervisada de la temporada de secas del año 2000. Se obtuvo una precisión total 82.63%, coeficiente de Kappa ($K^{\wedge} = 0.4962$). Verde (clase1) representada por fondo sin cobertura y Café (clase 2) fondo con cobertura vegetal.

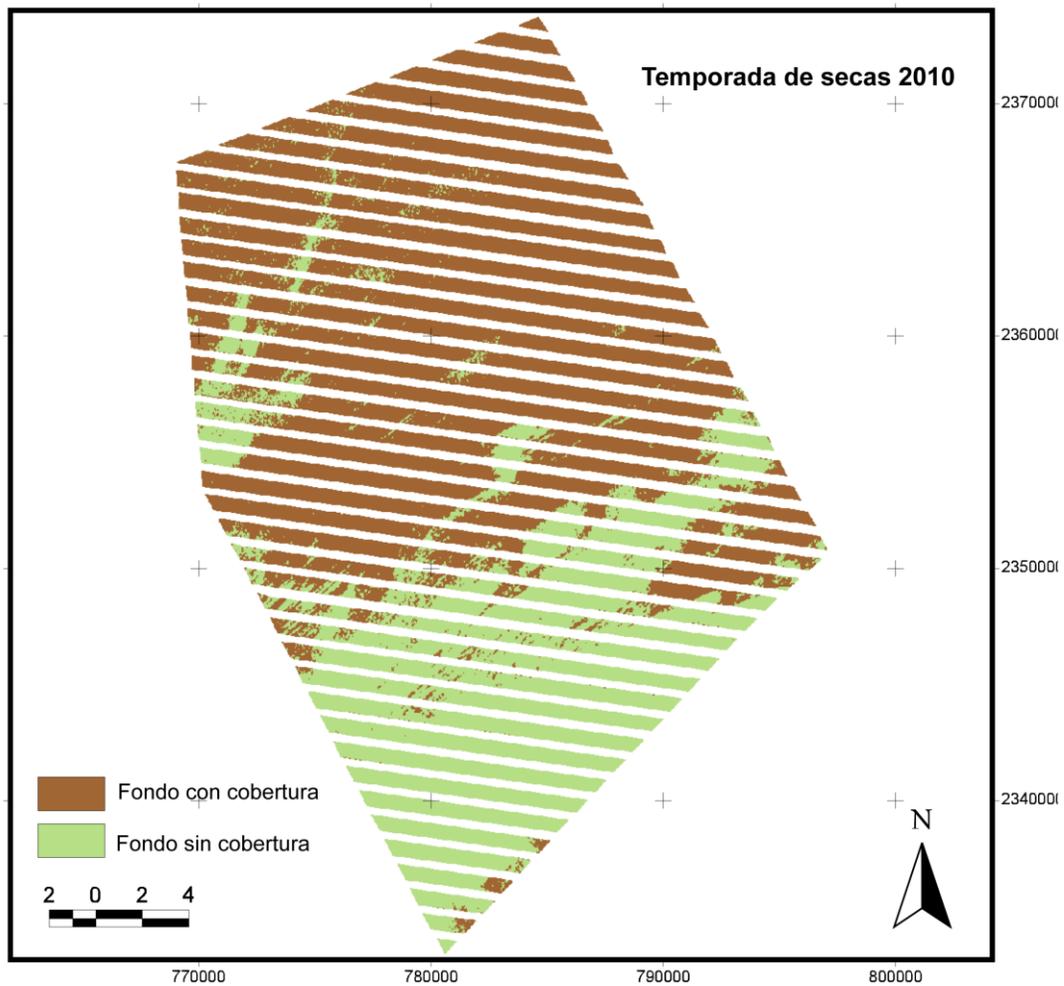


Figura 28. Mapa de distribución generado por el método de clasificación supervisada de la temporada de secas del año 2010. Se obtuvo una precisión total 73.69%, coeficiente de Kappa ($K^{\wedge} = 0.4607$). Verde (clase1) representada por fondo sin cobertura y Café (clase 2) fondo con cobertura vegetal.

Tabla 7. Porcentajes totales y áreas en kilómetros cuadrados de los fondos con y sin cobertura en los mapas de distribución de la temporada de secas del año 2000

Paisaje	Color	Área en Km²	%
Paisaje 1	café	286.91	76.95%
Paisaje 2	verde	85.91	23.05%

Tabla 8. Porcentajes totales y áreas en kilómetros cuadrados de los fondos con y sin cobertura en los mapas de distribución de la temporada de secas del año 2010

Paisaje	Color	Área en Km²	%
Paisaje 1	café	239.35	64.19%
Paisaje 2	verde	133.35	36.81%

Los análisis de detección de cambio se realizaron por temporadas (secas 2000, lluvias 2002 y nortes 2010). A partir de los mapas de distribución, el número total de clases introducidas en el análisis fue de seis. Los análisis se realizaron en el siguiente orden para el análisis entre temporadas: secas vs. lluvias, lluvias vs. nortes.

En general la máxima tasa de cambio se presentó en la temporada de nortes que demostró pérdida de cobertura vegetal en todos los paisajes con excepción del paisaje 2 respecto a la temporada de secas y lluvias.

El análisis de cambio de la escena inicial secas vs. escena final lluvias muestra que las clases que mostraron una tasa de cambio negativa corresponden a las clases 1 y 2 (Figuras 29 a y 29b) con -91.53 y -37.27% respectivamente, las clases 3 y 4 (Figuras 30 a y 30 b), 5 y 6 (Figura 31 a y 31 b) con 41.10, 95.58, 81.12, 97.17% respectivamente presentan una tasa de cambio positiva, la clase 5 algas rojas con parches de algas verdes sobre sedimento blando presenta el porcentaje de cambio mas significativo y se puede observar en las tablas de porcentajes totales del mapa de distribución para la temporada de lluvias (Tabla

9). La clase 1 se conservó en la imagen final con un 4.97% el resto que corresponde al 95.02% se transformó a la clase 2 con 4.38%, clase 3 con 6.36%, clase 4 con 22.88%, clase 5 con 47.05 y clase 6 con 10.12%.

Para la escena inicial lluvias vs. escena final nortes se obtuvo que las clases que presentaron una tasa de cambio negativas corresponde a la clase 3 (Figura 33 a), 5 y 6 (Figuras 34 a y 34 b) con un -80.59, -91.81 y -94.33% respectivamente. Las clases 1, 2 (Figuras 32 a y 32 b), y 4 (Figura 33 b) con un 72.84, 32.53 y 71.01% respectivamente, presentan una tasa de cambio positiva, siendo la clase 4 algas verdes sobre arena la que presenta el porcentaje de cambio más significativo y se puede observar en las tablas de porcentajes totales del mapa de distribución para la temporada de nortes (tabla 10), siendo esta clase la que presenta el mayor porcentaje de cobertura en el mapa con 48.33%. La clase 4 se conservó en la imagen final con un 36.37%, el resto que corresponde al 63.62% y se transformo a la clase 1 con 4.57%, clase 2 con 15.99%, clase 3 con 0.34% y clase 5 con 0.57%.

Los paisajes con algas verdes y algas rojas predominaron en todas las temporadas lo cual puede estar relacionado con las estructuras de fijación de estos grupos. Esto se pudo observar con los mapas de distribución de cada una de las temporadas donde para la temporada de secas el paisaje 1 con 56.93% de la cobertura total disminuye a un 15.31% en la temporada de nortes.

Cabe señalar que la altura y compactación del dosel de algas entre la temporada de nortes y la temporada de secas muestra diferencias significativas. La temporada de secas el dosel presenta mayor altura, abundancia y diversidad algal. En la temporada de nortes el dosel disminuye casi en su totalidad.

Tabla 9. Porcentajes de detección de cambio por clase entre la temporada de secas-lluvias, las columnas representan a los pixeles analizados en la imagen inicial y las filas a los pixeles analizados en la imagen final. En azul se muestra el porcentaje que se conservó en la imagen final y en rojo la tasa de cambio para cada clase.

Clase	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
CL1	4.97	4.57	1.10	5.081	4.46	6.60
CL2	4.38	32.64	0	20.53	8.14	0.04
CL3	6.36	1.54	58.89	27.73	28.21	9.99
CL4	22.88	3.77	6.68	4.41	3.01	12.68
CL5	47.05	23.32	7.04	14.19	18.87	63.56
CL6	10.12	27.35	0.24	13.49	8.42	2.82
Cambios clase	95.02	67.35	41.10	95.58	81.12	97.17
Tasa de cambio	-91.53	-37.27	163.46	55.08	573.20	89.62

Tabla 10. Porcentajes de detección de cambio por clase entre la temporada lluvias-nortes, las columnas representan a los pixeles analizados en la imagen inicial y las filas a los pixeles analizados en la imagen final. En azul se muestra el porcentaje que se conservo en la imagen final y en rojo la tasa de cambio para cada clase.

Clase	CL1	CL2	CL3	CL4	CL5	CL6
CL1	5.34	0.42	38.9	4.57	5.84	1.32
CL2	11.13	23.72	2.17	15.99	14.44	19.13
CL3	2.61	6.43	0.96	0.34	1.45	4.62
CL4	32.76	18.46	1.95	36.37	35.76	24.68
CL5	0.308	0.10	7.46	0.57	0.2	0.28
CL6	0	0	0.25	0	0	0
Cambios clase	95.65	76.27	99.04	63.62	99.78	100
Tasa de cambio	72.84	32.53	-80.59	71.01	-91.81	-94.33

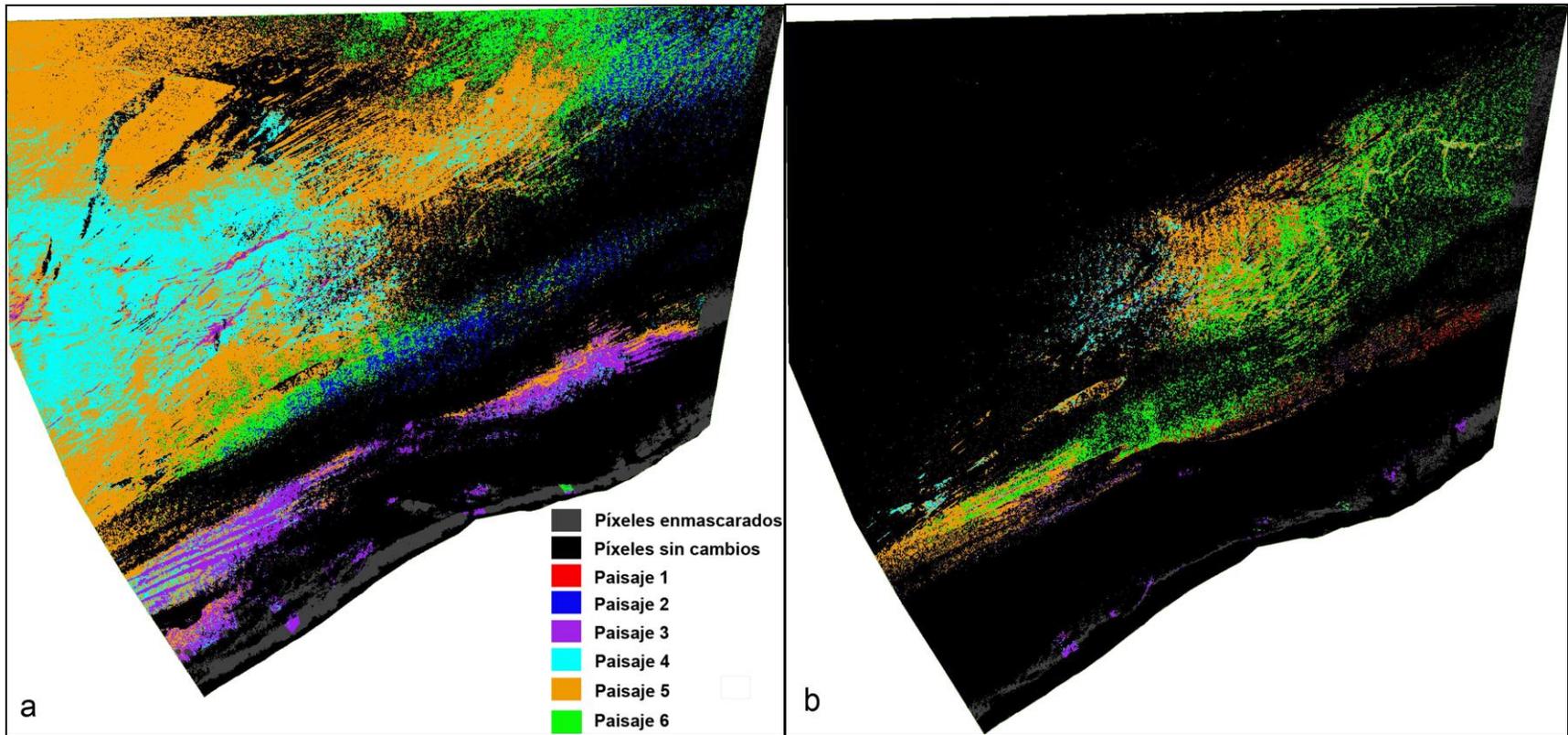


Figura 29. Imagen de salida del análisis de detección de cambio entre secas y lluvias, en la derecha se muestra los cambios que presentó el paisaje 1 y a la izquierda los cambios que presentó el paisaje 2. Los píxeles en negro en las imágenes no demuestran ningún cambio de paisaje, mientras que los píxeles a colores indican cambio de clase.

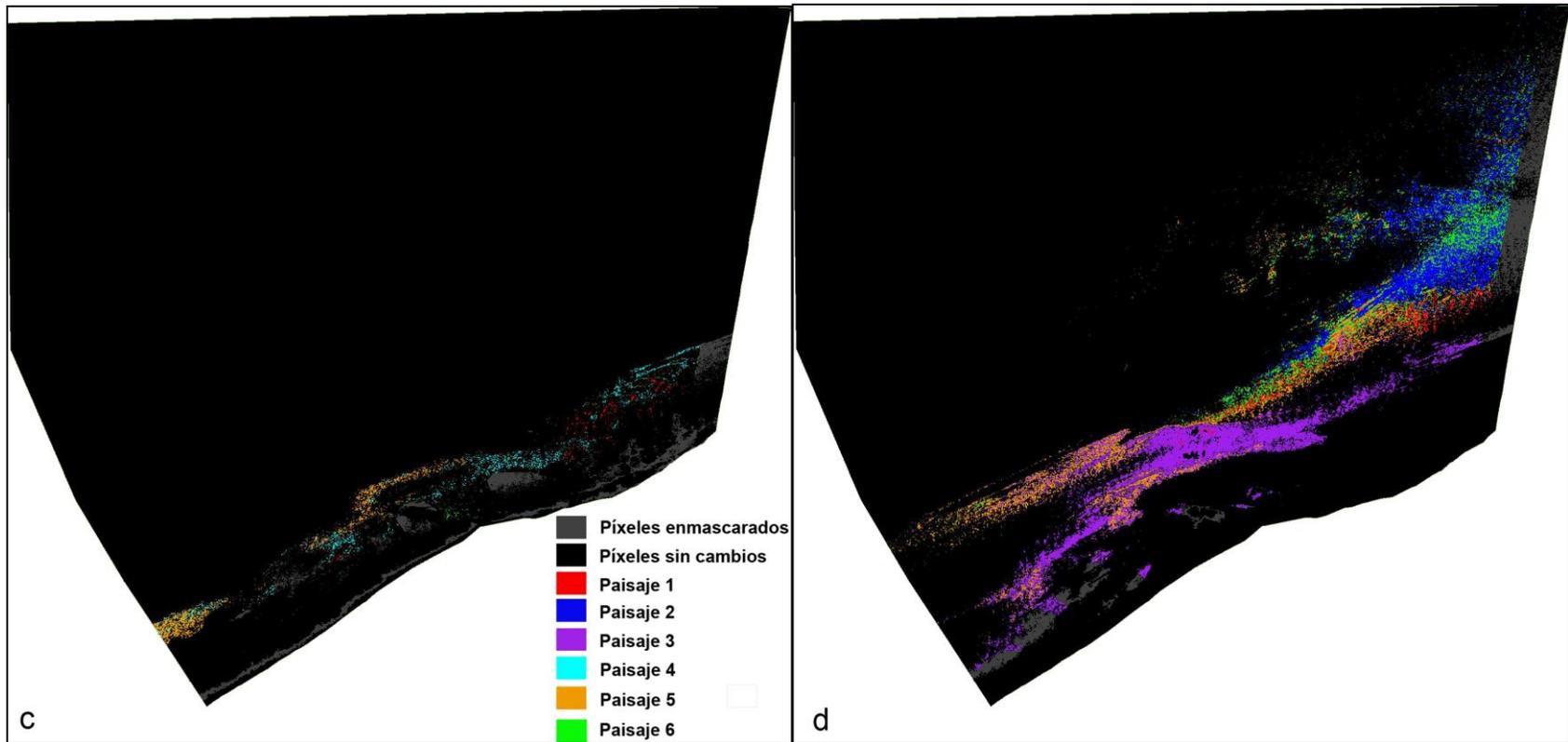


Figura 30. Imagen de salida del análisis de detección de cambio entre secas y lluvias, en la derecha se muestra los cambios que presentó el paisaje 3 y a la izquierda los cambios que presentó el paisaje 4.

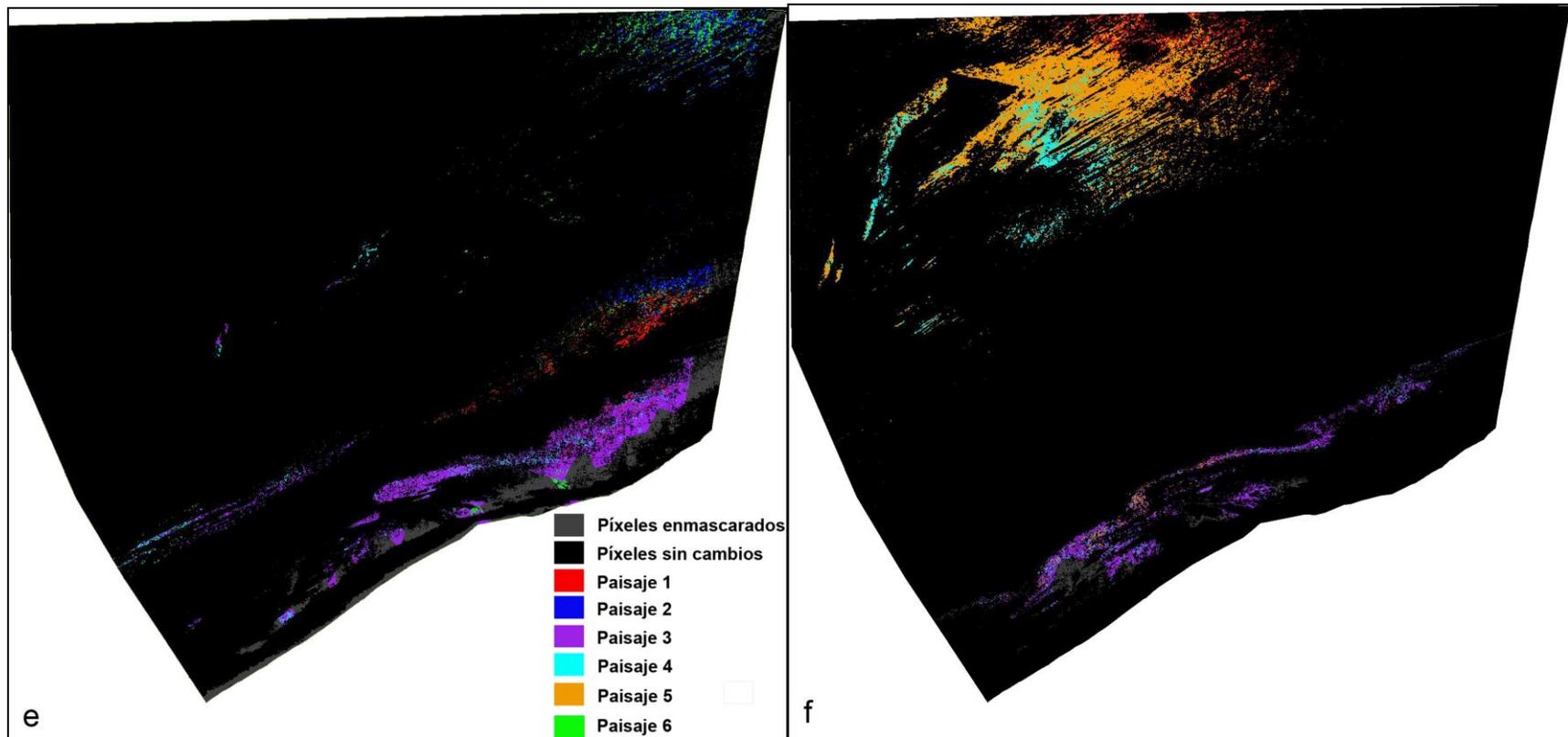


Figura 31. Imagen de salida del análisis de detección de cambio entre secas y lluvias, en la derecha se muestra los cambios que presentó el paisaje 5 y a la izquierda los cambios que presentó el paisaje 6.

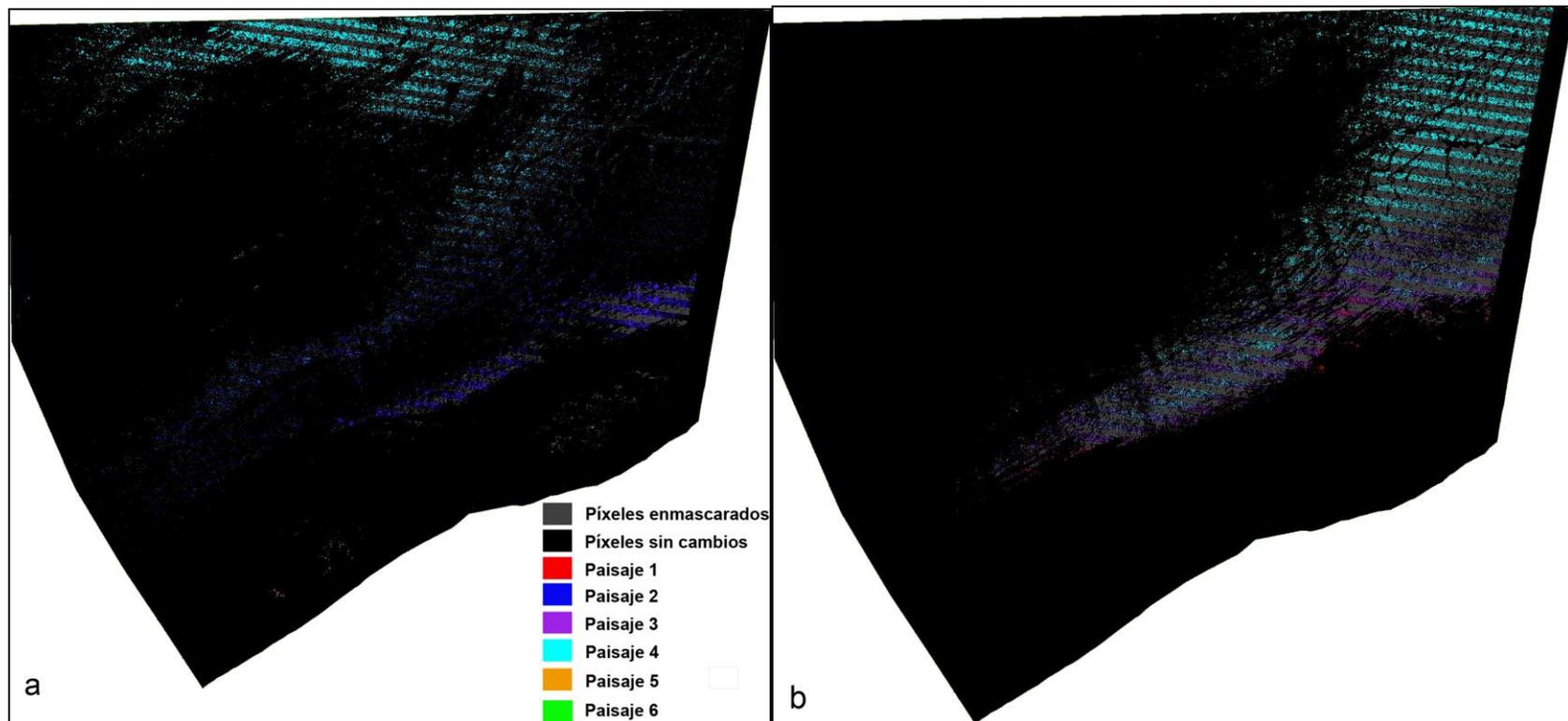


Figura 32. Imagen de salida del análisis de detección de cambio entre lluvias y nortes, en la derecha se muestra los cambios que presentó el paisaje 1 y a la izquierda los cambios que presentó el paisaje 2. Los píxeles en negro en las imágenes no representan ningún cambio de paisaje, mientras que los píxeles a colores indican cambio de clase.

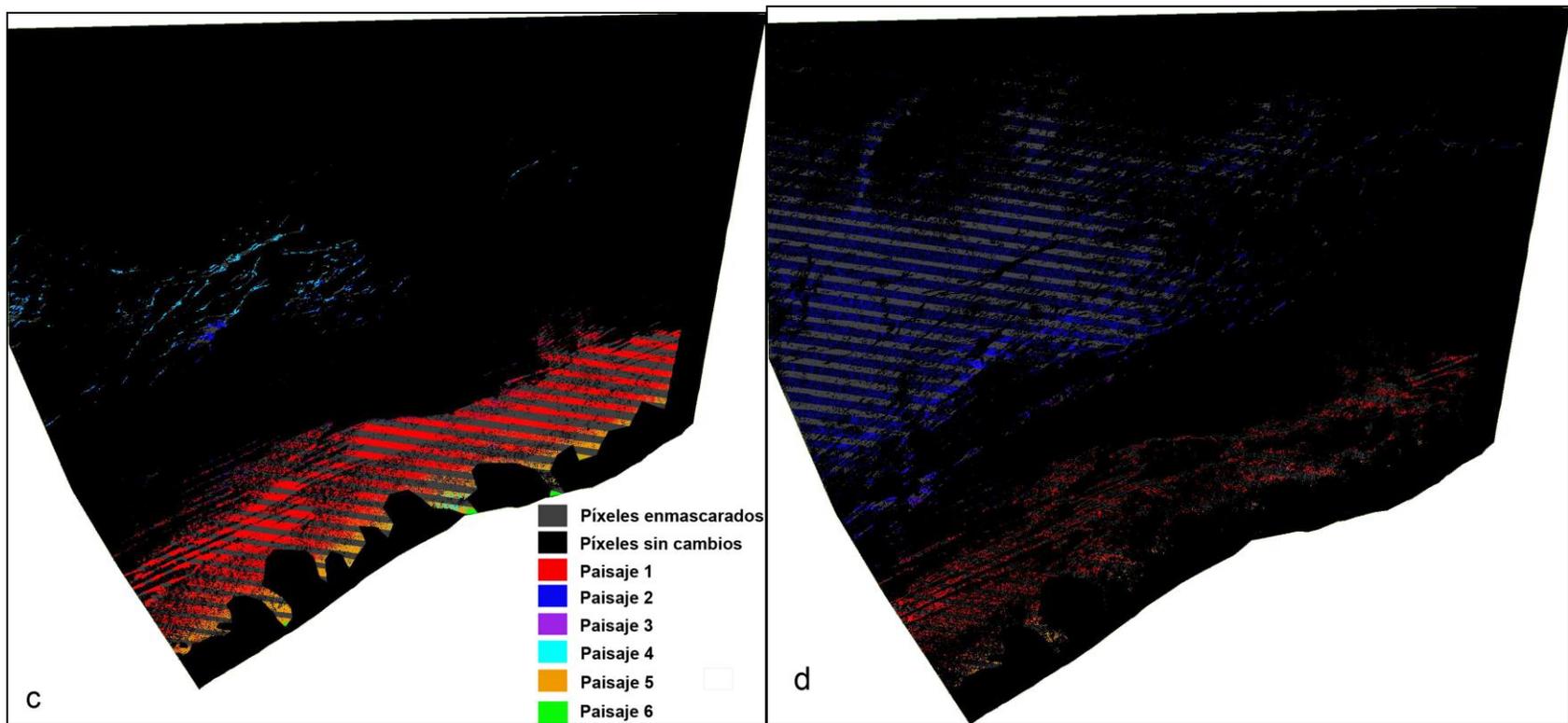


Figura 33. Imagen de salida del análisis de detección de cambio entre lluvias y nortes, en la derecha se muestra los cambios que presentó el paisaje 3 y a la izquierda los cambios que presentó el paisaje 4.

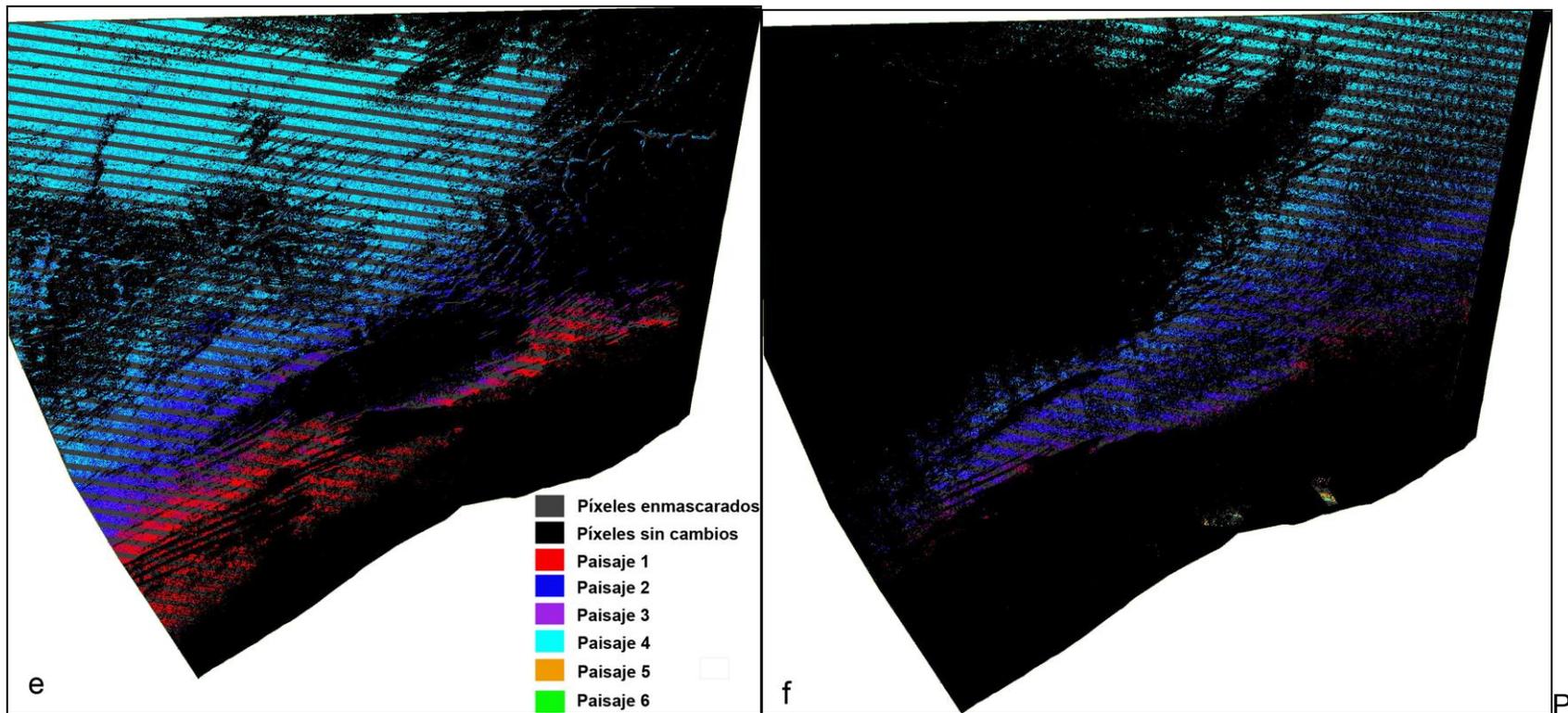


Figura 34. Imagen de salida del análisis de detección de cambio entre lluvias y nortes, en la derecha se muestra los cambios que presentó el paisaje 5 y a la izquierda los cambios que presentó el paisaje.

Para la detección de cambio con imágenes con 10 años de diferencia se realizó el análisis con la escena inicial secas 2000 vs. escena final secas 2010 y se obtuvo que la clase 1 que corresponde a fondo sin cobertura vegetal presentó una tasa de cambio positiva de 9.072 lo que indica un aumento en el fondo sin cobertura para el año 2010. Por su parte la clase 2 que corresponde a fondo con cobertura vegetal presenta una tasa de cambio negativa de 4.58 lo que indica que cerca del 13% del fondo con cobertura vegetal del año 2000 cambió a fondo sin cobertura vegetal para el año 2010 lo que corresponde a una tasa de cambio poco significativa a través de 10 años.

Tabla 10. Porcentajes de detección de cambio por clase entre la temporada secas 2000-secas 2010, las columnas representan a los píxeles analizados en la imagen inicial y las filas a los píxeles analizados en la imagen final.

Clase	CL1 rojo	CL2 verde
CL1	50.49	69.87
CL2	49.51	30.12
Cambio de clase	50.49	30.12
Tasa de cambio	9.072	-4.588

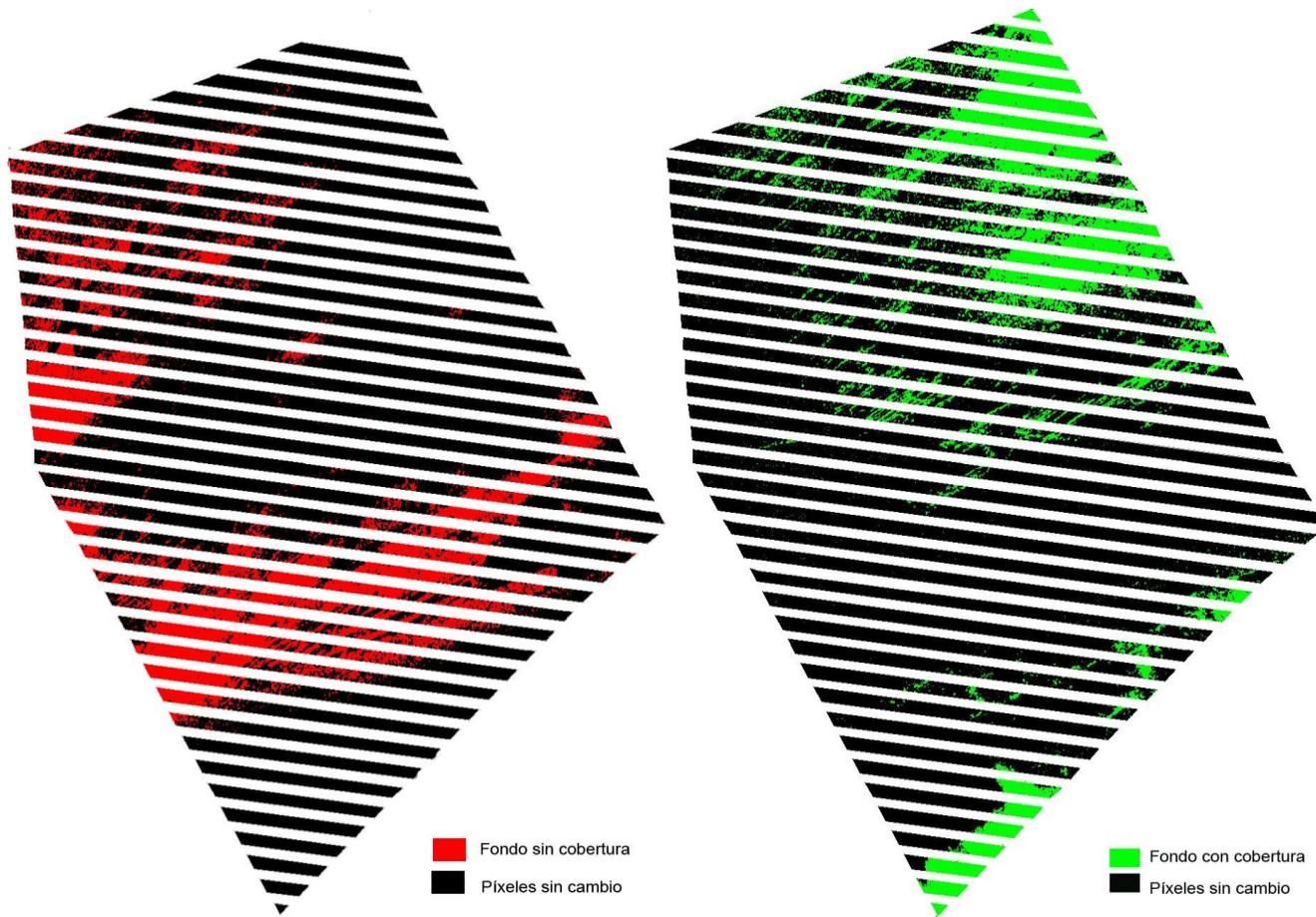


Figura 35. Imagen de salida del análisis de detección de cambio con imágenes con 10 años de diferencia, en la izquierda se muestran los cambios que presentó el paisaje 1 y a la derecha los cambios el paisaje 2.

6.3.1 Asociación de los componentes bióticos y abióticos con variables ambientales.

Se exploró la relación de los componentes bióticos (tipo de cobertura) y abióticos (tipo de fondo) con las variables ambientales (temperatura y precipitación pluvial) a través de un CCA, y se obtuvo (CCA; eigenvalues=0.161; $F= 1.55$; $p=0.170$). El Análisis muestra los componentes bióticos y abióticos asociados a dos ejes principales, precipitación y temperatura y asociados a estos ejes tenemos las temporadas climáticas (secas, lluvias y nortes). La mayoría de los componentes se encuentran cerca del centro del cuadrante lo que indica que están presentes para las tres temporadas, las arenas gruesas, corales y esponjas están altamente asociadas a la temporada de nortes y poseen a su vez una asociación negativa pero no excluyente con el eje de precipitación y temperatura.

Los componentes de arcillas/lodos y algas rojas están asociados a la temporada de secas y poseen a su vez una asociación negativa con los ejes de temperatura y precipitación. Los ejes de precipitación y temperatura tienen una alta asociación al resto de los componentes bióticos algas calcáreas, pastos, algas verdes, algas filamentosas/pardas, octocorales y zoántidos, pero poseen a su vez una asociación negativa con la temporada de nortes y secas (Figura 36).

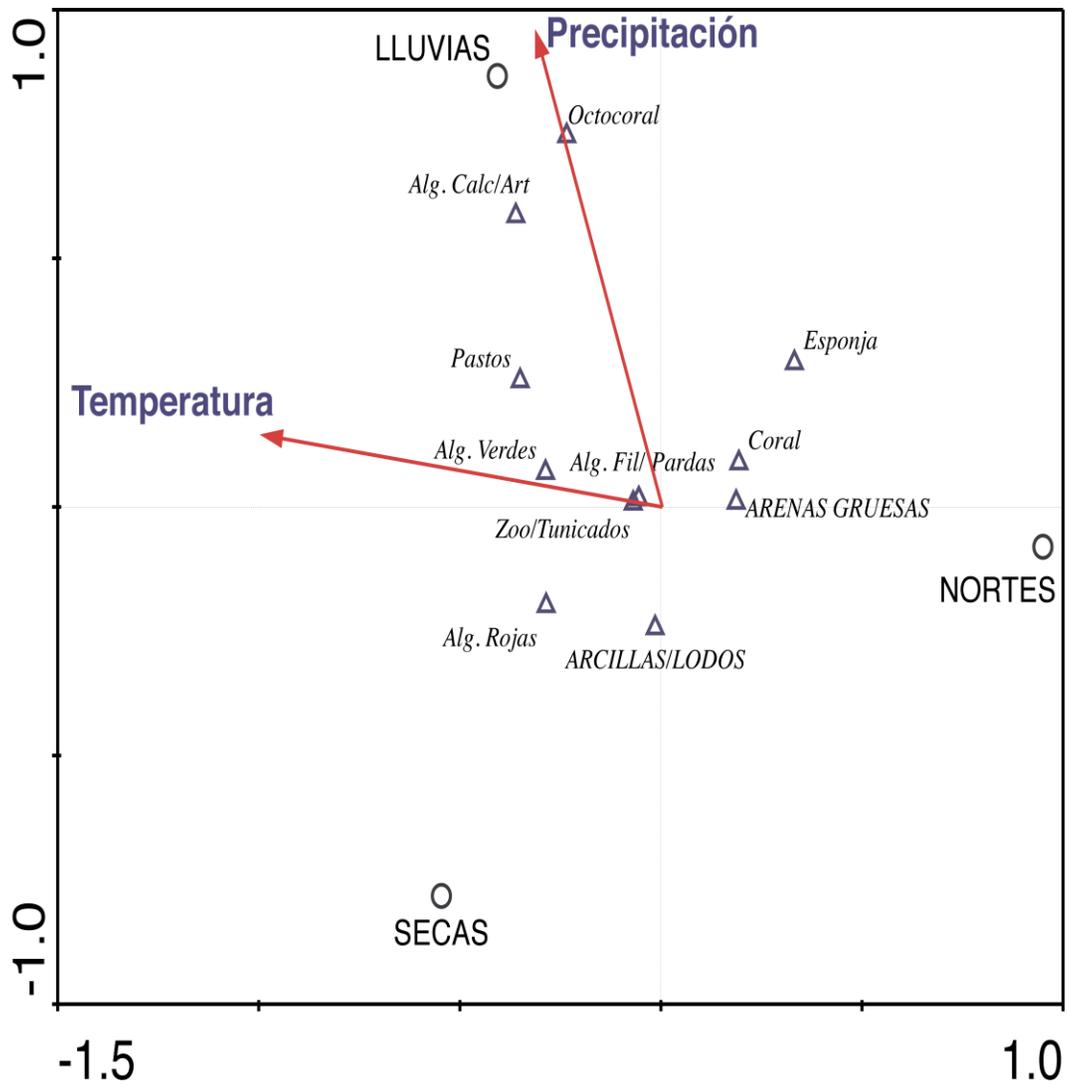
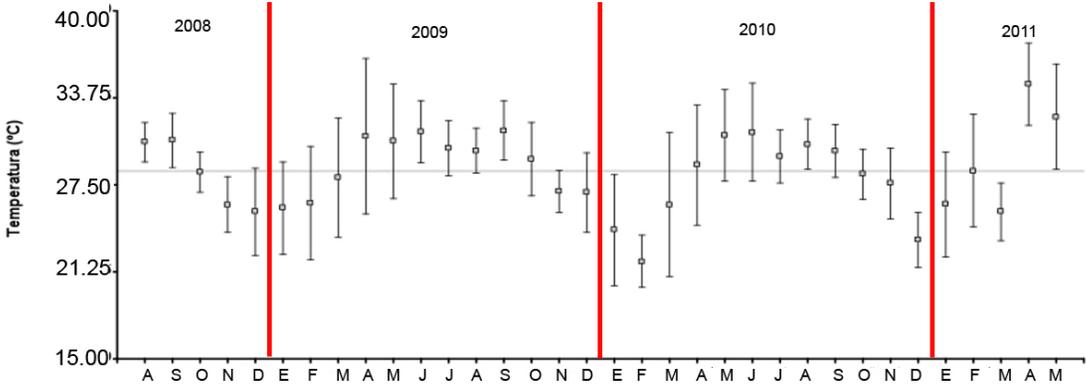
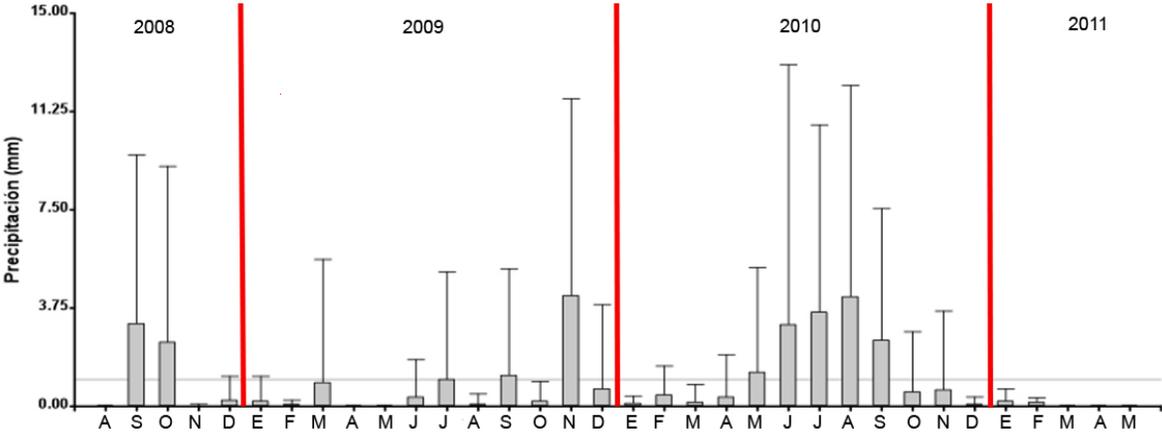


Figura 36. Diagrama de dispersión (biplot) de los componentes bióticos y abióticos asociados a variables ambientales, a partir de CCA. Los datos analizados fueron únicamente la de las tres temporadas del año 2010.

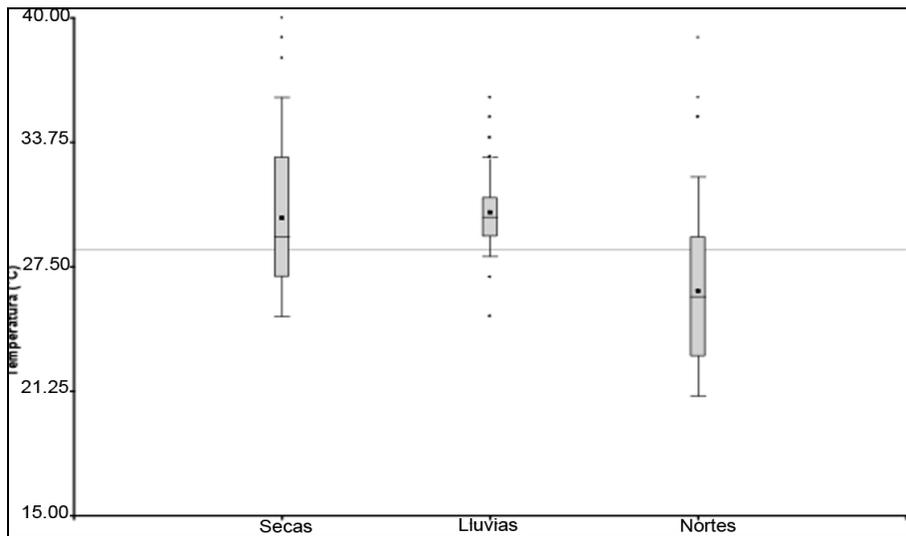
También se realizaron análisis estadísticos con los datos de temperatura y precipitación diaria de la zona de estudio de los años 2008 al 2011, estos registros fueron obtenidos de la página de Internet www.wunderground.com/weatherstation y pertenecen a la estación climática IYUCATNT2 que se encuentra en el Puerto de Telchac, Yucatán y pertenece al CINVESTAV-IPN.



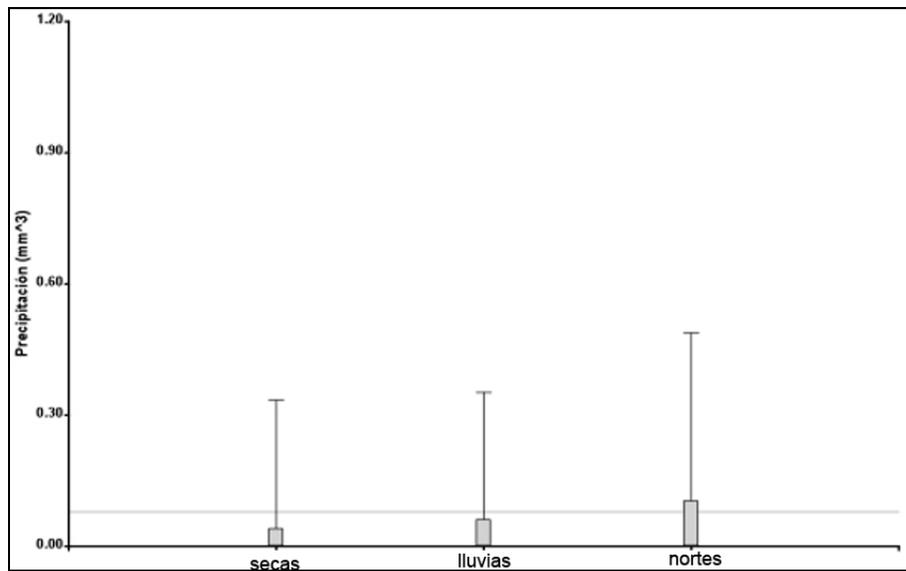
Grafica 1. Relación de la temperatura en el tiempo agosto 2008- mayo 2011, se muestra el promedio y la desviación estándar.



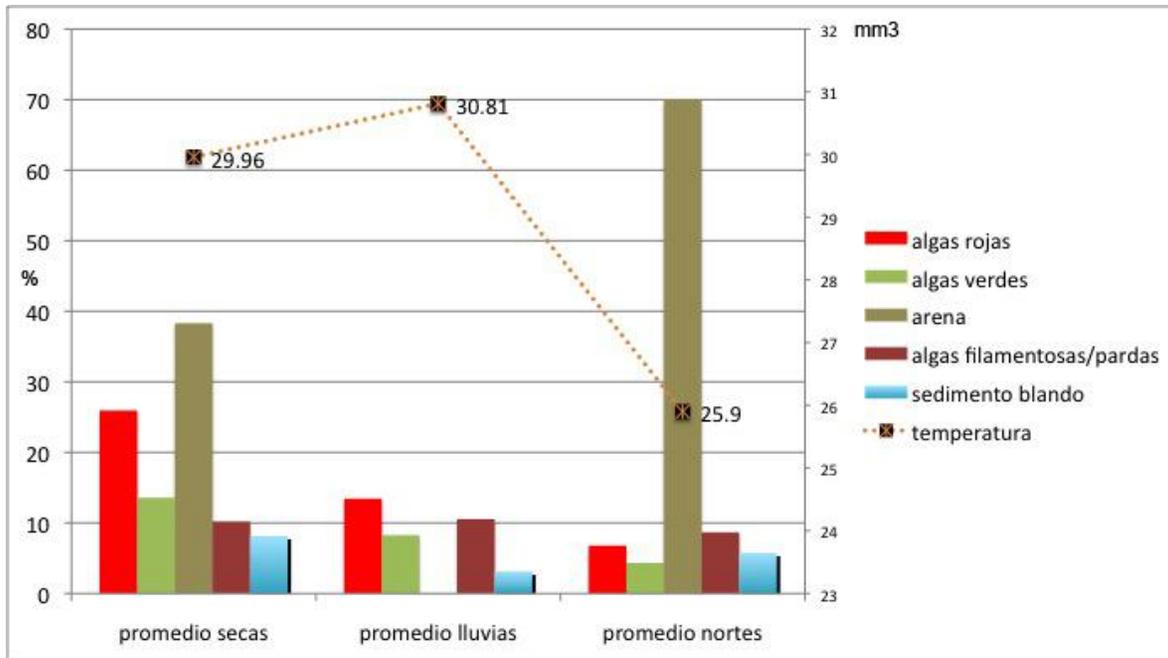
Grafica 2. Relación de la precipitación en el tiempo agosto 2008- mayo 2011, se muestra el promedio y la desviación estándar.



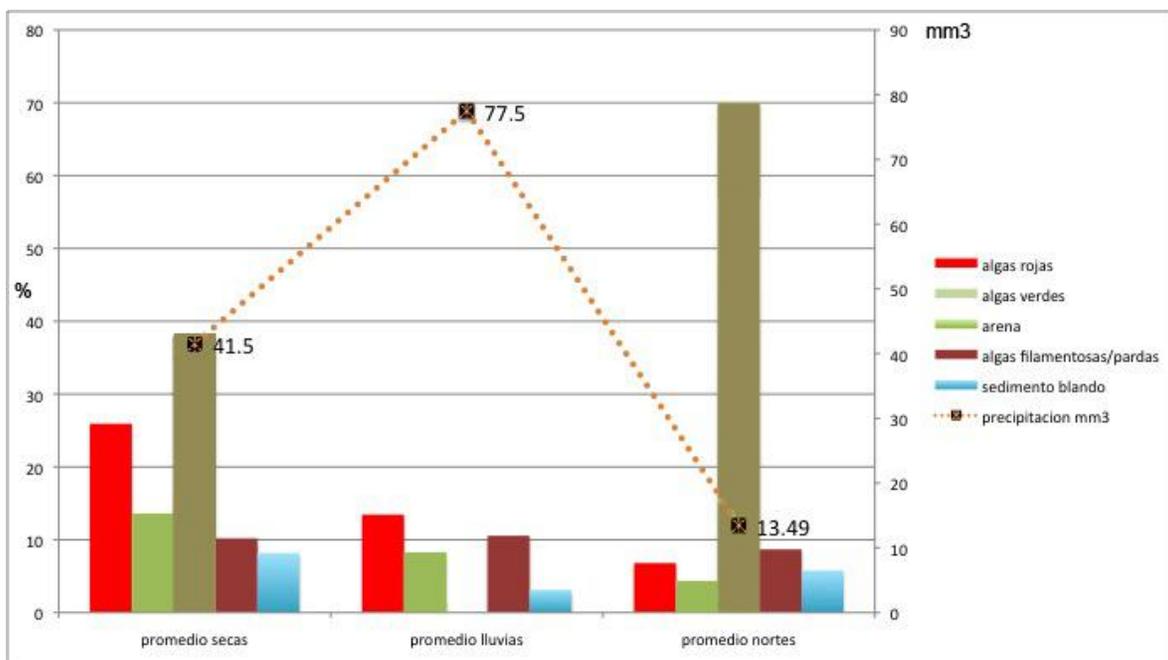
Grafica 3. Relación de la temperatura entre temporadas, se muestra el promedio y la desviación estándar.



Grafica 4. Relación de la precipitación entre temporadas, se muestra el promedio y la desviación estándar.



Gráfica 5. Muestra del promedio de la temperatura y de la cobertura biótica en las temporadas de secas, lluvias y nortes.



Gráfica 6. Muestra del promedio de la precipitación y de la cobertura biótica en las temporadas de secas, lluvias y nortes.

10 DISCUSIÓN

10.1 Pre-procesamiento de Imágenes

El satélite Landsat 7 fue utilizado para la realización del presente estudio, ya que combina una serie de características como una buena resolución espacial, gran cobertura espacial, un ciclo orbital corto, más de 25 años de operatividad y el acceso libre a su colección de imágenes, lo cual hace muy dinámica su adquisición reduciendo los costos.

Los datos ideales de referencia son los que se ajustan tanto espacial como temporalmente, aquellos registrados apropiadamente, y que sean perceptibles de manera gráfica en una imagen y que están diseñados para permitir la construcción de modelos necesarios para representar el espacio espectral y evaluar la solidez de los mapas finales (Congalton & Green, 1999). En su mayoría estos datos rara vez existen, aún siendo capturados específicamente con estos fines debido a las condiciones climáticas que se presenten en el momento de la recolección de los mismos y son difíciles de vincular geográficamente con las imágenes (Kennedy *et al.*, 2007). La heterogeneidad de las condiciones climáticas es fundamental para la construcción y evaluación de estos modelos (Fassnacht *et al.*, 2006), cuya alta precisión de clasificación son más difíciles de lograr en entornos más heterogéneos (Smith *et al.*, 2002). A menudo es difícil procesar por completo un dato sobre el área de estudio debido a la imprecisión georreferencial, y en fotos o imágenes aéreas de alta resolución a causa de sombras y variaciones de ángulo de visión de los distintos años (Paine, 1981; Wang *et al.*, 2007).

En cuanto a la adquisición de escenas Landsat se obtuvo un conjunto de imágenes limitado debido al alto porcentaje de ruidos atmosféricos y de la columna de agua presentes en las imágenes; así como el patrón de bandas presentes en las imágenes desde el 2003 a la fecha en las cuales se estima que más del 22 por ciento de cualquier escena se pierde debido a este patrón

(Pringle, 2009). Las imágenes colectadas que no pudieron ser utilizadas en este estudio presentaban uno o varios de los siguientes factores atmosféricos y de la columna de agua: a) vapor de agua con alto porcentaje de cobertura de nubes; b) fondo visible pero alto porcentaje de cobertura de nubes y sombras asociadas a la nubosidad; c) patrón de líneas ausentes y alto porcentaje de cobertura de imágenes d) patrón de líneas ausentes y vapor de agua, d) visibilidad nula del fondo en imágenes con y sin patrón de líneas ausentes.

En cuanto a la corrección de bandas ausentes en las imágenes Landsat SLC-off solo se pudieron obtener imágenes con bajo nivel de nitidez (Figura 37).

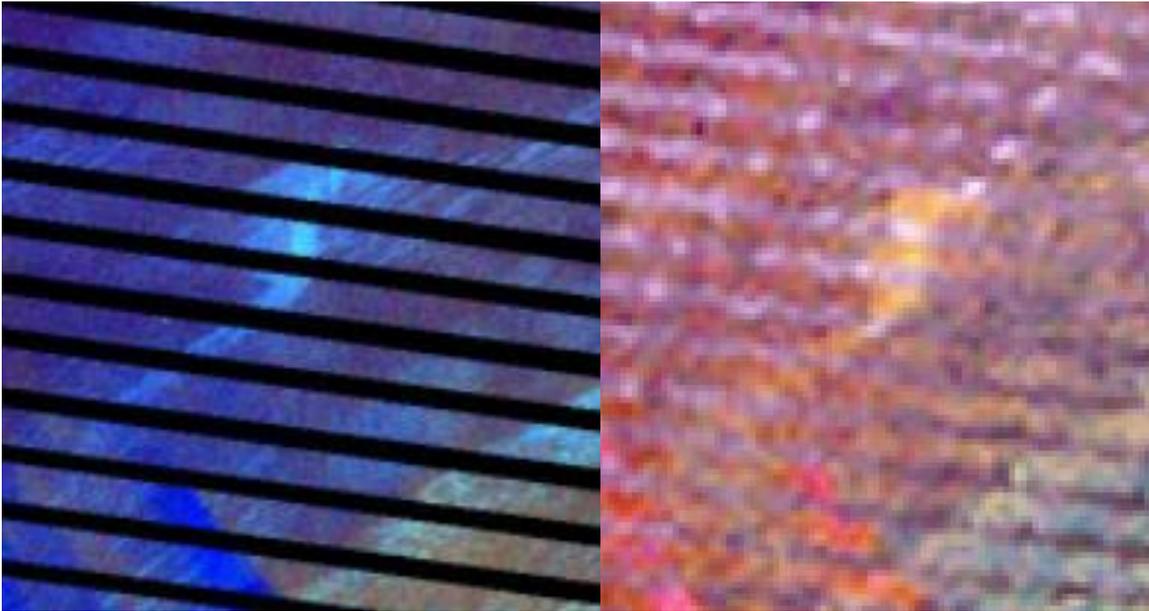


Figura 37. Ejemplo de la superposición de dos imágenes, SLC-off (izquierda) adquirida en el 2002, la superposición se realizo con la imagen del 2002 y del 2010, ambas de la misma temporada, el resultado da una imagen con SLC- On (derecha).

La calidad del resultado de la corrección de bandas ausentes depende mucho de la temporada de adquisición de las imágenes, un resultado satisfactorio se relaciona a la temporada de secas que corresponde a un cielo despejado (Toinoven, 2006). Para nuestra zona de estudio casi la totalidad de las imágenes disponibles en el catálogo Landsat mostraron altos porcentajes de cobertura de nubes.

La ausencia de cobertura de nubes está asociada a la acción de vientos fuertes cuya consecuencia en la columna de agua es la resuspensión del sedimento fino que constituye una parte significativa del fondo. Asimismo la técnica sugiere que para llevar a cabo la interpolación geoestadística y estimar los datos faltantes es preferible la utilización de imágenes con la menor diferencia de tiempo de adquisición satelital, preferiblemente semanas de diferencia y no meses, y aunque la interpolación de dos imágenes se puede predecir hipotéticamente en cualquier fecha, la varianza de estimación será menos significativa si las imágenes tienen unos pocos días o semanas de diferencia de haber sido captadas por el satélite (Pringle, 2009), lo cual limita el nivel de precisión de la corrección ya que se utilizaron imágenes con diez años de diferencia.

La técnica reconoce que si bien en terrenos más estables como desiertos y zonas rocosas se obtienen resultados positivos, en escenas con objetos transitorios (como en nuestro caso el efecto del oleaje, turbidez, nubosidad, vapor de agua atmosféricos) puede llegar a presentar errores visibles o sesgo en la corrección. (Pringle, 2009).

Para la aplicación de la Corrección Atmosférica, vapor de agua y efecto de la columna de agua es necesario tener en cuenta que la mayoría de las imágenes utilizadas presentaban el patrón de bandas negras, por lo tanto fue necesario seleccionar la superficie del área deseada, aplicando una máscara que eliminara las líneas ausentes y los píxeles con información radiométrica incompleta (figura 38) y así por una parte obtener un mejoramiento visual de las imágenes y por otra un set de datos confiable. Las máscaras se utilizan seleccionar porciones de una imagen que incluya sólo las características deseadas para el análisis, eliminando,

el resto de los datos (píxeles) que no son necesarios o pertinentes para nuestro análisis. Esta máscara es una imagen binaria que se compone de valores 0 y 1, cuando se aplica en una imagen, el resultado incluye las áreas con valores 1 y omite los valores en 0, a partir de esta máscara se pueden hacer cálculos de la imagen como estadísticas, clasificación, filtrados entre otros, con la certeza de que solo los píxeles deseados se incluyan en el análisis (ENVI, 2009).

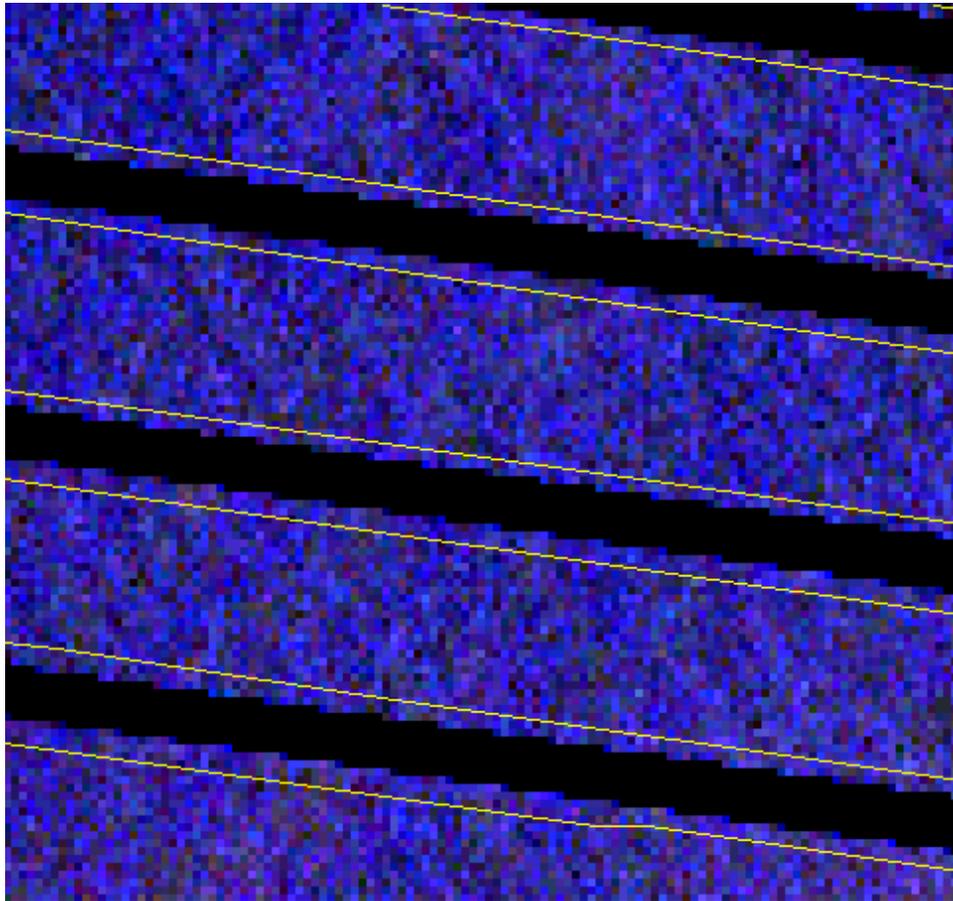


Figura 38. Detalle amplificado de una imagen RGB que presenta el patrón de bandas ausentes. La máscara se utilizó para recortar los píxeles en negro y se muestra en la figura por medio de líneas delgadas de color amarillo y cubre solo los píxeles deseados.

Para la aplicación de la corrección de la columna de agua hay que tener en cuenta que la claridad de los cuerpos del agua varía en muchas escalas. Por ejemplo, muchas áreas costeras exhiben un gradiente de turbidez para aguas claras creado por aumento en la profundidad (es decir menos resuspensión de sedimentos). En una escala grande, los océanos también varían en su turbidez total. (Green *et al*, 2000). La corrección de la columna de agua es una técnica que fue probada para

aguas en las Bahamas y generalmente es apropiada donde la claridad del agua es buena, la mayoría de aguas de áreas coralinas y pastos marinos. (Green *et al*, 2000).

Para el presente estudio se utilizó la corrección generando una banda con corrección del efecto de la profundidad de la columna de agua pero ya que la metodología exige alta transparencia de la columna de agua el efecto no fue el mismo. Para la temporada de secas obtuvimos imágenes con menor porcentaje de nubosidad y mayor transparencia en el agua lo que genero un resultado aceptable. Sin embargo no fue así para la temporada de lluvias y nortes imágenes con gran porcentaje de nubosidad y presencia de turbidez en el agua lo que indica mayor resuspensión de sedimentos en el área. La resuspensión es el mecanismo mediante el cual el sedimento del fondo es incorporado a la columna de agua debido a la acción de los flujos que actúan cerca del fondo. Este proceso determina en buena medida la concentración de material en suspensión en la columna de agua y la cantidad de sedimento transportado por las corrientes (Guillén J., 1999), lo que afecta directamente en la calidad de las imágenes utilizadas para la temporada de lluvias y nortes.

10.2 Procesamiento de imágenes

Las clases seleccionadas corresponden a la clasificación que realizó Orvañanos-Donis (2010) en su estudio sobre la variabilidad de las comunidades bentónicas del litoral de Sisal, Yucatán y su cambio a través de las tres temporadas climáticas de la región. Orvañanos-Donis (2010) señala que la proporción en las coberturas bentónicas fluctúa de manera muy importante entre cada temporada, lo que determina las diferencias significativas en los patrones espaciales de los paisajes submarinos entre cada una de las temporadas. Este cambio en coberturas puede atribuirse a las fluctuaciones en los diferentes factores ambientales, como la concentración de nutrientes, la concentración de oxígeno, las corrientes, turbidez,

viento y oleaje y temperatura (Bromley, 1996; Olenin, 1997; Coleman *et al.*, 2007; Orvañanos-Donis, 2010). Esto se ve reflejado en los patrones de distribución espacial que muestran cada uno de los paisajes en los mapas de distribución para las tres temporadas climáticas, en los cuales se observa una clara dominancia del paisaje 1 que corresponde a algas rojas con parches de algas verdes sobre arena con 56.93% de la cobertura total en la temporada de secas y que fluctúa de manera inversa a la proporción de cobertura en la temporada de lluvias con sólo el 5.14% de la cobertura total. El paisaje 1 presenta como característica una asociación significativa al sustrato arena y la dominancia de las algas rojas sobre las algas verdes, la riqueza y abundancia de las algas rojas en esta temporada se explica por las condiciones oceanográficas prevalentes en esta época del año, caracterizada por la presencia de aguas transparentes –que permite una máxima penetración de la luz solar hacia el fondo- y baja o nula energía en el oleaje, lo que favorece que las algas rojas alcancen sus mayores tallas durante este período. (Gil-Rodríguez y De la Torre, 1980; Ortegón-Aznar, 2001). Por su parte para la temporada de lluvias se obtuvo una dominancia de los paisajes con presencia de algas verdes y calcáreas como el paisaje 4 y 5 que presentaron 42.55 y 17.58% de la cobertura total, lo cual se asocia directamente al aumento de los nutrientes en la columna de agua que se generan temporalmente en la porción yucateca del Banco de Campeche con el fenómeno de la surgencia y que trae consigo un aumento de la corriente del Caribe y un afloramiento de agua relativamente más fría (22.5°C). Las algas verdes y calcáreas poseen estructuras de fijación al sustrato, las cuales son sistemas de rizoides que se entierran en la arena, los tallos son calcificados, lo que les da cierta rigidez y les permite mantener una posición erecta en la columna de agua y aprovechar la alta disponibilidad de nutrientes para su proliferación (Luning, 1990, Sánchez- Molina, 2007; Salmerón García, 2003 y Orvañanos- Donis, 2010).

La temporada de nortes presentó una disminución significativa de la mayoría de los grupos de algas con respecto a la temporada de secas y lluvias, así como tasas de cambio elevadas en todos los paisajes, esto puede ser debido al

incremento de la energía del oleaje y con ello la remoción del fondo y aumento de partículas suspendidas, lo que incrementa la turbidez del agua y reduce el paso de la luz en el fondo, lo cual puede afectar negativamente la intensidad de la luz disponible para la fotosíntesis de las algas en el fondo (Tunnell, 1988; Herrera-Silveira, 1996; Orduña-Rojas y Robledo, 2002; Gonnee *et al.*, 2004).

En la temporada de nortes también aumenta la movilidad de las masas de aguas más profundas hacia la línea de costa lo que puede provocar que algunas especies del fondo marino en aguas de mayor profundidad se desprenden y derivan en dirección a la orilla, y esto se ve reflejado en el paisaje 1 que paso de 56.93% de la cobertura total en secas a 15.31% de la cobertura total en nortes, esto es asociado a que las algas rojas cuentan con talos robustos que son arrancados del sustrato por las corrientes y turbulencias generadas por los fuertes vientos característicos de la temporada. (Sánchez- Molina, 2007; Orvañanos-Donis, 2010).

Por otro lado los paisajes dominantes fueron aquellos que presentaron bajas coberturas de algas verdes y calcáreas y corresponden al paisaje 2 y 4 con 48.33 y 25.34% de la cobertura total.

Los mapas de distribución para la temporada de secas y lluvias presentaron un patrón más homogéneo y compacto en la distribución de los paisajes. Durante la temporada de secas y lluvias la altura del dosel y el porcentaje de cobertura de algas cubre completamente los sustratos, esto es asociado a las condiciones oceanográficas de estas temporadas que favorecen el crecimiento y desarrollo de un mayor número de algas, consecuentemente este dosel algal cubre a los organismos fijados al sustrato como los corales y las esponjas. En la temporada de nortes disminuye la cobertura bentónica en porcentaje, así como la disminución significativa en la proporción de algas presentes y la altura de dosel, los corales y las esponjas son los únicos organismos sésiles que se mantienen en el fondo. (Sánchez-Molina, 2007; Orvañanos-Donis 2010), esto se ve reflejado en lo análisis de detección de cambio que demuestra que nortes es la temporada con mayor

tasa de cambio y un patrón de distribución de los paisajes más heterogéneo con respecto a la temporada de secas y lluvias.

Al analizar la asociación de los componentes bióticos y abióticos con factores ambientales como la temperatura y la precipitación pluvial se encontró que si bien la temperatura, es uno de los factores físicos determinantes de la distribución geográfica de las plantas marinas (Yokoya, 1992) existen otros factores importantes que pueden determinar su distribución como lo explica Werlinger y Alveal (1992) donde señalan que la salinidad del agua, el estado fisiológico del alga y las características físicas del lugar son igualmente importantes para su distribución. La asociación de la cobertura biótica con las temporadas climáticas se ilustra en el diagrama de dispersión (figura 40) en el cual se puede observar mayor influencia de las temporadas climáticas que de los factores físicos, esto puede ser debido al conjunto de los factores fisicoquímicos que caracteriza a cada una de las temporadas que a los factores de precipitación o temperatura por sí solos.

Los componentes abióticos del fondo marino relacionados con la cobertura bentónica representan un papel importante; la importancia del sustrato para las macroalgas radica principalmente en que su fijación depende de la naturaleza de éste. La composición y textura de un sustrato rocoso o arenoso afecta notablemente a las comunidades vegetales, en el caso de nuestro estudio las algas con estructuras de fijación como las algas verdes y calcáreas y que corresponden a los paisajes 1 y 4 muestran persistencia en la temporada de nortes. Durante la temporada de secas existe una dominancia por parte de las algas rojas pero no es porque las algas verdes y calcáreas se vean desplazadas sino porque estas se ven cubiertas por las otras algas que desarrollan doseles mucho más altos que las algas verdes y calcáreas. Nuestras observaciones en campo corresponden a lo descrito por Orvañanos-Donis (2010) quien menciona que durante la temporada de nortes disminuye la cobertura algal en porcentaje y en altura de dosel, los corales y las esponjas son los únicos organismos sésiles que se mantienen en el fondo mientras que en las temporadas de secas y lluvias

la altura del dosel y el porcentaje de cobertura de algas cubre completamente los sustratos y cubre a los organismos fijados al sustrato como los corales y las esponjas.

Hay que tener en cuenta que los datos obtenidos de la temperatura y precipitación son de una región cercana al área de estudio, ya que para Sisal no se cuenta con registros completos de los años de estudio. El puerto más cercano con registros disponibles y continuos pertenece al puerto de Telchac. Al no haber registros permanentes disponibles sobre la temperatura superficial del agua en el área de estudio o áreas cercanas se procedió a trabajar con la temperatura ambiental del puerto ya mencionado. Por lo que los datos extraídos son utilizados únicamente con el fin de exponer de manera gráfica el ciclo anual tanto de la temperatura y la precipitación en la zona y su co-relación con el tipo de cobertura bentónica. Los datos obtenidos para el presente estudio son a partir del mes de mayo del 2009 al mes de abril del 2010.

Para los análisis en una escala decadal las imágenes disponibles presentaron baja calidad, con poca visibilidad del fondo marino por lo que ópticamente las coberturas bentónicas fueron muy difíciles de discernir. De acuerdo a lo reportado por Orvañanos-Donis 2010 la diferencia de 6 los paisajes es mínima, y está basada en la abundancia relativa de las macroalgas y sus diferentes combinaciones por lo que se procedió a utilizar una clasificación binaria que estaría sujeta únicamente a la presencia o ausencia de cobertura vegetal y los resultados indican que existe una evidente disminución de la cobertura vegetal en los mapas de distribución de secas del año 2000 a secas del año 2010 (figura 28 y 29), esto puede deberse primero a que el patrón de bandas ausentes puede afectar considerablemente el resultado de los análisis, ya que al presentar este patrón de bandas ausentes se estima que 22% de cualquier escena se pierde debido a esto, segundo la imagen que se obtuvo para el año 2000 y 2010 corresponden a la temporada de secas del mes de abril en donde los registros de la estación climática del área de estudio demostraron que durante los meses de marzo y abril del 2010 se registraron fuertes vientos característicos de la

temporada de nortes que abarcan de noviembre a febrero, esta temporada tiene como principal característica cambios muy evidentes en las coberturas bentónicas, mostrando una disminución significativa en la proporción de algas al ser desprendidas o desplazadas debido al incremento del oleaje y la turbidez del agua (Orvañanos-Donis, 2010). Pese a esto los resultados nos indican que el patrón visual de los paisajes observado en los mapas de distribución permanece constante a través de las imágenes con diez años de diferencia, tanto en las imágenes como en los mapas los parches de fondo con cobertura y los parches de fondo sin cobertura presentan constancia a través del tiempo (Figura 39), este resultado puede deberse a que la mayoría de las macroalgas funcionan como estabilizadoras y retenedoras de sedimento (Robledo, 1998).

Los cambios observados son más evidentes inter-temporadas que a través del tiempo, los cambios entre temporadas son significativos por lo que se rechaza la hipótesis propuesta: La distribución de los paisajes submarinos del litoral de Sisal no permanece constante entre temporadas (lluvias, secas y nortes).

Por otro lado los patrones de distribución a través del tiempo muestran cierta estabilidad y una tasa de cambio poco significativa, con lo cual se acepta la hipótesis: El patrón espacial de los paisajes submarinos del litoral de Sisal Yucatán permanece estable en una escala decadal sin importar las variaciones anuales de la temperatura del agua, y la precipitación pluvial.

Debido a la baja presencia de organismos coralinos, octocorales, esponjas, zoántidos y tunicados se decidió no incluir a estos organismos en la clasificación y en los análisis de detección de cambio ya que no tienen un papel estadísticamente importante en términos de cobertura. Un factor indispensable para la presencia de corales y esponjas es la existencia de substrato de pavimento calcáreo para una óptima fijación, estos organismos se asocian a fondos duros en donde la capa de arena sobre el pavimento calcáreo es muy delgada, permitiendo la fijación de estos organismos que de otra manera pueden llegar a ser sepultados por el movimiento del sedimento (Wedler, 1989). Cabe mencionar que estas condiciones no son constantes en el área del presente estudio ya que como menciona Hughes et al. (1999) un factor estresante para el crecimiento de los corales es la alta

turbidez en la columna de agua, la cual se observo en la temporada de lluvias y de manera más significativa en la temporada de nortes del área de estudio.

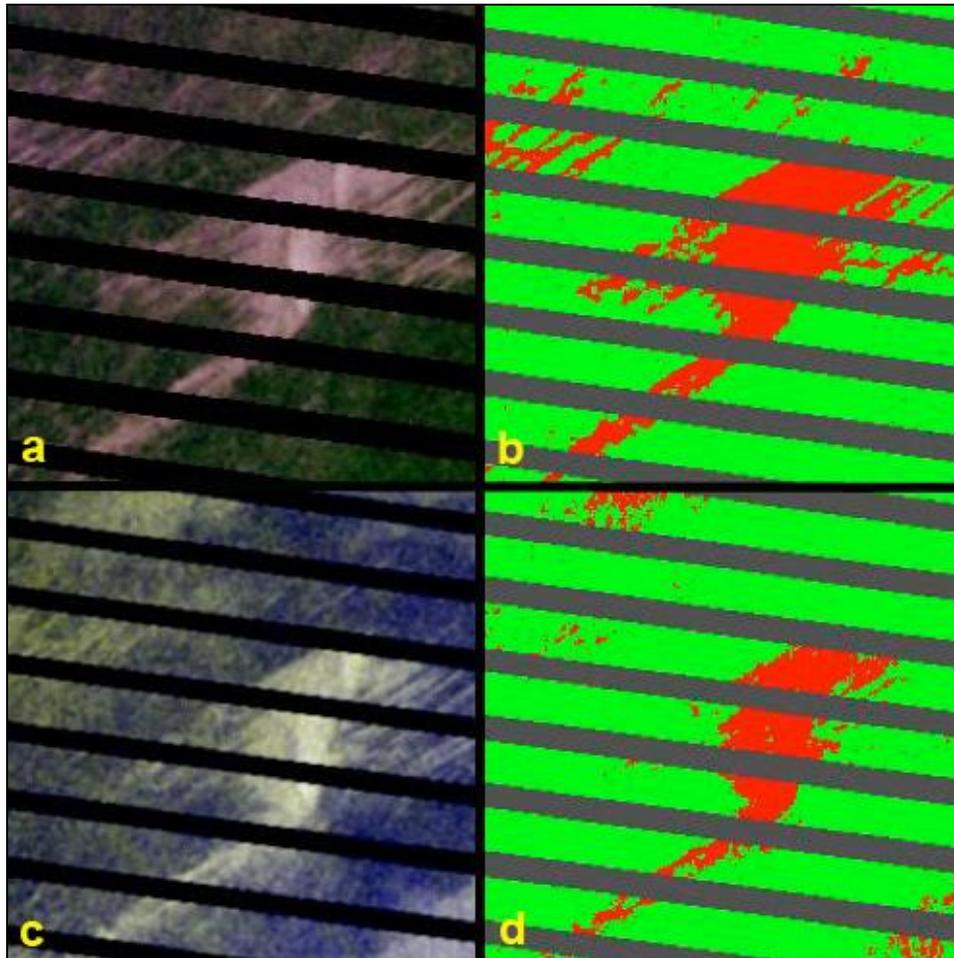


Figura 39. Ejemplos de porciones del área analizada para la temporada de secas del año 2000 contra secas del año 2010 en áreas donde el fondo es ópticamente visible. Del lado izquierdo arriba se muestra la porción para la imagen del año 2000 (a) y su correspondiente imagen clasificada (b) y del lado izquierdo abajo la porción para el año 2010 (c) y su correspondiente imagen clasificada (d).

11 CONCLUSIONES

El uso de imágenes satelitales aplicadas a estudios biológicos, ecológicos, fisiográficos, geológicos y de manejo de recursos encaminados a la investigación, representan una herramienta importante, tanto por su disponibilidad como por la versatilidad que ofrecen.

La combinación del uso de imágenes con la ecología del paisaje representa una posibilidad de generar conocimiento básico para la futura generación de planes de manejo o para delimitar zonas marinas para su estudio y que requieren de implementación de un plan de conservación.

Con el presente estudio se logro determinar el cambio y la distribución espacial de los paisajes en un área muy homogénea en sus características ambientales del litoral de Sisal, Yucatán y se concluyó lo siguiente:

De acuerdo a los mapas de distribución se puede concluir: que los patrones de la distribución espacial de cada uno de los paisajes para las tres temporadas climáticas en un ciclo anual están sujetos de manera significativa a la variabilidad ambiental asociada a cada temporada climática, principalmente a la energía del oleaje y corrientes y a la turbidez del agua y disponibilidad de luz en el fondo marino.

Entre temporadas la complejidad de la distribución de los paisajes disminuye significativamente, desde la temporada de secas representada por la mayor complejidad de paisajes submarinos, cobertura bentónica y dosel algal mas alto, seguida de la temporada de lluvias y finalmente la época de nortes, en donde predominan los fondos con escasa cobertura.

De la permanencia en un escala decadal de los paisajes, podemos decir que aunque se presentan ligeras variaciones espaciales en pequeñas áreas, el patrón general de su distribución ha permanecido constante

12 LITERATURA CONSULTADA

- Adobe (2011). Pagina Web Adobe Systems Incorporated , desarrolladora de software de edición de páginas, <http://partners.adobe.com/public/developer/tiff/index.html;jsessionid=7A8B8E17FD8E3CBB1479DA36A81944C5>, Última visita 23 de mayo 2011.
- Arias-González J.E., Legendre P.P., F. Rodríguez (2008). Scaling up beta diversity on Caribbean coral reefs, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 366, pp 28-36.
- Arias-Gonzalez J., Done T., Page C., Cheal A., Kininmonth S. & Garza-Pérez J. (2006). Towards a reefscape ecology: relating biomass and trophic structure of fish assemblages to habitat at Davies Reef, Australia, *Marine Ecology Progress Series* 320, pp. 29-41.
- Barquín Díez, J.; González Lorenzo M. Y G. Rodríguez (2003). A method to study benthonic bionomy used in the coasts of Canary Islands with a narrow marine platform. *Vieraea* 31, pp. 219-231.
- Capurro L. (2003). Un Gran Ecosistema costero: la Península de Yucatán, *Avance y perspectiva*, 22, pp. 69-75.
- Capurro L.; Euán J., J. Herrera (2002). Manejo sustentable del ecosistema de Yucatán, *Avance y perspectiva*, 21, pp. 195-204.
- Caso M., (2004). Diagnóstico ambiental del Golfo de México, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Instituto de Ecología, A.C. 791, pp.823
- Chávez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 62, pp.1025– 1035.
- Cogan B., Todd B., Lawton P. & Noji T. (2009). The role of marine habitat mapping in ecosystem-based management. *ICES Journal of Marine Science*, 66, pp. 2033-2042.
- Crippen, Robert E. (1987). The regression intersection method of adjusting image data for band ratioing, *International Journal of Remote Sensing*, 8, pp. 137-155.
- Collado-Vides L., González- González J. & Ezcurra E. (1995). Patrones de distribución Ficoflorística en el sistema lagunar de Nichupté, Quintana Roo, México. *Acta Botánica Mexicana*, 31, pp. 19-32.
- De Leeuw M. y Tavares L. (2009). Performance evaluation of several adaptive speckle filters for SAR imaging, *Anales XIV Simposio Brasileño de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, pp. 7299-7305.
- Djamel Toudert, (2009). Introducción a la teledetección aplicada al medio urbano, versión electrónica <http://membres.lycos.fr/teledetec/>
- Fernández-Coppel I., Herrero E (2005). El Satélite Landsat. Análisis Visual de Imágenes obtenidas del Sensor ETM+ Satélite Landsat. Área de Ingeniería Cartográfica, Geodesía y Fotogrametría. Universidad de Valladolid.
- Forman, R. y M. Godron. (1986). *Landscape Ecology*. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA.

- Franklin S., Dickson E., Farr D., Hansen M. & Moskal L. (2000). Quantification of landscape change from satellite remote sensing. *Forestry Chronicle*, 76, pp. 877- 886.
- Green, E.P.; Mumby, P.J.; Edwards, A.J.; Clark, C.D.; (Ed. A.J. Edwards), *Remote Sensing Handbook for Tropical Coastal Management. Coastal Management Sourcebook 3*, UNESCO, Paris, 2000, 1 pp. 316.
- Hedley J., Harborne A. & P. J. Mumby. (2004) Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing* 26, pp. 2107-2112.
- Herrera-Silveira J. (1996). Salinity and nutrients in a tropical coastal lagoon with groundwater discharges to the Gulf of Mexico. *Hidrobiología* 312, pp. 165-176.
- Hochberg E., Andréfouët S. & M. Tyler (2003). Sea surface correction of high spatial resolution ikonos images to improve bottom mapping in near-shore environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41 pp. 1724-1729.
- Houhoulis P. & Michener W. (2000). Detecting wetland change: a rule-based approach using NWI and SPOT-XS data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, pp. 205-211.
- Kaufmann R. & Seto K. (2001). Change detection, accuracy, and bias in a sequential analysis of Landsat imagery in the Pear River Delta, China: econometric techniques. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 85, pp. 95-105.
- Kennedy E., Townsend P., Gross J., Cohen W., Bolstad P., Wang Y. & P. Adams (2009). Remote sensing change detection tools for natural resource managers: Understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote sensing of environment* 113, pp. 1382-1396.
- Kushwaha S., Dwivedi R. & Rao B. (2000). Evaluation of various digital image processing techniques for detection of coastal wetlands using ERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 565-579.
- Liu X. & Lathrop R. (2002). Urban change detection based on an artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*, 23 pp. 2513-2518.
- Liu X., Huang F. & Wan E. (2002). Dynamic monitoring and damage evaluation of flood in north-west Jilin with remote sensing. *International Journal of Remote Sensing* 23 pp 3669-3679.
- Lopes A. Nezry E., Touzi R. y H. Laura, (1993) Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images, *International Journal of Remote Sensing* 14 pp. 1735-1758.
- Lunetta R., Ediriwickrema J., Johnson D., Lyon J. & Mickerrow A. (2002). Impacts of vegetation dynamics on the identification of land-cover change in a biologically complex community in North Carolina, USA. *Remote Sensing of Environment*, 82, pp. 258-270.
- Lyzenga, D. R. (1978). Passive remote sensing techniques for mapping water depth and bottom features. *Applied Optics*. 17, pp. 379 –383.
- Lu D. (2004). Change detection techniques, *International Journal of Remote Sensing*, 25:12, pp. 2365-2401.

- Madsen T. (1988). *Multivariate Analysis in Scandinavian Archaeology*. Jutland Archaeological Society Publications 21 pp. 11–13.
- McGarigal, K., Marks. B. (1995). FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA For. Serv. Gen. Tech. Rep. PNW-351.
- Mendoza; O. P. (2000). Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México, *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 43, pp. 7-31.
- Moizo, Marrubio, P. (2004). La percepción remota y la tecnología SIG: una aplicación en Ecología de Paisaje, *GeoFocus*, 4, pp. 1-24.
- Mumby, P., Clark C., Green E. & Edwards A. (1998). Benefits of water column correction and contextual editing for mapping coral reefs. *International Journal of Remote Sensing* 19, pp. 203–210.
- Mumby, P. J., Harborne A. (1999). Classification scheme for Marine Habitats of Belize. UNDP/GEF Belize Coastal Zone Management Project.
- Munyati C. (2000) Wetland change detection on the Kafue Flats Zambia by classification of a multitemporal remote sensing image dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 1787-1806.
- Pastor, Guzmán, J.; Maldonado G. (2007). Paisajes Submarinos de la Zona Norte de la Bahía de Banderas, Nayarit. Cuaderno de Resúmenes: IV Congreso Mexicano de Arrecifes Coralinos (CMAC, La Paz, BCS) pp.17.
- Perakis K., Kyrimis K. & A. Kungolos. (2000). Monitoring land cover change detection with remote sensing methods in magnesia prefecture in Greece. *Fresenis Environmental Bulletin*, 9, pp. 659-666.
- Peralta P. & Mather P. (2000). An analysis of deforestation patterns in the extractive reserves of Acre, Amazonia from satellite imagery: a landscape ecological approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 2555-2570.
- Piñeiro R., Giménez E., Moreno V., Burgos R. & A. Betanzos. (2001). Características térmicas del Banco de Campeche. INP. SAGARPA. México. *Ciencia Pesquera* 15, pp. 83-87.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). *GEO América Latina y el Caribe. Perspectivas del Medio Ambiente 2003*. www1.up.edu.pe/_data/ciup/documentos/20051130081057_38.pdf
- Radeloff V. Mladenoff D. & Boyce M (1999). Detecting jack pine budworm defoliation using spectral mixture analysis: separating effects from determinants. *Remote Sensing of Environment*, 69, pp. 156-169.
- Rígina O., Baklanov A., Hagner O. & Olsson H. (1999). Monitoring of forest damage in the Kola Peninsula, Northern Russia due to smelting industry. *Science of the Total Environment*, 229, pp. 147-163.
- Rioja N. y C.S. (2008). Combining aerial photographs and satellite imagery to map marine habitats of the Cozumel Reefs National Park, México. *Ocean & Coastal Management*. 51, pp. 397-404.
- Roy, D. P., Jin, Y., Lewis, P. E. y Justice, C. O. (2005b): "Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data", *Remote Sensing of Environment*, 97, pp. 137-162.

- Sader S., Hayes D., Hepinstall J., Coan M. & C. Soza (2001). Forest change monitoring of a remote biosphere reserve. *International Journal of Remote Sensing*, 22, pp. 1937-1950.
- Sader S. & Winne J. (1992). RGB–NDVI color composites for visualizing forest change dynamics. *International Journal of Remote Sensing*, 13, pp. 3055-3067.
- Scaramuzza P., Micijevic E., Chander G. (2004). SLC Gap-filled Products Phase One Methodology. http://landsat.usgs.gov/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology. PDF (access 30.08.11).
- Shennan, S. 1997. *Quantifying Archaeology*. 2nd edition. Edinburgh University Press, Edinburgh. 313–315 pp.
- Shepard, F.P. (1950). E.W.Scripps Cruise to the Gulf of California; Part. III. Submarine Topography of the Gulf of California. *Geol. Soc.America, Mem.* 43, pp. 1-32.
- Souza C. & Barreto P. (2000). An alternative approach for detecting and monitoring selectively logged forest in the Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 173-179.
- Steiner C. y Willette D. (2010). Distribution and size of benthic marine habitats in Dominica, Lesser Antilles. *Tropical. Biology* 58, pp. 589-602.
- Taylor J., Brewer T. & Bird A. (2000). Monitoring landscape change in the national parks of England and Wales using aerial photo interpretation and GIS. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 2737-2752.
- Tappan G., Hadj A., Wood E. & Lietzow R. (2000). Use of Argon, Corona, and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in west-central Senegal. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66, pp. 727-736.
- Tian X., Ji Y., Sven E. & Qin H. (2003). Landscape change detection of the newly created wetland in Yellow River Delta. *Ecological Modelling* 164, pp. 21-31.
- Ter Braak, C. & P. Smilauer. (1998). *CANOCO for Windows*. v. 4.5. Computer program. Centre for Biometry, Wageningen, Netherlands.
- Tucker C. & Townshend J. (2000). Strategies for monitoring tropical deforestation using satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 1461-1471.
- Turner M. G., Gardner R., & R. O'Neill. 2001. *Landscape ecology in theory and practice: pattern and process*. Springer, New York, E.U.A. 401 pp.
- Vega C. (2004). Ictiofauna de la Reserva de la Biosfera Celestún, Yucatán: una contribución al conocimiento de su biodiversidad, *Anales del Instituto de Biología, UNAM*, 75, pp. 193-206.
- Weng Q. (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling. *Journal of Environmental Management*, 64, pp. 273-284.
- Wilson E. & Sader S. (2002). Detection of forest Harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 80, pp. 385-396.
- Woodcock C., Macomber S., Pax-Lenney M. & Cohen W. (2001). Monitoring large areas for forest change using Landsat: generalization

- across space, time and Landsat sensors. *Remote Sensing of Environment*, 78, pp. 194-203.
- Zavala Figueroa, (2008). Evaluación rápida de la sección Uvero- Punta Piedras, Costa Maya, Quintana Roo, México: contribución enfocada al manejo futuro del hábitat, tesis de maestría, Colegio de la Frontera sur-ECOSUR.
 - Zhang M., Carder K., Muller-Karger Z. (1999). Noise reduction and atmospheric correction for coastal applications of Landsat thematic mapper imagery. *Remote Sensing. Environment*. 70, pp. 167–180.
 - Zhang X., Defries R., Townshend J., Dimiceli C., Hansen M., Huang C. & Sohlberg R. (2000). The 250 m global land cover change product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer of NASA's Earth observing system. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 1433-1460.
 - Zhang X., Sohlberg R., Townshend J., Dimiceli C., Carroll M., Eastman J., Hansen M. & Defries R. (2002). Detection of land cover changes using MODIS 250 m data. *Remote Sensing of Environment*, 83, pp. 336–350.
 - Zheng D., Wallin D. & Hao Z. (1997). Rates and patterns of landscape change between 1972 and 1988 in the Changbai Mountain area of China and North Korea. *Landscape Ecology*, 12, pp. 241-254.
 - Zhenghao Shi and Ko B. Fung, (1994). A Comparison of Digital Speckle Filters, *Proceedings of IGARSS 94*, August 8-12, 1994, pp. 2129-2133.
 - Zhao H., (2010). A landscape approach for wetland change detection (1979-2009) in the Pearl River Estuary. *Procedia Environment Sciences*: 2, pp. 1265-1278.
 - Zomer R., Ustin J. & Carpenter C. (2001). Land cover change along tropical and subtropical riparian corridors within the Makalu Barun National Park and Conservation Area, Nepal. *Mountain Research and Development*, 21, pp. 175-183.

13 ANEXOS

Tabla 4. Lista de imágenes descargadas y correcciones aplicadas.

Nombre de la imagen	Año/temporada	Características	Correcciones aplicadas	Utilizable
L7epp021r045	2000/secas	Costa brillante Bajo % de cobertura de nubes	Corrección Atmosférica (ATM), corrección de la Columna de agua (CW) y filtro gamma	Si
LE70210452002019	2002/nortes	Alto % cobertura de nubes y vapor de agua (vp.) en el área de estudio (aoi)	Corrección ATM, CW y filtro gamma	No
LE702104520020730	2002/lluvias	Cobertura de nubes a lo largo de la costa	Corrección ATM, CW y filtro gamma	Si
LE70210452002307	2002/nortes	Escasa visibilidad del fondo marino	No	No
LE0210452002355	2002/nortes	Alto % de vp, Bandas negras (Bn)	No	No
LE7021045200331	2003/nortes	Alto % cobertura de nubes en el aoi	No	No
LE70210452004345	2004/nortes	Escasa visibilidad del fondo marino, Bn	No	No
LE70210452005011	2005/nortes	Escasa visibilidad del fondo marino, Bn	No	No
LE70210452005043	2005/nortes	Alto % cobertura de nubes en el aoi,	No	No

		Bn		
LE70210452005155	2005/lluvias	Escasa visibilidad del fondo marino, Bandas negras	Corrección ATM y filtro gamma	No
LE70210452005219	2005/lluvias	Alto % cobertura de nubes en el aoi, Bn	No	No
LE70210452006046	2006/nortes	Alto % cobertura de nubes y vp. en aoi y Bn	No	No
LE70210452008036	2008/nortes	Bn, agua revuelta	No	No
LE70210452008100	2008/secas	Bn, Vp y nubes	Corrección ATM y CW	No
LE70210452008276	2008/nortes	Vp y nubes, Bn	Filtro gamma	No
LE702104520100125	2010/nortes	Agua revuelta, Bn y parche de nubes en la costa	Corrección CW y filtro gamma	No
LE7021045201003314	2010/secas	Agua revuelta, Bn	No	No
LE70210452010105	2010/secas	Vp y parche de nubes cercano a la costa, Bn	No	No
LE70210452010121	2010/secas	Agua revuelta, Bn	No	No
LE70210452010153	2010/lluvias	Agua revuelta, Bn	Corrección ATM, CW y filtro gamma	No
LE7021045201065	2010/lluvias	Agua revuelta, Bn	Corrección ATM, CW y filtro gamma	No
LE70210452009	2009/nortes	Bn, vp	Corrección ATM, CW y filtro gamma	Si

