"DISTRIBUCIÓN DE LA ESPECIE RHIZOPHORA MANGLE EN EL NORTE DE LA LAGUNA AGUA BRAVA EN MARISMAS NACIONALES, NAYARIT EN EL MARCO DEL SISTEMA DE MONITOREO DE LOS MANGLARES DE MÉXICO"

INFORME FINAL

Identificación de *Rhizophora mangle*

Foto marismas nacionales, izquierda ejemplares de *Rhizophora mangle*, derecha de *Laguncularia racemosa.* (Foto: José Alberto Alcántara)

01/12/2015

Índice

Capítulo 1. Preparación de insumos y construcción de mapas 1
Introducción. 1
Métodos 1
Identificación previa de la condición de la cobertura de manglar 1
Diseño de muestreo para la primera fase de campo 3
Adquisición y preparación de las imágenes Worldview2 4
Obtención de mapas de identificación de *Rizhopora mangle* 7
Resultados Capítulo 1 8
Resultados de la identificación previa de la condición de la cobertura de manglar 8
Resultados de la primera etapa de campo 11
Mapas de distribución de especies 14
Capítulo 2. Evaluación del grado de acuerdo obtenido en la identificación de *Rhizophora mangle* en el área de estudio 18
Introducción 18
Métodos 18
Estrategia de muestreo para la segunda fase de campo 18
Evaluación de la confiabilidad de los mapas Worldview 2 (4 abril 2015) y Landsat 8 19
Resultados y discusión de la evaluación del grado de acuerdo obtenido en la identificación de *Rhizophora mangle* en el área de estudio 19
Datos colectados en campo 19
Evaluación de confiabilidad 31
Capítulo 3. Cambios en la cobertura de *Rhizophora mangle* 2011 – 2015 en el área de estudio en la laguna de Agua Brava usando como insumo imágenes Worldview 2. 33
Introducción 33
Métodos 33
Resultado del análisis de cambios 35
Conclusiones y recomendaciones para el proyecto 40
Referencias 42
Anexo Protocolo para la toma de fotos hemisféricas 43

Índice de Tablas

Tabla 1. Lista de imágenes Landsat 8 obtenidos para el análisis 2
Tabla 2. Datos compilados en los sitios de muestreo 4
Tabla 3. Imágenes Worldview 2 solicitadas a la empresa DigitalGlobe. 4
Tabla 4. Leyenda utilizada en el mapa de la zona de estudio. 7
Tabla 5. Distribución de puntos de muestreo 12
Tabla 6. Datos colectados en los sitios visitados. La variable fCover se refiere a la fracción del suelo cubierta por vegetación estimada a partir de las fotografías hemisféricas usando el software CanEye. 14
Tabla 7. Información recabada en campo en la segunda visita de campo 23
Tabla 8. Matriz de confusión entre datos obtenidos en campo y clases esperadas de acuerdo al mapa derivado de la imagen Worldview 2 a 1.6 m del 4 de abril de 2015. 31
Tabla 9. Matriz de confusión entre datos obtenidos en campo y clases esperadas de acuerdo al mapa derivado de la imagen multitemporal Landsat 8 a 30 m. 32
Tabla 10. Matriz de cambios 2011-2015 a partir de los mapas generados con imágenes Worldview 2 a 1.6 m de resolución del área de estudio. 36

Índice de Figuras

Figura 1. Escenas Worldview 2 del área de estudio para el año 2011. El área correspondiente al año 2015 abarca la superficie cubierta por estas 2 escenas. 5
Figura 2. Diagrama de flujo para la corrección geométrica de las escenas Worldview 2. 6
Figura 3. Clasificaciones no supervisadas obtenidas con el perfil temporal del NDVI en las 12 fechas mediante el algoritmo K-means empleando 6, 10 y 36 clases, a partir de las imágenes Landsat 8... 9
Figura 4. Mapa de distribución fenológica de manglares de 6 clases en el área de estudio y perfiles fenológicos obtenidos por clase en función de las variaciones del NDVI en la serie de tiempo 07/04/2013-26/03/2015 a partir de imágenes de la misión Landsat 8. El punto dentro de las cajas representa la media, la línea entre cajas la mediana. La caja inferior representa el segundo cuartil, la superior el tercero. Los remates de las líneas superior e inferior representan el máximo y el mínimo respectivamente. 10
Figura 5. Ejemplo de fotograma y su ubicación, adquiridos con el equipo de video. 12
Figura 6. Ubicación de los sitios visitados y los transectos que cuentan con datos de video con fotogramas geoetiquetados. 13
Figura 8. Mapas de cobertura terrestre obtenidos con el proceso de clasificación. Landsat 8 a 30 m de resolución (izquierda) y multiespectral a 1.6 m a partir de una imagen Worldview 2 (derecha) del año 2015. 15
Figura 9. Perfiles fenológicos de los diferentes tipos de cobertura de suelo identificados en el área de estudio. 16

Figura 10 Perfiles espectrales de los diferentes tipos de cobertura de suelo identificados en el área de estudio..... 17
Figura 11. Ubicación de puntos de verificación del mapa Worldview 2 del 4 de abril de 2015 al norte del área de estudio..... 21
Figura 12. Ubicación de puntos de verificación del mapa Worldview 2 del 4 de abril de 2015 al sur del área de estudio..... 22
Figura 13 Diagrama de flujo de la construcción del mapa de cambios..... 34
Figura 14. Mapas de cobertura terrestre obtenidos con el proceso de clasificación. Mapa 2011 y 2015 con área mínima cartografiable de 0.01 ha (izquierda y derecha respectivamente) obtenidos a partir de imágenes Worldview 2. 35
Figura 15. Mapas de pérdidas y ganancias para la clase *Manglar Rhizophora dominante* obtenidos para el área de estudio entre 2011 y 2015. Izquierda pérdidas, derecha ganancias. Por cuestiones de escala solo se representan los tipos de cambios con mayor superficie..... 36
Figura 16. Ejemplo de cambios identificados entre dominancia de especies de manglar en el área de estudio. a) Ubicación general de los cambios; b) Mapa 2011 (*Manglar Rhizophora dominante* verde oscuro, *Manglar Laguncularia* dominante verde claro); c) Mapa 2015; d) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2011; e) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2015..... 38
Figura 17 Ejemplo de cambios identificados entre Manglar *Rhizophora* dominante y Cuerpos de agua en el área de estudio. a) Ubicación general de los cambios; b) Mapa 2011 (Manglar *Rhizophora* dominante verde oscuro, Manglar *Laguncularia* dominante verde claro, Cuerpos de agua azul); c) Mapa 2015; d) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2011; e) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2015..... 39

Capítulo 1. Preparación de insumos y construcción de mapas.

Introducción.

La Fundación Packard a través del Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (Packard-FMCN), solicitó a la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) la realización de un proyecto piloto para generar resultados que favorezcan la conservación de las zonas de mangle y en específico de la especie *Rhizophora mangle*, debido a que son sitios de anidación y producción de otras especies importantes en la pesquería. Específicamente la intensión fue evaluar el uso de imágenes de satélite de alta resolución espacial en un sitio piloto de Marismas Nacionales, Nayarit, para diferenciar las especies de mangle, en particular *R. mangle* y elaborar cartografía que permita el seguimiento espacial de esta especie en el marco del monitoreo del manglar en la región Pacífico Norte.

La propuesta se basó en el uso de imágenes Worldview 2, porque presentan una resolución espacial y espectral amplia (ocho bandas), con la que se pudo obtener una diferenciación espacial adecuada de la especie *R. mangle*. Los insumos utilizados corresponden a los años propuestos (2011 y 2015). Las fechas fueron seleccionadas con base en las de los datos empleados en los mapas de la distribución de manglares, 2010 y 2015, sin embargo no hubo la disponibilidad de imagen Worldview 2 para el área de interés en el año 2010.

Se realizaron dos fases de trabajo en campo, la primera para verificar los primeros resultados y resolver dudas, y la segunda para obtener datos para el proceso de validación, el cual se refiere al grado de acuerdo entre los resultados obtenidos y la realidad. Para ello se utilizaron datos de campo que no fueron utilizados en la generación de la información.

Como un análisis previo de exploración y para orientar la primera parte del trabajo de campo, se comenzó con una propuesta para diferenciar las comunidades de manglar que se desarrollan en el área de estudio empleando datos de la plataforma Landsat 8. En esta propuesta se usó la información que brindan los patrones temporales (fenología), formados por un indicador de verdor y vigor de la vegetación (NDVI), aprovechando la disponibilidad de imágenes Landsat 8 desde el mes de abril del 2013 hasta finales de mayo del 2015. Aunque no estaba contemplado en la propuesta original, el mapa resultante se evaluó junto con el mapa resultado de las imágenes Worldview 2 para ahondar en la discusión de las mejores prácticas en el objetivo del seguimiento de la cobertura de la especie *R. mangle.*

Métodos

Identificación previa de la condición de la cobertura de manglar

Con el fin de contar con una primera descripción del área de estudio previa a la adquisición de las imágenes Worldview 2, se descargaron las imágenes de la misión Landsat 8 de libre acceso (30 m de resolución), disponibles desde los últimos 2 años. El Path/Row correspondiente es el 031/045 y las fechas de los datos se muestran en la tabla 1. A partir de esos datos se hizo una descripción de

la fenología de las áreas de manglar para explorar la posibilidad de usar esta información en la caracterización e identificación *a priori* de *R. mangle* y dirigir el esfuerzo de muestreo en campo.

Tabla 1. Lista de imágenes Landsat 8 obtenidos para el análisis

Path	Row	Año	Sensor	Día juliano del año de adquisición	Fecha	NDVI
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	97	07/04/2013	X
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	143	23/05/2013	
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	159	08/06/2013	
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	191	10/07/2013	
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	255	12/09/2013	X
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	287	14/10/2013	
031	045	2013	Combinado (TIRS+OLI)	351	17/12/2013	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	2	02/01/2014	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	18	18/01/2014	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	66	07/03/2014	
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	130	10/05/2014	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	194	13/07/2014	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	210	29/07/2014	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	226	14/08/2014	X
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	290	17/10/2014	
031	045	2014	Combinado (TIRS+OLI)	306	02/11/2014	X
031	045	2015	Combinado (TIRS+OLI)	21	21/01/2015	
031	045	2015	Combinado (TIRS+OLI)	69	10/03/2015	X
031	045	2015	Combinado (TIRS+OLI)	85	26/03/2015	X
031	045	2015	Combinado (TIRS+OLI)	149	29/05/2015	X

Las imágenes fueron procesadas en el programa QGIS con el grupo de herramientas SCP (Semi-Automatic Classification Plugin), para llevarlas de su expresión en valores digitales a reflectancias al límite de la atmósfera. Este proceso incluye correcciones radiométrica y atmosférica empleando el modelo DOS1 (Dark Object Substraction) (USGS, 2015). Lo anterior permite estandarizar los datos y con ello la posibilidad de hacer comparaciones con los registros en las diferentes fechas.

Se realizó una selección visual de las imágenes procesadas para eliminar aquellas con presencia de nubes en el área de estudio y se obtuvieron imágenes de NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada), empleando la fórmula (ecuación 1):

Ecuación 1

$$NDVI = \frac{(IRCercano\ -\ Rojo)}{(IRCercano\ +\ Rojo)}$$

Dónde:

IRCercano = Banda 5 (NIR) del sensor OLI de la misión Landsat 8.

Y

Rojo = Banda 4 (Rojo) del sensor OLI de la misión Landsat 8.

Con estos datos se construyó una imagen multitemporal de NDVI con las fechas concatenadas señaladas con una X en la tabla 1.

Asumiendo la posibilidad de que el comportamiento fenológico sea una característica particular de cada especie de manglar en el área de estudio, como sugiere el trabajo de Flores de Santiago, et al, 2012, se obtuvieron 3 clasificaciones no supervisadas de 6, 10 y 36 clases, sobre el perfil temporal del NDVI de las 12 fechas empleando el algoritmo K-means y el programa ERDAS. Estas clasificaciones se acotaron empleando como máscara el área señalada como "Manglar" del mapa 2010 de Sistema de Monitoreo de los Manglares de México (SMMM) (Rodríguez-Zuñiga et al., 2013), correspondiente al área de estudio.

El mapa resultante funcionó como referencia durante la primera fase de campo. Los datos colectados a nivel de terreno se emplearon después para proponer una nueva clasificación que se presenta al final de este informe y que considera, entre otras clases, una categoría que identifica las áreas donde la especie *R. mangle* es dominante.

Diseño de muestreo para la primera fase de campo

Se generó una grilla de puntos sistemática a 250 m sobre la máscara de la clase "Manglar", obtenida del mapa 2010 del SMMM para el estado de Nayarit, que arrojó un total de 1,259 puntos. Mediante una operación de unión espacial, se asignó la clase correspondiente en el mapa resultado de la identificación previa de las condiciones de la cobertura de manglar de seis clases mencionadas párrafos arriba.

Se consideró visitar y registrar datos en 126 puntos, que corresponden al 10% del total de puntos de la grilla sistemática, distribuyéndolos de acuerdo al área ponderada sobre las clases identificadas con comportamientos fenológicos particulares, usando también como criterio la accesibilidad de los sitios. La información colectada en esta visita, se utilizó como insumo para mejorar la clasificación fenológica de la serie NDVI derivada de las imágenes Landsat y para guiar la clasificación de las imágenes Worldview 2.

Aunque se intentó llegar en la medida de lo posible a los puntos generados en gabinete, en la práctica, debido a las condiciones de inaccesibilidad en varios de ellos, sólo se emplearon como guías y se optó por tomar datos en donde las condiciones de la estructura de la vegetación lo ameritaban (transiciones o sitios con clara dominancia de una especie).

En cada sitio se registraron los datos que se muestran en la tabla 2 en un radio de 10 m a partir del centro. Adicionalmente, se tomaron 10 fotografías hemisféricas (5 al dosel y 5 al suelo) para contar con estimaciones de cobertura de la vegetación y registros gráficos de la estructura y especies en el sitio. Los detalles de esta técnica se muestran en el anexo a este documento.

Tabla 2. Datos compilados en los sitios de muestreo

ID Punto	**Número de árboles de** *Rhizophora mangle*	**Número de árboles de** *Laguncularia racemosa*	**Número de árboles de** *Avicennia germinans*	**Número de árboles de** *Conocarpus erectus*	**Altura Promedio arbolado (m)**

Adquisición y preparación de las imágenes Worldview2.

Se realizó una búsqueda en el sistema ImageFinder de Digital Globe para imágenes Worldview 2 y 3 en el área de estudio para los años 2011 y 2015. Las mejores opciones dada el área cubierta por las escenas y sus características en cuanto a nubosidad, fueron las escenas que se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Imágenes Worldview 2 solicitadas a la empresa DigitalGlobe.

ID	Año	Fecha	Sensor	Bandas
103001004048D200	2015	4-abril	WV2	Pan+MS1+MS2
103001000AD73900	2011	1-mayo	WV2	Pan+MS1+MS2
103001000B139D00	2011	17-mayo	WV2	Pan+MS1+MS2

Para 2015 solo fue necesaria una escena para cubrir el área de estudio y para 2011 fue necesario considerar una segunda escena (17-mayo) para complementar una franja de 350 m en su parte más ancha y de unos pocos metros en su parte más angosta, al oeste del área de estudio (figura 1).

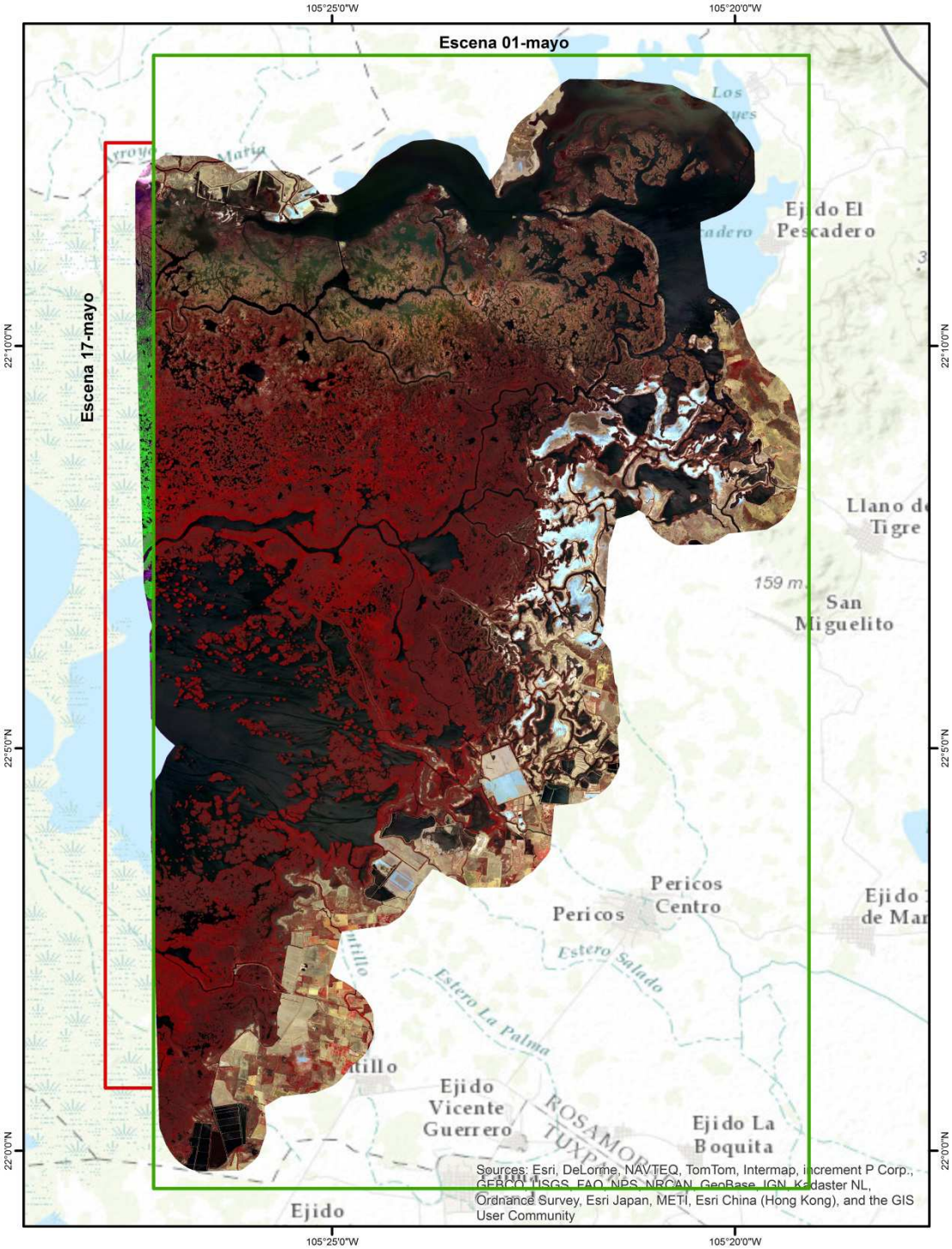


Figura 1. Escenas Worldview 2 del área de estudio para el año 2011. El área correspondiente al año 2015 abarca la superficie cubierta por estas 2 escenas.

Corrección radiométrica de las imágenes. Las imágenes fueron corregidas radiométricamente empleando el software Geomatica 2015, llevándolas de su expresión en números digitales a reflectancia a nivel del dosel mediante una corrección atmosférica con el módulo ATCOR. Para este proceso se usó el Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 de INEGI a una resolución de 15 metros, para estimar las condiciones de iluminación y los siguientes parámetros de visibilidad:

Tipo de aerosol: marítimo

Condición: Tropical

Constante de visibilidad: 30 km

Los parámetros de neblina y mascara de nubes se dejaron con los valores por defecto del programa.

Corrección geométrica de las escenas. Para asegurar un adecuado ajuste entre las imágenes que permitiera su comparación, las imágenes producto de la corrección radiométrica se sometieron a un proceso de ortorrectificación empleando el módulo OrthoEngine de PCI Geomática (figura 2). Se eligió la imagen pancromática de la escena Worldview 2 correspondiente al 01 de mayo del 2011 como base para corregir las imágenes del 17 de mayo del 2011 y del 4 de abril del 2015, ya que las características al momento de su adquisición (ángulo máximo de desplazamiento al nadir de 6°), le confieren un ajuste muy preciso con la base de ortofotos de INEGI.

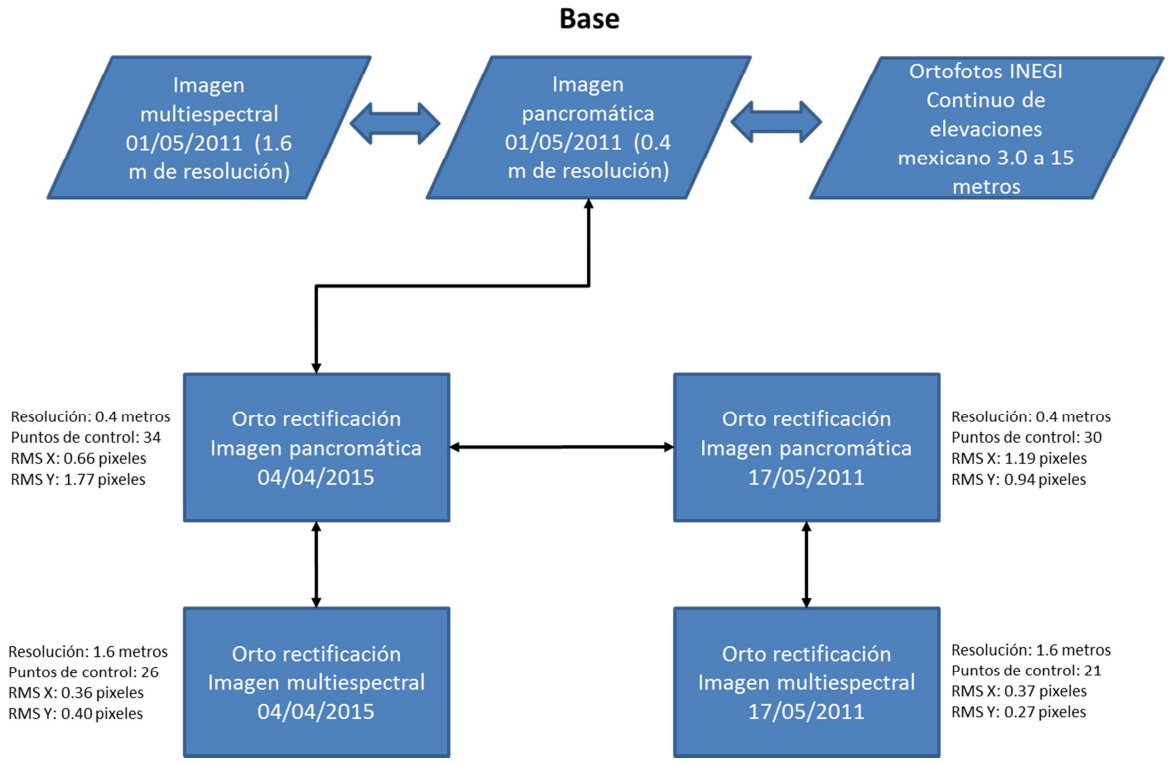


Figura 2. Diagrama de flujo para la corrección geométrica de las escenas Worldview 2.

Se corrigió en primer lugar la imagen pancromática del 04 de abril del 2015, generándose la imagen de salida con una resolución espacial de 0.4 m. Se emplearon 34 puntos de control, obteniendo 0.66 pixeles de RMS para la coordenada X y 1.77 para la coordenada Y.

Posteriormente se ajustó la imagen multiespectral del 04 de abril del 2015 empleando como imagen de referencia a su par pancromático ya corregido, generándose la imagen de salida con una resolución espacial de 1.6 m. Se emplearon 26 puntos de control obteniendo 0.36 pixeles de RMS para la coordenada X y 0.40 para la coordenada Y.

La imagen pancromática correspondiente a la escena del 17 de mayo del 2011, se corrigió geométricamente usando la imagen pancromática ya corregida del 04 de abril del 2015. Se generaron 30 puntos de control, obteniéndose un RMS para la coordenada X de 1.19 píxeles y de 0.94 píxeles en la dirección Y. La imagen corregida se generó a 0.4 m de resolución espacial.

Finalmente, la imagen multiespectral del 17 de mayo del 2011, se corrigió geométricamente usando su par pancromático ya corregido. Se generaron 21 puntos de control, obteniéndose un RMS para la coordenada X de 0.37 píxeles y de 0.27 píxeles en la dirección Y. La imagen corregida se generó a 1.6 m de resolución espacial.

Obtención de mapas de identificación de *Rizhopora mangle*

Se probó como primer método para la identificación de las áreas con presencia de *R. mangle* en el área de estudio, el uso de clasificaciones no supervisada sobre la imagen multitemporal de NDVI derivada de Landsat 8 y la imagen World View 2 corregida del 04 de abril del 2015. Dado el buen desempeño obtenido por estas, se optó por mantener esta estrategia.

Se generaron dos imágenes categorizadas con 100 clases cada una mediante el algoritmo isodata del software ERDAS, las cuales fueron agrupadas a una leyenda de 8 clases (tabla 4), haciendo uso de la información recabada en campo durante la primera visita, incluyendo los fotogramas de los transectos guardados en los videos e interpretación visual de rasgos. Es decir, la posición de los datos de campo se cruzó con las clases que les corresponden en el mapa de 100 clases para renombrar a estas y darles una categoría de la leyenda usada en este estudio. Originalmente, se empleó una leyenda preliminar que contemplaba cuerpos de agua con diferentes niveles de profundidad. Posteriormente se decidió simplificar la leyenda agrupando estas clases para dejar solo una clase para cuerpos de agua, quedando como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Leyenda utilizada en el mapa de la zona de estudio.

ID	Etiqueta/Clase	Descripción
1	Cuerpos de agua	Cuerpos de agua
2	Humedales_granjas	Vegetación hidrófita o halófita, terrenos con poca cubierta vegetal, granjas camaronícolas sin mantenimiento.
3	Agrícola_pecuario	Áreas utilizadas para agricultura de temporal, riego y pastizales dedicados a la actividad pecuaria.

4	Otra_vegetación	Vegetación arbustiva y arbórea de selvas bajas caducifolias y/o perennifolias. Diferentes tipos de vegetación secundaria arbórea y arbustiva.
5	Suelo_Infraestructura	Suelo desnudo y áreas de granjas acuícolas sin presencia de agua
6	Manglar_Laguncularia_Dominante	Humedales arbóreos conformados casi exclusivamente por la especie *Laguncularia racemosa.*
7	Manglar_Rhizophora_Dominante	Humedales arbóreos conformados casi exclusivamente por la especie *Rizhophora mangle.*
8	Vegetación muerta	Humedales con restos muertos de diferentes especies de mangle

Resultados Capítulo 1

Resultados de la identificación previa de la condición de la cobertura de manglar

Los patrones fenológicos obtenidos a partir de la serie de valores de NDVI derivados de las imágenes Landsat 8 mostraron consistentemente un grupo de clases que se distribuye en la ribera del canal principal en la parte centro-norte de la zona de estudio y en el centro de los principales bloques de vegetación entre cuerpos de agua (figura 3). También fue posible observar un gradiente de clases hacia tierra firme. Lo anterior, se especuló y corroboró a nivel del terreno, podría deberse a diferentes condiciones de crecimiento dadas las características de régimen hidrológico, lo que también está relacionado con la composición de especies (López-Portillo y Ezcurra, 2002). En las áreas aledañas a los canales, el flujo de agua por la marea es continuo, dando lugar a condiciones que impiden el estancamiento y evaporación del agua, lo que no propicia condiciones de hipersalinidad. Hacia la parte de tierra y zonas más altas, el flujo de agua no es continuo y las condiciones de salinidad favorecen el establecimiento de las especies más tolerantes (*L. racemosa y Avicennia germinans*).

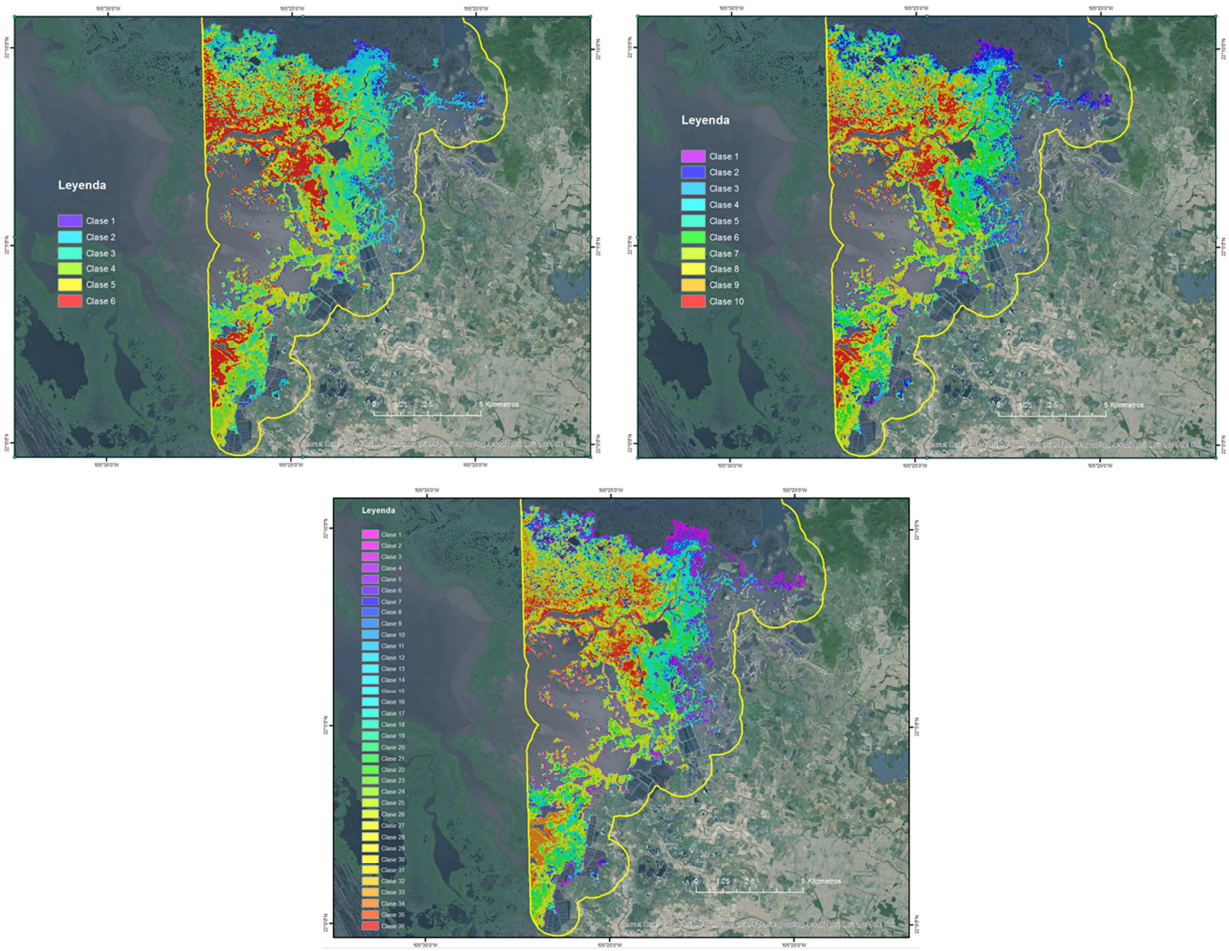


Figura 3. Clasificaciones no supervisadas obtenidas con el perfil temporal del NDVI en las 12 fechas mediante el algoritmo K-means empleando 6, 10 y 36 clases, a partir de las imágenes Landsat 8.

Empleando la grilla sistemática a 250 m y el mapa producto de la clasificación no supervisada de 6 clases, se obtuvieron las estadísticas de NDVI para cada fecha con el fin de analizar las diferentes condiciones que se esperaban encontrar sobre el terreno (figura 4)

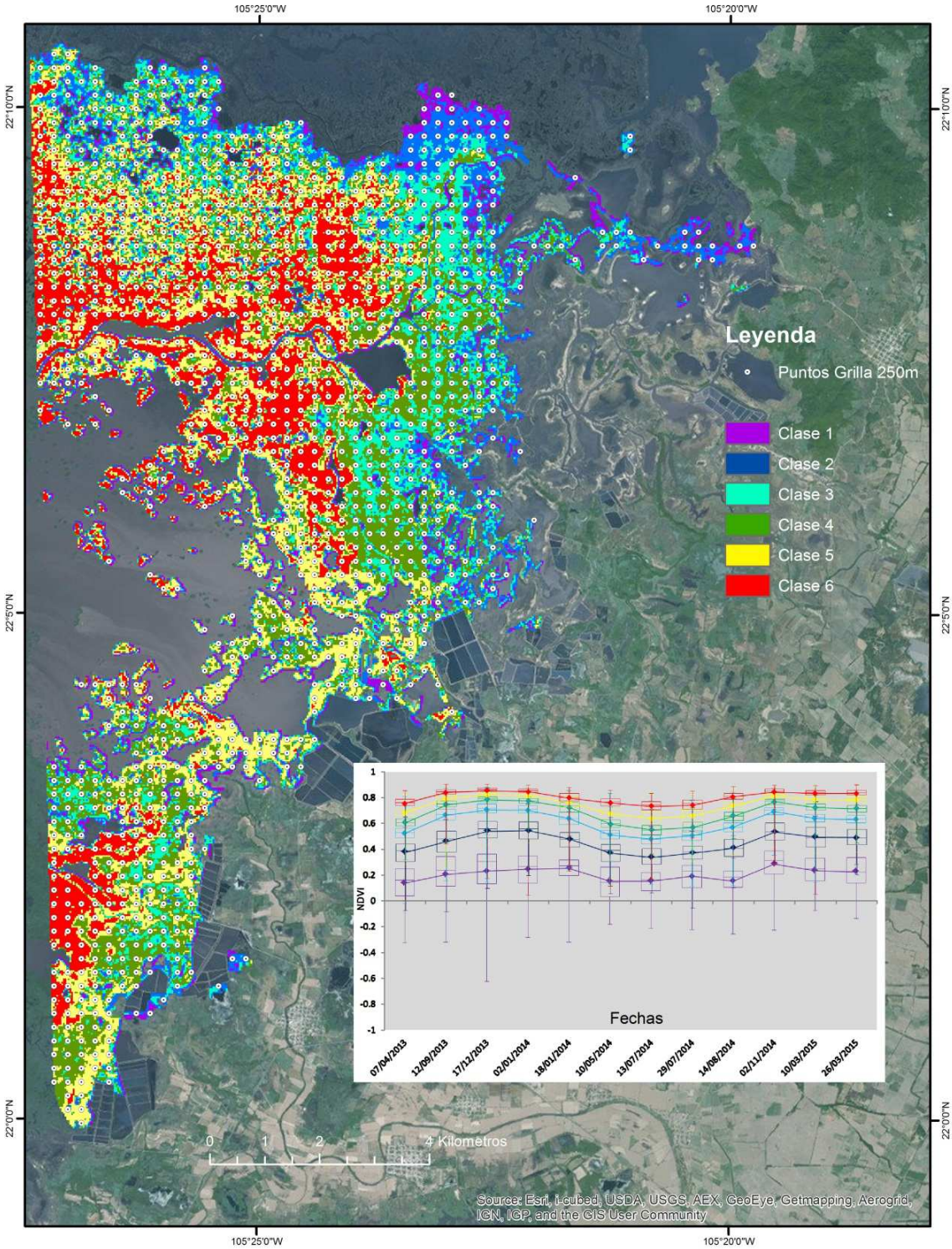


Figura 4. Mapa de distribución fenológica de manglares de 6 clases en el área de estudio y perfiles fenológicos obtenidos por clase en función de las variaciones del NDVI en la serie de tiempo 07/04/2013-26/03/2015 a partir de imágenes de la misión Landsat 8. El punto dentro de las cajas representa la media, la línea entre cajas la mediana. La caja inferior representa el segundo cuartil, la superior el tercero. Los remates de las líneas superior e inferior representan el máximo y el mínimo respectivamente.

Como se aprecia en la figura 4, la forma de los perfiles fenológicos del manglar en el área de estudio entre las diferentes clases son similares; los valores máximos del primer periodo (2013) se alcanzaron entre diciembre y la primera quincena de enero para todas las clases, excepto la clase 1, que lo hizo en la segunda quincena. El mínimo también coincide para todas las clases excepto la clase 1, alcanzándose en julio y en mayo de 2014, respectivamente. En el segundo periodo (2014), el máximo para todas las clases parece alcanzarse en noviembre, sin embargo, falta información de los meses posteriores hasta febrero 2015, debido a las condiciones de nubosidad de principios de este año.

La principal diferencia entre las clases estriba en los valores de NDVI que alcanza cada una de ellas, siendo los de clase 5 y 6 las que mantienen todo el tiempo valores muy altos de NDVI, estrechamente concentrados alrededor de sus respectivas medias. Las diferencias entre fechas en estas clases también son muy pequeñas, marcando una ligera diferencia entre los periodos con valores más altos y los más bajos. Lo anterior sugiere sitios con cobertura de manglar muy densa y con variaciones en su follaje y cobertura poco visibles a lo largo de las diferentes épocas del año.

Las clases 2, 3 y 4 marcan una diferencia más visible entre los valores más altos y más bajos de NDVI a lo largo del tiempo. Lo anterior puede deberse a diferentes condiciones, entre ellas mayores áreas de inundación o menor densidad de árboles, lo que podría estar relacionado también con la composición de especies en esas áreas.

La clase 1 se separa claramente del resto y espacialmente está restringida prácticamente al límite entre los cuerpos de agua y la tierra firme. Sus valores mínimos de NDVI toman valores negativos a lo largo de todas las épocas del año y su estacionalidad es poco marcada, por lo que se espera corresponda a sitios con muy poca cobertura de manglar y en sitios inundados constantemente. Probablemente se trata de sitios perturbados o de transición a otros humedales en la zona de estudio.

Resultados de la primera etapa de campo

De forma preliminar, se mantuvo la expectativa de que las áreas de distribución señaladas por la clase 6 correspondían a los sitios con mayor presencia de *R. mangle*, aunque también podrían tratarse simplemente del área de distribución con mejores condiciones para el desarrollo de varias especies. Para comprobar lo anterior, se distribuyeron los 126 sitios de muestreo guiándose con estos gradientes, asignando la cantidad por clase proporcionalmente al área de distribución de las 6 clases como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Distribución de puntos de muestreo

Clase	Puntos grilla 250m que caen en cada clase	Proporción	Puntos de Muestreo por clase
1	42	0.03	4
2	117	0.09	12
3	208	0.17	21
4	312	0.25	31
5	321	0.25	32
6	259	0.21	26
Total	**1259**		**126**

Para el trabajo en campo se organizaron dos brigadas. Cada grupo registró la posición sobre el terreno donde se tomaron los datos empleando un GPS Garmin modelo GPSMAP 78S, que entre sus características cuenta con sistema para estimar una posición promediando automáticamente las lecturas durante varios minutos hasta alcanzar la mejor precisión del GPS (3 m).

Adicionalmente, se contó con dos cámaras de video modelo Garmin Virb Elite, que integran datos GPS, lo que permitió documentar los transectos. Como cada fotograma puede asociarse a los datos de posición que brinda el GPS (figura 5), cada uno de ellos representa información útil georreferenciada para la identificación de especies y de las condiciones la vegetación. En total se visitaron 52 sitios, se tomaron 510 fotografías hemisféricas y se grabaron 92 videos con una duración promedio de 3 minutos cada uno.

Figura 5. Ejemplo de fotograma y su ubicación, adquiridos con el equipo de video.

La figura 6 muestra la ubicación de los sitios de toma de datos y los transectos con datos de video geoetiquetado. La tabla 6 muestra los datos obtenidos para cada uno de los sitios.

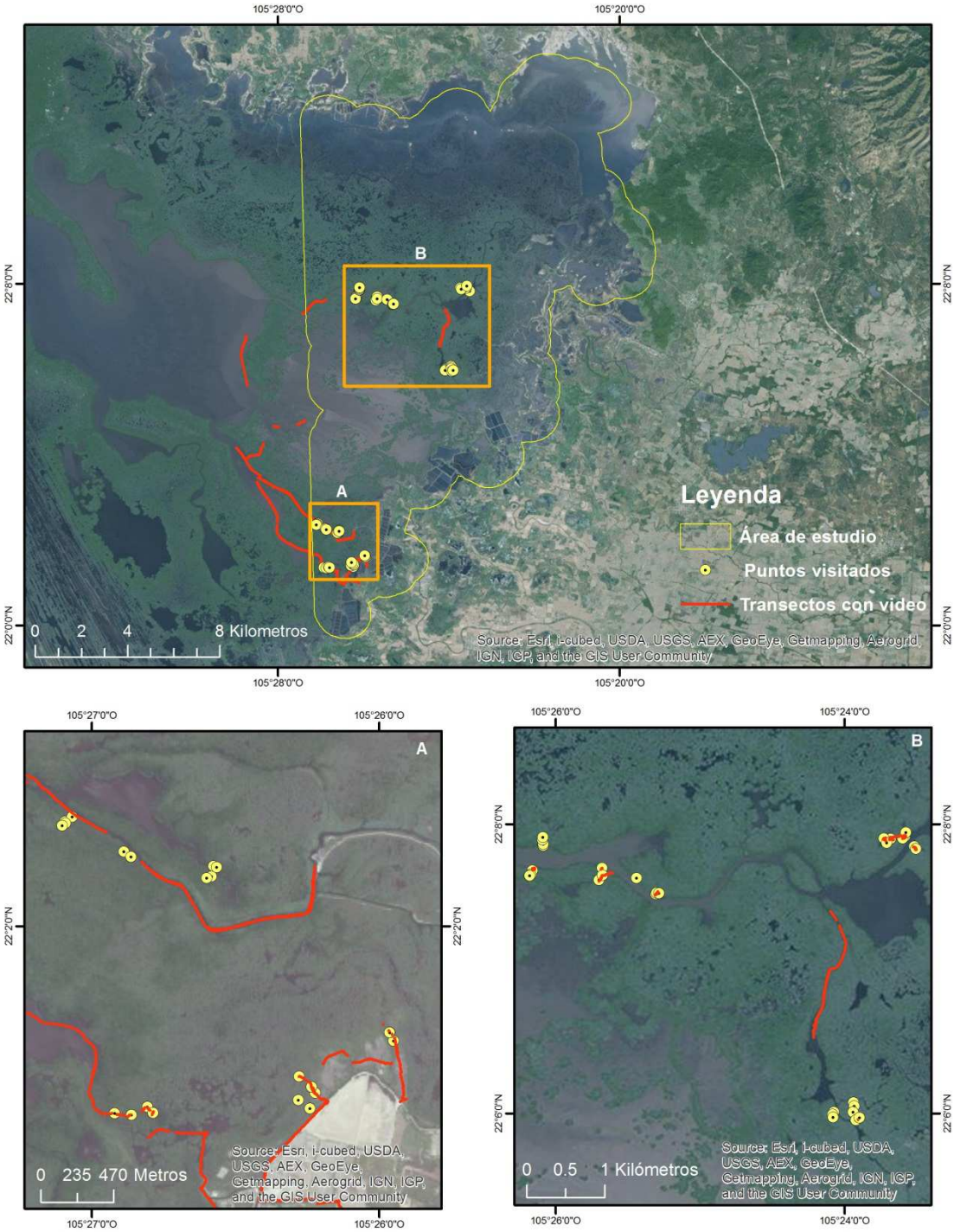


Figura 6. Ubicación de los sitios visitados y los transectos que cuentan con datos de video con fotogramas geoetiquetados.

Tabla 6. Datos colectados en los sitios visitados. La variable fCover se refiere a la fracción del suelo cubierta por vegetación estimada a partir de las fotografías hemisféricas usando el software CanEye.

ID_Punto	Numero de Fotos Hemisfericas	Fecha	Número de *Rizhophora*	Número de *Laguncularia*	Número de *Avicennia*	Altura_Promedio	% Presencia *Rhizophora*	Longitud	Latitud	fCover
B01	5	18/05/2015	12			10	100	-105.42798	22.12826	81.3
B02	5	18/05/2015	10	3		9	76.9	-105.42835	22.126861	91.1
B03		18/05/2015		11		12	0	-105.42792	22.127452	
A01	5	18/05/2015		16		7	0	-105.424	22.12709	81.3
A02	5	18/05/2015	18			7	100	-105.42179	22.125259	73.6
A03	5	18/05/2015	10	12		6	45.5	-105.42171	22.125403	78.4
A04	5	18/05/2015	5	8		4	38.5	-105.42145	22.125348	87.5
B04	5	19/05/2015	1	20		8	4.8	-105.43601	22.127994	56.9
B05	5	19/05/2015	32	1		7	97	-105.4362	22.127535	61.1
B06	5	19/05/2015	5	5		9	50	-105.43633	22.127383	83.2
B07	5	19/05/2015		60		4	0	-105.39196	22.130739	21.9
B08	5	19/05/2015		17		5	0	-105.39178	22.130472	44.1
A05	5	19/05/2015	3	4		6	42.9	-105.43479	22.130863	86.1
A06	5	19/05/2015	8	18		6	30.8	-105.43476	22.131034	86.3
A07	5	19/05/2015	9	11		4	45	-105.43486	22.131522	61.6
A08	5	19/05/2015	6	1		3	85.7	-105.43481	22.131843	86.4
A09	5	19/05/2015	4	28		4	12.5	-105.39308	22.131882	60.5
A10	5	19/05/2015		17		2	0	-105.39333	22.131677	33.8
A11	5	19/05/2015	6	20		2	23.1	-105.39468	22.131635	44.5
A12	5	19/05/2015	6	0		3.5	100	-105.3955	22.131671	93.4
A13	5	19/05/2015	2	20		2	9.1	-105.39515	22.131193	56.1
A14	5	19/05/2015		30		2	0	-105.39293	22.132352	65.5
B09	5	20/05/2015		15		3.5	0	-105.40124	22.100105	58.4
B10	5	20/05/2015		13		2.5	0	-105.4014	22.099814	37.4
B11	5	20/05/2015	4	12		3	25	-105.40133	22.09948	60.1
A15	5	20/05/2015		32		2.5	0	-105.39899	22.101205	53.7
A16	5	20/05/2015		31		2	0	-105.39888	22.100772	51.7
A17	5	20/05/2015		12		2.5	0	-105.39904	22.100081	56.8
A18	5	20/05/2015		17		2.5	0	-105.3987	22.099192	70.6
A19	5	20/05/2015		35		5	0	-105.39831	22.099438	41.8
B12	5	21/05/2015			50	2	0	-105.43247	22.02666	1
B13	5	21/05/2015		21		7	0	-105.43267	22.027144	60
B14	5	21/05/2015		25		7	0	-105.4327	22.027151	63.8
B15	5	21/05/2015		3	40	2.5	0	-105.43732	22.02273	
B16	5	21/05/2015		70		3	0	-105.438	22.023209	72.9
B17	5	21/05/2015		30		5	0	-105.45155	22.039386	49.4
B18	5	21/05/2015	22	1		10	95.7	-105.45114	22.039677	85.9
B19	5	21/05/2015	21	8		10	72.4	-105.45153	22.039302	82.8
B20	5	21/05/2015	20	11		10	64.5	-105.45172	22.03917	60.1
A20	5	21/05/2015	1	8		8	11.1	-105.44814	22.037639	44.6
A21	5	21/05/2015		15		7	0	-105.44867	22.02244	61.3
A22	5	21/05/2015	6	25		8	19.4	-105.44769	22.022351	64.2
A23	5	21/05/2015	11	9		7.5	55	-105.44677	22.022813	74.7
A24	5	21/05/2015	12	3		10	80	-105.44645	22.022463	78.6
A25	5	21/05/2015	9	8		10	52.9	-105.44773	22.037349	84.6
B21	5	22/05/2015		7		3.5	0	-105.43703	22.023626	61
B22	5	22/05/2015		12		7	0	-105.43723	22.023991	70.2
B23	5	22/05/2015		14		9	0	-105.43795	22.024592	72.5
B24	5	22/05/2015	12	3		11	80	-105.44304	22.036207	79.6
B25	5	22/05/2015	22	4		15	84.6	-105.44334	22.036109	85.8
A26	5	22/05/2015	18	3		10	85.7	-105.44293	22.036809	86.7
A27	5	22/05/2015	5	38		8	11.6	-105.44275	22.036741	70.6

Mapas de distribución de especies

A partir de los dos insumos del año 2015 se construyeron 2 mapas categorizados de acuerdo al proceso descrito en el apartado de Metodología, etiquetando las imágenes producto de una clasificación no supervisada de 100 clases con la ayuda de los fotogramas de los videos

georreferenciados, los datos recopilados en los sitos de fotos hemisféricas e interpretación visual de rasgos.

Los mapas resultantes (figura 7) corresponden a estos mapas de 100 clases producto de una clasificación no supervisada, agrupadas a las 8 categorías de cobertura descritas en la leyenda haciendo uso de los datos recabados en campo. La leyenda empleada contiene las condiciones de cobertura terrestre encontradas en el área de estudio y las dos condiciones de crecimiento de manglar hallado: las áreas donde domina la especie *R. mangle* y las áreas donde *L. racemosa* es la principal especie observada. La condición de dominio en los sitios observados en campo para estas clases de cobertura de manglar, se estableció cuando más de la mitad de los individuos censados en un radio de 10 m a partir del centro del punto, corresponde a una de estas especies.

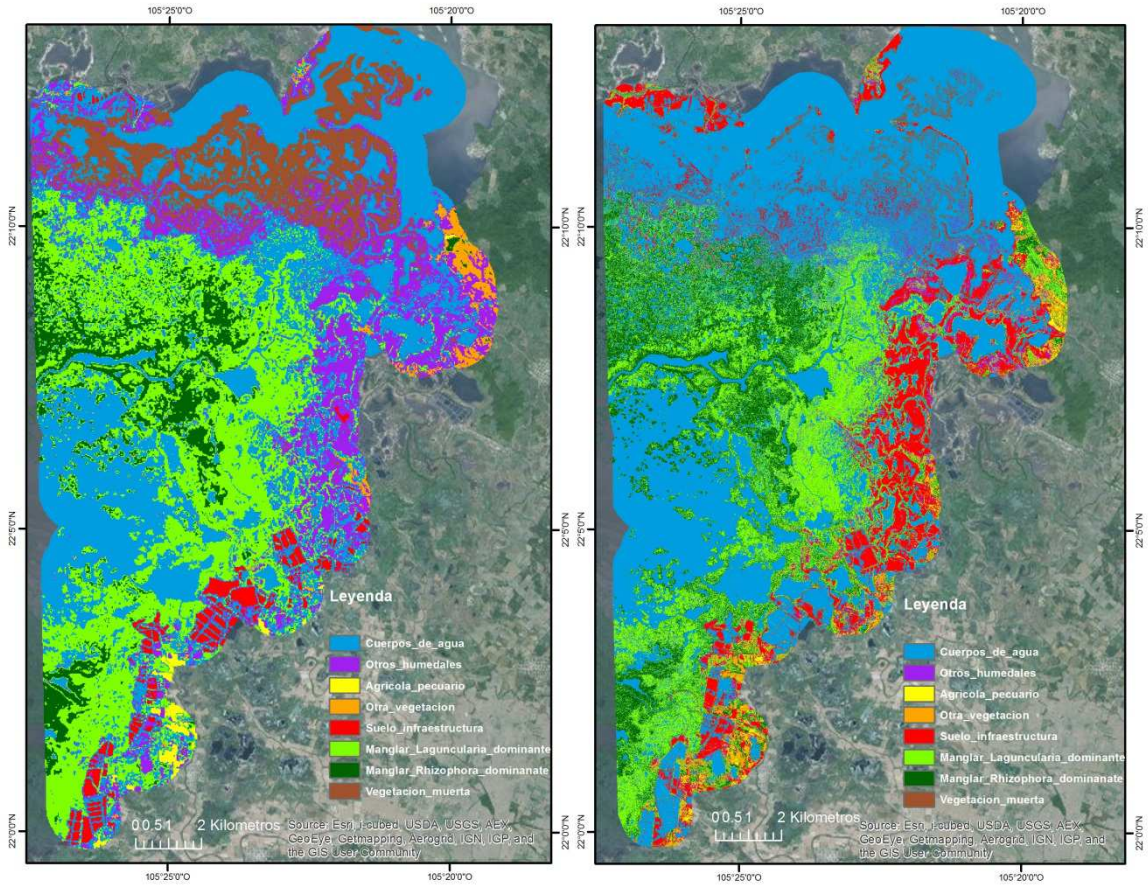


Figura 7. Mapas de cobertura terrestre obtenidos con el proceso de clasificación. Landsat 8 a 30 m de resolución (izquierda) y multiespectral a 1.6 m a partir de una imagen Worldview 2 (derecha) del año 2015.

En general, la distribución de las áreas de las dos condiciones de manglar (verde obscuro y verde claro) son similares bajo ambos enfoques, a pesar de la fuerte diferencia en la resolución espacial

de los insumos (30 m y 1.6 m respectivamente). Las diferencias particulares parecen deberse a las distintas resoluciones espaciales y a la gran fragmentación de los manchones de mangle en algunas zonas del área de estudio, lo que hace que los pixeles de 30 m de Landsat no detecten *R. mangle* en donde la resolución de 1.6 metros de la imagen Worldview 2 si lo hace. Ambos enfoques sin embargo parecen confundir con *R. mangle* a una pequeña área al noroeste, en donde, a reserva de comprobarlo en la segunda fase de campo, muy probablemente se trate de algún tipo de selva inundable u otro tipo de vegetación.

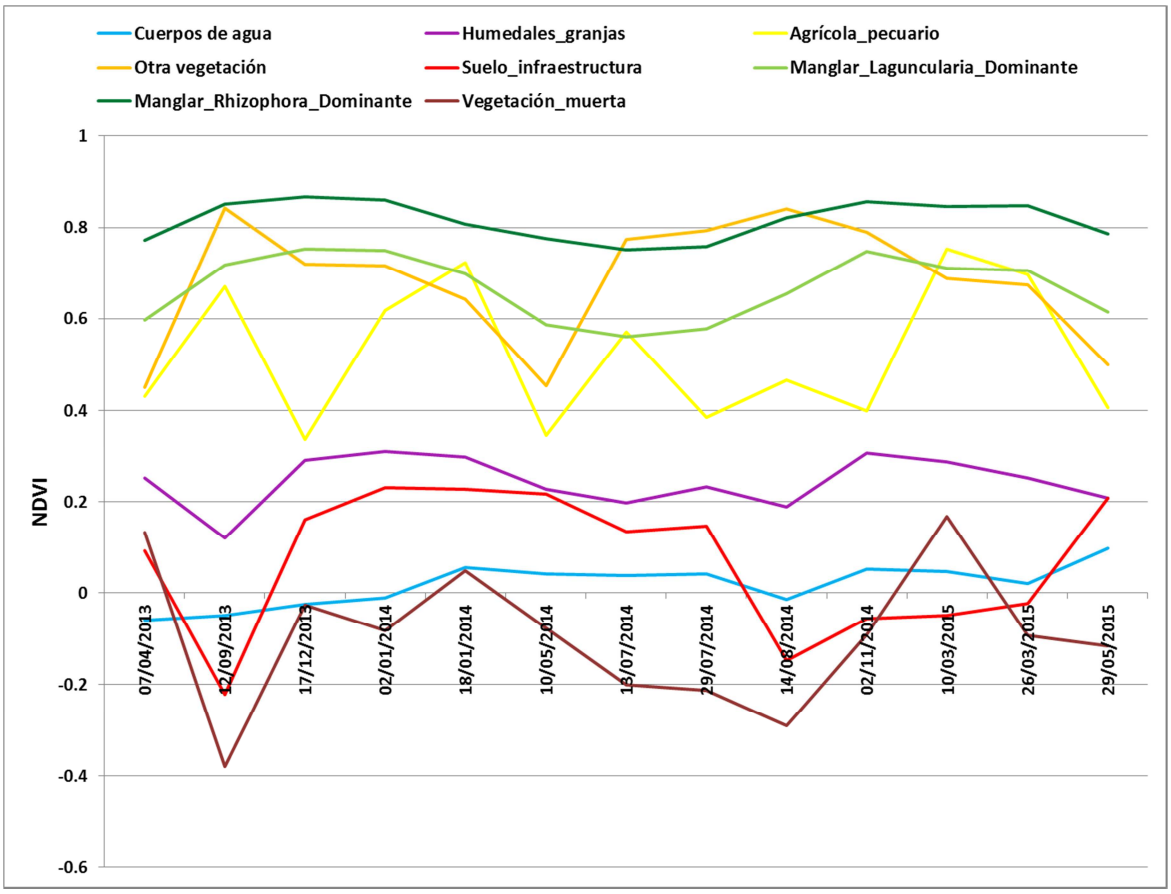


Figura 8. Perfiles fenológicos de los diferentes tipos de cobertura de suelo identificados en el área de estudio.

La figura 8 muestra los perfiles fenológicos de las coberturas terrestres utilizadas como leyenda. Lo más destacable es la forma que adoptan los cambios estacionales del NDVI de ambas condiciones de manglar. *R. mangle* muestra una estacionalidad poco marcada y se mantiene con los valores más altos de NDVI, sólo superado a principios del mes de julio por los valores de la clase "Otra vegetación", que responde seguramente a las condiciones de humedad de la temporada de lluvias.

En las otras áreas, donde domina *L. racemosa* por su parte, se mantienen también valores altos de NDVI, pero no al nivel de *R. mangle* y aunque su perfil fenológico es muy similar, exhiben una estacionalidad ligeramente más marcada, lo que quizás es consecuencia de su mayor tolerancia a

condiciones adversas, lo que se reflejaría como comunidades menos vigorosas y una menor densidad de individuos en sus áreas de distribución.

Una característica destacable del análisis de los patrones fenológicos, es que facilita la identificación de áreas bajo manejo, como son las áreas agrícolas y las granjas acuícolas de otro tipo de condiciones. También permite discriminar de mejor manera las áreas que corresponden a otros tipos de vegetación terrestre de las áreas de manglar.

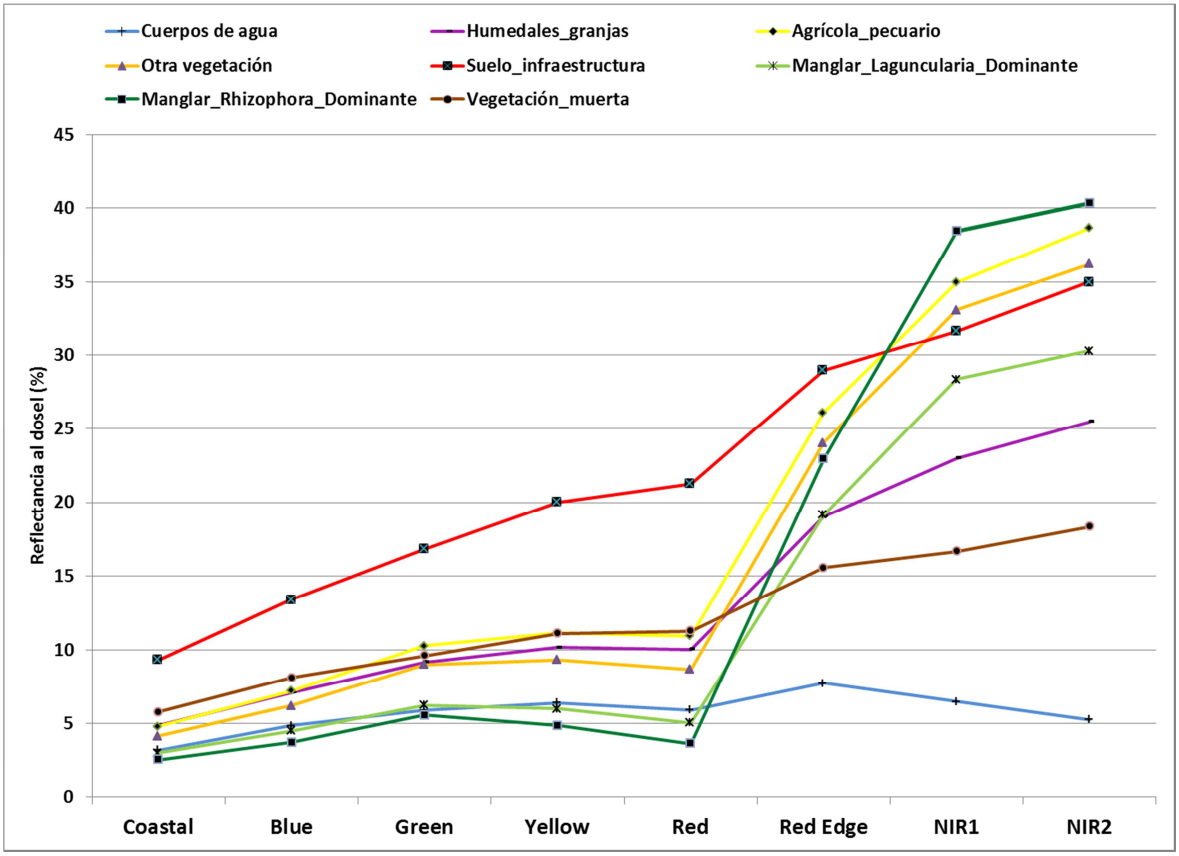


Figura 9 Perfiles espectrales de los diferentes tipos de cobertura de suelo identificados en el área de estudio

La figura 9 muestra los perfiles espectrales obtenidos a partir de la imagen Worldview 2 del 4 de abril del 2015 de los diferentes tipos de cobertura terrestre identificados en el área de estudio. Como cabría esperar por lo observado en el perfil fenológico del NDVI, la firma espectral del *R. mangle* se destaca por tener la mayor absorbancia de todas las clases en la región roja del espectro y los mayores valores de reflectancia en las dos bandas infrarrojas que proporciona la imagen. Lo anterior implica un follaje vigoroso con la mayor actividad fotosintética de entre todas las clases. Este comportamiento, confirma lo obtenido en investigaciones previas en la región noroeste del país. Zhang, et al., 2014, en condiciones de laboratorio, encontró que las hojas de *R. mangle* son de un verde muy oscuro comparada con las de otras especies, lo que explica su baja

reflectancia en las regiones verde y roja de espectro. También cita la notable respuesta en la región infrarroja, producto probablemente del grosor relativo de sus hojas.

Las áreas identificadas con dominancia de *L. racemosa* en cambio, si bien presentan el típico perfil de vegetación activa (valores bajos de reflectancia en la región roja del espectro y altos en la región infrarroja), en el contexto de la región de estudio exhibe un menor vigor respecto a *R. mangle*. Sus hojas tienden más a colores verdes de tonos más brillantes con matices amarillos.

Capítulo 2. Evaluación del grado de acuerdo obtenido en la identificación de *Rhizophora mangle* en el área de estudio

Introducción

Como se mencionó en el Capítulo 1, el trabajo de campo constó de 2 fases. En la primera de estas se obtuvo información que funcionó para obtener los mapas de distribución de mangle rojo en el área de estudio. La segunda sirvió para obtener nuevos datos para evaluar el grado de acuerdo entre los resultados obtenidos y la realidad. Originalmente se planteó hacer el segundo recorrido de campo a finales del mes de octubre, sin embargo por problemas de logística y meteorológicos (paso del huracán Patricia), no fue posible hacerlo sino hasta principios del mes de noviembre.

El ejercicio de validación se planificó para realizarlo sobre el mapa obtenido a partir de la imagen Worldview 2 del 4 de abril del 2015. Es decir, los datos recabados en campo sobre el tipo de cobertura sobre el terreno (en un área circular de 10 m de radio), comparado con la predicción hecha por el mapa 2015 derivado de la imagen Worldview2 (un pixel en esta imagen equivale a 2.56 m^2).

Aunque los datos obtenidos en campo no se corresponden a la resolución espacial del mapa generado con datos Landsat 8 (el área circular de los sitios en campo tiene 122 m^2 mientras que un solo pixel de la imagen landsat 8 equivale a 900 m^2), éstos también fueron empleados para validarlo y con esto poder discutir las ventajas y desventajas de ambos insumos.

Métodos

Estrategia de muestreo para la segunda fase de campo

A partir del mapa de distribución de especies obtenido con la imagen Worldview 2 del 4 de abril de 2015, se propusieron una serie de zonas que se denominaron “Áreas de interés”, que se caracterizaron por tener una clara dominancia de alguna de las dos principales especies de mangle halladas en la zona (*R. mangle y L. racemosa*) de acuerdo al mapa obtenido a partir de las imágenes Worldview 2. Se ubicaron principalmente en la parte norte, que es la más fragmentada y que no fue visitada durante la primera fase campo.

Se propuso visitar 54 puntos dentro de estas áreas y verificar la concordancia entre el mapa de distribución obtenido y la especie dominante en campo. Como en la primera visita en el mes de mayo, se conformaron 2 equipos de trabajo. En cada sitio se registraron los mismos datos de la primera visita (tabla 2), incluyendo la toma de 10 fotografías hemisféricas (5 al dosel y 5 al suelo), para tener un registro gráfico de la estructura y dominancia, estableciendo esta como el porcentaje de individuos de *R. mangle* o *L. racemosa* presentes en un radio de 10 m a partir del centro del sitio.

Para el registro de la posición se contó con 2 equipos GPS de alta precisión, un Mobile Mapper Spectra 20 y un Mobile Mapper Spectra 120, cuya exactitud en tiempo real se aproxima al metro y dos cámaras de video tipo Gopro, con las cuales se intentó geoetiquetar algunos fotogramas para contar con mayor información de campo. Sin embargo, por fallas de sincronización de tiempo, no fueron considerados en el análisis de exactitud al no tener el suficiente grado de certidumbre en su ubicación sobre el terreno.

Evaluación de la confiabilidad de los mapas Worldview 2 (4 abril 2015) y Landsat 8

Para la evaluación de la exactitud de los mapas se hizo hincapié en la capacidad de éstos para distinguir las áreas donde las especies *R. mangle* y *L. racemosa* son dominantes, estableciendo como criterio que más de 50% de los individuos en el sitio de muestra, corresponda a una especie o a otra. El resto de las clases no se consideró individualmente, agrupándolas como “Otras clases”. A partir de los datos de campo y su correspondiente clase en cada uno de los mapas, se construyó una matriz de confusión (Congalton et al., 1999), que consiste en un cuadro de doble entrada en donde se contabilizan las coincidencias de los sitios en campo con la clase esperada de acuerdo al mapa. Las estadísticas estimadas en este ejercicio de validación son la confiabilidad total (proporción de los sitios de verificación correctamente clasificados en el mapa); confiabilidad del usuario para cada clase (probabilidad de que un sitio clasificado con cierta clase y aleatoriamente seleccionado sea realmente esa clase en el terreno) y confiabilidad del productor, que es la proporción de sitios de verificación de una determinada clase que están representados en el mapa. A partir de la confiabilidad del usuario y del productor, se deriva la estimación de los errores de comisión y de omisión, respectivamente (Mas, et al., 2003).

Resultados y discusión de la evaluación del grado de acuerdo obtenido en la identificación de *Rhizophora mangle* en el área de estudio

Datos colectados en campo

Debido a las dificultades del terreno por el régimen de lluvias de este año en la región, solo fue posible visitar 31 puntos en las áreas de interés establecidas en gabinete. De estos, 5 puntos se ubicaron en la parte exterior de la laguna. La ubicación de todos los sitios se muestra en la figura 10 y la figura 11.

De los 31 sitios visitados, 15 correspondieron a lugares con *R. mangle* como especie dominante, 11 con *L. racemosa*, 2 a suelo desnudo-Infraestructura, 1 a otro humedal y 2 a otra vegetación. Los

datos recabados en éstos se muestran en la tabla 7, así como el tipo de cobertura esperada en los dos mapas, el derivado a partir de la firma espectral de la imagen Worldview 2 del 4 de abril del 2015 y el derivado de la imagen multitemporal de NDVI a partir de imágenes del sensor Landsat 8. En total se tomaron 290 fotografías hemisféricas y 32 videos con una duración promedio de 2 minutos.

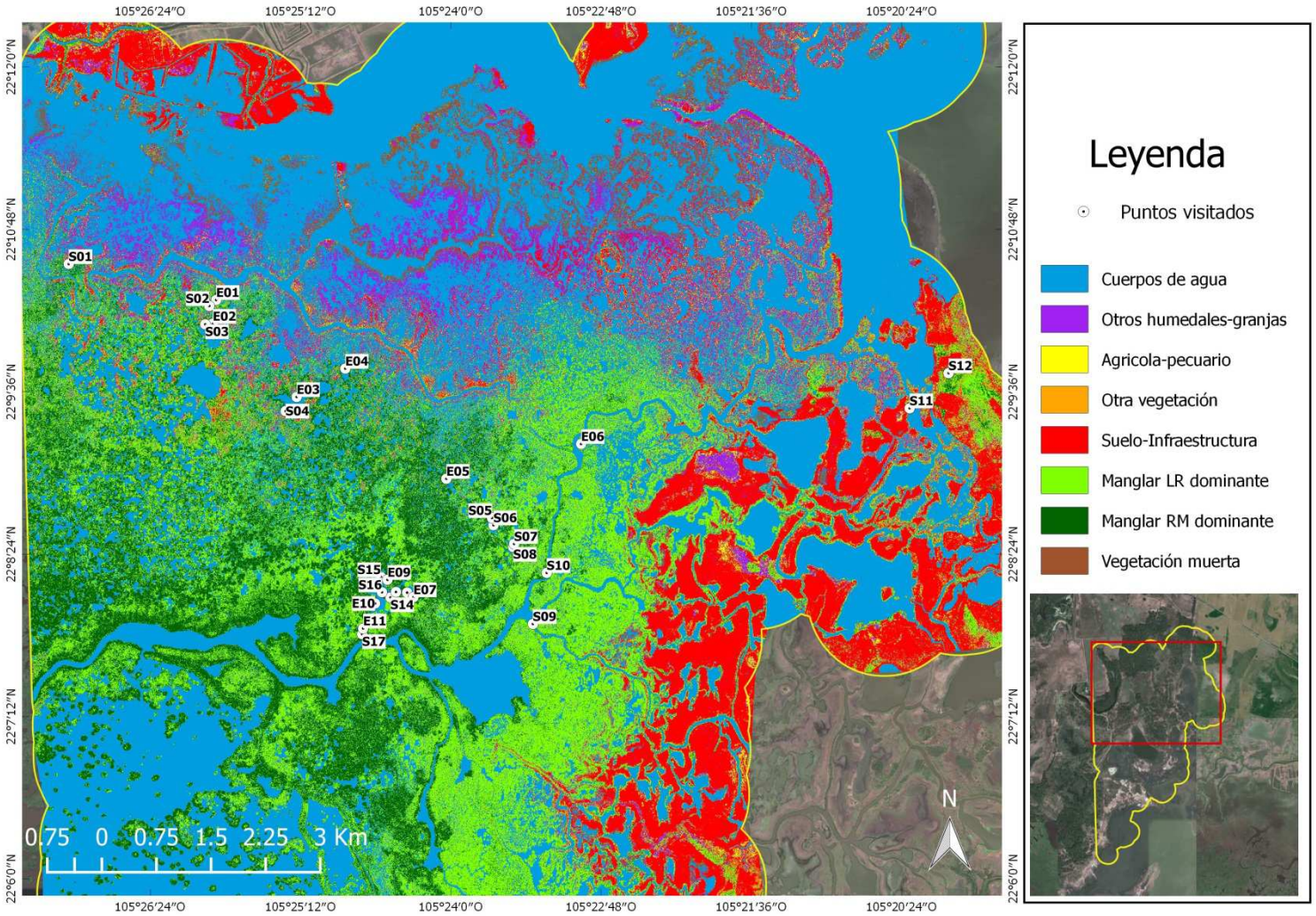


Figura 10. Ubicación de puntos de verificación del mapa Worldview 2 del 4 de abril de 2015 al norte del área de estudio.

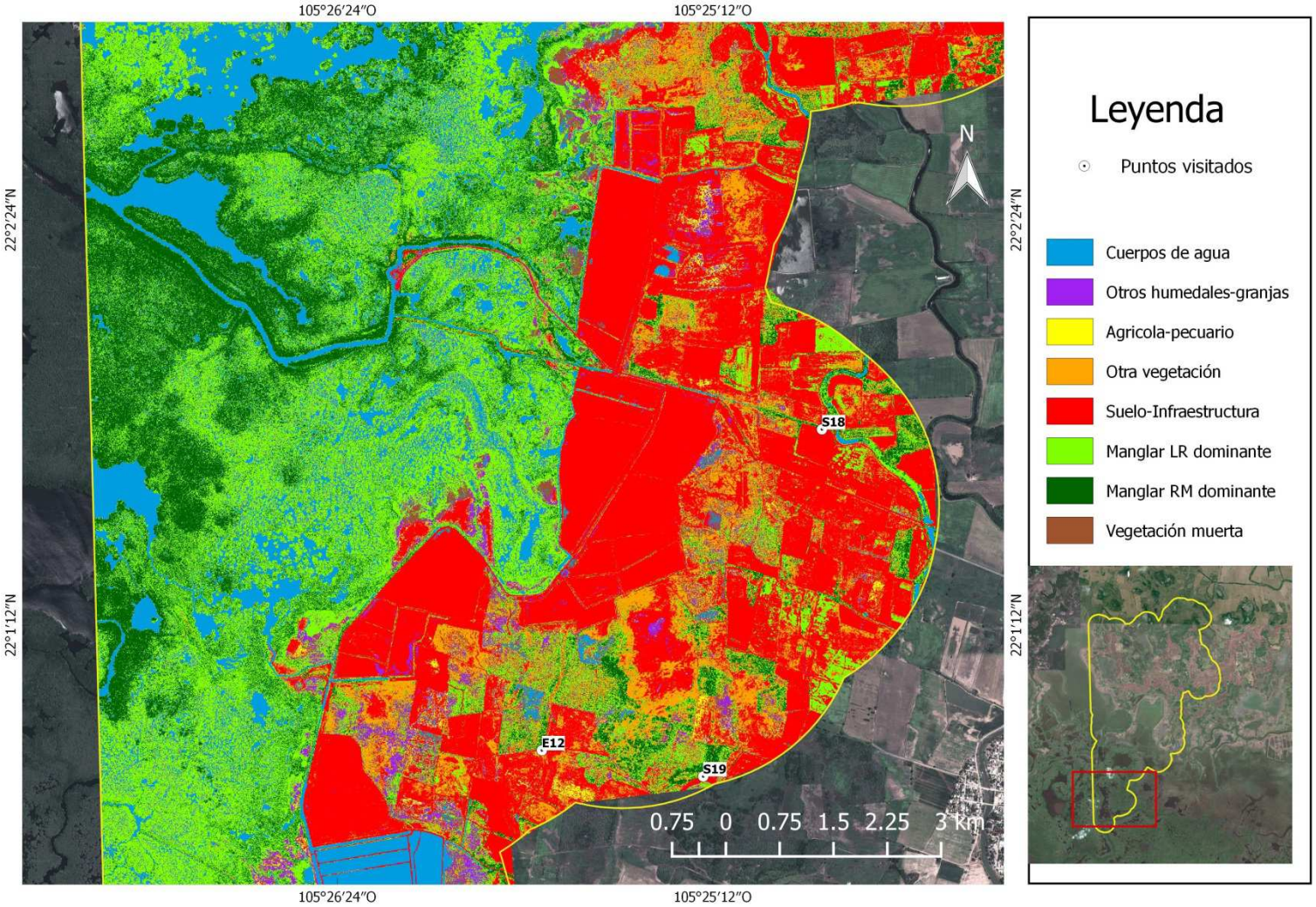
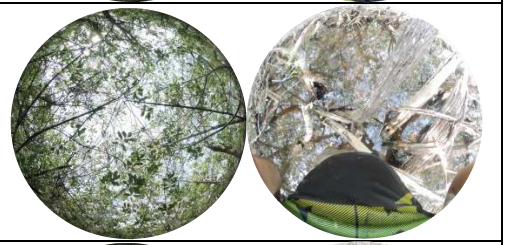


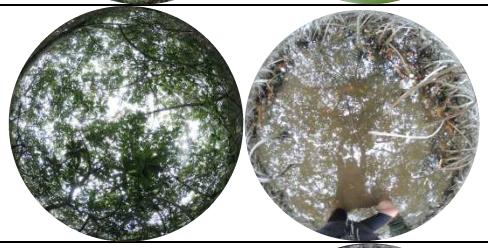
Figura 11. Ubicación de puntos de verificación del mapa Worldview 2 del 4 de abril de 2015 al sur del área de estudio

Tabla 7. Información recabada en campo en la segunda visita de campo

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
E01	22.17130431	-105.4312404	25	5	5	83.33	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
E02	22.16838055	-105.4316915	0	33	4	0.00	***Laguncularia Racemosa***	**Cuerpo de agua**	***Laguncularia Racemosa***	
E03	22.15935683	-105.4205271	11	0	5	100.00	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
E04	22.16284912	-105.414054	11	0	5	100.00	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	

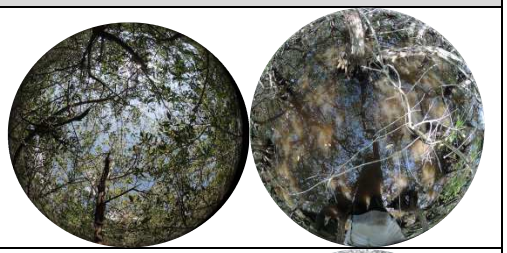
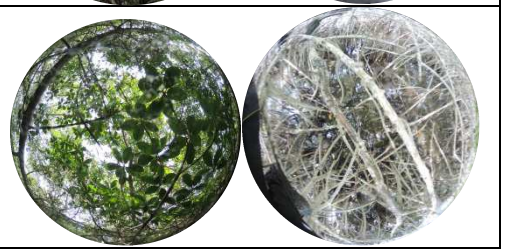
ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
E05	22.14928325	-105.4005983	11	0	5	100.00	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	
E06	22.15357235	-105.3826589	0	96	4	0.00	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	
E07	22.13469355	-105.404986	7	0	5	100.00	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	
E08	22.13534029	-105.4073099	0	22	5	0.00	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
E09	22.13683819	-105.4084317	13	0	4	100.00	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
E10	22.13391957	-105.4100857	3	23	5	11.54	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	
E11	22.13084475	-105.4116784	0	81	4	0.00	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	
E12	22.01382038	-105.4291058	0	0	4	--	**Otra Vegetación**	***Laguncularia Racemosa***	**Humedal**	

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
S01	2.175733045	-105.4508694	20	2	6	90.91	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
S02	22.17056848	-105.4321525	1	38	5	2.56	***Laguncularia Racemosa***	**Cuerpo de agua**	***Laguncularia Racemosa***	
S03	22.16830229	-105.432697	31	4	5	88.57	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
S04	22.15761487	-105.4219937	22	0	6	100.00	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
S05	22.14445886	-105.3945233	12	0	7	100.00	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
S06	22.14356127	-105.3943273	0	19	6	0.00	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	
S07	22.14125848	-105.391577	22	0	6.5	100.00	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
S08	22.14088157	-105.3917033	0	37	5	0.00	***Laguncularia Racemosa***	**Cuerpo de agua**	***Laguncularia Racemosa***	

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
S09	22.13139662	-105.3890752	0	39	6.5	0.00	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	***Laguncularia Racemosa***	
S10	2.137689226	-105.3872372	16	7	7	69.57	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
S11	22.15796451	-105.3389267	0	0	8.5	--	***Laguncularia Racemosa***	**Otro humedal**	***Otra vegetacion***	
S12	22.1622869	-105.3337415	0	0	10	--	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	***Otra vegetacion***	

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
S13	22.13526171	-105.4058196	0	47	6	0.00	***Laguncularia Racemosa***	**Cuerpo de agua**	***Laguncularia Racemosa***	
S14	22.13466159	-105.4080419	23	0	6.5	100.00	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	***Rhizophora mangle***	
S15	22.1371679	-105.4093026	0	81	5.5	0.00	***Laguncularia Racemosa***	**Otro humedal**	***Laguncularia Racemosa***	
S16	22.13530439	-105.4091666	22	0	8	100.00	***Rhizophora mangle***	**Cuerpo de agua**	***Rhizophora mangle***	

ID	Latitud	Longitud	Número de árboles de Rhizophora	Número de árboles de Laguncularia	Altura m	% Presencia de Rhizophora	Especie dominante esperada (mapa WV2)	Especie dominante esperada (mapa Landsat 8)	Especie dominante hallada (terreno)	Fotos
S17	22.13013933	-105.4118073	32	20	7	61.54	***Rhizophora mangle***	***Laguncularia Racemosa***	***Rhizophora mangle***	
S18	22.02966118	-105.4141827	0	0	--	--	**Suelo-Infraestructura**	**Agrícola-pecuario**	**Infraestructura**	
S19	22.01253145	-105.4205072	0	0	--	--	**Suelo-Infraestructura**	**Otro humedal**	**Infraestructura**	

.

Evaluación de confiabilidad

El mapa derivado de la imagen Worldview 2 predijo acertadamente 15 de 16 sitios donde se esperaba observar a *R. mangle* como especie dominante (94% de aciertos o confiabilidad del usuario) y 11 de 12 lugares donde se esperaba encontrar *L. racemosa* (92%) (tabla 8), lo cual es un desempeño notable en la capacidad de diferenciar la especie dominante. Los errores de identificación correspondieron a sitios que se predijeron como manglar y resultaron ser otro tipo de vegetación en las partes más alejadas de la laguna (errores de comisión). Estas zonas fuera de la laguna, fueron en inicio fácilmente discriminadas bajo el enfoque fenológico (mapa a partir de datos Landsat 8), por lo que la combinación de ambos mapas sería una forma de mejorar la identificación de las áreas donde no crece manglar. Con la cantidad de datos recabados, no fue posible hallar errores de omisión, ya que ningún sitio catalogado como otra categoría de cobertura, fue identificado como alguno de los 2 tipos de manglar. La confiabilidad total del mapa es de 94%.

Tabla 8. Matriz de confusión entre datos obtenidos en campo y clases esperadas de acuerdo al mapa derivado de la imagen Worldview 2 a 1.6 m del 4 de abril de 2015.

Clases evaluadas		Clase esperada mapa Worldview 2 (n° de sitios)			
		RM Dominante	**LR Dominante**	**Otras clases**	**Total**
Clase hallada campo	**MR Dominante**	15	0	0	15
	ML Dominante	0	11	0	11
	Otras clases	1	1	3	5
	Total	**16**	**12**	**3**	**31**
	Confiabilidad Usuario	94%	92%	100%	
	Error Comisión	6%	8%	0%	
	Confiabilidad Productor	100%	100%	60%	
	Error de Omisión	0%	0%	40%	
	Exactitud global	94%			

El mapa derivado de datos Landsat 8 (tabla 9), posee una eficiencia notablemente más baja para separar los grupos de especies (Exactitud global de solo 42%), pero no debe perderse de vista que la resolución espacial de esta fuente de datos es casi 19 veces mayor que la fuente Worldview 2 (30 m de resolución contra 1.6 m), que el tamaño de los sitios (10 m de radio a partir del centro) se eligió pensando en la resolución de estas imágenes y que la zona en donde se tomaron la mayor parte de los datos para validar, es la más fragmentada y de mayor variación de dominancia.

La mayor fuente de error son los errores de omisión para la clase *Manglar Rhizophora dominante* (*MR Dominante*), que alcanzan un 73%. Estos son sitios que en realidad corresponden a lugares con dominancia de *L. racemosa*, por lo que la principal fuente de confusión de este mapa es entre

ambas clases de manglar. Para dimensionar mejor la utilidad del mapa derivado de los datos Landsat 8, habría que ampliar el radio de 10 metros empleado en el trabajo de campo para identificar dominancia a por lo menos 60 m.

Tabla 9. Matriz de confusión entre datos obtenidos en campo y clases esperadas de acuerdo al mapa derivado de la imagen multitemporal Landsat 8 a 30 m.

Clases evaluadas		Clase esperada mapa Landsat (n° de sitios)			
		RM Dominante	LR Dominante	Otras clases	Total
Clase hallada campo	MR Dominante	4	10	1	15
	ML Dominante		6	5	11
	Otras clases	1	1	3	5
	Total	**5**	**17**	**9**	**31**
	Confiabilidad Usuario	80%	35%	33%	
	Error Comisión	20%	65%	67%	
	Exactitud Productor	27%	55%	60%	
	Error de Omisión	73%	45%	40%	
	Exactitud global	42%			

Los resultados anteriores confirman lo sugerido por Lin, et al. (2015), que afirma que la resolución espacial juega el papel más importante en la confiabilidad de una clasificación derivada de imágenes de satélite. Una posibilidad en un trabajo futuro sería evaluar el resultado de utilizar la banda pancromática de Landsat 8 para subir la resolución de este producto de 30 a 15 metros, lo que debería mejorar su capacidad para separar las áreas de dominancia de *R. mangle* del resto. Esto sobre todo en áreas como la utilizada para el ejercicio de validación, en donde los bloques de comunidades "puras" o con una marcada dominancia de una especie, son tan pequeños como unas cuantas decenas de metros de largo.

En cuanto a las imágenes Worldview 2, queda claro que su alta resolución espacial las hace un insumo especialmente útil para distinguir las áreas de dominio de la especie de interés. Esta misma característica, sin embargo, podría ser una desventaja en estudios sobre áreas más grandes, por el volumen de datos, necesidades de cómputo, costo y disponibilidad de los insumos. En función de la importancia de ciertas áreas, son el tipo de imagen ideal para hacer la mejor discriminación de las zonas en donde se desarrolla *R. mangle*.

Capítulo 3. Cambios en la cobertura de *Rhizophora mangle* 2011 – 2015 en el área de estudio en la laguna de Agua Brava usando como insumo imágenes Worldview 2.

Introducción

La adquisición del par de imágenes Worldview 2 de dos periodos separados por 4 años (2011-2015), permitió hacer una comparación entre fechas para observar los cambios en la cobertura de *R. mangle* en el área de estudio. La alta resolución de las imágenes Worldview 2 (1.6 m) permite observar cambios a nivel de cobertura de copa, lo cual resulta interesante para estudios muy específicos de relaciones entre especies. De contarse con varios periodos de observación, serían un insumo invaluable para describir el crecimiento y las formas de sucesión y colonización. Su desventaja son sus altos costos así como los requerimientos de capacidad de cómputo para su análisis.

Métodos

El análisis de cambios se hizo para el par de fechas 01/05/2011 y 04/04/2015. Como se comentó en el Capítulo 1, en la sección de Adquisición y preparación de las imágenes Worldview 2, el área de estudio en 2011 se completó con una estrecha franja que corresponde a una escena del 17/05/2011.

La preparación de los datos del año 2011 consistió en obtener un mapa con la misma leyenda que el mapa 2015 empleando el mismo método, es decir, una clasificación no supervisada de 100 clases, que fueron agrupadas a la leyenda de 8 clases usando como datos de entrenamiento el mapa obtenido para el año 2015 e interpretación visual de rasgos. Esquemáticamente, el proceso se muestra en la figura 12.

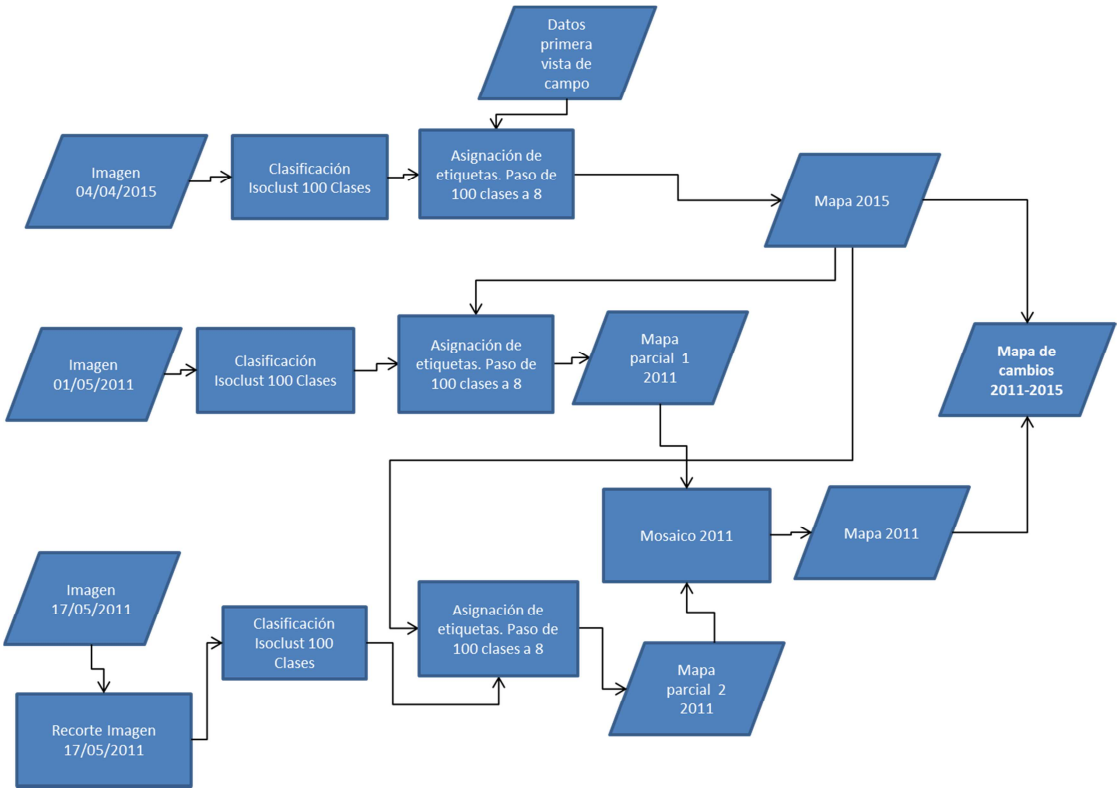


Figura 12 Diagrama de flujo de la construcción del mapa de cambios.

Los mapas 2011 y 2015 obtenidos se procesaron para ajustarse a un criterio de área mínima cartografiable de 0.01 ha, disolviendo los grupos de pixeles menores a esta superficie con los de los vecinos más grandes, empleado el modelo "Eliminate" del software ERDAS. Esto con el fin de poder manejar una escala de trabajo para ambos de 1:10,000, antes de proceder al análisis de cambios en sí.

Para reducir la incidencia de falsos cambios en el margen este del área de estudio que corresponde a terreno firme, se usaron como máscara las áreas de distribución de las clases: *Otra vegetación* y *Agrícola_pecuario,* obtenidas con los datos fenológicos derivados de Landsat 8. La sobreposición de los mapas se hizo en el software ERDAS usando el modelo "Matrix Union", lo que permitió obtener una imagen de cambios y a partir de ella, una matriz, con la cual se realizaron los análisis de transiciones de clases correspondientes, haciendo énfasis en lo observado para la clase *Manglar Rhizophora dominante*. En este análisis se estimaron dos índices: Estabilidad de localización (EL) y estabilidad de residencia (ER) (Ramsey III,et al., 2001). El primero de ellos estima el porcentaje de superficie de una clase que permanece como tal en la misma ubicación y el segundo el porcentaje de cambio entre el año final y el año inicial tomando como referencia la superficie inicial de la clase. Su formulación matemática es la siguiente:

Ecuación 2. Estabilidad de localización:

$$EL\ (\text{por clase}) = \frac{(\text{cobertura del año inicial} - \text{pérdida cobertura del año inicial})}{\text{cobertura año inicial}} \times 100$$

Ecuación 3 Estabilidad de residencia:

$$ER\ (\text{por clase}) = \frac{(\text{cobertura del año final} - \text{cobertuta del año inicial})}{\text{cobertura del año inicial}} \times 100$$

Resultado del análisis de cambios

La figura 13 muestra los mapas 2011 y 2015 obtenidos a partir del proceso descrito en la sección de métodos para el área de estudio, ambos con un área mínima cartografiable de 0.01 ha.

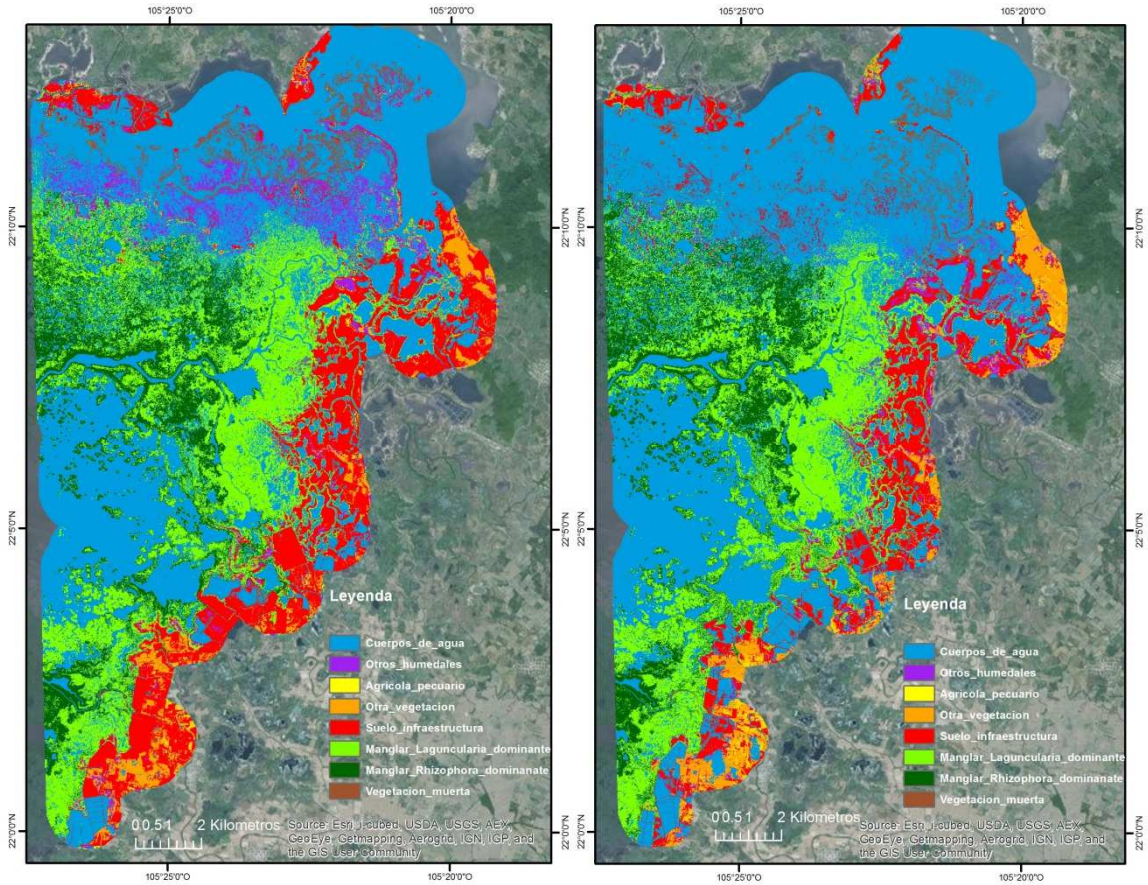


Figura 13. Mapas de cobertura terrestre obtenidos con el proceso de clasificación. Mapa 2011 y 2015 con área mínima cartografiable de 0.01 ha (izquierda y derecha respectivamente) obtenidos a partir de imágenes Worldview 2.

La figura 14 muestra las áreas de pérdidas y ganancias de la clase *Manglar_Rhizopora dominante* en el área de estudio producto, de sobreponer los mapas de la figura 13 . La tabla 10 muestra la

matriz de cambios resultante de comparar los mapas 2011 y 2015 obtenidos de las imágenes Worldview 2. Como es posible observar desde la imagen, la mayor parte de interacciones de cambio se dan entre las dos especies de mangle.

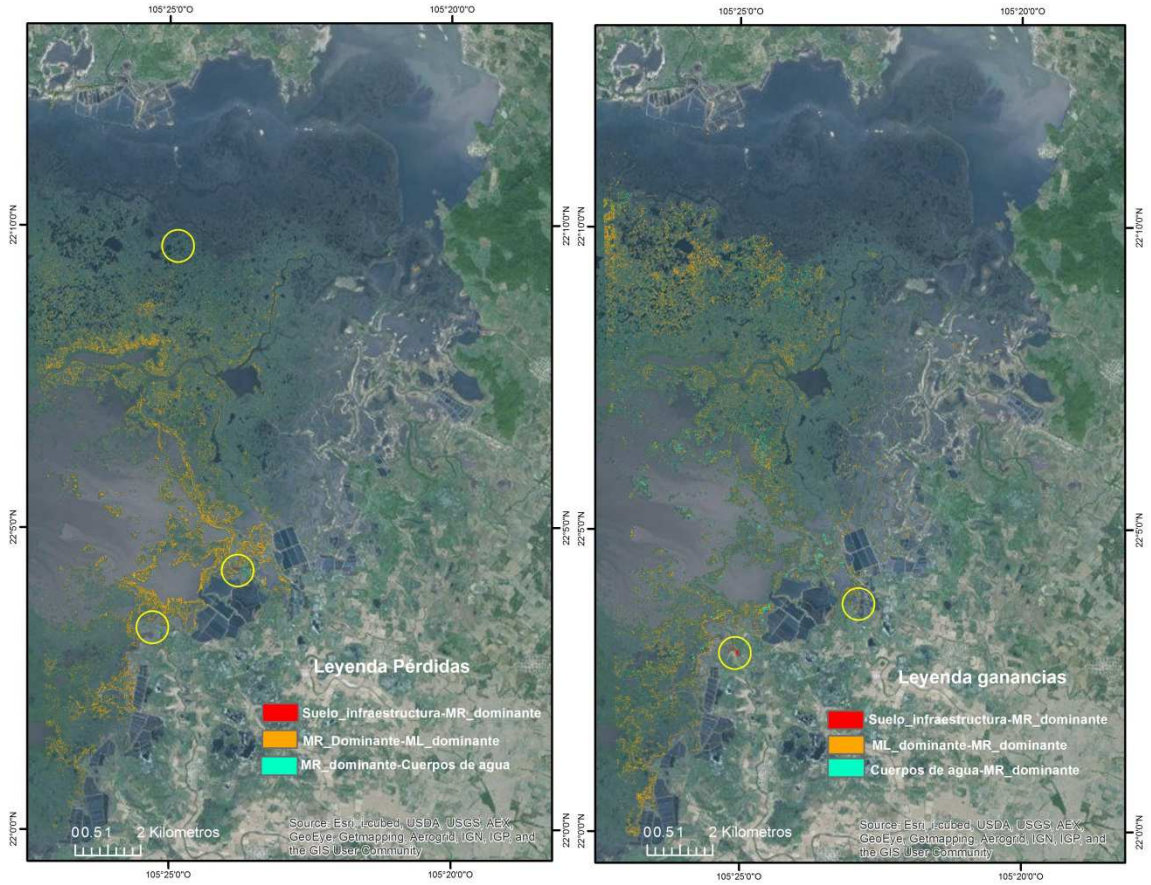


Figura 14. Mapas de pérdidas y ganancias para la clase *Manglar Rhizophora dominante* obtenidos para el área de estudio entre 2011 y 2015. Izquierda pérdidas, derecha ganancias. Por cuestiones de escala solo se representan los tipos de cambios con mayor superficie.

Tabla 10. Matriz de cambios 2011-2015 a partir de los mapas generados con imágenes Worldview 2 a 1.6 m de resolución del área de estudio.

Clases/año			2011 (ha)								Total 2015
			1	2	3	4	5	6	7	8	
2015 (ha)	1	Cuerpos de agua	**9,313.52**	544.77	10.75	63.23	542.50	385.28	10.88	377.11	**11,248.04**
	2	Otros humedales-granjas	14.36	**105.33**	36.49	30.61	260.25	75.33	0.48	16.75	**539.60**

	3	**Agricola-pecuario**	0.53	1.92	**24.33**	24.03	140.26	0.62	0.08	0.62	**192.38**
	4	**Otra vegetación**	7.63	32.64	22.74	**372.52**	303.75	12.06	1.40	10.97	**763.70**
	5	**Suelo-infraestructura**	77.84	151.96	26.88	64.71	**1,659.16**	41.47	2.19	41.22	**2,065.44**
	6	**Manglar Laguncularia dominante**	194.16	64.30	17.88	15.76	92.65	**3,300.75**	525.91	10.43	**4,221.83**
	7	**Manglar Rhizophora dominante**	111.61	4.02	0.28	2.43	7.69	566.14	**1,910.85**	0.80	**2,603.84**
	8	**Vegetacion muerta**	55.53	127.27	5.94	7.22	84.02	30.40	0.09	**128.12**	**438.58**
Total 2011			**9,775.19**	**1,032.21**	**145.29**	**580.50**	**3,090.27**	**4,412.04**	**2,451.88**	**586.02**	**22,073.41**
		EL (%)	95.28	10.20	16.74	64.17	53.69	**74.81**	**77.93**	21.86	
		ER (%)	0.15	-0.48	0.32	0.32	-0.33	**-0.04**	**0.06**	-0.25	

De acuerdo al índice ER, se observa que las clases *Cuerpos de Agua*, *Agricola_pecuario*, *Otra vegetación* y *Manglar Rhizophora dominante*, aumentaron en forma neta su área de distribución, aunque todas de forma marginal, pues dichos cambios no corresponden ni siquiera al 1%. La clases *Manglar Rhizophora dominante*, lo hizo en 0.06% lo que representa unas 152 ha. Por otra parte las clases que presentan pérdidas netas (ER negativo), también lo hacen de forma marginal. La clase *Manglar Laguncularia* dominante, lo hace en -0.04%, lo que representa unas 190 ha.

A pesar del incremento neto, el índice EL nos indica que el 25% y el 22% del área original de las clases *Manglar_Laguncularia* dominante y *Manglar Rhizophora dominante* respectivamente, sufrieron cambios (El 75% y 78%). Particularmente para el caso de *Rhizophora*, observamos que tanto sus mayores pérdidas (525 ha, 97% de las pérdidas) como sus mayores ganancias (566 ha 82% de las ganancias), se verifican con la clase *Manglar Laguncularia dominante*. Esto quizás no necesariamente represente un cambio real en la superficie de distribución, ya que por razones de crecimiento interanual, a la escala de trabajo, **el efecto de crecimiento de ramas y hojas puede** cambiar aparentemente la situación donde existe una fuerte mezcla entre ambas especies, sin que esto implique necesariamente la pérdida completa de la presencia de *Rhizophora* o *Laguncularia* a favor de la una o la otra. También deben considerarse los errores de comisión asociados al mapa en las áreas donde la mezcla de ambas especies es muy fuerte.

Como ejemplo de esta dinámica de cambio de dominancia entre especies, se muestra en la figura 15 una zona de cambios de estas clases vista con la composición de alta resolución (0.4 m). Las diferencias entre una fecha y otra parecen confirmar una expansión en la imagen 2015 de áreas

con predominio de *R. mangle* (los tonos rojos intensos mostrarían áreas con mayor actividad fotosintética que las áreas con tonos pálidos). Como se mencionó anteriormente, estos cambios podrían ser estacionales y no necesariamente estar ligados a un proceso de sucesión, para corroborarlo, sería necesario analizar más fechas y/o estudiar la dinámica de crecimiento en parcelas de monitoreo.

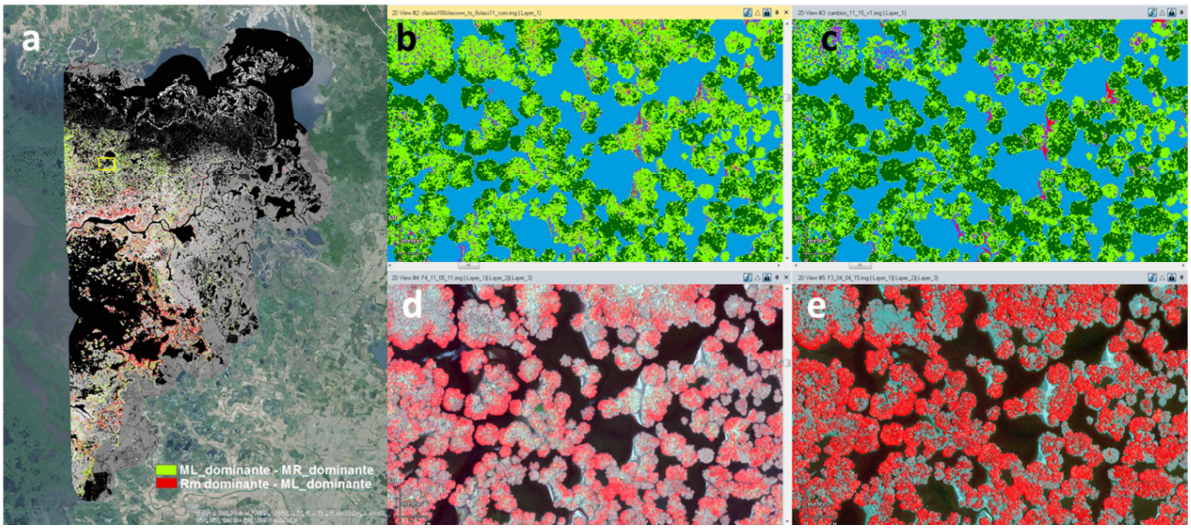


Figura 15. Ejemplo de cambios identificados entre dominancia de especies de manglar en el área de estudio. a) Ubicación general de los cambios; b) Mapa 2011 (*Manglar Rhizophora dominante* verde oscuro, *Manglar Laguncularia* dominante verde claro); c) Mapa 2015; d) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2011; e) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2015

La clase *Cuerpos de agua* es la segunda en superficie con interacciones de cambio con *R. mangle* en el área de estudio, representando el 2% de las pérdidas y el 16% de las ganancias para esta clase (11 ha y 112 ha respectivamente). En las imágenes de alta resolución (figura 16) es posible apreciar como en solo 4 años, la especie tiene la capacidad de colonizar sitios donde las condiciones le favorecen. En el ejemplo también se observa la pérdida de manglar por la construcción o acondicionamiento de estanques en el borde de distribución de la zona de, que de alguna forma, tal vez estén relacionados con el repoblamiento de manglar en esas áreas aledañas. Este tipo de transición (*Manglar Rhizophora dominate –Suelo-infraestructura*) es el tercero en superficie con interacciones de cambio con *R. mangle*, aunque solo representa el 0.4% (2.19ha) y 1.1% (7.69 ha) de las pérdidas y de las ganancias respectivamente para esta clase.

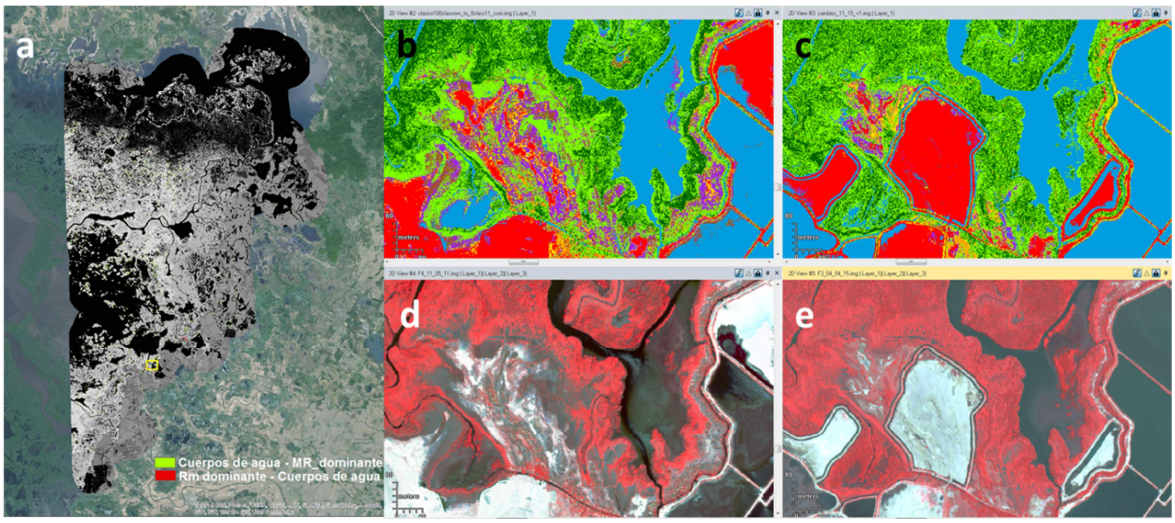


Figura 16 Ejemplo de cambios identificados entre Manglar *Rhizophora* dominante y Cuerpos de agua en el área de estudio. a) Ubicación general de los cambios; b) Mapa 2011 (Manglar *Rhizophora* dominante verde oscuro, Manglar *Laguncularia* dominante verde claro, Cuerpos de agua azul); c) Mapa 2015; d) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2011; e) Composición bandas RE, R, B y pancromática a 0.4m de la Imagen Worldview 2 2015.

Las interacciones de pérdida de la clase *Manglar Rhizophora dominante* con las clases restantes (*Otros humedales*, *Agrícola-pecuario*, *Otra vegetación* y *Vegetación muerta*) son marginales, pues solo en el caso de la clase *Otra vegetación* (1.40 ha), se supera la hectárea. Lo mismo ocurre en el caso de las ganancias, donde solo las clases *Otros humedales* (4.02 ha) y *Otra vegetación* (2.43 ha) superan el valor de una hectárea cedida a favor de la clase *Manglar Rhizophora dominante*.

Conclusiones y recomendaciones para el proyecto

- Es posible mediante técnicas de percepción remota, identificar en la región noroeste del país las áreas donde se desarrolla de forma dominante la especie *R. mangle*, de otras áreas con diferentes especies de manglar con un buen nivel de certidumbre (más de 90%).
- Fenológicamente, las áreas donde domina *Rhizophora* son las de mayor bioproductividad. Es decir comunidades densas, que mantienen hojas fotosintéticamente activas sin grandes cambios durante las diferentes temporadas en el año. Espectralmente esto se ve reflejado también, el perfil señala un aspecto muy saludable y vigoroso (verdes más obscuros y coberturas más cerradas).
- *Laguncularia* se adapta a condiciones más difíciles, lo que implica que puede presentarse en comunidades que exhiben menor vigor, comparadas con *R. mangle* y que pueden diferenciarse tanto en un perfil fenológico como en un perfil espectral. Su aspecto en el terreno corresponde a coberturas menos densas y de hojas de tonos verdes con más tendencia al amarillo.
- Las condiciones de la región (microtopografía principalmente), serían uno de los principales factores de distribución. El régimen de mareas en la zona de estudio, define zonas donde la circulación del agua es constante, lo que impide la hipersalinización y brinda las condiciones para que *Rhizophora* prospere. Por otra parte, las zonas interiores donde el agua permanece más tiempo sin ser renovada, las condiciones favorecen a *Laguncularia*, que también queda más expuesta a los cambios estacionales.
- La resolución espacial del insumo empleado mejora notablemente la capacidad de distinguir adecuadamente las áreas donde prospera *R. mangle*, sobre todo en lugares altamente fragmentados, donde los parches de vegetación solo alcanzan algunas decenas de metros.
- Datos de resolución media como Landsat 8, no son adecuados en la diferenciación de dominancia en áreas altamente fragmentadas y con mucha variabilidad espacial. Sin embargo, parecen ser muy eficientes en áreas continuas con poca fragmentación y, dada la posibilidad de construir series de tiempo con ellas, brindan una información valiosa para entender la dinámica fenológica y la resiliencia de los ecosistemas de *R. mangle*. Esta misma información, también puede ser útil para mejorar las clasificaciones a partir de imágenes multiespectrales de mayor resolución espacial pero menor resolución temporal.
- Es recomendable evaluar los efectos de subir la resolución espacial de los datos Landsat empleando la banda pancromática de 15 m mediante técnicas de fusión espectral en su capacidad de discriminar las áreas de dominancia de *R. mangle***,** comparadas con datos de alta resolución espacial como Worldview 2.
- Entre 2011 y 2015 las condiciones, en el área de estudio, parecen haber favorecido la conservación y desarrollo de los manglares. Específicamente de *R. mangle*, en términos generales no solo no perdió superficie, sino que ganó unas 152 ha, además que se fue posible identificar crecimiento del dosel

- A pesar de que en el balance neto *R. mangle* incrementó marginalmente su superficie, el análisis de cambios mostró una intensa dinámica, pues hasta un 25% de su superficie original (75% de Estabilidad de residencia) pasó a otra clase entre 2011 y 2015.
- La mayor parte de los cambios de *R. mangle*, tanto pérdidas como ganancias en el área de estudio, se verificaron con la clase *L. dominante* (97% y 82% de sus pérdidas y ganancias respectivamente), lo que no necesariamente implica procesos de sucesión entre especies, para averiguarlo se recomienda profundizar con estudios de series de tiempo de datos de teledetección o parcelas de monitoreo en campo.
- La réplica de este trabajo en otras áreas del noroeste mexicano es posible a un bajo coste utilizando como insumo imágenes Landsat 8 en series de tiempo a escalas entre 1:250,000 y 1:100,000, aunque como se comentó anteriormente, no sería adecuado en zonas donde el manglar se encuentra fragmentado. Para estudios a escalas más grandes, el insumo adecuado serían imágenes Worldview 2. La inversión en tiempo y personal también depende de la escala deseada para los productos finales, porque implica mayor trabajo en campo. Para otras áreas del país que no sean el noroeste, aún es necesario hacer otros ensayos para ver si es posible hallar diferencias fenológicas o espectrales entre diferentes especies de mangle. Con fines de visualización, el área que corresponde a este trabajo es de 219.6 km^2, el volumen de datos generado por los datos fenológicos de la serie Landsat 8 es de 12.8 GB mientras que los generados por el análisis de las imágenes Worldview 2 es de 300 GB. Por la parte de software, en el análisis con datos Landsat 8 se emplearon los programas Qgis 12.12 Lyon de distribución libre y ERDAS 2013, mientras que para el análisis de las imágenes Worldview 2 se emplearon los softwares Geomatica 2015 y ERDAS 2013.

Referencias

Congalton, R. G., & Mowrer, H. T. (1999). *Quantifying spatial uncertainty in natural resources : theory and applications for GIS and remote sensing*. Chelsea, Mi.: Ann Arbor Press.

Flores-de-Santiago, F., Kovacs, J., & Flores-Verdugo, F. (2012). Seasonal changes in leaf chlorophyll a content and morphology in a sub-tropical mangrove forest of the Mexican Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, *444*, 57–68. http://doi.org/10.3354/meps09474

Lin, C., Wu, C.-C., Tsogt, K., Ouyang, Y.-C., & Chang, C.-I. (2015). Effects of atmospheric correction and pansharpening on LULC classification accuracy using Worldview-2 imagery. *Information Processing in Agriculture*, *2*(1), 25–36. http://doi.org/10.1016/j.inpa.2015.01.003

López-Portillo, J., & Ezcurra, E. (2002). Los manglares de México: Una revisión. *Madera Y Bosques Numero Especial*, 27–51.

Mas, J., Díaz-Gallegos, J. R., & Vega-Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o de imágenes clasificadas: una revisión. *Investigaciones Geográficas, Boletín Del Instituto de Geografía, UNAM*, (51), 53–72.

Ramsey III, E. W., Nelson, G. A., & Sapkota, S. K. (2001). Coastal Change Analysis Program Implemented in Louisiana. *Journal of Coastal Research*, *17*(1), 53–71. Retrieved from http://www.jstor.org/stable/4300149

Rodríguez-Zuñiga, M. T., Troche-Souza, C., Vázquez-Lule, A. ., Márquez-Mendoza, J. D., Vázquez-Balderas, B., Valderrama-Landeros, L., Galindo-Leal, C. (2013). *Manglares de México Extensión, distribución y monitoreo*. México D.F.: Comision Nacional Para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

USGS. (2015). *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center* (Vol. 8). Retrieved from http://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf

Zhang, C., Kovacs, J., Liu, Y., Flores-Verdugo, F., & Flores-de-Santiago, F. (2014). Separating Mangrove Species and Conditions Using Laboratory Hyperspectral Data: A Case Study of a Degraded Mangrove Forest of the Mexican Pacific. *Remote Sensing*, *6*(12), 11673–11688. http://doi.org/10.3390/rs61211673

Anexo Protocolo para la toma de fotos hemisféricas

La CONABIO y CONAFOR en el año 2011 implementaron la toma de fotografías hemisféricas en algunos conglomerados del Inventario Nacional Forestal y de Suelos, como una manera de derivar información sobre la estructura de la vegetación. Desde entonces se han venido explorando las aplicaciones de esta técnica, que entre sus ventajas ofrece la posibilidad de generar registros permanentes de las condiciones de la estructura de la vegetación en un sitio en un tiempo determinados, lo que significa también un alto potencial como una técnica de apoyo a proyectos de monitoreo a nivel del terreno.

Con el fin de contar con material fotográfico para estimar la cobertura de vegetación en los sitios, se utilizará el equipo para fotografías hemisféricas. Se empleará la configuración descrita en el "Manual técnico para la realización de fotos hemisféricas empleando la cámara Nikon Coolpix P7800". No se hará uso del tripie, tomando las fotografías a pulso siguiendo el siguiente patrón y orientando la vista al norte:

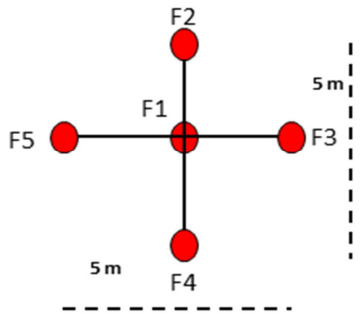


Figura 1. Patrón para la toma de fotografías en los sitios de muestreo

Cada punto de la figura 1 representa el sitio de la toma de fotografías en una unidad base de muestreo (UBM). Cada UBM consta de 5 sitios de fotografía distribuidos como se muestra en la figura 2. Se tomará un par de fotos por punto, una tomada hacia el dosel y otra hacia el piso. En ambos casos, el fotógrafo hará la toma de frente al norte, siguiendo el orden establecido.

El procesamiento de las fotografías se llevará a cabo en gabinete usando el software Can-Eye, para determinar la cobertura y el índice de área foliar en las parcelas de muestreo.