



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**CARACTERIZACIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS A TRAVÉS DE
HERRAMIENTAS GEOESPACIALES EN EL ÁREA LACUSTRE DE
MONTEBELLO, CHIAPAS**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

LINA ELISA SANTILLÁN ESPINOZA

TUTOR

DR. TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN

(Instituto de Geofísica, UNAM)

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR

Dr. Raúl Aguirre Gómez (Instituto de Geografía, UNAM)

Dr. Roberto Bonifaz Alfonso (Instituto de Geofísica, UNAM)

Dra. Alejandra Aurelia López Caloca (CentroGEO, CONACyT)

Dr. Oscar Arnoldo Escolero Fuentes (Instituto de Geología, UNAM)

Ciudad Universitaria, CD.MX., marzo 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por haberme puesto en mi camino los medios y las personas indicadas para permitirme realizar la maestría y poder concluir con ésta.

Agradezco el apoyo del Instituto de Geofísica de la UNAM, en particular al posgrado en Ciencias de la Tierra por haber abierto sus puertas y el apoyo que me brindó todo este tiempo, sobre todo a la Lic. Araceli Chamán Gamez por su paciencia.

Agradezco el apoyo del Centro de Investigación en Geografía y Geomática, Ing. Jorge L. Tamayo A.C. (CentroGeo) y a las personas de este CentroGeo que me compartieron sus conocimientos y tiempo.

Gracias al Lic. David Dumon por haber proporcionado la imagen SPOT-4 procesada y utilizada en este trabajo.

Este trabajo forma parte del proyecto Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, Chis., del Fondo Sectorial CONAGUA-CONACyT (167603), al cual agradezco por su apoyo.

Gracias a mis tutores el Dr. Tomás González Morán y la Dra. Alejandra Aurelia López Caloca por su apoyo y paciencia, por el tiempo que invirtieron y los conocimientos que me transmitieron. GRACIAS porque a pesar de no haber terminado en tiempo este trabajo, siempre estuvieron al pendiente y no permitieron que dejara inconclusa esta fase de mi vida académica.

Gracias a mis sinodales el Dr. Raúl Aguirre Gómez, el Dr. Rene Colditz, el Dr. Oscar Arnorldo Escolero Fuentes y el Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo por su apoyo, tiempo y paciencia.

Gracias a mis padres que estuvieron siempre dándome su apoyo, gracias por nunca dejar de confiar en mí. LOS QUIERO MUCHO.

Gracias a mis amigos y amigas que me apoyaron todo este tiempo y que nunca perdieron la esperanza de que llegara este día.

Gracias a esa persona que estuvo a mi lado, motivándome para retomar y terminar este trabajo y que no permitió que me diera por vencida.

ÍNDICE

RESUMEN	7
CAPÍTULO I	9
1.- INTRODUCCIÓN	9
1.1.- OBJETIVO GENERAL.....	12
1.1.1.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
1.2.- JUSTIFICACIÓN.....	12
CAPÍTULO II	14
2.- MARCO TEÓRICO	14
2.1.- LA PERCEPCIÓN REMOTA COMO HERRAMIENTA DE ESTUDIO.....	14
2.2.- INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON EL AGUA.....	15
2.2.1.- RADIANCIA EN UN CUERPO DE AGUA.....	17
2.3.- PROPIEDADES INHERENTES DEL AGUA.....	19
2.4.- PROPIEDADES DEL AGUA “PURA”.....	20
2.5.- MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA SUPERFICIE DE AGUA (ESTADO DEL ARTE).....	21
2.5.1.- CLASIFICACIÓN TEMÁTICA.....	22
2.5.2.- ÍNDICE NORMALIZADO DEL AGUA.....	23
CAPÍTULO III	29
3.- ZONA DE ESTUDIO	29
3.1.- LOCALIZACIÓN.....	29
3.2.- MARCO GEOLÓGICO.....	31
3.3.- SUELOS	32
3.4.- HIDROLOGÍA.....	34
3.5.- PANORAMA ACTUAL DE LA ZONA.....	35
CAPÍTULO IV	37
4.- METODOLOGÍA PARA TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATÉLITALES	37
4.1.- RECURSOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO.....	39
4.1.1.- CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES.....	41
4.1.1.1.- SPOT-4	41

4.1.1.2.- SPOT-5.....	42
4.1.1.3.- WORLDVIEW-2.....	43
4.1.2.- CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	44
4.2.- PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	44
4.2.1.- IMÁGENES SPOT.....	45
4.2.1.1 METODOLOGÍA 1.....	45
4.2.1.1.1.- CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.....	46
4.2.1.1.2.- CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA.....	47
4.2.1.1.3.- CONVERSIÓN A REFLECTANCIAS.....	48
4.2.1.2.- METODOLOGÍA 2.....	50
4.2.2.- IMÁGEN WORLDVIEW-2.....	51
4.2.2.1.- CORRECCIÓN GEOMÉTRICA.....	51
4.2.2.2.- CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA Y CONVERSIÓN DE ND'S A REFLECTANCIAS.....	52
4.3.- PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	53
4.3.1.- TÉCNICAS DE FUSIÓN PARA REALCE ESPACIAL EN IMÁGENES SATELITALES	54
4.3.1.1.- FUSIÓN PCA.....	55
4.3.1.2.- ALGORITMO À TROUS.....	56
4.3.1.3.- FUSIÓN WAVELET-PC USANDO EL ALGORITMO “À TROUS”.....	59
4.3.2.- TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA.....	63
4.3.2.1.- ÍNDICE DIFERENCIAL DE AGUA NORMALIZADO (NDWI).....	63
4.3.2.2.- CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA Y SUPERVISADA.....	64
4.3.3.- TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS TEMPORALES	66
4.3.3.1.- DIFERENCIA DEL ÍNDICE DEL AGUA.....	68
4.3.3.2.- ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES CLASIFICADAS.....	68
4.3.3.2.1.- COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS POST-CLASIFICACIÓN.....	69
4.3.3.3.- EVALUCIÓN DE LA EXACTITUD.....	70
4.4.- PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	71

CAPÍTULO V	72
5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	72
5.1.- REALCE ESPACIAL O FUSIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES.....	72
5.2.- PROCESO DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE AGUA NORMALIZADO (NDWI).....	74
5.2.1.- CÁLCULO DE VARIACIONES RELATIVAS ENTRE LAGUNAS.....	75
5.3.- PROCESO DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	82
5.3.1- CÁLCULO DE VARIACIONES DE LA EXTENSIÓN RELATIVA ENTRE LAGUNAS	83
5.4.- PROCESO DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	90
5.5.- ANÁLISIS CONJUNTO DE LAS TRES METODOLOGÍAS UTILIZADAS.....	98
5.6.- ANÁLISIS DE LOS SUBSISTEMAS DEL PNLM CON LAS TRES METODOLOGÍAS UTILIZADAS	99
5.7.- VALIDACIÓN DE LAS TRES METODOLOGÍAS UTILIZADAS.....	102
5.7.1.- COMPARACIÓN CON DATOS DE PRECIPITACIÓN.....	102
5.7.2.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LAS IMÁGENES SPOT-5 Y WORLDVIEW-2.....	106
5.7.3.- EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD EN LAS CLASIFICACIONES NO SUPERVISADA Y SUPERVISADA, DE LA IMAGEN SPOT-5 DEL AÑO 2012.....	107
5.7.3.1.- CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA.....	108
5.7.3.2.- CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.....	109
CAPÍTULO VI	111
6.- CONCLUSIONES	111
REFERENCIAS	114
ANEXO	1211

RESUMEN

El Parque Nacional “Lagunas de Montebello” (**PNLM**) declarado área protegida, el 16 de Diciembre de 1959, representa uno de los más importantes y bellos escenarios naturales de toda la República Mexicana. Se encuentra localizado al sureste del estado de Chiapas, limitando al sur con Guatemala. Este sistema lagunar en las últimas décadas, ha presentado en los cuerpos de agua cambios de coloración, composición y tamaño. El objetivo de este trabajo es caracterizar cambios y fluctuaciones de la extensión de la cubierta de agua del sistema lacustre utilizando técnicas de percepción remota.

Se procesaron siete imágenes satelitales, una SPOT-4 del año 2000, cinco SPOT-5 de los años 2006, 2007, 2009, 2010 y 2012, y una WORLDVIEW-2 del año 2011, las cuales corresponden a época de estiaje. Se implementaron dos metodologías diferentes, que se dividen cada una en cinco etapas: (1) preprocesamiento, (2) realce espacial, (3) identificar cubierta de agua, (4) vectorizar los cuerpos lacustres y (5) análisis de cambios cualitativos y cuantitativos. La etapa dos permite hacer un realce espacial con los datos satelitales SPOT-5, ya que cuentan tanto con las bandas multiespectrales como con la pancromática, utilizando la técnica de *à trous*, dando como resultado una mejor definición de los cuerpos de agua. La diferencia entre las dos metodologías es la etapa tres, en una metodología se utilizó el método de segmentación de reconocimiento de patrones (método de umbral) para extraer la superficie de agua, y en la otra metodología se utilizaron los métodos de clasificación no supervisada y clasificación supervisada para identificar la cubierta de agua. Utilizando sistemas de información geográfica se llevó a cabo la etapa cuatro de vectorización de los cuerpos lacustres de cada imagen satelital y se procedió a calcular las extensiones de cubierta de agua, finalmente se hizo un análisis cualitativo y cuantitativo de los cambios presentes en el sistema lagunar, a lo largo del periodo de estudio (etapa seis).

Los resultados del presente trabajo, permitieron mejorar la resolución espacial de las imágenes SPOT-5 de 10m a 2.5m, además, muestran que se han producido cambios de tamaño en los cuerpos lagunares a lo largo de 12 años (2000 - 2012), observable en las

variaciones de la extensión de agua superficial. La principal variación temporal observada en la superficie de los cuerpos lacustres, fue en el año 2007, con un decremento del 25% con respecto del primer año de estudio, el sistema lagunar tiende a recuperarse para el año 2010, sin embargo, para el 2012 no llega a alcanzar los niveles iniciales del año 2000, teniendo una pérdida del 16%.

Estos datos son de gran importancia para monitorear los cambios superficiales, que presentan los cuerpos de agua en el PNLM, y así, las instancias correspondientes puedan tomar decisiones para el cuidado del parque.

CAPÍTULO I

1.- INTRODUCCIÓN

A lo largo del tiempo, la detección de cambios en las diferentes coberturas y usos de suelo han contribuido de forma fundamental para la planificación, gestión y estudios ambientales, tales como la dinámica del paisaje o los riesgos e impactos naturales (European Commission, 1998, Sommer et al., 1998), con el fin de la toma de decisiones en el ámbito político, ambiental y social del país.

Actualmente, el análisis de detección de cambios se puede llevar a cabo mediante la obtención de datos de percepción remota a través de satélites que orbitan la Tierra, debido a la calidad consistente de la imagen y la periodicidad repetitiva en intervalos cortos de tiempo con que pasan dichos satélites (Anderson, 1977, Ingram et al., 1981, Nelson, 1983, Singh, 1984).

El Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) se declaró área protegida el 16 de Diciembre de 1959 (DOF, 1959), ya que representa uno de los mejores escenarios naturales en toda la República Mexicana. Su principal atractivo son un conjunto de lagunas de origen kárstico, consideradas las más bellas de México. El sistema lagunar está formado por alrededor de 60 lagunas de diferentes tamaños y tonalidades. Característica única de estas lagunas es la tonalidad cromática que adoptan sus aguas, cuya gama va de verde esmeralda o jade, a azul, rojo, cobrizo, blanco o negro; colores que les dan nombres como Agua Tinta, Esmeralda, Pozo Azul, etc. Esta variedad cromática hace que tengan un alto valor turístico, tanto nacional como internacional. Atributo adicional que resalta y enmarca la belleza escénica de las lagunas, es la exuberante vegetación de bosque y selva, así como la gran variedad de flora y fauna.

Parte de las lagunas se alimenta con aguas del río Grande de Comitán, mientras que el resto de ellas tienen alimentación subterránea. Aunque la precipitación es abundante, la escorrentía superficial no es significativa, debido a las características de alta permeabilidad del subsuelo. Melo y Cervantes (1986) mencionan que el parque, ha

presentado diversos cambios a través del tiempo como consecuencia de la interacción del PNLM, con sistemas antropogénicos y naturales. La zona ha sido afectada principalmente, por las actividades de la ciudad de Comitán de Domínguez y pueblos de los alrededores, en las afueras del Parque. La descarga de aguas residuales de estas ciudades hacia el río, se incorpora en el sistema lagunar en la región conocida como "desfiladero".

Como consecuencia de los fenómenos naturales y los causados por el hombre, las lagunas han sufrido alteraciones tanto en color como en tamaño. Debido a esta situación, se lleva a cabo un estudio de detección de cambios en el Parque Nacional Lagunas de Montebello, haciendo uso de imágenes satelitales de diferentes resoluciones espacial y espectral, y principalmente de diferentes fechas, para identificar variaciones a través del tiempo.

Lu et al. (2004) mencionan que al implementar un proyecto de detección de cambios, se deben de llevar a cabo tres pasos:

- 1) Un pre-procesamiento de las imágenes que incluye la rectificación geométrica y registro de éstas, corrección radiométrica y atmosférica, y la corrección topográfica si el área de estudio se encuentra en regiones montañosas.
- 2) Selección de las metodologías adecuadas para implementar los análisis de detección de cambios.
- 3) Evaluación de la exactitud.

De esta manera, la aplicación de diferentes metodologías de percepción remota permite identificar variaciones en el tiempo de las diferentes coberturas de la tierra (suelo desnudo, vegetación, urbano, agua, agricultura, etc.) y algunas de ellas, son específicamente para destacar cuerpos de agua y sus características con el propósito de facilitar la investigación de la zona, ya que debido al tamaño de las lagunas, el estudio se hace más difícil.

El procedimiento para la selección de las metodologías adecuadas para la detección de cambios se pueden agrupar en tres categorías que se caracterizan por la forma de transformar los datos y las técnicas de análisis utilizadas para delimitar las zonas de cambios (Mas, 1999). Éstas son:

- 1) Técnicas de mejoramiento de la imagen.
- 2) Clasificación de datos de múltiples fechas.
- 3) Comparación de dos clasificaciones independientes de la cubierta terrestre.

Las técnicas desarrolladas y utilizadas en este proyecto son de realce espacial (algoritmo de fusión ATROUS), de extracción de información temática (Índice diferencial de agua normalizado (NDWI), clasificación no supervisada y supervisada) y dos diferentes metodologías para la detección de cambios morfológicos en el tiempo: diferencia del índice de agua y diferencia del análisis de imágenes clasificadas (clasificación supervisada y no supervisada).

El procedimiento de detección de cambios consiste en la correlación y comparación de dos conjuntos de imágenes tomadas de la misma área pero en diferentes tiempos (Shephard, 1964).

El alcance esperado de este estudio es encontrar variaciones, en la parte noroeste del Parque Nacional Lagunas de Montebello, para poder estimar variaciones en la morfología de las lagunas y cuantificar los principales cambios en un periodo máximo de 10 años, puesto que las fechas de las imágenes que se usaron en el proyecto son para el periodo comprendido entre el año 2000 y 2012.

A lo largo de esta tesis se estará haciendo referencia a cambios o variaciones en la morfología de los cuerpos de agua, estos cambios se refieren a las variaciones de extensión superficial de agua de las lagunas, donde la palabra morfología se utiliza para hacer referencia a la forma de la superficie acuática.

1.1.- OBJETIVO GENERAL

Identificar cambios morfológicos en el tiempo de la parte noroeste de lagunas de la zona lacustre de Montebello, Chiapas, y establecer variaciones entre los cuerpos de agua en diferentes fechas, a través de la identificación de patrones geoespaciales, mediante técnicas de procesamiento digital usando imágenes satelitales.

1.1.1.- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Detectar cambios morfológicos en los cuerpos de agua.
- Implementar herramientas de percepción remota para mejorar la resolución espacial de la zona de estudio.
- Implementar metodologías que permitan identificar la variabilidad temporal de las lagunas.
- Caracterizar el patrón de comportamiento de cambios del sistema lacustre de Montebello, Chiapas.

1.2.- JUSTIFICACIÓN

Debido a que las Lagunas de Montebello se ubican en un Parque Nacional sujeto a protección prioritaria, por parte de Instituciones gubernamentales tales como la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), se tiene un interés especial en monitorear las variaciones temporales que ocurren en la zona, ya que es necesario caracterizar los cambios del sistema lacustre, para encontrar un patrón de comportamiento de las lagunas y aportar a encontrar las posibles causas que están provocando el cambio tanto de coloración como de extensión, lo cual permita contribuir en la realización de acciones conjuntas entre los sectores involucrados, dirigidas a la elaboración de políticas que den como resultado un manejo sustentable de los recursos.

En la zona de estudio se han realizado pocas investigaciones y las existentes están relacionadas con flora y fauna de la región. En cuanto a la detección de cambios temporales en los cuerpos de agua, no se encontraron trabajos publicados. En este sentido y debido a las diferentes actividades antropogénicas y fenómenos naturales que han propiciado variaciones en las lagunas, resulta primordial la realización de investigaciones que permitan caracterizar los cambios morfológicos del sistema lacustre del PNLM.

Por lo anterior, se propuso la elaboración del presente estudio, con la finalidad de identificar variaciones en el tiempo de los cuerpos de agua e identificar patrones de comportamiento en la zona de estudio.

Esta investigación se concentra en la parte noroeste del sistema lagunar debido a que es el área que presenta más cambios en los cuerpos de agua, de acuerdo con estudios previos realizados por Melo y Cervantes (1986) y la CFE (2012).

CAPÍTULO II

2.- MARCO TEÓRICO

2.1.- LA PERCEPCIÓN REMOTA COMO HERRAMIENTA DE ESTUDIO

La percepción remota es el estudio de objetos o escenarios a distancia, donde la recolección de los datos no está directamente relacionada con el objetivo. Sin embargo, el enlace indirecto que proporciona la información son las radiaciones electromagnéticas que emanan del objeto o escenario en forma de radiación tanto autoemisora como reflejada (Bukata et al., 1995).

Campbell (2011) definió a la percepción remota como la práctica de obtener información acerca del terreno incluyendo superficies de agua mediante imágenes aéreas, utilizando radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida desde la superficie de la terrestre.

El monitoreo y/o la investigación a través de la percepción remota, se basan en la recolección de datos desde sensores remotos que responden en un amplio rango de emisiones electromagnéticas de ondas radio de longitud de onda muy larga, hasta la radiación cósmica de longitud de onda muy corta (Bukata et al, 1995).

La interpretación de imágenes en percepción remota depende del entendimiento de la radiación electromagnética y su interacción con las diferentes superficies terrestres y la atmósfera, ya que a medida que ésta pasa a través de la atmósfera terrestre interactúa con todo tipo de objetos, que pueden ser correlacionados con características de vegetación, estructuras (edificaciones), diferentes suelos, unidades geológicas o cuerpos de agua en la superficie terrestre. La forma más conocida de la radiación electromagnética es la luz visible, que forma sólo una pequeña parte (pero muy importante) de todo el espectro electromagnético (Campbell, 2011).

2.2.- INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON EL AGUA

Las características espectrales de cuerpos de agua se determinan por la interacción de diversos factores, incluyendo la radiación incidente a la superficie del agua, propiedades ópticas de ésta, rugosidad de la superficie, ángulos de observación e iluminación, y en algunos casos, la reflexión de la luz desde el fondo del cuerpo de agua (Figura 2.1)(Campbell, 2011).

Los cuerpos de agua presentan mayor absorción de la radiación, cuanto mayor sea su longitud de onda. Además, la mayor reflectividad del agua clara se produce en la parte azul del espectro visible, reduciéndose paulatinamente hacia el infrarrojo cercano y medio, donde es prácticamente nula (Chuvienco, 2002).

La variabilidad de las características del agua son más fácil de detectar en las longitudes de onda cortas (azul y verde). Se relaciona con la profundidad del cuerpo de agua, contenido de materiales en suspensión (clorofila, sedimentos y nutrientes), y rugosidad de la superficie que favorece la reflexión difusa, y en consecuencia una mayor reflectividad (Figura 2.1). El aumento de la reflectividad en todas las bandas del visible, para distintos diámetros de partícula, se pueden relacionar con la turbidez del agua y su contenido de sedimentos (Chuvienco, 2002).

En caso de aguas muy tranquilas, la superficie se comporta como un “espejo”, con valores de reflectividad que varían en función de la localización del sensor (Chuvienco, 2002). Dirigen la radiación de volumen reflejado al sensor, mientras que las superficies rugosas dirigen una porción de la radiación solar a éste. Como resultado, las superficies onduladas presentan mayor brillantez, especialmente en la parte visible del espectro (Campbell, 2011).

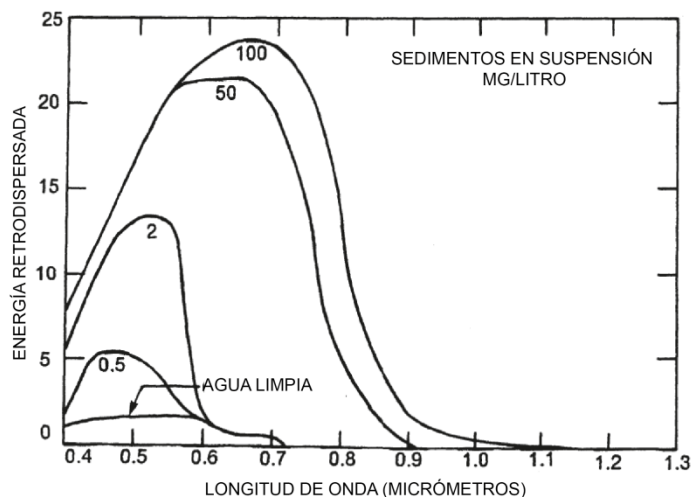


Figura 2.1.- Efectos de turbidez en las propiedades espectrales del agua. (Tomado y modificado de Campbell, 2011).

La profundidad del cuerpo de agua influye directamente en el aporte de reflectividad derivado de las características de los materiales del fondo (Figura 2.2). En aguas poco profundas la reflectividad aumenta, ya que produce un efecto de mezcla en el flujo recibido la reflectividad del suelo (fondo) de los cuerpos de agua. Por lo tanto, la absorptividad será mayor cuanto más profunda sea el tirante de agua (Chuvienco, 2002).

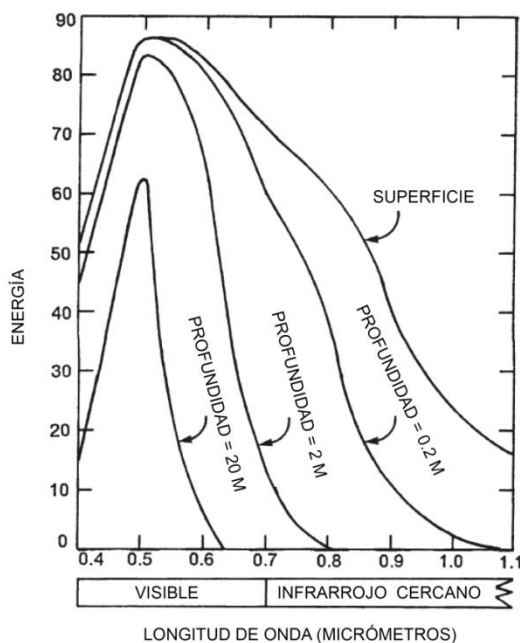


Figura 2.2.- Penetración de la luz en cuerpos de agua limpios. (Tomado de Chuvienco, 2002).

Así mismo, la presencia de altas concentraciones de clorofila en la composición de los cuerpos de agua, causa un decremento en la reflectividad en la región azul del visible del espectro, e incrementa dicha reflectividad en la región verde, del visible del espectro electromagnético.

En la región del infrarrojo cercano (NIR), el agua actúa casi como un cuerpo negro perfecto y absorbe virtualmente toda la energía incidente, permitiendo sólo hacer distinciones tierra-agua (Campbell, 2011). Es el único material natural con esta propiedad. De esta manera, los cuerpos de agua pueden ser fácilmente distinguibles de otros tipos de superficies terrestres. Incluso si son someros o contienen mucho material suspendido. Siendo una buena aproximación de un cuerpo negro, el agua es un emisor casi perfecto de radiación infrarroja, como un buen medio absorbente.

2.2.1.- RADIANCIA EN UN CUERPO DE AGUA

La radiancia L en una dirección específica en un punto del campo de radiación, se define como el flujo radiante en ese punto por unidad de ángulo sólido por unidad de área en ángulo recto con respecto a la dirección de propagación del fotón.

La radiancia total $L(\theta, \varphi, \lambda)$ comprende cuatro componentes identificados en la Figura 2.3 como se observa en la ecuación 2.1.

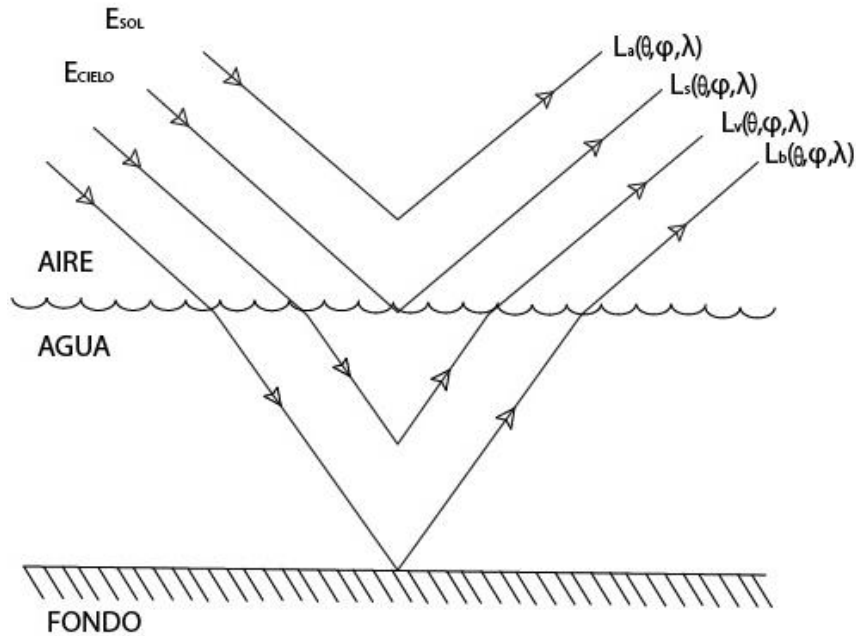


Figura 2.3.- Principales factores que influyen en las características espectrales de un cuerpo de agua. (Tomado y modificado de Bukata et al., 1995).

$L_a(\theta, \varphi, \lambda)$.- es la cantidad de radiancia registrada que resulta de la radiación descendente solar E_{sol} y del cielo E_{cielo} que no toca la interface aire-agua. Esta radiancia se regresa a la atmósfera y se refiere a la dispersión atmosférica.

$L_s(\theta, \varphi, \lambda)$.- es la cantidad de radiancia registrada que resulta de la radiación descendente solar E_{sol} y del cielo E_{cielo} que toca pero no penetra la interface aire-agua, también se le conoce como capa límite y se considera que es el primer milímetro subsuperficial. Esta radiancia representa una reflexión de la superficie acuática.

$L_v(\theta, \varphi, \lambda)$.- es la cantidad de radiancia registrada que resulta de la radiación descendente solar E_{sol} y del cielo E_{cielo} que penetra la interface aire-agua e interactúa con los componentes que contiene la columna de agua sin tocar el fondo del cuerpo de agua, para después regresar y salir del cuerpo de agua. Esta radiancia contiene información del volumen de la columna de agua.

$L_b(\theta, \varphi, \lambda)$.- es la cantidad de radiancia registrada que resulta de la radiación descendente solar E_{sol} y del cielo E_{cielo} que penetra la interfase aire-agua, hasta alcanzar el fondo del cuerpo de agua, además de interactuar con los componentes de la columna de agua, para después regresar y salir del cuerpo de agua. Esta radiancia contiene información del fondo del cuerpo de agua, y es la reflexión del fondo.

La radiancia registrada por un sensor remoto, pasa a través de la atmósfera, atraviesa la interface aire-agua e interactúa con la columna de agua antes de llegar a tocar el fondo del cuerpo de agua y hace un recorrido de regreso semejante. Por esta razón, es que la radiancia total $L(\theta, \varphi, \lambda)$ puede representarse como la suma de los cuatro componentes anteriormente mencionados, ecuación (2.1):

$$L(\theta, \varphi, \lambda) = L_a(\theta, \varphi, \lambda) + L_s(\theta, \varphi, \lambda) + L_v(\theta, \varphi, \lambda) + L_b(\theta, \varphi, \lambda) \quad (2.1)$$

Existen diferentes tipos de estudios sobre los cuerpos de agua. Dependiendo del objetivo de éstos, es que se puede extraer la radiancia de interés a partir de los componentes de radiación registrados por el sensor, donde las radiancias que no son de interés deben de ser eliminadas de la radiancia total (Bukata et al., 1995).

Es importante mencionar que la atmósfera se pueda considerar, como un medio acuático, compuesto por centros de dispersión y absorción, variables en espacio y tiempo. Por lo tanto, un sensor remoto que está dirigido hacia un cuerpo de agua, está percibiendo un medio atenuante, a través de otro medio atenuante.

2.3.- PROPIEDADES INHERENTES DEL AGUA

Dos propiedades ópticas inherentes del agua fundamentales son: la absorción y la dispersión en diferentes direcciones, definidas en términos del comportamiento de un haz de luz paralelo, incidente sobre una fina capa de medio (Kirk, 1994).

Aunque el agua contribuye por si misma a la absorción y distribución de luz, las propiedades ópticas de los lagos turbios dependen en gran parte de la presencia de partículas orgánicas e inorgánicas, en suspensión y de sustancias disueltas, en el medio acuático.

Todos los materiales de color absorben en diferentes cantidades. En general, las sustancias orgánicas disueltas y suspendidas en los lagos con sedimentos turbosos, dan un color oscuro al agua. En la mayoría de los lagos poco profundos, la luz es absorbida predominantemente por células de fitoplancton, detritos y partículas de sedimento suspendidas.

Dado que el material absorbente tiene color, la absorción de luz no es la misma para todas las longitudes de onda, y algunos colores penetrarán más profundamente que otros (Scheffer, 1997). La dispersión de las ondas electromagnéticas en lagos depende fuertemente del color de la luz (Kirk, 1994). Los materiales suspendidos y disueltos contribuyen diferencialmente a la dispersión y absorción, un buen ejemplo es el fitoplancton. Los coeficientes totales de absorción y dispersión en una longitud de onda determinada son producto de la suma de las contribuciones individuales del agua, compuestos orgánicos, fitoplancton y sedimentos inorgánicos en suspensión (Prieur & Sathyendranath, 1981).

2.4.- PROPIEDADES DEL AGUA “PURA”

El término de Agua “Pura” se refiere a agua que está libre de materia orgánica e inorgánica y por lo tanto de los efectos ópticos de ésta. Bukata et al. (1995) define al agua “pura” como una sustancia químicamente pura compuesta de una mezcla de isótopos de agua con diferente masa molecular.

La atenuación $c_w(\lambda)$ es la suma de la absorción $a_w(\lambda)$ y dispersión $b_w(\lambda)$ en un punto del espectro electromagnético λ , como se representa en la siguiente ecuación:

$$c_w(\lambda) = a_w(\lambda) + b_w(\lambda) \quad (2.2)$$

Cuando λ es mayor o igual a 580 nm se presenta una dispersión molecular insignificante en comparación con la absorción de las moléculas de agua. Por lo tanto, la atenuación de la luz en longitudes de onda mayores a 580 nm , es consecuencia de la absorción molecular.

Sin embargo en el rango $400 \text{ nm} < \lambda < 520 \text{ nm}$, la dispersión de moléculas de agua predomina con respecto a la absorción por moléculas de agua. Por lo tanto, la atenuación se rige, por el efecto dispersivo en lo que corresponde a la región azul, del espectro electromagnético.

El agua “pura” absorbe fuertemente en la región de longitudes de onda rojas del espectro visible, sin embargo presenta una absorción más fuerte del infrarrojo cercano cuando $\lambda > 700 \text{ nm}$.

Debido al papel dominante de la dispersión molecular en valores pequeños de λ en el visible y a la absorción molecular, en valores grandes de λ en el visible, el “agua pura” (considerada incolora) se visualiza de color azul. El color azul es más evidente en aguas medias oceánicas, así como en aguas prístinas continentales y costeras ya que no están sujetas a cargas dominantes de materia orgánica e inorgánica terrestre (Bukata et al., 1995).

2.5.- MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS EN LA SUPERFICIE DE AGUA (ESTADO DEL ARTE)

Los satélites de percepción remota con diferentes resoluciones espaciales, espectrales y temporales proporcionan información de gran calidad. Se han convertido en una de las principales fuentes para detectar cambios en las superficies que presentan agua. En general, se extraen de forma individual las características de cuerpos de agua, de dos o más imágenes satelitales, para posteriormente analizarlas y compararlas, con el fin de identificar variaciones en diferentes momentos de tiempo.

Existen gran cantidad de técnicas o metodologías que permiten clasificar coberturas terrestres y diferenciar cuerpos de agua, del resto de la superficie terrestre. Actualmente, se han integrado diferentes metodologías con la finalidad de mejorar la detección de píxeles de agua. Algunas de estas técnicas consisten en:

- Combinar diferentes bandas espectrales de las imágenes satelitales, para identificar expresiones aritméticas del índice diferencial de agua normalizado (NDWI) que permitan identificar mejor las características de agua (Ji et al., 2009).
- Implementar la combinación del índice de agua (NDWI) y el índice de vegetación (NDVI), para resaltar diferencias entre cuerpos de agua y vegetación (Lu et al., 2011; Feng et al., 2016).
- Fusionar imágenes y aplicar métodos de clasificación sobre éstas (Rokni et al., 2015).
- Integrar más de dos bandas para el cálculo del índice diferencial de agua normalizado (Feyisa et al., 2014).

2.5.1.- CLASIFICACIÓN TEMÁTICA

La clasificación de las diferentes superficies terrestres y el análisis de cambios sobre éstas, son aplicaciones de rutina en la percepción remota. Sin embargo, actualmente se está aplicando un nuevo enfoque que hace los resultados más confiables, al momento de detectar variaciones, en imágenes procesadas con alguna técnica de clasificación. Se basa en la aplicación de técnicas de fusión de imágenes (Rokni et al., 2015).

Estas investigaciones, han dado lugar a la implementación de nuevas metodologías en la detección de cambios en cuerpos de agua. Se basan en la técnica de fusión de imágenes satelitales multitemporales, a nivel pixel. Por ejemplo, la Intensidad-Matiz-Saturación (IHS)(Carper et al., 1990), la transformada de Wavelet (Yocky, 1995), filtros Pasa Altas (Schowengerdt, 1980). Este nuevo enfoque conocido como "Pansharpening", consiste en la unión de diferentes imágenes de una misma región, pixel

por pixel, para formar una nueva imagen, la cual contiene más información que las imágenes originales.

El propósito de las técnicas de fusión es mejorar la resolución espacial de los datos de entrada, resaltando la baja resolución de las imágenes multiespectrales con la alta resolución de los datos pancromáticos. Las técnicas de clasificación permiten identificar áreas de cambio haciéndolas visibles con mayor claridad, en una imagen fusionada. La fusión a nivel píxel, de los datos multitemporales de coberturas de agua y tierra genera nuevos píxeles respecto de los píxeles que no tuvieron cambios, de dichas coberturas.

La exactitud de los resultados en la detección de cambios depende básicamente de la técnica de clasificación aplicada, para la extracción de los píxeles que presentaron variaciones de imágenes multitemporales, así como del método utilizado para llevar a cabo la fusión, para resaltar dichos cambios (Rokni et al., 2015).

Rokni et al. (2015), integró la metodología de fusión de imágenes con diferentes técnicas de clasificación con la finalidad de detectar cambios en la superficie de cuerpos de agua, demostrando una alta efectividad con este nuevo enfoque. El resultado obtenido con la fusión de imágenes fue una imagen multiespectral de alta resolución, con áreas de cambio “resaltadas”, lo que a su vez permitió resultados más confiables.

2.5.2.- ÍNDICE NORMALIZADO DEL AGUA

Existen otros métodos de clasificación conocidos como “índices de umbrales” de una o dos bandas. Se basan en calcular y encontrar un valor de umbral apropiado para diferenciar donde hay presencia de agua y donde no hay. Estos índices mejoran localmente la señal de agua, sin embargo determinar el valor de umbral es difícil, debido a que varían en espacio y tiempo (Feyisa et al., 2014).

El índice espectral de agua representa un número, único, derivado de una operación aritmética entre dos o más bandas espectrales. Se puede establecer un umbral

adecuado de este índice, que permita separar cuerpos de agua de elementos con otras características de la cubierta terrestre de acuerdo a sus características espectrales. El diseño de un índice espectral de agua se basa, en el hecho de que el agua absorbe energía, en longitudes de onda del infrarrojo cercano (NIR) y en el infrarrojo de onda corta (SWIR). La operación aritmética no sólo mejora las señales espectrales mediante el contraste de la reflectancia entre diferentes longitudes de onda, sino también elimina gran parte de los componentes de ruido que son comunes en diferentes regiones de longitud de onda (Ji et al., 2009).

McFeeters (1996) establece una relación para el índice diferencial de agua normalizado (NDWI) en función de las reflectancias de las bandas verde (ρ_{verde}) y el infrarrojo cercano (ρ_{NIR}):

$$NDWI = \frac{\rho_{\text{verde}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{verde}} + \rho_{\text{NIR}}} \quad (2.3)$$

Donde, el valor de NDWI oscila entre -1 y 1 y cumple con las siguientes condiciones:

- Si el valor de NDWI > 0, entonces el tipo de cubierta es agua
- Si el valor de NDWI <= 0, la cubierta no es agua.

Este índice está diseñado para:

- (1) Maximizar la reflectancia de agua, mediante el uso de longitudes de onda de la banda verde.
- (2) Reducir al mínimo la baja reflectancia del infrarrojo cercano (NIR), por las características del agua.
- (3) Tomar ventaja de la alta reflectancia del NIR, por características propias de la vegetación y el suelo.

El proceso permite resaltar cuerpos de agua con diferentes características si el valor del NDWI > 0 , mientras que los diferentes tipos de vegetación y suelo suelen tener valores negativos o cero (McFeeters, 1996).

Sin embargo, Xu (2006) encontró que la expresión (2.3) de McFeeters para el NDWI era incapaz de separar completamente, las características de zonas urbanizadas de las características del agua. Propuso un nuevo índice (MNDWI) reemplazando la banda NIR (ρ_{NIR}) por la banda SWIR (ρ_{SWIR}) en la ecuación (2.3), obteniendo la siguiente expresión:

$$NDWI = \frac{\rho_{\text{verde}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{verde}} + \rho_{\text{SWIR}}} \quad (2.4)$$

En imágenes multiespectrales Worldview-2, el índice Diferencial de Agua Normalizado puede ser calculado utilizando la banda 3 ($b_{3_{\text{verde}}}$) con un rango espectral de 510 – 580 nm. y la banda 8 ($b_{8_{\text{NIR2}}}$) con 860 – 1040 nm., obteniéndose la siguiente expresión (Zhou et al., 2012):

$$NDWI = \frac{b_{3_{\text{verde}}} - b_{8_{\text{NIR2}}}}{b_{3_{\text{verde}}} + b_{8_{\text{NIR2}}}} \quad (2.5)$$

Ji et al. (2009) mencionan que los dos principales problemas para identificar las características de agua a través del NDWI son:

- Identificar la combinación de bandas que sean los mejores indicadores de agua.
- Encontrar un valor de umbral adecuado que permita identificar los píxeles con componentes de agua y sin agua.

Por esta razón, Ji et al. (2009) probaron en diferentes imágenes satelitales el NDWI, basándose en el formato del NDWI de McFeeters (1996) y combinaron las distintas bandas espectrales de los distintos datos satelitales Landsat ETM+, SPOT-5, ASTER y MODIS.

Los valores de umbrales más estables que encontraron, fueron con la combinación de las bandas verde y SWIR, las expresiones implementadas con mejores resultados se enlistan en la siguiente tabla:

Sensor	Ecuación NDWI	Bandas (μm)
Landsat ETM+	$NDWI = \frac{\rho_2 - \rho_5}{\rho_2 + \rho_5} \quad (2.6)$	$\rho_2 =$ banda 2 (verde): 0.52 – 0.60 $\rho_5 =$ banda 5 (SWIR): 1.55 – 1.75
SPOT-5	$NDWI = \frac{\rho_1 - \rho_4}{\rho_1 + \rho_4} \quad (2.7)$	$\rho_1 =$ banda 1 (verde): 0.50 – 0.59 $\rho_4 =$ banda 4 (SWIR): 1.58 – 1.75
ASTER	$NDWI = \frac{\rho_1 - \rho_4}{\rho_1 + \rho_4} \quad (2.8)$	$\rho_1 =$ banda 1 (verde): 0.52 – 0.60 $\rho_4 =$ banda 4 (SWIR): 1.60 – 1.70
MODIS	$NDWI = \frac{\rho_4 - \rho_5}{\rho_4 + \rho_5} \quad (2.9)$	$\rho_4 =$ banda 4 (verde): 0.55 – 0.57 $\rho_5 =$ banda 5 (SWIR): 1.23 – 1.25

Tabla 2.1.- NDWIs para diferente tipos de imágenes satelitales (Ji et al., 2009).

Los resultados de Ji et al. (2009) y Xu (2006) coinciden en la misma combinación de bandas para las imágenes satelitales Landsat y SPOT, ya que las expresiones 2.4, 2.6 y 2.7 son equivalentes.

Feyisa et al. (2014) encontraron que los índices existentes para identificar la cobertura de agua, presentaban problemas de exactitud en superficies donde había sombras o presencia de luz solar escasa. Derivado de estos inconvenientes, introdujeron el Índice Automático de Extracción de Agua (AWEI), que a diferencia de los índices anteriormente mencionados, es un método multibanda y con dos objetivos principales:

1. Automatizar la extracción del ruido provocado por las sombras y superficies oscuras en una clasificación, con la finalidad de incrementar el contraste entre el agua y otras coberturas oscuras para obtener mejores resultados en la detección de superficies que presentan agua.

2. Probar la robustez del AWEI, en diferentes escenarios del medio ambiente, y evaluar su exactitud, ante otras técnicas de clasificación.

El Índice Automático de Extracción de Agua (AWEI) consta de dos ecuaciones, la primera ($AWEI_{nsh}$) se utiliza para superficies donde las sombras, no son el principal problema, mientras que la segunda ($AWEI_{sh}$) es empleada para eliminar píxeles de sombras y/o superficies oscuras.

$$AWEI_{nsh} = 4 * (b2_{verde} - b5_{SWIR}) - (0.25 * b2_{verde} + 2.75 * b7_{SWIR}) \quad (2.10)$$

$$AWEI_{sh} = b1_{azul} + 2.5 * b2_{verde} - 1.5 * (b4_{verde} + b5_{SWIR}) - 0.25 * b7_{SWIR} \quad (2.11)$$

Este índice multibanda en las imágenes Landsat TM respecto a otros métodos de clasificación presenta su mayor exactitud en áreas de sombra y superficies oscuras. Además permite detectar, los píxeles de los bordes de las coberturas de agua, con elevada precisión (Feyisa et al., 2014).

Otra metodología, que permite resaltar los píxeles que presentan agua consiste en utilizar las imágenes satelitales multiespectrales llamadas HJ-1A y HJ-1B. Son una fuente ideal de información con alta resolución espacial y temporal para monitorear los cuerpos de agua (combinación de características entre las imágenes Landsat TM/ETM+ y MODIS). Esta metodología consiste en integrar los índices NDVI – NDWI con la topografía y la banda del NIR, usando las siguientes relaciones (Lu et al., 2011):

- La diferencia entre el Índice Normalizado Diferencial de Vegetación (NDVI) y el Índice Normalizado Diferencial de Agua, permite mejorar el contraste entre las superficies de agua y las diferentes coberturas que lo rodean, como es la vegetación.
- La topografía del área de estudio, que permite eliminar las sombras de las montañas.
- La banda del infrarrojo cercano (NIR), que reduce los efectos causados por las sombras de las construcciones.

Los métodos de índices son muy usados ya que son fáciles de aplicar y ocupan menos recursos computacionales que otras técnicas de clasificación (Ji et al., 2009).

CAPÍTULO III

3.- ZONA DE ESTUDIO

3.1.- LOCALIZACIÓN

El Parque Nacional Lagunas de Montebello (PNLM) fue decretado, como tal el 16 de diciembre de 1959, por el entonces presidente de la República Mexicana Adolfo López Mateos (DOF, 1959). Se ubica al sureste del estado de Chiapas, a los $16^{\circ}10'20''$ y $16^{\circ}04'40''$ de latitud Norte y a los $91^{\circ}47'40''$ y $91^{\circ}37'40''$ de longitud Oeste; limitando al Sur con Guatemala (Figura 3.1). Está comprendida dentro de los municipios de La Trinidad y La Independencia, a 47 km. de la ciudad de Comitán en la provincia fisiográfica Sierras de Chiapas y Guatemala, con una altitud promedio de 1,500 msnm y una extensión de 6,022 ha.

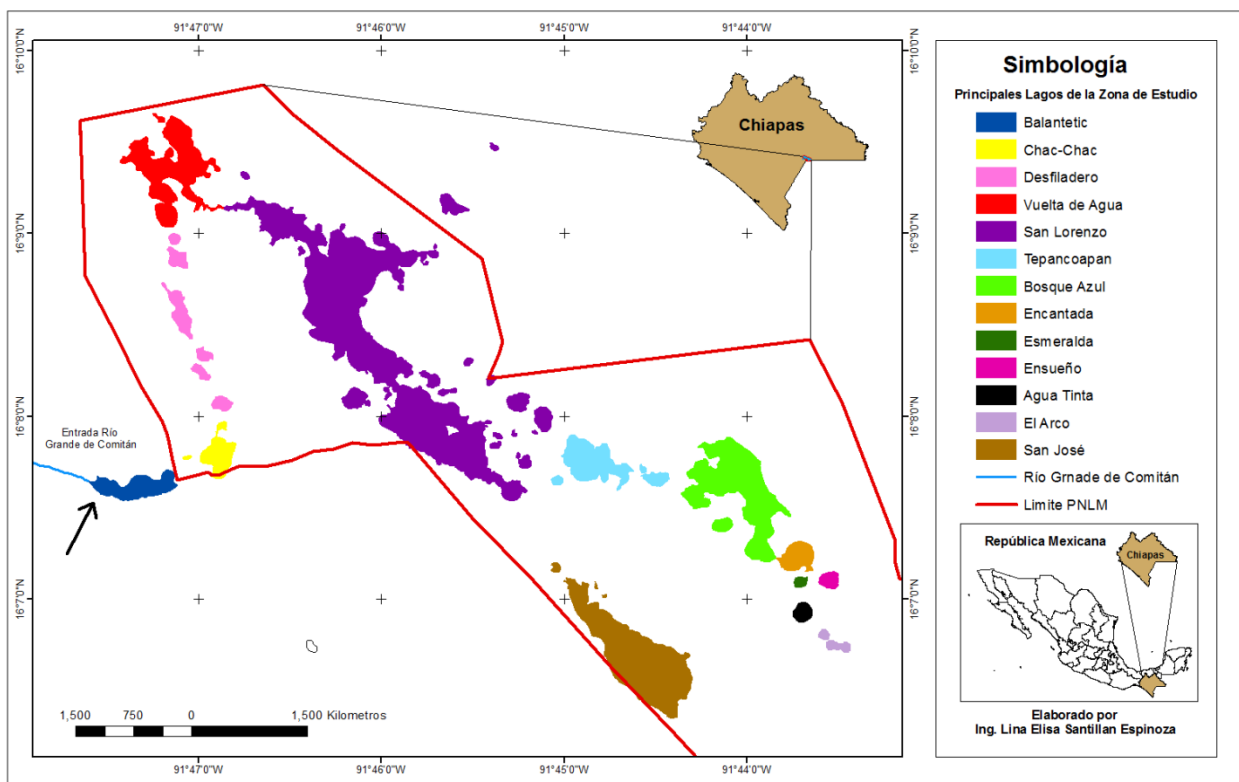


Figura 3.1.- Localización del Parque Nacional Lagunas de Montebello en Chiapas, México.

El parque es un lugar de sobresaliente belleza natural, su principal atractivo es un sistema lagunar de origen kárstico con alimentación subterránea. Se encuentran desde

pequeños sumideros hasta grandes fosas con perfiles cóncavos de fondo agudo o semiplanos, así como grandes grutas y oquedades de formas y tamaños variados. Se calcula que existen alrededor de 60 lagos de diversa magnitud, siendo el más grande e importante el de Tepancoapan, de 13 km de longitud. Otros de tamaño medio son los de Montebello y Tziscaco, existiendo un sinnúmero de pequeñas lagunas que desaparecen en la época de sequía y reaparecen en época de lluvias (Melo y Cervantes, 1986).

La diversidad de tonalidades de colores que tienen estas lagunas, hace de ellas una característica única, van desde un verde esmeralda o jade, hasta un azul, rojo, cobrizo, blanco o negro, razón por la cual les dan nombres como Agua Tinta, Esmeralda, Pozo Azul, etc. (Melo y Cervantes, 1986).

El clima de la zona es templado. Los habitantes de la región, reconocen dos estaciones al año, la seca con una duración de tres meses (Febrero a Mayo), con lluvias esporádicas y la de lluvias, con una duración de nueve meses (Junio a Enero) siendo Agosto, Septiembre y Octubre los meses con mayor precipitación. El promedio de precipitación anual varía desde los 2,500 hasta los 3,000 mm con una humedad ambiental, superior al 80% (Ramírez, 2009).

Esta investigación se concentra en la parte noroeste del sistema lagunar debido a que es el área que presenta más cambios en los cuerpos de agua, de acuerdo con estudios previos realizados por Melo y Cervantes (1986) y la CFE (2012). Los nombres de las lagunas que son estudiadas son: Balantetic, Chac-Chac, Sistema San Lorenzo, Vuelta de Agua, San Lorenzo, Tepancoapan, Bosque Azul, Encantada, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta, El Arco y San José. De acuerdo a la conectividad hidráulica que tienen entre ellas, se clasificaron en 3 subsistemas, para la interpretación de algunos resultados, los cuales son:

- Subsistema San Lorenzo que comprende desde el cuerpo lacustre Balantetic, Chac-Chac, Sistema San Lorenzo, Vuelta de Agua hasta San Lorenzo.
- Subsistema Bosque Azul conformado por Tepancoapan, Bosque Azul, Encantada, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta y El Arco.

- Subsistema San José que abarca la laguna de San José y pequeños cuerpos de agua aledaños a ésta.

3.2.- MARCO GEOLÓGICO

Melo y Cervantes (1986) describen que en el área predominan materiales de origen marino, por lo que se infiere que durante un largo periodo, la región del parque estuvo ocupada por mares someros, depositándose organismos y materiales sedimentarios, que al consolidarse formaron rocas calizas. El material predominante, en toda el área de Montebello, son las rocas calizas bien estratificadas, dispuestas en forma de banco, aunque también en capas y lajas, de estructura maciza y frecuentemente con interacciones de estratos finos dolomíticos. Su espesor alcanza hasta los 80 m y poseen coloración grisácea y rojiza. Su textura es masiva y resistente a la erosión mecánica, pero débil al ataque químico, debido a la presencia de intercalaciones de núcleos fosilíferos, delgados, compuestos de dolomitas.

Los depósitos fluviales se localizan a lo largo de cauces y arroyos, presentando composición variable, formando estratos arcillosos, arcilloso-arenoso, arenas, guijarros y cantos rodados.

Las calizas, ligeramente plegadas, de la zona de Montebello se caracterizan por la carstificación de las rocas, es decir, la disolución de los carbonatos por los procesos químicos del CO₂ con el agua, principalmente a lo largo de zonas lábiles (fracturas, poros, impurezas, etc.). Gran parte de este material es arcilloso y junto con un porcentaje de arenas, constituye las otras unidades litológicas que existen en el parque, distribuidas a menor escala como depósitos lacustres en los alrededores de los lagos y fluviales, a lo largo de arroyos intermitentes o causes inactivos (CONANP, 2007).

Los rasgos geomorfológicos que presenta el PNLM se caracterizan por un conjunto de estructuras geológicas formadas por rocas sedimentarias calizas dispuestas en bloques afallados y dislocados, formando un paisaje de lomeríos con elevaciones de poca altura, separadas por pequeñas depresiones. Caracterizan este paisaje, laderas que constituyen

frentes abruptos, siendo comunes las paredes rocosas en partes superiores de dichas laderas. Estas formaciones resultan de factores geológicos que han conformado el relieve primario y de la actividad de otros procesos morfogenéticos, en especial el intemperismo químico que disuelve y desintegra la roca caliza, preparándola de manera que la erosión del agua percolante las arrastre, a través de fallas y fracturas, hacia el interior de la estructura geológica en la que se pierden definitivamente (Melo y Cervantes, 1986).

La mayor actividad morfológica de la carstificación se presenta subterráneamente, este proceso se refleja en el macro y meso-relieve en la superficie. La carstificación ocasiona la formación y ampliación de complejos sistemas subterráneos de cuevas y canales interconectados que constituyen almacenes y conductos temporales o permanentes del manto freático. Al encontrarse cerca de la superficie, la continua disolución de las calizas, resulta eventualmente, en techos calcáreos débiles de estas concavidades y su consecuente derrumbe, con formación de depresiones redondas o alargadas que poco a poco se rellenan con sedimentos finos del suelo alrededor y suelo formado, in situ (CONANP, 2007).

3.3.- SUELOS

La mayor parte de los suelos del PNLN se han desarrollado de las calizas o de sedimentos fluviales y lacustres. Se identifican los siguientes tipos de suelos: litosoles, rendzinas, vertisoles, acrisoles, fluvisoles y gleysoles (Vásquez y Méndez, 1994) (Tabla 1).

Tabla 3.1.- Características principales de suelos que predominan en la zona de estudio (Vásquez y Méndez, 1994).

Suelo	Observaciones
Litosoles	Ocupan la mayor superficie del Parque, se encuentran en partes escarpadas de las laderas y en los lomeríos donde los procesos denudativos actúan continuamente. Son suelos muy someros caracterizados por una baja capacidad de retención de agua. Sin embargo, como ocupan sitios inclinados, son altamente susceptibles a la erosión acelerada después de la deforestación, por lo que se pueden convertir rápidamente a sitios muy someros (Litosoles), con la pérdida de sus propiedades favorables.
Rendzinas	Ocupan las partes bajas del relieve, las depresiones al pie de los lomeríos cársticos hacia el noroeste del Parque y las laderas de poca inclinación. Son suelos profundos y ricos en arcillas hinchables.
Vertisoles	Se ubican en las laderas montañosas de suave pendiente, son suelos más o menos profundos, arcillosos y ácidos por su alto grado de basificación. Son altamente susceptibles a la erosión acelerada posterior a la deforestación por la estructura mayormente débil de los horizontes superiores.
Acrisoles	Concentrados en las partes más bajas del relieve influenciados por el manto freático y en playas contiguas a cuerpos lacustres inundados de manera temporal o permanente.
Fluvisoles	En laderas de suave pendiente y cubiertas de bosque, son suelos profundos, rojizos y amarillentos, situados en lugares muy húmedos.

3.4.- HIDROLOGÍA

Los lagos del Parque constituyen un complejo lacustre de origen cárstico, que abarca desde territorio mexicano hasta guatemalteco. Estos cuerpos de agua están comunicados entre sí por conductos subterráneos y pequeños canales superficiales que funcionan como conductos activos, especialmente en las temporadas de mayor precipitación. Los lagos en el área de estudio reciben aportes tanto de agua superficial, como subterránea, siendo ésta última la fuente principal (Vásquez y Méndez, 1994). A pesar de que la precipitación es abundante, no existen escurrimientos superficiales importantes, debido a la alta permeabilidad del subsuelo, favorecida por el tipo de estructuras geológicas afalladas, dislocadas y fracturadas, y la composición química de las rocas que favorecen la desintegración de su basamento, por disolución química.

En su génesis, estos lagos constituyeron dolinas o úvalas cársticas formadas por el derrumbe de los techos de los sistemas de cuevas subterráneas que se originaron por la disolución química de las calizas. Su posición específica dentro del sistema de las aguas freáticas cársticas, facilita el relleno de estas depresiones con agua subterránea y el nivel del espejo lacustre (CONANP, 2007).

Montebello está comprendido en la Región Hidrológica Nacional No. 30 Grijalva-Usumacinta y forma parte de la subcuenca del Río Grande Comitán con 545 km². Con respecto a sus dimensiones, son siete los principales lagos del Parque. El sistema Tepancoapan (13 km de longitud) está considerado como un cuerpo de agua continuo que reúne a los lagos San Lorenzo, Bosque Azul, Peninsular, Encantada, Esmeralda, Bartolo y Peñasquito debido a las inundaciones de sus áreas colindantes durante la época de lluvia. Con base en sus dimensiones, le siguen en importancia los lagos de Tzisco (3.6 km de longitud); Montebello (2 km de longitud); y Pojoj (1 km de longitud).

El Río Grande constituye el río principal de la subcuenca que abarca el Parque. Las aguas negras de la ciudad de Comitán de Domínguez desembocan en este río y conforma una seria amenaza de contaminación al sistema hidrológico de Montebello (CONANP, 2007).

3.5.- PANORAMA ACTUAL DE LA ZONA

El estado de conservación del Parque Nacional Lagunas de Montebello es amenazado principalmente por el cambio en el uso de suelo, la invasión del territorio por comunidades colindantes, el uso doméstico del agua, los incendios forestales y la afectación por desechos sólidos, provocando variaciones morfológicas en extensión de los cuerpos lacustres.

En adición a los procesos naturales de transformación ambiental propios de los ecosistemas (regeneración y sucesión, incendios naturales, etc.), son numerosos los factores antropogénicos que promueven la transformación de las áreas naturales. Las principales amenazas en el área de estudio, son el cambio de uso de suelo, la invasión del territorio por comunidades colindantes, el uso doméstico del agua, los incendios forestales y la afectación por descargas de aguas negras y las de áreas agrícolas.

La contaminación, en el Parque y su zona de influencia, tiene origen en las actividades agropecuarias, uso de fertilizantes y plaguicidas, así como en vertido de las aguas residuales sin tratamiento de la ciudad de Comitán de Domínguez al Río Grande que desemboca en el Lago de Tepancoapan, el más extenso del Sistema de Lagos de Montebello.

El impacto de las actividades agrícolas y el uso de fertilizantes y plaguicidas, pueden potencialmente filtrarse a las aguas subterráneas, que es parte de la alimentación del sistema lacustre de Montebello. En particular el uso de detergentes puede afectar las condiciones limnológicas de los cuerpos de agua (CONANP, 2007). Melo y Cervantes (1986) refieren que el cambio de coloración de los cuerpos lacustres, debido a toda la problemática anteriormente mencionada del Parque, es un proceso que ha ocurrido desde hace tiempo. La figura 3.2, muestra el cambio de coloración entre lagunas cercanas.



Figura 3.2.- Cambios en la coloración de las Lagunas de Montebello

Otra fuente de contaminación, producto de la actividad turística, es la basura que los visitantes dejan a su paso, la falta de adopción de un sistema de clasificación de desechos, reciclaje y reutilización o su disposición final en rellenos (CONANP, 2007).

Con respecto al uso del agua, existe una gran presión sobre este recurso debido a que todas las comunidades asentadas en torno al Parque utilizan el agua de los lagos para actividades domésticas, consumo humano y riego (CONANP, 2007).

CAPÍTULO IV

4.- METODOLOGÍA PARA TRATAMIENTO DE IMÁGENES SATÉLITALES

Las dos metodologías desarrolladas en el presente trabajo se ilustran en la Figura 4.1. Implican un conjunto de técnicas y procesos divididas en cinco pasos, donde el preprocesamiento (paso 1), la vectorización (paso 4) y el análisis de cambios por diferencias (paso 5) son iguales en ambas metodologías. La diferencia básica radica en la etapa de realce (paso 2) y la de segmentación de reconocimiento de patrones (paso 3).

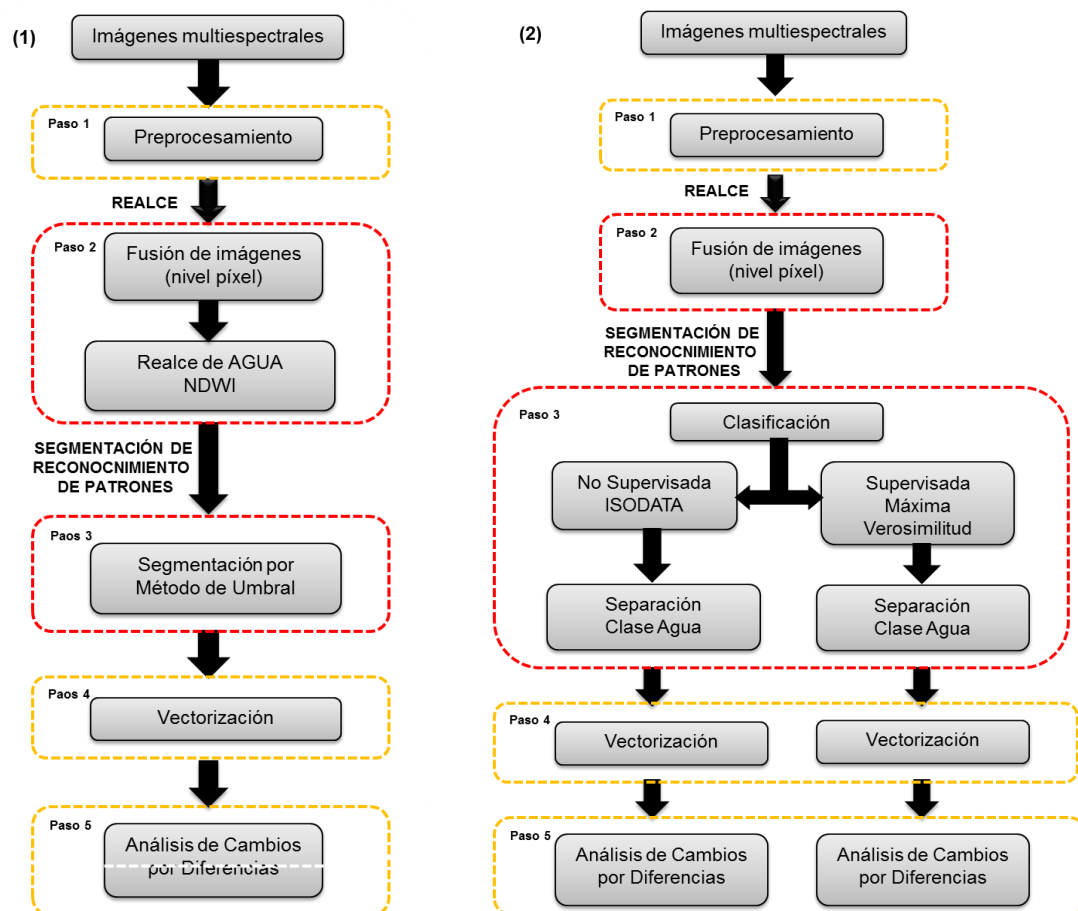


Figura 4.1.- Esquema de las dos metodologías desarrolladas para la detección de cambios en las lagunas de Montebello, Chiapas.

El primer paso de las metodologías esta basado en los procesos implicados en el preprocesamiento, como son las correcciones geométrica y atmosférica que permiten la restauración de las diferentes imágenes, utilizadas en el presente trabajo.

El segundo paso, es el realce espacial a nivel píxel. Esta técnica se realiza en las imágenes SPOT-5 que cuentan tanto con las bandas multiespectrales como con la pancromática, ya que ésta última es esencial para alcanzar una resolución espacial de 10m a 2.5m en las imágenes. Las dos metodologías llevan a cabo el proceso antes mencionado, sin embargo, una de ellas, también aplica un realce de cubierta de agua, utilizando el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).

Como se señaló anteriormente, el paso tres es diferente en ambas metodologías. Una de ellas, después de haber realizado la cubierta de agua, utiliza técnicas de segmentación de reconocimiento de patrones (Método de umbral) para extraer la cubierta de agua antes identificada. Mientras que para la segunda metodología, esta etapa consiste en llevar a cabo las clasificaciones no supervisada y supervisada, seguido de una separación perteneciente a la clase de agua.

El cuarto paso es igual para ambas metodologías. Consiste en hacer las máscaras de cada imagen resultante en la etapa anterior, a través de la vectorización de toda la cubierta de agua, seguido del cálculo del área total de la superficie de agua.

Finalmente, el último paso (Paso 5) consiste en analizar los cambios presentes por diferencias, entre los diferentes tiempos de las máscaras, con el fin de establecer una tabla por cada comparación entre las diferentes fechas con los cambios principales detectados, además de las diferencias calculadas de las áreas superficiales.

4.1.- RECURSOS UTILIZADOS EN EL PROYECTO

Los recursos utilizados para la detección de cambios morfológicos de los cuerpos lagunares en el área lacustre de Montebello, Chiapas consisten en la colección de tres tipos de imágenes satelitales (SPOT-4**, SPOT-5 y Worldview-2) de los años 2000, 2006, 2007, 2009, 2010, 2011 y 2012, con diferentes características espaciales y espectrales, que abarcan el área del arribo del Río Grande de Comitán, al sistema lagunar, hasta las lagunas del Arco, al Oriente y la de San José, al Sur (Figura 3.1), y de una base de datos con la precipitación diaria de la estación meteorológica de Comitán.

Las imágenes SPOT-5 de los años 2006, 2007, 2009 y 2010 fueron proporcionadas por la Secretaría de Marina (SEMAR), a través de la Estación de Recepción México de la Constelación Spot (ERMEXS), para el proyecto Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, Chis., del Fondo Sectorial CONAGUA-CONACyT llevado a cabo por el Instituto de Geofísica de la UNAM, en base a su convenio con la dependencia gubernamental antes mencionada. Desafortunadamente, estas imágenes tenían un alto porcentaje de nubosidad, por lo que se tomó la decisión, de volver a solicitarlas, con el cuidado de tener el menor porcentaje de nubosidad y de ser posible nulo, pero alrededor de la misma fecha que las existentes, y de pedir una imagen más reciente del año 2012.

Las nuevas imágenes SPOT-5 de los años 2006, 2007, 2009, 2010 y 2012 fueron cuidadosamente seleccionadas del catálogo SIRIUS del programa francés SPOT. Posteriormente se solicitaron a la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) a través del CentroGeo, con base a su convenio con la anterior dependencia gubernamental. El tiempo que se llevó la adquisición de estas imágenes fue de varios meses, por lo que se tomó la decisión de recortar el área de estudio. Considerando las zonas más susceptibles a cambios mencionadas en estudios anteriores, y tomando en cuenta las imágenes satelitales que se tenía en ese momento, se recortaron las zonas con densa nubosidad, que afortunadamente, no eran el área de interés. Al llegar las nuevas imágenes, se

****Se agradece a la empresa Distribución Astrium Services / Spot Image S. A que proporcionó la imagen SPOT-4 © CNES 2000 a esta investigación.

dejaron de procesar las primeras que se tenían, y se continuó el procesamiento con las nuevas.

La imagen Worldview-2 fue comprada a la empresa DigitalGlobe, por el proyecto Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, Chis., del Fondo Sectorial CONAGUA-CONACyT (Escolero, 2013).

El total de imágenes procesadas fueron siete y las fechas de adquisición son en época de estiaje. Abarcan un periodo de 12 años (2000 - 2012). La Tabla 4.1 presenta las imágenes que finalmente se utilizaron en la detección de cambios para la superficie lacustre, así como las características de las mismas.

Tabla 4.1.- Características de las imágenes procesadas en el presente trabajo.

Sensor	Fecha	Imagen		Nivel de procesamiento	Resolución espacial (m)	Resolución radiométrica	ID referencia
		MS	PAN				
SPOT-4	2000/03/11	X		1A	20m	8 bits	4 605-318 00-03-11 17:01:42 2 I
SPOT-5	2006/01/16	X		1A	10m	8 bits	E56053180601162J1A00002
SPOT-5	2007/02/20	X		1A	10m	8 bits	E56053180702201J1A01007
SPOT-5	2007/02/20		X	1A	2.5m	8 bits	E56053180702201T1A05006
SPOT-5	2009/12/26	X		2A	10m	8 bits	E56053180912262J2A07017
SPOT-5	2009/12/26		X	2A	2.5m	8 bits	E56053180912262T2A08014
SPOT-5	2010/12/15	X		2A	10m	8 bits	E56053181012152J2A08024
SPOT-5	2010/12/15		X	2A	2.5m	8 bits	E56053181012152T2A01023
WorldView-2	2011/11/ 23	X		LV2A Estándar	1.85m	16 bits	052970705010_01_P001
SPOT-5	2012/01/09	X		1A	10m	8 bits	E56053181201092J1A04018
SPOT-5	2012/01/09		X	1A	2.5m	8 bits	E56053181201092T1A02021

4.1.1.- CARACTERÍSTICAS DE LAS IMÁGENES

Las imágenes multiespectrales SPOT-4 y SPOT-5 al ser adquiridas constan de un conjunto de archivos, contenidos y organizados en formato zip, entre los que destacan son los de extensión TIFF, DIM y un PDF de nombre VOL_LIST.

Archivo GeoTIFF.- es la imagen correspondiente a la escena tomada por el sensor, y está en uno de los formatos más usados para imágenes.

Archivo DIM.- son los metadatos de la imagen del sensor, los cuales permiten desplegar la imagen sin necesidad de tener que abrir el archivo TIFF, ya que contiene información propia de la imagen, como las coordenadas de la escena tomada por el sensor, el sistema y la proyección de la georreferenciación, además de datos de cada banda de la imagen, etc.

Archivo VOL_LIST.PDF.- este archivo es indispensable para hacer un análisis visual de la imagen, te permite obtener información contenida en los metadatos, además de visualizar los histogramas por banda para comparar que correspondan a los histogramas desplegados por la imagen.

4.1.1.1.- SPOT-4

El satélite SPOT-4 inició su misión en marzo de 1998 con la característica principal de contar con un instrumento de alta resolución visible e infrarrojo (HRVIR) que permite contar con una banda de infrarrojo medio SWIR (1,58-1,75 μm) diseñada para proporcionar capacidades de reconocimiento geológico, para estudios de la vegetación, y para el estudio de la cubierta de nieve. Esta misión SPOT-4 también presenta la mejora de la adición del sensor VGT1, más adecuado para la detección de vegetación (Tabla 4.2).

Tabla 4.2.- Características del satélite SPOT-4

Satélite	Lanzamiento	Sensor	Bandas (μm)	Resolución Espacial	Resolución radiométrica	Resolución Temporal
SPOT 4	Marzo 1998	HRVIR	1 - (0.50 - 0.59)	20 m	8 bits	26 días
			2 - (0.61 - 0.68)			
			3 - (0.79 - 0.89)			
			SWIR - (1.58 - 1.75)			
		VGT1	PAN - (0.51 - 0.73)	PAN 10 m		

La imagen SPOT-4 del año 2000 utilizada en este trabajo, tiene una corrección nivel 1A, que implica una corrección radiométrica aplicada para corregir distorsiones propias del sensor.

4.1.1.2.- SPOT-5

El satélite SPOT-5 fue lanzado en mayo del año 2002 y se caracteriza por la alta resolución estereoscópica del sensor HRS, la alta resolución geométrica del sensor HRG y el sensor VGT2 con la versión mejorada de su antecesor para la detección de vegetación (Tabla 4.3).

Tabla 4.3.- Características del satélite SPOT-5

Satélite	Lanzamiento	Sensor	Bandas (μm)	Resolución Espacial	Resolución radiométrica	Resolución Temporal
SPOT 5	Mayo 2002	HRS	1 - (0.50 - 0.59)	20 m	8 bits	26 días
			2 - (0.61 - 0.68)			
			3 - (0.79 - 0.89)			
			HRG			
		VGT2	PAN - (0.51 - 0.73)	PAN 10 m		

Las imágenes del sensor SPOT-5 están en un formato DIMAP, esto quiere decir que al desplegar las imágenes multiespectrales, se ve una imagen de color falso estándar, ya que las bandas verde (1) y NIR (3) están invertidas, y deben ser reorganizadas.

Los datos espaciales de los años 2006, 2007 y 2012 tienen una corrección nivel 1A, al igual que los datos SPOT-4, mientras que las imágenes de los años 2009 y 2010 de este estudio, tienen una corrección nivel 2A, que implica una corrección radiométrica al igual que el nivel 1A y una georreferenciación a una proyección UTM WGS84 (sin usar los puntos de control del terreno).

4.1.1.3.- WORLDVIEW-2

WorldView-2 fue lanzado en octubre de 2009 y es el primer satélite comercial de alta resolución con 8 bandas multiespectrales (Tabla 4.4).

Tabla 4.4.- Características del satélite WorldView-2

Satélite	Lanzamiento	Bandas (μm)	Resolución Espacial	Resolución radiométrica	Resolución Temporal
WorldView-2	Octubre 2009	Costera - (0.40 - 0.45) Azul - (0.45 - 0.51) Verde - (0.51 - 0.58) Amarilla - (0.585 - 0.625) Roja - (0.63 - 0.69) Borde Rojo - (0.705 - 0.745) NIR 1 - (0.77 - 0.895) NIR 2 - (0.86 - 1.04)	1.85 m	16 bits	1.1 días
		PAN - (0.45 - 0.80)	PAN 46 cm		

La imagen WorldView-2 utilizada en el trabajo es del 23 de noviembre del año 2011 y tiene un nivel de procesamiento estándar 2A (LV2A), esto quiere decir, que los

datos satelitales fueron adquiridos con la corrección radiométrica y geométrica, además de haber sido ortorectificados a 16 bits.

4.1.2.- CARACTERÍSTICAS DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

Los datos de precipitación se analizaron con la finalidad de encontrar la relación de las lluvias con el comportamiento de cambios de la zona lacustre. La base de datos que fue proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de la gestión realizada por el Dr. Roberto Bonifaz, es de precipitación diaria y corresponde a la estación meteorológica de Comitán de Domínguez, la información es desde el año de 1961 hasta el 2012, esta estación se localiza en el municipio que lleva por nombre.

4.2.- PRE-PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El pre-procesamiento se refiere a las operaciones preliminares en el desarrollo de la metodología empleada; es decir, el proceso de restauración de la imagen, que involucra la corrección por distorsión, degradación y ruido introducido, durante la adquisición de la imagen.

Antes de llevar a cabo el análisis de detección de cambios, es necesario cumplir ciertas condiciones en proyectos de detección de cambios, tales como: realizar el registro de imágenes multitemporales y las correcciones radiométrica y atmosférica (Lu et al., 2004). Para este último requisito, se han desarrollado una variedad de métodos, como la calibración relativa y sustracción del objeto más oscuro.

Las imágenes utilizadas en este proyecto, ya presentaban corrección radiométrica, debido al nivel de procesamiento con el que se adquirieron, sin embargo, no todas contaban con la corrección geométrica, por lo que se tomó la decisión de llevar a cabo la corrección geométrica tanto para las que ya contaban con ella, como para las que no, con el fin de verificar que todas las imágenes utilizadas coincidieran entre sí y no hubiera desfase. También se aplicó la corrección atmosférica en algunas imágenes

con la finalidad de eliminar la influencia de la atmósfera en los valores de brillo de los datos geoespaciales.

4.2.1.- IMÁGENES SPOT

El proceso que se aplicó a las imágenes SPOT-4 y 5, permitió restaurarlas y aproximarlas lo mejor posible, a las escenas reales detectadas. Primero se llevó a cabo, una revisión exhaustiva de la información desplegada por banda de cada imagen, checando que el orden de las bandas fuera correcto, en concordancia con el archivo VOL_LIST.PDF, y se compararon los histogramas de las bandas para verificar el orden de éstas. Debido al cuidado previo que se tuvo, se encontró que las bandas 1 y 3 estaban invertidas, por lo que se ordenaron las bandas de todas las imágenes. Una vez revisadas y corregidas las imágenes SPOT, se procedió a implementar dos metodologías para el preprocesamiento, las cuales se ilustran en los diagramas de la Figura 4.2.

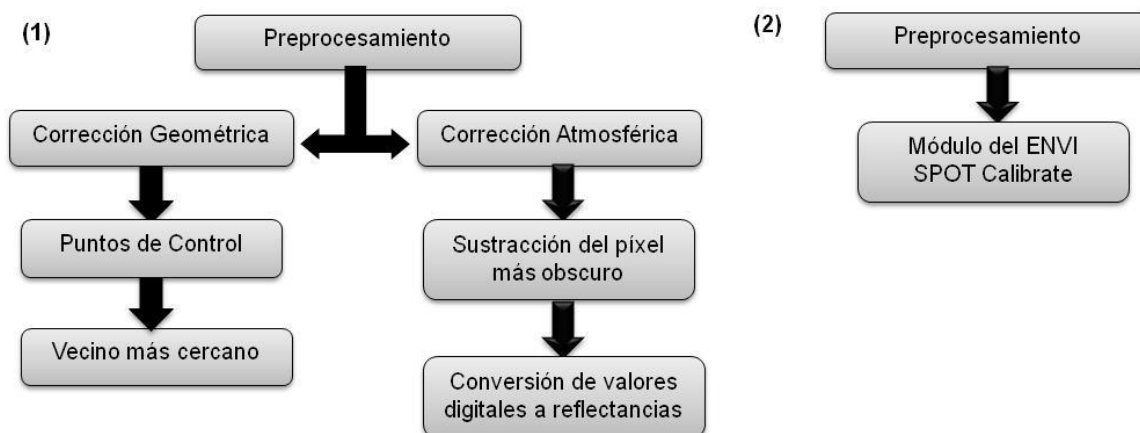


Figura 4.2.- Esquemas de las metodologías probadas para el preprocesamiento.

4.2.1.1 METODOLOGÍA 1

La primera metodología, consiste básicamente en aplicar la corrección geométrica, utilizando puntos de control. Para la transferencia de los niveles digitales originales a la nueva posición, se utilizó el método del vecino más cercano, ya que mantiene la información espectral original. Con respecto a la corrección atmosférica, se

utilizó el método de sustracción del píxel más oscuro. Además se transformaron los valores digitales a valores de reflectancia, ya que se utilizan este tipo de valores en procesos posteriores. Para dicha conversión, se utilizaron los gains y bias de los metadatos propios de cada imagen.

4.2.1.1.1.- CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

Los datos de percepción remota usualmente contienen errores geométricos sistemáticos, derivados de la rotación o curvatura terrestre y de la inclinación de la órbita del satélite, y errores no sistemáticos, que se corrigen a partir de puntos de control. Estos errores pueden ser divididos en dos clases (Campbell, 2011):

- 1.- Usando efemérides de la plataforma y conocimiento de la distorsión del sensor.
- 2.- Otros que no pueden ser corregidos con exactitud sin un número suficiente de puntos de control de tierra (PCT), es decir, puntos en la superficie de la Tierra donde tanto la imagen coordenada como el mapa coordenado puedan ser identificados.

Los datos satelitales de las imágenes SPOT-5 del año 2009 y 2010 fueron corregidos geoméricamente, sin importar si ya contaban con ella, ya que se quería evitar cualquier posible desfase entre las imágenes. Se utilizaron como referencia 30 puntos de control terrestre de un mapa vectorizado de caminos y carretero del INEGI del área de estudio, uniformemente distribuidos en la imagen SPOT.

La transferencia de los niveles digitales originales a la nueva posición, se llevó a cabo utilizando el método de remuestreo del vecino más cercano. Este algoritmo se basa en situar en cada celda de la imagen corregida el nivel digital del píxel más cercano en la imagen original. Es la solución que supone menor transformación de los ND originales. Su principal inconveniente radica en la distorsión que introduce en rasgos lineales y bordes de la imagen, que pueden aparecer como líneas quebradas. Esta desventaja no es conveniente, para un estudio con lagunas pequeñas como el presente.

Las imágenes resultantes después de la corrección geométrica, quedaron con una proyección cartográfica estándar UTM - WGS 84. La calidad de dichas correcciones se basó en el error medio cuadrático (RMS) de ellas, con un valor de 0.6 para la imagen del año 2009 y 0.71 para la del año 2010.

4.2.1.1.2.- CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA

La radiación electromagnética (EMR) captada por los satélites en el espectro solar se modifica por la dispersión y la absorción de gases y aerosoles mientras viaja a través de la atmósfera, desde la superficie de la Tierra hasta el sensor (Chuvieco, 2002).

En muchas aplicaciones que implican clasificación y detección de cambios, la corrección atmosférica no es necesaria, siempre y cuando los datos utilizados estén a la misma escala relativa. En otras circunstancias, las correcciones son obligatorias para poner los datos multitemporales en la misma escala radiométrica, con el fin de supervisar las cubiertas terrestres con el tiempo.

Los procedimientos para llevar a cabo la corrección atmosférica, con precisión, requieren información sobre las condiciones de la atmósfera en el momento de la toma de la imagen que generalmente no suelen estar disponibles. Otro problema adicional consiste en que, los efectos atmosféricos no son constantes en la imagen, sino que algunas zonas pueden haber sido más influenciadas que otras, en función de la presencia de aerosoles o vapor de agua.

Debido a estas razones, Chávez (1996) realizó un método basado en el efecto de cuerpo negro. Este método consiste en asumir que las áreas cubiertas con materiales de fuerte absortividad (agua, zonas de sombra) deberían presentar una radiancia espectral muy cercana a cero. En la práctica, el histograma de los ND de la imagen siempre presenta un mínimo superior a ese valor, que puede ser atribuido al efecto de dispersión atmosférica. Una sencilla aproximación, a la corrección atmosférica generalmente utilizada, consiste en restar a todos los ND, de cada banda, el mínimo de

esa misma banda (k), situando el origen del histograma, en cero, como se muestra en la siguiente expresión:

$$ND'_{i,j,k} = ND_{i,j,k} - ND_{min,k} \quad (4.1)$$

donde $ND_{min,k}$ indica el valor mínimo de cada banda.

4.2.1.1.3.- CONVERSIÓN A REFLECTANCIAS

La conversión de valores de los números digitales (ND) de los datos satelitales a valores de reflectividad, se basan en la información de los metadatos de la imagen satelital y utiliza los coeficientes de calibración estándar (valores de ganancia y sesgo) para realizar los cálculos de los valores de radiancia (L) (ecuación 4.2) y reflectancia aparente (ρ) (ecuación 4.3), respectivamente.

$$L = \frac{X}{A} + B \quad (4.2)$$

Donde, X es el valor radiométrico de la ubicación de un píxel en el archivo raster, A es el valor de ganancia (gain) y B es el sesgo (bias). Después de haber obtenido la radiancia (L) (ec: 4.2) se procede a calcular la reflectancia aparente (ρ) con la expresión 4.3.

$$\rho = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \cos(SZ)} \quad (4.3)$$

Donde d^2 es el cuadrado de la distancia del sol a la tierra en unidades astronómicas (aprox. 1UA). Se calcula con la expresión 4.4, donde JD es el día juliano (el número de día del año), de adquisición de la imagen.

$$d^2 = (1 - 0.01674 \cos(0.9856 (JD - 4)))^2 \quad (4.4)$$

La radiancia espectral de cada banda (L_{λ}) a su longitud de onda λ está en miliwatts sobre centímetros cuadrados por esteroradianes por micrómetros (

$mWcm^{-2}ster^{-1}\mu m^{-1}$). $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia solar media en $mWcm^{-2}\mu m^{-1}$ fuera de la atmósfera para la banda a su longitud de onda y SZ es el ángulo cenital solar en radianes (fórmula 4.5) donde el θ_{ε} es el ángulo de elevación de adquisición de la imagen.

$$SZ = (90 - \theta_{\varepsilon}) \frac{\pi}{180} \quad (4.5)$$

Los datos requeridos para el cálculo la transformación de valores digitales a reflectancias se obtuvieron de los metadatos de cada imagen, en la tabla 4.5 se describe la información.

Tabla 4.5.- Datos requeridos para la transformación de valores digitales a reflectancias de cada imagen, obtenidos de los metadatos.

Sensor	Fecha de la imagen	Gain				Bias	Ángulo de elevación	Azimut
SPOT-4	11-03-2000	1.53203	1.93571	1.39545	5.61670		62.70	134.90
SPOT-5	16-01-2006	2.90321	3.86682	1.73855	10.6947		45.55	145.20
SPOT-5	20-02-2007	3.16239	3.80370	2.41152	10.7412		53.41	136.66
SPOT-5	20-02-2007		3.396503				53.40	136.65
SPOT-5	26-12-2009	2.02729	3.78720	2.34087	10.5646		45.41	151.86
SPOT-5	26-12-2009		3.285604				45.40	151.85
SPOT-5	15-12-2010	1.99925	3.76825	2.33427	13.6880		45.68	151.51
SPOT-5	15-12-2010		3.236282				45.67	151.50
SPOT-5	09-01-2012	1.97121	3.74929	1.68751	10.5123		44.53	145.94
SPOT-5	09-01-2012		3.194548				44.52	145.92

Finalmente, todas las imágenes fueron corregidas y obtenidos sus valores de reflectancias. Sin embargo el tiempo invertido para cada una de ellas fue de aproximadamente un mes, debido a la cantidad de operaciones y cuidados, que se tienen al ir haciendo paso por paso, además se tiene una pérdida de información cada que se realizaba un proceso, pues existe un remuestre, o por cada uno de ellos.

4.2.1.2.- METODOLOGÍA 2

La segunda metodología consistió en la descarga de la herramienta `calbrate.sav` del sitio web EXELIS Visual Information Solutions (<http://www.exelisvis.com/Default.aspx?tabid=1540&id=1143>), dedicado al desarrollo de análisis de imágenes y software. La herramienta `calbrate.sav` se adecuó al software ENVI v4.8, situando el archivo en la carpeta donde se encuentra instalado dicho programa, siendo la ruta de instalación `C:\Program Files (x86)\ITT\IDL71\products\envi48\save_add`. Después de agregar el módulo de `calbrate.sav`, se pudo utilizar dentro de las herramientas de ENVI v4.8 como CALIBRATE SPOT.

La corrección geométrica y conversión de los valores digitales de cada píxel de las imágenes a reflectancias, se llevó a cabo con la implementación del módulo CALIBRATE SPOT, el cual trabaja directamente con el archivo de los metadatos propio de la imagen (`METADATA.DIM`), obteniendo como resultado datos satelitales corregidos geométricamente, y valores de los números digitales en reflectancias. Este proceso hizo una geocodificación basada en los metadatos, siendo equivalente a la corrección geométrica de la metodología uno. Además realizó el cálculo de las fórmulas de conversión de los ND's a reflectancias de la metodología anterior, cabe mencionar que el tiempo que se llevó correr este proceso fue de aproximadamente, cinco minutos por imagen.

En esta segunda metodología no se llevó a cabo la corrección atmosférica, debido al cuidado que se tuvo para elegir las imágenes y principalmente para evitar la pérdida de información, debido al remuestreo de los datos por cada proceso que se realiza.

La metodología elegida para desarrollar en el preprocesamiento de las imágenes SPOT, tomó en cuenta básicamente dos cosas; el tiempo que se llevaría el procesamiento de cada imagen y la aplicación del menor número de procesos, ya que

por cada uno, existe un remuestreo y por tanto pérdida de información. Para esto, se probaron las dos metodologías, anteriormente mencionadas, decidiendo utilizar la metodología 2.

4.2.2.- IMÁGEN WORLDVIEW-2

La metodología desarrollada en la imagen WorldView-2 se ilustra en la Figura 4.3. Consiste de dos pasos, la corrección geométrica y la implementación del módulo ATCOR 2.

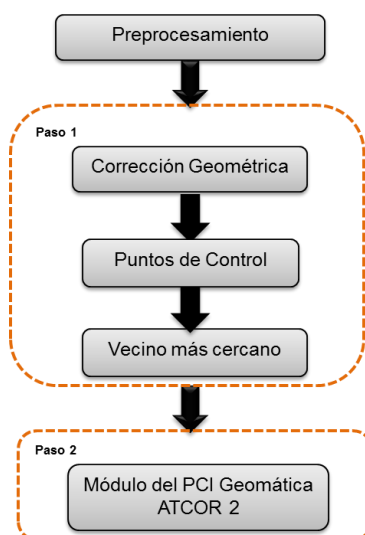


Figura 4.3.- Esquema de la metodología para el preprocesamiento de la imagen WorldView-2.

4.2.2.1.- CORRECCIÓN GEOMÉTRICA

La corrección geométrica que realizada a la imagen Worldview-2 utilizó como referencia puntos de control de la imagen SPOT-5, del año 2012 previamente corregida. También uso el método de remuestreo del vecino más cercano para colocar en su nueva posición a los ND's originales. El RMS de dicha corrección fue de 0.48.

4.2.2.2.- CORRECCIÓN ATMOSFÉRICA Y CONVERSIÓN DE ND's A REFLECTANCIAS

El proceso aplicado a la imagen WorldView-2, se llevó a cabo utilizando el módulo ATCOR 2, implementado en el software PCI Geomática, v10. Esta herramienta incluye la transformación de valores de los ND's a reflectancias con corrección atmosférica, creado por el Dr. Richter de German Aerospace Center – DLR. Se basa en una serie de datos atmosféricos estándar que se adaptan a los parámetros de la imagen en cuestión, como son el espesor atmosférico, los coeficientes de calibración estándar, para el tipo de sensor, así como el efecto de adyacencia producido a consecuencia de la dispersión procedente de cubiertas vecinas.

ATCOR 2 convierte los valores de intensidad (número digital (ND)) de cada píxel a valores de reflectancia. El programa calcula la radiancia ($\text{mW}/\text{cm}^2 \text{sr } \mu\text{m}$), a partir de los valores digitales de cada píxel, sobre la base de factores de calibración de cada sensor (valores de ganancia y sesgo) existentes en los metadatos de cada imagen. A partir de los valores de radiancia, el programa calcula los valores de reflectancia (relación entre el flujo reflejado por el píxel y flujo incidente, sobre el mismo), descontando el efecto de la radiancia refractada por la atmósfera y captada por el sensor y la radiación reflejada por áreas contiguas (efecto de adyacencia) (Lencinas y Mohr-Bell, 2007).

Los parámetros de calibración requeridos por ATCOR 2, de la imagen Worldview-2 del año 2011, se obtuvieron de los metadatos y se capturaron en un archivo de extensión .cal que se localiza en C:\PCIGeomatics\Geomatica2010\atcor\cal\worldview2, para después ser utilizados por ATCOR 2 (Tabla 4.6).

Tabla 4.6.- Parámetros de calibración de la imagen Worldview-2 del año 2011 obtenidos de sus respectivos metadatos.

Valor de calibración
0.009295654
0.01260825
0.009713071
0.005101088
0.01103623
0.00453961
0.0122438
0.009042234

Dado que el resultado de la corrección atmosférica está escalado a una imagen de reflectividad con el rango de 0 – 255, para datos de 8 bits, fue necesario dividir los valores de reflectividad entre 4 para obtener los datos en porcentaje (Manual de uso del paquete PCI Geomática, V10).

4.3.- PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Actualmente las investigaciones realizadas, en el campo, de la detección de cambios, con imágenes de satélite emplean una amplia gama de metodologías, para la identificación de cambios ambientales. Los procedimientos para la detección de cambios se pueden agrupar en tres grupos.

Caracterizados por la forma de transformar los datos y las técnicas de análisis utilizadas, para delimitar las zonas de cambios significativas se pueden agrupar de la siguiente manera (Mas, 1999):

- (1) mejoramiento de la imagen.
- (2) clasificación de datos de múltiples fechas.
- (3) comparación de dos clasificaciones independientes de la cubierta terrestre.

El enfoque del mejoramiento de la imagen consiste en la combinación matemática de imágenes, de diferentes fechas, la sustracción de bandas, regresión de la imagen o análisis de componentes principales (PCA). Los umbrales aplicados al mejoramiento de la imagen permiten aislar los píxeles que han cambiado. La clasificación directa de múltiples fechas, está basada en el análisis independiente de un conjunto combinado de datos de dos o más fechas, con el fin de identificar áreas de cambio. La comparación post-clasificación, es un análisis comparativo de las imágenes obtenidas en diferentes tiempos después de una previa clasificación independiente.

Las imágenes corregidas, en el pre-procesamiento, están listas para aplicarles técnicas específicas de análisis, con el fin de resaltar detalles y poder detectar cambios temporales en las imágenes. En el presente estudio, se probaron, analizaron y seleccionaron dos metodologías, para hacer el análisis de detección de cambios por diferencias (Segmentación por el Método de Umbral y Clasificación No Supervisada y Supervisada).

4.3.1.- TÉCNICAS DE FUSIÓN PARA REALCE ESPACIAL EN IMÁGENES SATELITALES

Para entender mejor los procesos que afectan al planeta, resulta de gran interés realizar estudios de percepción remota, a distintas escalas y niveles de detalle. Gracias a las diferentes resoluciones, actualmente disponibles, podemos procesar y analizar imágenes de satélite, en un rango muy amplio de escalas.

En este contexto, la fusión de imágenes multiespectrales (MS) y pancromáticas (PAN), con características espectrales y espaciales, es una técnica prometedora para obtener imágenes, con alta resolución espacial y espectral, simultáneamente.

Los métodos de fusión más populares son el **IHS** (por sus siglas en inglés **I**ntensity, **H**ue, **S**aturation), basado en intensidad, matiz y saturación del color, y el análisis de componentes principales (**PCA**). El principal inconveniente de estos métodos,

frecuentemente llamados métodos de “sustitución de componentes”, es la alta distorsión de la información espectral original, presente en las imágenes multispectrales resultantes (González-Audicana et al., 2004). Por esta razón, se han realizado mejoras a los algoritmos antes mencionados, que emplean la transformada discreta de ondeleta y algunas variantes como la transformada de ondeleta “Mallat” y la transformada de ondeleta “à trous”, utilizadas para lograr la extracción y la incorporación del detalle espacial (González-Audicana et al., 2004).

Como se mencionó anteriormente, el interés principal del presente estudio son cuerpos lagunares de pequeña escala y aprovechar al máximo la información espacial de las imágenes. Por esta razón se decidió llevar a cabo la fusión de las imágenes MS con sus respectivas PAN para lograr aumentar la resolución espacial. El método de ondeleta con componentes principales (Wavelet-PC) basado en el algoritmo de “à trous” se aplicó en esta investigación (González-Audicana et al., 2004). Es un algoritmo de cambio invariante en el tiempo, diádico, simétrico, no ortogonal, no decimado, redundante de la Transformada Discreta de Ondeleta (DWT).

4.3.1.1.- FUSIÓN PCA

La técnica de fusión con análisis de componentes principales, recoge y reorganiza la mayoría de la información original, sintetizando las bandas originales y creando otras nuevas. En general, la primer componente (PC1) reúne la información espacial, común en todas las bandas, utilizadas como datos de entrada en el PCA, mientras que la información espectral específica para cada banda es organizada, en las otras componentes principales. Esto hace que el análisis de componentes principales (PCA) sea la técnica más utilizada cuando se fusionan las imágenes MS y PAN (González-Audicana et al., 2004).

El método estándar de PCA, es un proceso de fusión de imágenes que puede ser utilizado siempre y cuando, la imagen PAN esté altamente correlacionada con la componente PC1 de la imagen MS. Esta correlación consiste en que ambas imágenes

PAN y MS sean tomadas en la misma fecha y que el ancho de banda de la imagen PAN cubra todo el rango de ancho de banda, de todas las bandas originales MS. Si alguna de las condiciones anteriores no se cumple, la imagen fusionada puede resultar de baja calidad. A pesar de esto, las imágenes fusionadas con este método tienden a presentar mayor detalle espacial, debido a que cuando la transformada de PCA es aplicada, la información espectral y espacial de la imagen MS, no es separada completamente (González-Audicana et al., 2004).

Sin embargo, la calidad espectral y espacial de las imágenes fusionadas podría mejorar sustancialmente, si en lugar de reemplazar la componente PC1 por la imagen PAN, como se realiza en el método estándar de PCA, se incorporara, solamente, el detalle espacial, de la imagen PAN perdido, en la MS. Esta es la idea central de la Fusión wavelet - PC (González-Audicana et al., 2004).

Basado en la descomposición multiresolución de la transformada de ondeleta “de modo no decimado”, la información detallada de las características espaciales de la imagen PAN, es extraída utilizando el algoritmo de “à trous” (González-Audicana et al., 2004).

4.3.1.2.- ALGORITMO À TROUS

Rajendran et al. (2012) y González-Audicana et al. (2005) mencionan que el algoritmo “à trous” es no decimado, diádico y redundante de la transformada discreta de ondeleta. Este algoritmo está basado con un esquema multiresolución de paralelepípedo. La base del paralelepípedo es la imagen original (A_2^j), con una resolución 2^j , con C columnas y R renglones. Cada nivel del paralelepípedo representa una aproximación a la imagen original. Al ir incrementando el nivel de resolución, las aproximaciones sucesivas de imágenes tienen una resolución espacial más burda, pero con el mismo número de píxeles, que la imagen original (Figura 4.4). Si se aplica un enfoque de descomposición diádico, el nivel de resolución de la imagen resultante en la aproximación enésima a la imagen original, es de 2^{j-N} .

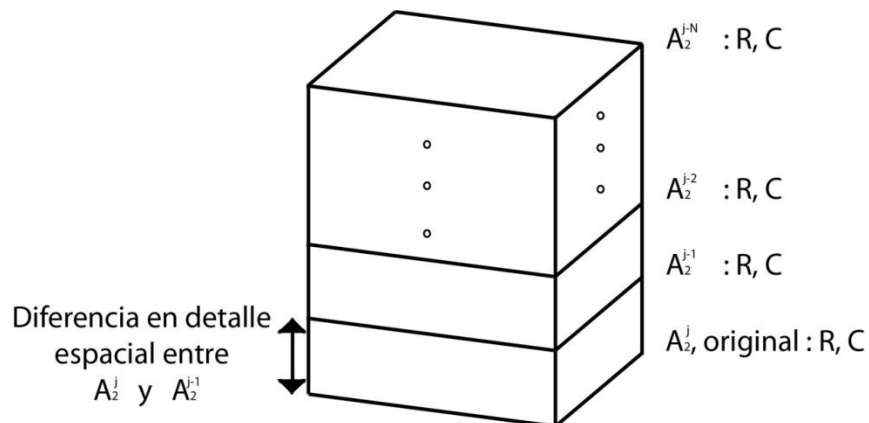


Figura 4.4.- Representación del paralelepípedo del algoritmo de descomposición multiresolución de la transformada discreta de ondeleta “à trous”. (Tomado de González-Audicana et al., 2005).

Las imágenes generadas en cada nivel de aproximación a la imagen original, se calculan utilizando funciones de escala. El detalle espacial que se pierde entre las imágenes A_2^{j-1} y A_2^j se almacena en sólo una imagen del coeficiente de ondeleta (w_2^{j-1}), frecuentemente llamado plano de ondeleta. Se calcula como la diferencia entre las imágenes A_2^{j-1} y A_2^j . Finalmente, cuando se aplica la transformada inversa, se puede reconstruir exactamente la imagen original A_2^j , sumando la imagen resultante en el nivel de aproximación a la imagen original, A_2^{j-1} y el plano de ondeleta w_2^{j-1} .

El algoritmo “à trous” realiza un cambio invariante en el tiempo de descomposición discreta de la transformada de ondeleta. Todas las imágenes obtenidas en el proceso de aproximación mediante la aplicación de esta descomposición, tienen mismo número de columnas y filas que la imagen original, dado que “à trous” es un algoritmo, no ortogonal, de la transformada, redundante, sobremuestreada.

González-Audicana et al. (2005) mencionan que la implementación de este algoritmo “à trous” desarrolla un proceso de convolución sucesiva, con un filtro

bidimensional asociado a una función de escala. Esta función utiliza filtro pasa bajos B_3 cubic spline (Nuñez et al., 1999) y es el utilizado en el presente trabajo de investigación:

$$F_0 = \frac{1}{256} \begin{pmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

A partir de la matriz original, se incorporan ceros entre pares de coeficientes del filtro. Este procedimiento ocasiona un suavizado de la imagen original y la obtención de aproximaciones de la imagen más burdas, hasta conseguir la resolución de nivel deseada:

$$F_0^* = \begin{pmatrix} \frac{1}{256} & 0 & \frac{1}{64} & 0 & \frac{3}{128} & 0 & \frac{1}{64} & 0 & \frac{1}{256} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{64} & 0 & \frac{1}{16} & 0 & \frac{3}{32} & 0 & \frac{1}{16} & 0 & \frac{1}{64} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 3 & 0 & 9 & 0 & 3 & 0 & 3 \\ \frac{1}{128} & 0 & \frac{1}{32} & 0 & \frac{3}{64} & 0 & \frac{1}{32} & 0 & \frac{1}{128} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{64} & 0 & \frac{1}{16} & 0 & \frac{3}{32} & 0 & \frac{1}{16} & 0 & \frac{1}{64} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{256} & 0 & \frac{1}{64} & 0 & \frac{3}{128} & 0 & \frac{1}{64} & 0 & \frac{1}{256} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

Como se ha mencionado anteriormente, el algoritmo “à trous”, está basado en la transformada discreta de ondeleta (DWT). Algunos métodos de fusión de imágenes que la emplean son: el método aditivo de ondeleta, el método Aditivo de Intensidad de ondeleta y el método Aditivo de Componentes Principales de ondeleta (González-Audicana et al., 2005).

Particularmente, el método aditivo de ondeleta (AW) es usado por el algoritmo “à trous”, y las transformaciones discretas de ondeleta son empleadas para extraer el

detalle espacial de la imagen pancromática, que se ha perdido en la imagen multiespectral, para después incorporarlo en cada banda de la imagen MS.

4.3.1.3.- FUSIÓN WAVELET-PC USANDO EL ALGORITMO “À TROUS”

Existen algunas paqueterías, como el software ERDAS v13, tiene un módulo que permite realizar la fusión utilizando el algoritmo de “à trous”. Esta herramienta se probó, sin embargo no dio los resultados adecuados para los propósitos de este trabajo que requería resaltar los bordes de las lagunas para su posterior extracción y que además distorsionaba los colores de la imagen. Debido a esta razón, se prefirió implementar la metodología, en el mismo software, pero realizando cada paso de los procesos de remuestreo, aplicación de componentes principales PCA, la igualación del histograma, convolución con el filtro de “à trous” y la transformada inversa de PCA. La metodología empleada, en el presente trabajo se basa en el procedimiento descrito por González-Audicana et al. (2004).

La Figura 4.7 muestra un esquema diseñado para mostrar las operaciones que realiza el procedimiento de fusión utilizando análisis de componentes principales (PCA) y el algoritmo “à trous”. Este diagrama fue modificado y esta es la propuesta para realizar la fusión de González-Audicana et al. (2004):

1. A partir de las imágenes PAN y MS, se debe remuestrear la MS hasta igualar el tamaño de píxel, al de la PAN, con el fin de obtener imágenes, que sean perfectamente superpuestas.
2. Obtener las componentes principales, aplicando la transformada de PCA a la imagen MS, e identificar la primer componente principal (PC1).
3. Generar de la imagen PAN una nueva imagen (PAN_{nueva}) cuyo histograma se hará coincidir con el de la imagen PC1.

4. Aplicar el proceso de descomposición de la transformada de ondeleta no decimado (“à trous”) con el filtro B_3 cubic spline (4.6) a la imagen PAN generada en el paso anterior (PAN_{nueva}) y a la imagen resultante volver a aplicar el mismo proceso pero con el filtro al que se le incorporaron ceros (4.7). La Figura 4.5 muestra una imagen de los resultados de aplicar el filtro B_3 cubic spline. La imagen de la izquierda es la PAN_{nueva} , la del centro es el resultado de aplicar el filtro paso bajo y la de la derecha es la de aplicar nuevamente el filtro pasa bajo pero con los ceros intercalados.

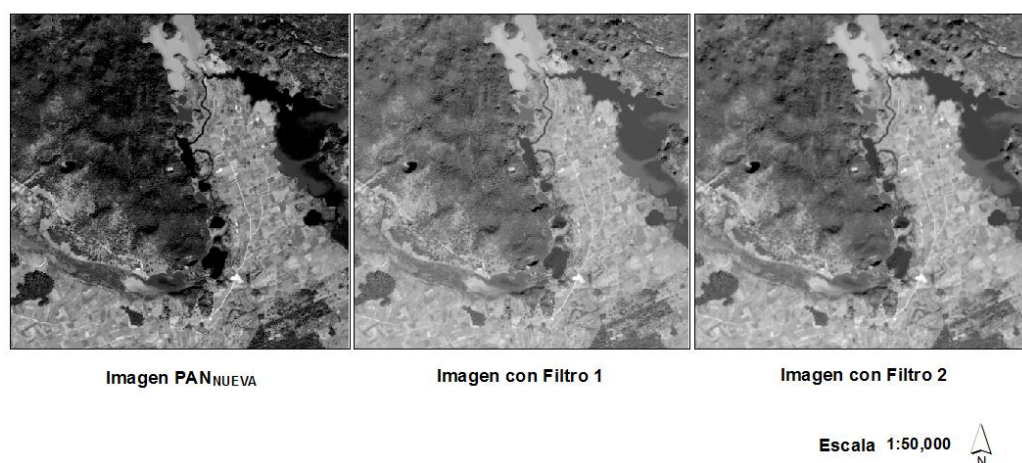


Figura 4.5.- Imágenes resultantes de aplicar el filtro “à trous” a la imagen PAN_{nueva} .

5. Las dos imágenes de aproximación obtenidas, representan una versión de baja frecuencia de la imagen PAN. Posteriormente, se realiza la diferencia entre la PAN_{nueva} y la primera imagen de aproximación ($W1$), $W2$ muestra la diferencia entre las dos imágenes de aproximación como lo muestra la Figura 4.6:

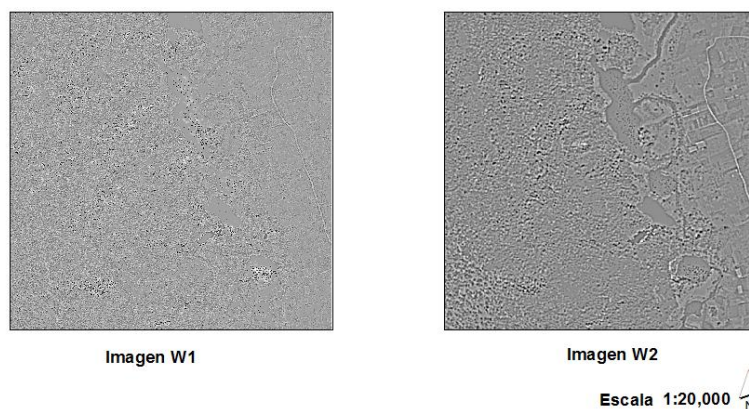


Figura 4.6.- Imagen $W1$ y $W2$ obtenidas con la diferencia de la PAN_{nueva} y las imágenes de aproximación.

6. Una vez, incorporadas las diferencias obtenidas a partir de los filtros al PC1. Se genera un archivo con el PC1 con la intersección de los detalles y las demás componentes PC2, PC3 y PC4.
7. Finalmente, se realiza la transformada inversa de componentes principales (PCA).

El proceso resultante es una imagen sintética combinada de alta resolución espacial, que mantiene la información espectral de la imagen MS original.

Las imágenes, SPOT-5, que se procesaron a través del método de fusión Wavelet-PC utilizando el algoritmo de "à trous", fueron multiespectrales y pancromáticas con resolución espacial de 10m y 2.5m, respectivamente. Este procedimiento permitió aumentar el detalle espacial de las imágenes MS, en este trabajo. Aunque no se evaluó cuantitativamente la información espectral final se hizo una interpretación y análisis visual. El procesamiento de fusión se le aplicó, únicamente, en los años 2007, 2009, 2010 y 2012 a las imágenes SPOT-5, ya que éstas presentaban, tanto la información MS como la PAN.

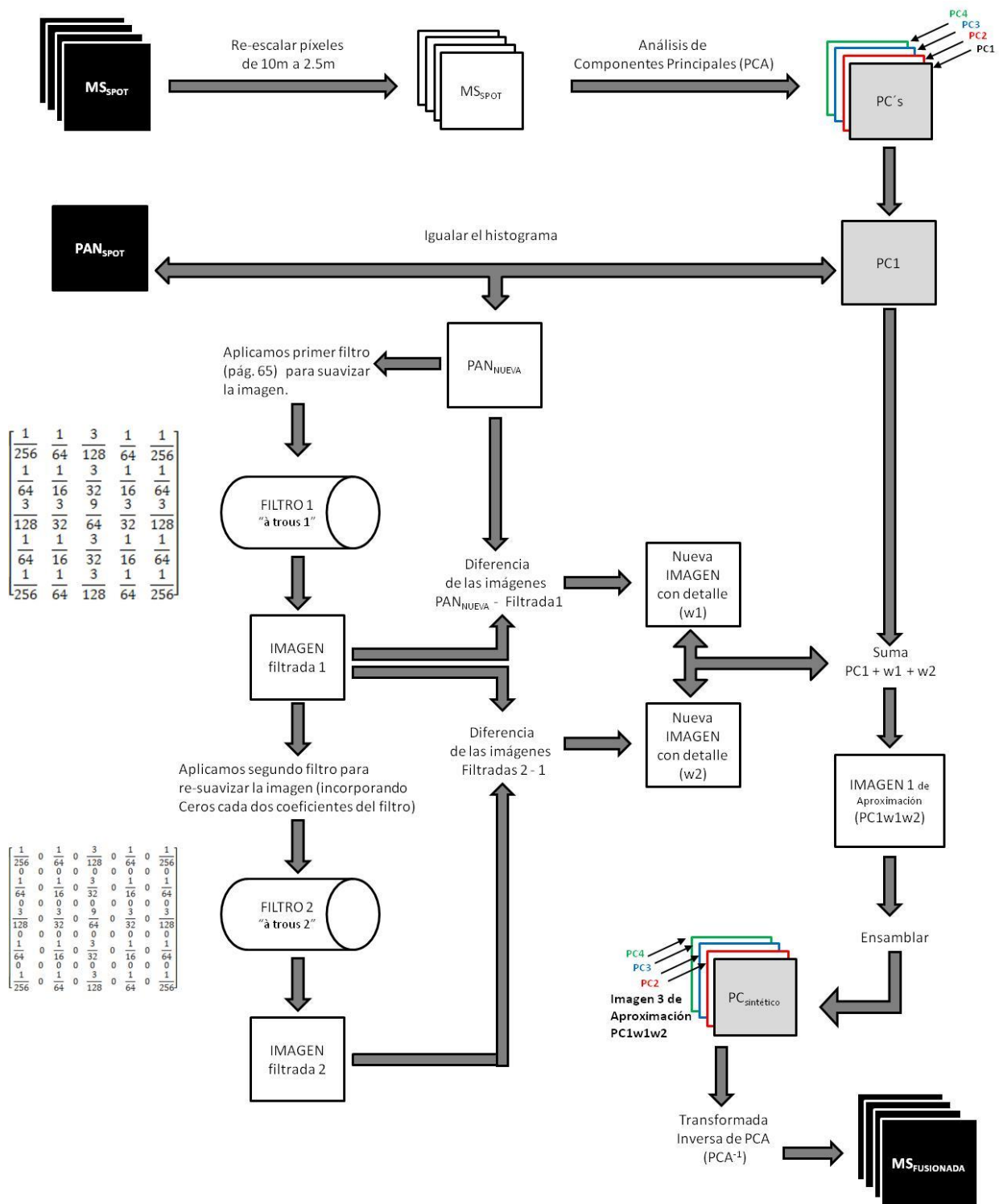


Figura 4.7.- Método de fusión PCA "mejorado" de la transformada de ondeleta "à trous". (Basado y modificado de González-Audicana et al. 2004).

4.3.2.- TÉCNICAS DE EXTRACCIÓN DE INFORMACIÓN TEMÁTICA

Después de haber realizado el preprocesamiento a las imágenes, con el fin de resaltar información temática de interés, se aplicaron varias técnicas que permiten realzar dicha información, el índice diferencial de agua normalizado y las clasificaciones no supervisada y supervisada.

4.3.2.1.- ÍNDICE DIFERENCIAL DE AGUA NORMALIZADO (NDWI)

Antes de usar el NDWI se necesitan entender y resolver dos problemas. El primero, a partir de su comportamiento espectral se selecciona la banda o combinación de bandas como mejor indicador de las características del agua y en segundo, se debe considerar que el umbral de NDWI no tiene un valor constante, es un valor dinámico que cambia dependiendo de los componentes del subpixel, de la cubierta terrestre. Esta técnica es explicada con mayor detalle en el Subcapítulo 2.5.2 ÍNDICE NORMALIZADO DEL AGUA.

En esta tesis se utilizó la expresión 2.4 del Capítulo 2 MARCO TEÓRICO para calcular el NDWI de las imágenes SPOT-4 y 5, donde las bandas de dichos sensores que corresponden a las utilizadas por la ecuación se describen en la siguiente tabla:

Tabla 4.7.- Rangos espectrales de las imágenes SPOT-4 y 5 equivalentes a las bandas utilizadas en el NDWI.

Banda NDWI	Banda SPOT-4 y 5	Rango espectral correspondiente al sensor
ρ_{verde}	Banda 1	500 – 590 nm
ρ_{SWIR}	Banda 4	1580 – 1750 nm

La expresión 2.5 del Capítulo 2 MARCO TEÓRICO se utilizó para calcular el NDWI de la imagen WorldView-2 del año 2011, la tabla siguiente describe las bandas que se usaron:

Tabla 4.8.- Rangos espectrales de la imagen Worldview-2 equivalentes a las bandas utilizadas en el NDWI.

Banda WorldView-2	Rango espectral correspondiente al senso
Banda 3 (verde)	510 – 580 nm
Banda 8 (NIR ₂)	860 – 1040 nm

A las imágenes SPOT-4 y SPOT-5 se aplicó la ecuación (2.4) propuesta por Xu (2006), correspondiente a la división de la banda 1 menos la banda 4, entre la banda 1 más la banda 4. Para la Worldview-2, se utilizó la ecuación (2.5) que divide, la diferencia de la banda 3 con la banda 8, entre la suma de la banda 3 y la banda 8, para resaltar los cuerpos de agua, permitiendo una mejor caracterización de éstos.

Finalmente se obtuvieron 7 imágenes diferentes de los NDWIs correspondientes a cada año estudiado en el presente trabajo, para posteriormente proceder a la realización de las máscaras con la extracción del área cubierta de agua, y analizar cuantitativamente los cambios en la extensión superficial de las lagunas.

4.3.2.2.- CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA Y SUPERVISADA

La clasificación no supervisada es un método utilizado para definir diferentes clases temáticas presentes en la imagen. No implica ningún conocimiento del área de estudio, por lo que la intervención humana se centra más en la interpretación de los resultados. Asume que los ND de la imagen forman una serie de agrupaciones o conglomerados (clusters), más o menos nítidos según el caso. Estos grupos equivaldrían a píxeles que presentan un comportamiento espectral homogéneo y, por tanto, deberían definir clases temáticas de interés (Chuvieco, 2002).

La clasificación no supervisa es más automatizada y permite especificar información de entrada que sea usada como guía para identificar parámetros estadísticos

en los datos. Requiere interpretar las clases que sean creadas por el algoritmo. El entrenamiento no supervisado también denominado “aglomeración” (clustering), porque está basado en agrupaciones naturales de píxeles en los datos de la imagen. De acuerdo con los parámetros especificados, estos grupos pueden unirse, desagregarse, ser manipulados o usados como base, para una firma.

Los clúster son definidos con un algoritmo que a menudo usa todos o muchos de los píxeles de un archivo de datos de entrada, para su análisis. Este método no considera la contigüidad de los píxeles que definen cada conglomerado. El algoritmo que se utiliza es uno de los más conocidos, el ISODATA (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique), el cual es un método de clustering que usa las distancias espectrales, pero que interactivamente clasifica los píxeles, redefine el criterio para cada clase y clasifica nuevamente, hasta que los patrones de distancia espectral de los datos emergen, gradualmente (Mas, 1999).

Dado que existe poca información disponible en la zona de estudio y la problemática presente es multifactorial, se realizó una clasificación no supervisada. A partir de los datos de las imágenes, que se tienen del proyecto, para tener una idea de la distribución de las coberturas y usos de suelo de la zona. Después se consideraron sólo dos clases (agua y no agua), obteniendo como resultado mapas temáticos de estas dos clases.

Una vez obtenida la clasificación del método no supervisado, se procedió a realizar la clasificación supervisada, con la escasa información que se tiene, debido a la facilidad aparente para identificar entre las coberturas de agua y sin agua, y así comparar los métodos entre sí.

La clasificación supervisada parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio y asume que se han identificado los diferentes tipos de cobertura del área, uso de suelo y/o clase, a través del trabajo de campo, análisis de imágenes aéreas o satelitales, mapas y/o experiencia personal. Esta mayor familiaridad con el área de

interés permite al intérprete delimitar sobre la imagen áreas suficientemente representativas de cada una de las categorías o clases. Estas áreas seleccionadas, sirven como áreas de entrenamiento (también conocidas como polígonos de entrenamiento) para el algoritmo de clasificación, ya que contienen las características espectrales de interés. Para cada sitio de entrenamiento, el algoritmo calcula los parámetros estadísticos multivariados (media, desviación estándar, matriz de covarianza, matriz de correlación, etc.), y se evalúa cada píxel, que no forme parte de los polígonos de entrenamiento, para asignarlo a la clase a la que tenga la mayor probabilidad de pertenencia (Jensen, 1996). En el presente trabajo, el algoritmo que se utilizó para la clasificación supervisada fue el de máxima verosimilitud. Este método establece un criterio de decisión en la probabilidad, de que cada píxel pertenezca a una clase en particular. Además de que dicha probabilidad sea igual para todas las clases y que las bandas de entrada de la imagen, a clasificar, tengan una distribución normal.

A partir de las respuestas espectrales teóricas de los diferentes materiales de estudio, se llevó a cabo una clasificación supervisada con el objetivo de obtener como resultado mapas temáticos de dos clases, que permitan distinguir la cobertura de lo que es y no es agua, para posteriormente cuantificar diferencias, en la superficie lacustre de Montebello, Chiapas.

4.3.3.- TÉCNICAS PARA LA DETECCIÓN DE CAMBIOS MORFOLÓGICOS TEMPORALES

La detección de cambios es un proceso que permite identificar las diferencias del estado de un objeto o fenómeno, mediante su observación en diferentes momentos (Singh, 1989). La detección de cambios puntual y exacta de características de la superficie del terreno es la base para entender las relaciones e interacciones entre los fenómenos antropogénicos y naturales, para mejorar la gestión y el uso de los recursos. En general, la detección de cambios consiste en el análisis de múltiples conjuntos de datos temporales para estimar cuantitativamente los efectos de un fenómeno, en el tiempo.

MacLeod and Congalton (1998) describen cuatro aspectos importantes de la detección de cambios en los recursos naturales:

1. Detectar si ha ocurrido un cambio.
2. Identificar el tipo de cambio.
3. Medir la extensión superficial del cambio.
4. Evaluar el patrón espacial del cambio.

Los estudios de detección de cambios pueden aplicarse a una gran variedad de disciplinas. Tienen por objeto analizar qué rasgos presentes en un determinado territorio, se han modificado en diferentes tiempos.

Debido a la importancia de conocer cambios de características en la superficie del terreno, la investigación de las técnicas de detección de cambios, es un tema activo, y se han desarrollado nuevas técnicas (Singh 1989, Mouat et al. 1993, Deer 1995, Coppin y Bauer 1996, Jensen 1996, Jensen et al. 1997, Yuan et al. 1998, Serpico y Bruzzone 1999). En la práctica, no es fácil seleccionar el algoritmo adecuado para un proyecto de detección de cambios específicos, sin embargo, la identificación de una técnica adecuada se convierte de gran importancia en la producción de resultados de buena calidad (Lu et al., 2004).

Dado que el objetivo fundamental de este trabajo es identificar a nivel regional los cambios temporales entre diferentes imágenes, se tomó la decisión de generar máscaras mediante la extracción exclusiva de la cobertura de agua en el sistema lacustre de Montebello, a partir de diferentes metodologías de extracción temática. Las máscaras de los NDWI's se realizaron únicamente con la extracción de píxeles con valor entre 0 y 1, ya que son los que corresponden, a la cobertura de agua. Para las clasificaciones no supervisada y supervisada se utilizó la clase perteneciente a la cobertura de agua, con el objetivo de obtener exclusivamente los polígonos correspondientes a los cuerpos de agua, del Parque de Montebello.

4.3.3.1.- DIFERENCIA DEL ÍNDICE DEL AGUA

El índice diferencial de agua normalizado (NDWI) ha sido utilizado con éxito para delinear características de la superficie del agua. En este proyecto se utilizaron las ecuaciones 2.4 y 2.5, propuestas por Xu(2006) y por Zhou et al. (2012), para las imágenes SPOT y Worldview respectivamente, y se calcularon los NDWI's, con el fin de compararlos.

Este método es relativamente simple, y fácil de implementar e interpretar, pero no puede generar una matriz completa de información de cambios. Además, tiene un aspecto fundamental a considerar, que es la selección de umbrales adecuados para identificar las áreas modificadas, en los resultados de detección de cambios (Lu et al., 2004).

En este estudio, se procedió a calcular la superficie de agua de cada máscara y se realizó la diferencia entre las áreas de las máscaras para diferentes fechas, para estimar de manera cuantitativa los cambios que se visualizaron en el paso anterior. De esta manera, se identificó la ganancia o pérdida de extensión de la zona lagunar entre los años estudiados.

El ejercicio anteriormente mencionado, se realizó con ayuda del paquete de información geográfica (ArcGIS), comparando las seis máscaras obtenidas de los NDWI's. De esta manera, se pudieron identificar áreas que han sufrido variaciones temporales. Este proceso se realizó para todas las máscaras obtenidas de las imágenes SPOT, haciendo cinco comparaciones diferentes que comprenden del 2000-2006, 2006-2007, 2007-2009, 2009-2010 y de 2010-2012.

4.3.3.2.- ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE IMÁGENES CLASIFICADAS

La detección de cambios puede también realizarse empleando las técnicas de extracción de información temática de clasificación, antes comentadas. En este caso, el

proceso de clasificación lleva consigo discretizar la escala continua de las imágenes originales, por tanto comparaciones multitemporales, se realizan entre categorías.

La detección de cambios a partir de técnicas de clasificación puede llevarse a cabo, de dos maneras:

1. Mediante la comparación de imágenes previamente clasificadas (Comparación del análisis post-clasificación) y
2. Clasificar conjuntamente las imágenes de las dos fechas (clasificación directa multitemporal).

El método de detección de cambios, basado en técnicas de clasificación da lugar a un análisis más detallado en el intervalo de tiempo $[T_0 \rightarrow T_f]$. Es una técnica adecuada para aplicarse cuando están disponibles suficientes datos de áreas de entrenamiento. La clasificación facilita la identificación de áreas de cambios verdaderos, respecto a las áreas de cambio detectadas, ya que estas técnicas no están basadas en la determinación de umbrales (Lu et al., 2004).

4.3.3.2.1.- COMPARACIÓN DEL ANÁLISIS POST-CLASIFICACIÓN

El método de comparación del análisis post-clasificación es el más simple en detección de cambios. Requiere realizar la comparación de imágenes clasificadas que fueron independientemente elaboradas (Singh, 1989). En este contexto, hay que señalar que el mapa de cambios de las dos imágenes será tan preciso como el producto de las precisiones individuales de cada clasificación (Stow et al., 1980). Además la agrupación selectiva de los resultados de clasificación, permite observar cualquier subconjunto de los cambios que puedan ser de mayor interés.

Una vez obtenidas las máscaras de la clasificación supervisada, se procedió de la misma forma que en la clasificación directa multitemporal. Se compararon las máscaras para identificar cambios cualitativos y se calcularon las áreas de las coberturas

de agua, para estimar de forma cuantitativa las variaciones presentadas en los diferentes años. Cabe remarcar, que la diferencia de este método con el anterior, es que el primero trabaja con clasificación no supervisada y este último, con clasificación supervisada.

4.3.3.3.- EVALUCIÓN DE LA EXACTITUD

Dado que la detección de cambio digital se ve afectada por limitaciones espaciales, espectrales, temática y temporal, y porque existen muchas técnicas de detección de cambios, la selección de un método o algoritmo adecuado para un determinado proyecto de investigación es importante, pero no es fácil. En la práctica, con frecuencia diferentes técnicas son utilizadas para implementarlas en la detección de cambios, y sus resultados se comparan para identificar el mejor resultado a través de una evaluación visual o cuantitativa, de la exactitud.

Es muy importante evaluar la exactitud de los resultados que se obtienen a partir de los métodos empleados para la detección de cambios, pues la comprensión y desarrollo de estos resultados, se emplean para la toma de decisiones. Los elementos más comunes de exactitud evaluados son la exactitud general, del productor, del usuario y el coeficiente Kappa. La evaluación de la exactitud para la detección de cambios, es particularmente difícil debido a los problemas existentes en la recolección de conjuntos de datos temporales confiables sobre el terreno. Por esta razón, muchas investigaciones previas en la detección de cambios no suelen llegar a proporcionar un análisis cuantitativo de los resultados de la investigación. La matriz de error es el método más común, para la evaluación de la exactitud (Congalton y Plourde, 2002).

En este trabajo se llevó a cabo una matriz de error para evaluar los cambios detectados Sin embargo los puntos de control fueron seleccionados de manera visual, a partir de una imagen de satelital SPOT-5, por lo que el resultado es cuestionable, ya que no fue aleatorio. Lo ideal, hubiera sido salir a campo y tomar los puntos muestra para tener un resultado confiable.

4.4.- PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DE PRECIPITACIÓN

La base de datos de precipitación de la estación meteorológica ubicada en el municipio de Comitán de Domínguez se revisó que estuviera completa, y donde se encontraba que faltaba información se procedió a interpolar, utilizando los promedios de las precipitaciones de todo el periodo existente en la base de datos por día, para sustituir el valor faltante por el promedio del año, mes y día correspondiente. Una vez completa la información, se graficaron los datos de la cantidad de precipitación en mm con respecto del tiempo, con la finalidad de observar algún comportamiento periódico de la serie y ubicar las temporadas de sequía y lluvia.

La serie de precipitación de la estación meteorológica de Comitán, fue procesada con la Transformada Rápida de Fourier (FFT), utilizando el software de MATLAB v2013a, en conjunto con el Dr. Tomás González Morán, con el objetivo de encontrar periodicidades presentes en la información, que posteriormente pudieran relacionarse con resultados posteriores del presente estudio. Una vez graficados los resultados del FFT se detectaron los picos de las frecuencias más importantes en la serie y se procedió a pasar dichos valores de frecuencias a su equivalente en tiempo con la fórmula siguiente:

$$T = \frac{1}{\mathcal{F}} \quad (4.9)$$

donde T es el periodo en días y \mathcal{F} es la frecuencia encontrada en ciclos por día.

Los resultados de la presente metodología descrita en el capítulo, se muestran el Capítulo V RESULTADOS Y DISCUSIÓN, el cual está conformado de una serie de mapas y tablas que agrupan los cambios detectados en los cuerpos lacustres.

CAPÍTULO V

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de las imágenes crudas obtenidas por parte, de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), la Secretaría de Marina (Estación de Recepción México de la Constelación SPOT (ERMEXS)) y la empresa Distribución Astrium Services / Spot Image S. A., se obtuvieron nuevas imágenes, eliminando la influencia de los gases invernadero mediante la corrección atmosférica, y se convirtieron los valores de brillo (ND), a reflectancias, con el propósito de tener información normalizada y poder hacer comparaciones entre distintas imágenes, utilizando el algoritmo “ATCOR2” del programa PCI Geomática, V10 y el SPOT “Calibrate”, del programa ENVI V4.8.

5.1.- REALCE ESPACIAL O FUSIÓN DE LAS IMÁGENES SATELITALES

Como se comentó en el capítulo IV, aplicando la técnica de análisis de Componentes Principales (PCA) “mejorada”, basada en el algoritmo de “à trous”, se realizó el proceso de realce a las imágenes SPOT-5, de los años 2007, 2009, 2010 y 2012, debido a que contaban con su respectiva imagen pancromática.

La Figura 5.1 muestra algunos detalles de los resultados de la fusión realizada entre imágenes multiespectrales, con resolución espacial de 10 m., y las imágenes pancromáticas, con 2.5 m, para obtener nuevas imágenes con resolución espacial de 2.5 m., pero manteniendo la resolución espectral de las multiespectrales. Este proceso permite alcanzar una mejor definición en bordes (geoformas) y lineamientos (contactos geológicos, caminos y carreteras) de las coberturas terrestres.

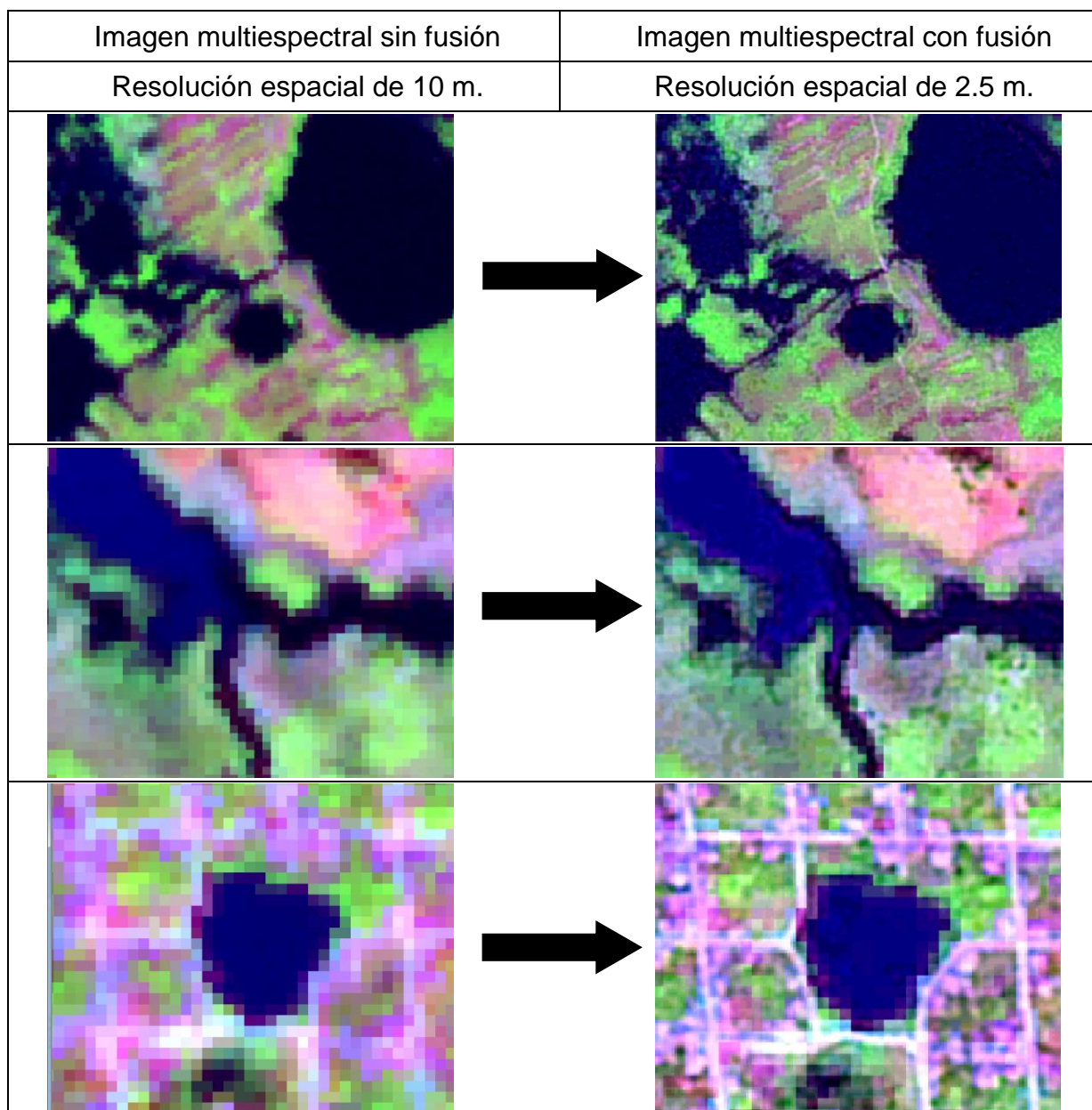


Figura 5.1.- Selección de 3 zonas de la Imagen SPOT 5, del año 2012, con la finalidad de mostrar el efecto de la fusión, en la imagen original.

5.2.- PROCESO DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE AGUA NORMALIZADO (NDWI)

A partir de las imágenes con resolución espacial “mejorada”, se identificaron en la zona de estudio áreas con cobertura de agua. Para esto, se utilizó el algoritmo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), de acuerdo a los criterios establecidos por McFeeters (1996) y Xu (2006), para identificar cuerpos de agua.

El Índice Normalizado de Agua permitió identificar las áreas con agua del sistema lagunar de Montebello de las que no lo son. De acuerdo con McFeeters (1996) se seleccionó un umbral de valores entre 0 y 1, para el área de interés. Aplicando este proceso, las áreas con agua pueden ser observadas de color blanco. (Figuras A.1 – A.6, del Anexo).

La imagen resultante del NDWI del año 2000 presenta, a simple vista, cambios relativos en la extensión de agua no identificados, en las imágenes de los NDWI's, de los años 2006, 2007, 2009 y 2012. Sin embargo, en el 2010, se observa una recuperación, de esas mismas áreas presentando mayor cobertura de agua, que en el año 2000.

Después de haber realizado la identificación de áreas cubiertas de agua, se procedió a extraer las áreas de interés. Esta selección generó una nueva imagen, conocida como máscara que fueron obtenidas para cada imagen de los NDWI's.

En el Anexo, (Figuras A.7 – A.12) se muestran las máscaras de los NDWIs de cada una de las imágenes estudiadas, resaltando los cambios más importantes que se han presentado en la zona lagunar, que a continuación se enlistan:

- a) El cuerpo de agua ubicado al norte (círculo 1) presenta un comportamiento muy variado y notorio, en los años 2000 y 2010, es donde se hace presente, mientras que en el 2007, 2009 y 2012, apenas hay evidencia de agua, y en el 2006, desaparece en su totalidad.
- b) En la laguna de San Lorenzo se observa a lo largo de los años que hay un incremento ó decremento en su extensión, tanto en su parte norte (círculo 2) como en la sur

(círculo 3), haciendo más ancho ó más delgado el “brazo” de la laguna en la parte superior, mientras que en la parte inferior, se fragmenta la superficie lacustre en varias cuerpos pequeños.

- c) Las lagunas de Tepancoapan y Bosque azul (círculo 4) tienen conectividad entre sí, los años 2000, 2009, 2010 y 2012, mientras que en los años 2006 y 2007 desaparece dicha conexión.
- d) Finalmente, la laguna San José (círculo 5) presenta variaciones al noreste. Este comportamiento de crecimiento, en la parte más angosta de la laguna, es semejante al de la conectividad de las lagunas mencionadas, anteriormente.

5.2.1.- CÁLCULO DE VARIACIONES RELATIVAS ENTRE LAGUNAS

Para obtener resultados cuantitativos se calculó la extensión cubierta con agua. El 2000, presentó la mayor extensión de agua, seguido del 2010 y 2009. Los años, con menor presencia de agua, fueron 2012, 2006 y 2007 (Tabla 5.1). Entre el periodo del 2000 – 2006 hay una pérdida relativa anual de superficie cubierta de 21.47 ha, siendo en total, 128.84 ha el decremento de dicho periodo (6 años). El siguiente año (2007), el sistema lagunar sigue reduciendo su área superficial, con 40.71 ha. En los siguientes tres años (2008 - 2010) el sistema de los cuerpos de agua se recupera y aumenta relativamente por año 32.06 ha en el 2008 y 2009, y 67.34 ha, en el año 2010. Finalmente, el sistema presenta un decremento de 73.20 ha en el periodo 2011 – 2012 (36.60 ha por año). El sistema lacustre nunca recupera la extensión de agua, con respecto del primer año de estudio (2000).

Tabla 5.1.- Áreas de las máscaras de los NDWI's de las diferentes imágenes en Hectáreas (ha).

Año	Área en Ha	Cambio anual	Cambio por periodo
2000 marzo	665.87	-21.47 ha	-128.84 ha
2006 enero	537.03	-40.71 ha	-40.71 ha
2007 febrero	496.32	32.06 ha	64.12 ha
2009 diciembre	560.44	67.34 ha	67.34 ha
2010 diciembre	627.78	-36.60 ha	-73.20 ha
2012 enero	554.58		

Las principales diferencias entre las cinco comparaciones de cada par de años, 2000 – 2006, 2006 – 2007, 2007 – 2009, 2009 – 2010 y 2010 – 2012 se mencionan en las Tablas 5.2 a la 5.6, respectivamente, con una descripción general de las ganancias o pérdidas que ha tenido el sistema lagunar de Montebello en su extensión de cubierta de agua, mientras que las Figuras 5.2 – 5.6 presentan dichas comparaciones entre las máscaras de los NDWI's, resaltando los acercamientos de las variaciones mencionadas en las tablas anteriores, por regiones de cambio.

NDWI (periodo 2000 - 2006)

Tabla 5.2.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de los NDWI's de los años 2000 y 2006.

Diferencias de las máscaras de los NDWI's			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2000 - 2006	Reducción del área cubierta de agua de 128.84 ha equivalente al 20% del área 2000.	Región (a)	Desaparece totalmente en el 2006.
		Región (b)	La entrada del cauce del Río Grande de Comitán a la laguna de Balantetic, se reduce o desaparece en su totalidad al final del periodo.
		Regiones (c) y (d)	Disminuyen las áreas de las partes noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (e)	La parte sur de la laguna San Lorenzo se fragmenta en cuerpos pequeños para el año 2006.
		Región (f)	Las conectividades superficiales entre las lagunas de Tepancoapan y Bosque Azul desaparecen por completo.
		Región (g)	Presenta un decremento general y desaparece una sección, casi por completo, en la parte noreste de la laguna San José.

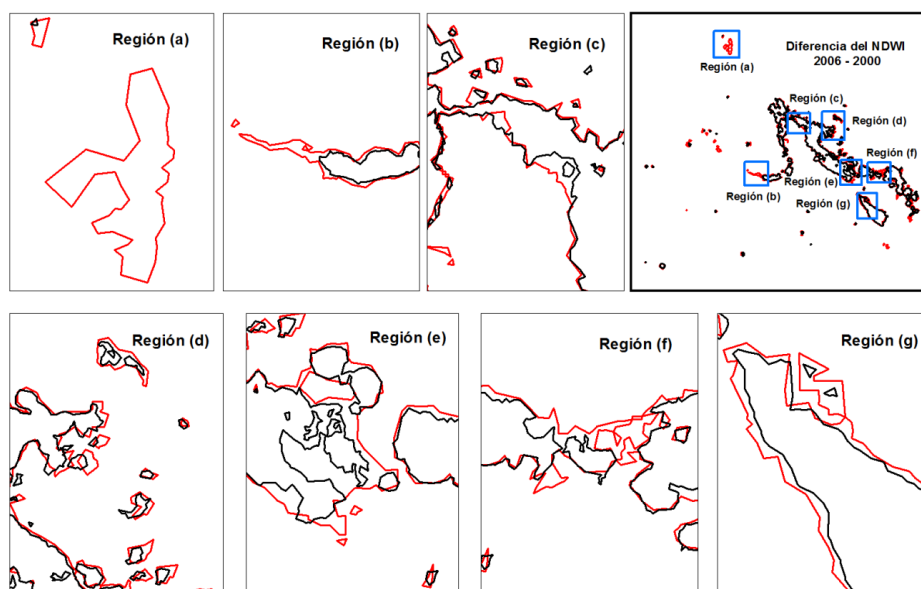


Figura 5.2.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de los NDWI's de los años 2000 (línea roja) y 2006 (línea negra) de las imágenes.

NDWI (periodo 2006 - 2007)

Tabla 5.3.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de los NDWI's de los años 2006 y 2007.

Diferencias de las máscaras de los NDWI's			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2006 – 2007	Decremento de la extensión cubierta de agua de 40.71 ha/año, que corresponde a una pérdida de 7% respecto al 2006.	Región (a)	La laguna reaparece presentando, sólo pequeñas cantidades de agua.
		Regiones (b) y (c)	Continúan disminuyendo las áreas de las partes noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (d)	Los cuerpos del sur de la laguna San Lorenzo se reducen de tamaño.
		Región (e)	Las lagunas la Encantada, Esmeralda, Ensueño y Agua Tinta, presentan un decremento en su cubierta de agua.

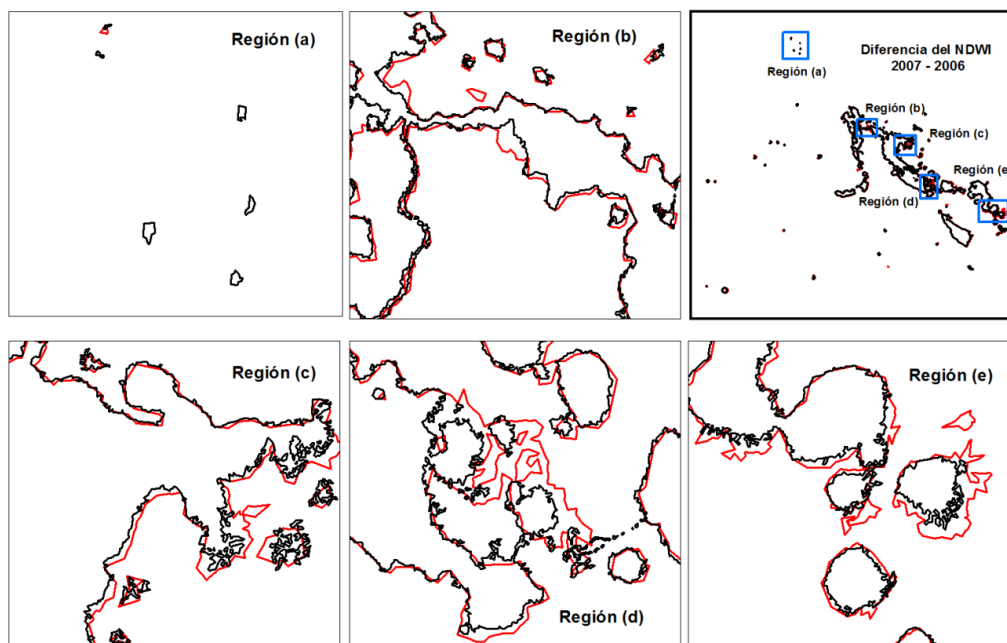


Figura 5.3.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de los NDWI's de los años 2006 (línea roja) y 2007 (línea negra) de las imágenes.

NDWI (periodo 2007 - 2009)

Tabla 5.4.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de los NDWI's de los años 2007 y 2009.

Diferencias de las máscaras de los NDWI's			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2007 – 2009	Recuperación del sistema lagunar en un 13% con una extensión de cubierta de agua de 64.12 ha en el periodo. Una ganancia parcial por año de 32.06 ha con respecto al 2007.	Región (a)	La laguna pierde las pequeñas cantidades de agua que presentaba en el 2007 y gana superficie en el cuerpo de agua del noreste para el 2009.
		Región (b)	Se incrementa el área de la parte noreste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (c)	El sur de la laguna de San Lorenzo, se incrementa y algunos pequeños cuerpos de agua, se unen entre sí.
		Región (d)	Las conectividades superficiales entre las lagunas de Tepancoapan y Bosque Azul, reaparecen.
		Región (e)	La parte noreste de la laguna San José tiene un incremento, presentándose una extensión de la laguna en dicha dirección.

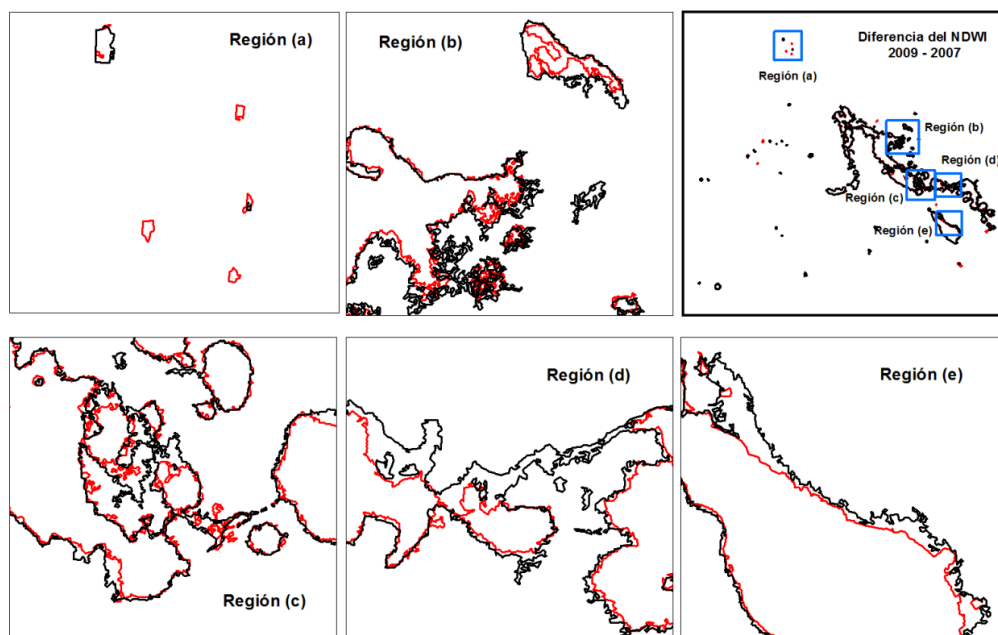


Figura 5.4.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de los NDWI's de los años 2007 (línea roja) y 2009 (línea negra) de las imágenes.

NDWI (periodo 2009 - 2010)

Tabla 5.5.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de los NDWI's de los años 2009 y 2010.

Diferencias de las máscaras de los NDWI's			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2009 - 2010	Presenta un crecimiento el sistema lagunar considerable, de 67.34 ha/año, que corresponde a una ganancia del 13% respecto al 2009.	Región (a)	La laguna se recupera con una gran extensión de su cubierta de agua, presentando dicho cuerpo de agua, la mayor área del presente estudio.
		Región (b)	Se incrementa la superficie de cubierta de agua de la parte noroeste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (c)	Se presenta un crecimiento en la parte noreste de la laguna de San Lorenzo, y un pequeño decremento en ciertas secciones.
		Región (d)	Al igual que el periodo pasado, el sur de la laguna de San Lorenzo, se incrementa y algunos pequeños cuerpos de agua, se siguen uniendo entre sí.
		Región (e)	La laguna de San José, tiene un crecimiento general, además de una reducción en su extensión en la parte noreste.

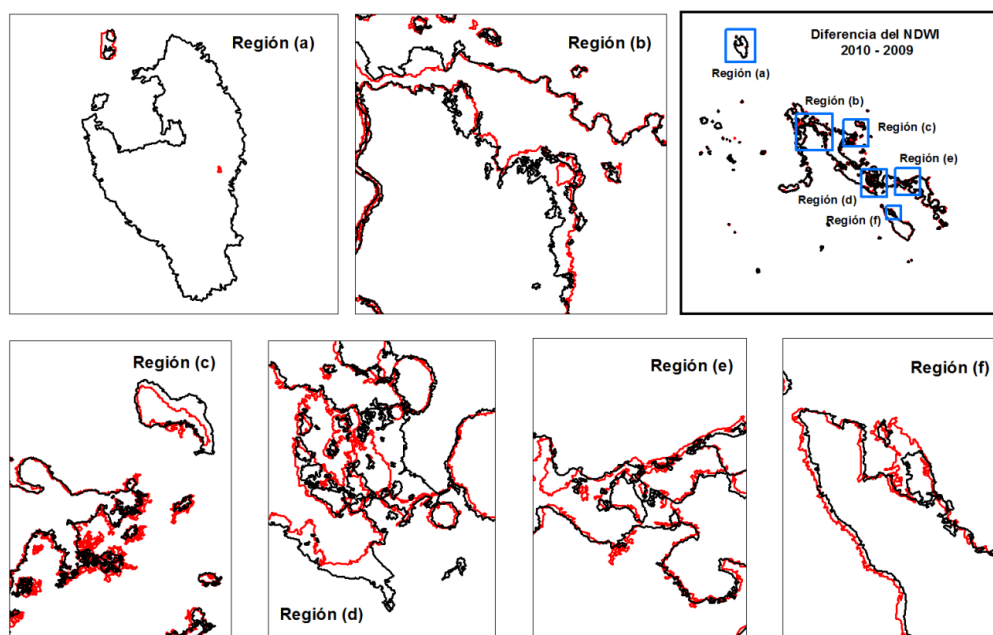


Figura 5.5.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de los NDWI's de los años 2009 (línea roja) y 2010 (línea negra) de las imágenes.

NDWI (periodo 2010 - 2012)

Tabla 5.6.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de los NDWI's de los años 2010 y 2012.

Diferencias de las máscaras de los NDWI's			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2010 - 2012	Reducción del área cubierta de agua de 73.20 ha en el periodo, equivalente al 11% del área 2010, con una pérdida parcial por año de 36.60 ha.	Región (a)	Se pierde casi en su totalidad la laguna, quedando sólo pequeñas cantidades de agua.
		Región (b)	La laguna de Balantetic reduce su extensión de cubierta de agua, en su parte suroeste, principalmente.
		Región (c)	Disminuye el área de la parte noroeste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (d)	La parte fragmentada del sur de la laguna de San Lorenzo, se reduce.
		Región (e)	La parte sureste de la laguna San José tiene una pequeña pérdida.

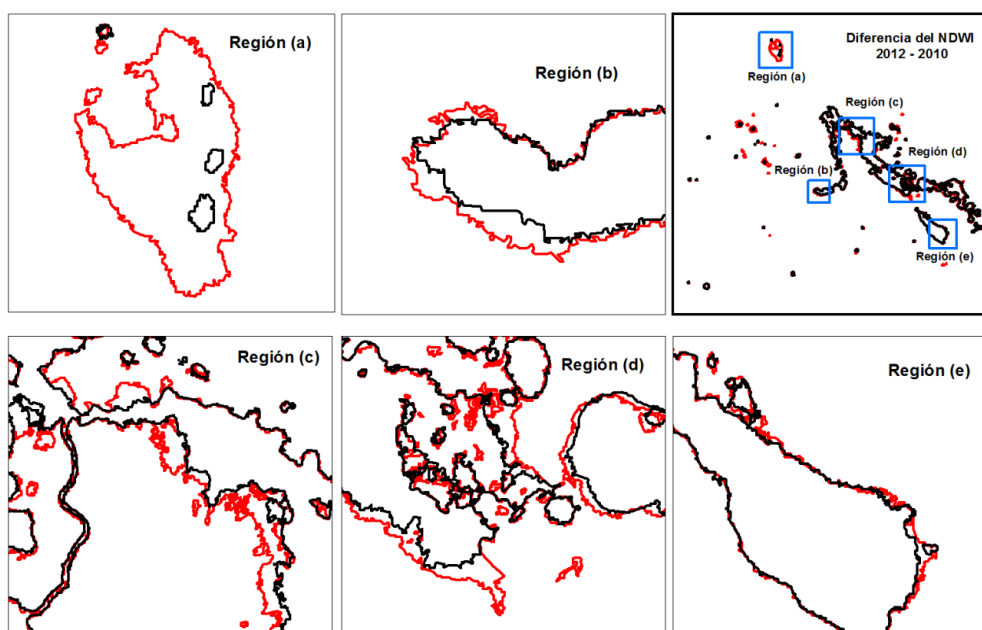


Figura 5.6.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de los NDWI's de los años 2010 (línea roja) y 2012 (línea negra) de las imágenes.

A continuación se presenta, una síntesis de las cubiertas de agua para diferentes años. La Figura 5.7 muestra un gráfico de los totales de la superficie cubierta de agua, en el Parque Nacional Lagunas de Montebello. El año 2007, es el que presentó menor cantidad de área lacustre, mientras que el 2000 fue el año con mayor extensión de agua, en los cuerpos lagunares del sistema. Se puede observar que del 2000 al 2007, hubo una pérdida de alrededor del 25%. Sin embargo, en los años 2009 y 2010 se recupera el sistema lacustre, alcanzando aproximadamente un 95% del área cubierta de agua, existente en el 2000, aunque esta tendencia no se conserva, en el año que finaliza el presente estudio (2012) dado que vuelve a disminuir la cantidad de agua, teniendo una pérdida mayor al 16%, con respecto al primer año de estudio (2000).

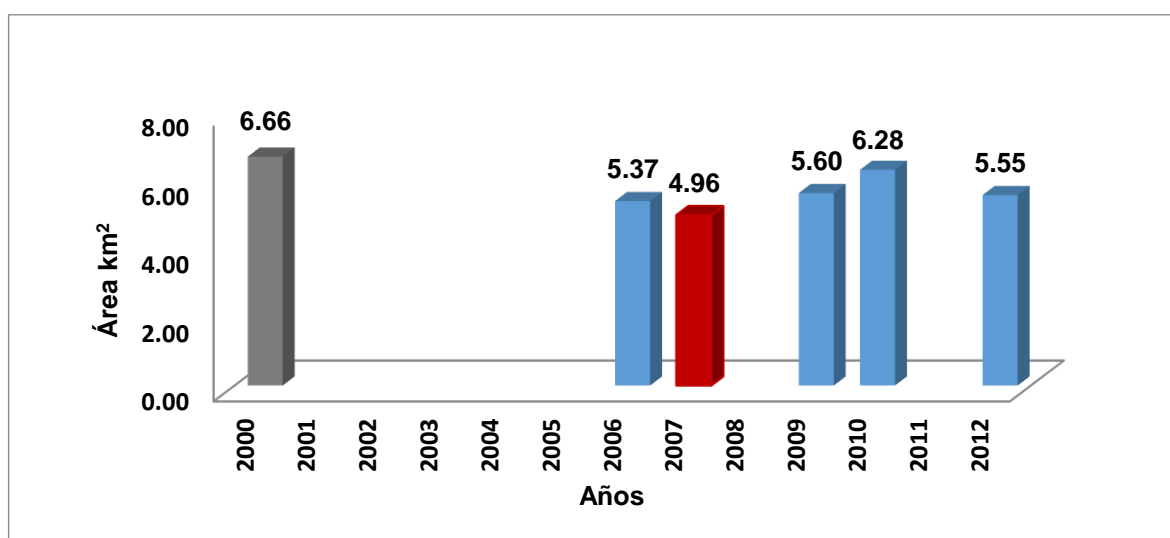


Figura 5.7.- Superficie total cubierta con agua en el Sistema Lacustre de Montebello cuantificada para diferentes años usando el NDWI.

5.3.- PROCESO DE LA CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

La clasificación No Supervisada, permitió generar dos clases de cada imagen estudiada, en el presente trabajo. Una de ellas, es toda la cobertura de agua (clase 1) y la otra, todo lo que no es agua (clase 2). Los mapas temáticos obtenidos de esta clasificación, se pueden observar en las Figuras A.13 – A.18 en el Anexo. El

patrón de comportamiento de esta clasificación, es muy similar a la metodología pasada (NDWI). Los años 2000 y 2010, presentan zonas con más agua, que en los años 2006, 2007, 2009 y 2012. Sin embargo, la única diferencia con respecto a los NDWI's resulta, en que el año, con mayor superficie de agua, fue el 2010, mientras que en los resultados anteriores, fue el año 2000.

Las Figuras A.19 a A.24, del Anexo, muestran las máscaras de las clasificaciones no supervisadas de los 6 diferentes años, analizados en este estudio. Se han resaltado algunos de los cambios visualmente, más notorios de la zona lacustre con círculos rojos.

Las variaciones de la laguna ubicada fuera del PNLM, al norte del sistema (círculo 1), la parte noroeste y sureste de San Lorenzo (círculo 2 y 3), los canales que conectan a los cuerpos lacustres de Tepancoapan y Bosque azul (círculo 4), y la laguna de San José (círculo 5). Se observa un patrón de cambio, similar al de los resultados del procesamiento, anterior de los NDWIs. En las mismas zonas se presentan incrementos y decrementos de la superficie de agua; la diferencia radica en las cantidades cubiertas. Aunque, presentan diferencias importantes dado que algunos de los canales que conectan el Sistema San Lorenzo, entre sí, no son detectados por esta metodología, en los años 2000 y 2006 (círculo 6).

5.3.1- CÁLCULO DE VARIACIONES DE LA EXTENSIÓN RELATIVA ENTRE LAGUNAS

La cuantificación de áreas con agua en las máscaras usando clasificaciones, no supervisadas, presenta un comportamiento similar con respecto a las máscaras de los NDWI's, muestra que el 2010^{diciembre} presenta mayor extensión de agua, seguido del 2000^{marzo} y 2009^{diciembre}; los años con menor presencia de agua fueron 2006^{enero}, 2012^{enero} y 2007^{febrero} con la extensión menor de agua (Tabla 5.7).

Tabla 5.7.- Áreas en hectáreas de las máscaras de las clasificaciones, no supervisadas, para las imágenes de diferentes años.

Año	Área en Ha	Cambio anual	Cambio por periodo
2000 marzo	613.80		
2006 enero	530.12	-13.94 ha	-83.68 ha
2007 febrero	489.69	-40.43 ha	-40.43 ha
2009 diciembre	534.93	22.62 ha	45.24 ha
2010 diciembre	615.44	80.51 ha	80.51 ha
2012 enero	495.76	-59.84 ha	-119.68 ha

Las principales diferencias entre las cinco comparaciones de cada par de años, 2000 – 2006, 2006 – 2007, 2007 – 2009, 2009 – 2010 y 2010 – 2012 se mencionan en las Tablas 5.8 a la 5.12, respectivamente, con una descripción general de las ganancias o pérdidas que ha tenido el sistema lagunar de Montebello en su extensión de cubierta de agua, mientras que las Figuras 5.8 – 5.12 presentan dichas comparaciones entre las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas, resaltando los acercamientos de las variaciones mencionadas en las tablas anteriores, por regiones de cambio.

Clasificación No Supervisada (periodo 2000 - 2006)

Tabla 5.8.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2000 y 2006.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2000 - 2006	El sistema lacustre presenta una pérdida del 14% de cubierta de agua con respecto al 2000, equivalente a 83.67 ha durante el periodo (13.94 ha/año).	Región (a)	La laguna desaparece totalmente en el 2006.
		Regiones (b) y (c)	Las partes media y noreste de la laguna de San Lorenzo disminuyen su extensión superficial de agua.
		Región (d)	Decrece el área lacustre de la parte sur de la laguna San Lorenzo, provocando la fragmentación de ésta región en cuerpos pequeños, al finalizar el periodo.
		Región (e)	La laguna de Tepancoapan se reduce en la parte norte de ésta.
		Región (f)	Las conectividades superficiales entre las lagunas de Tepancoapan y Bosque Azul desaparecen por completo.
		Región (g)	Presenta la laguna San José una reducción general alrededor del borde,

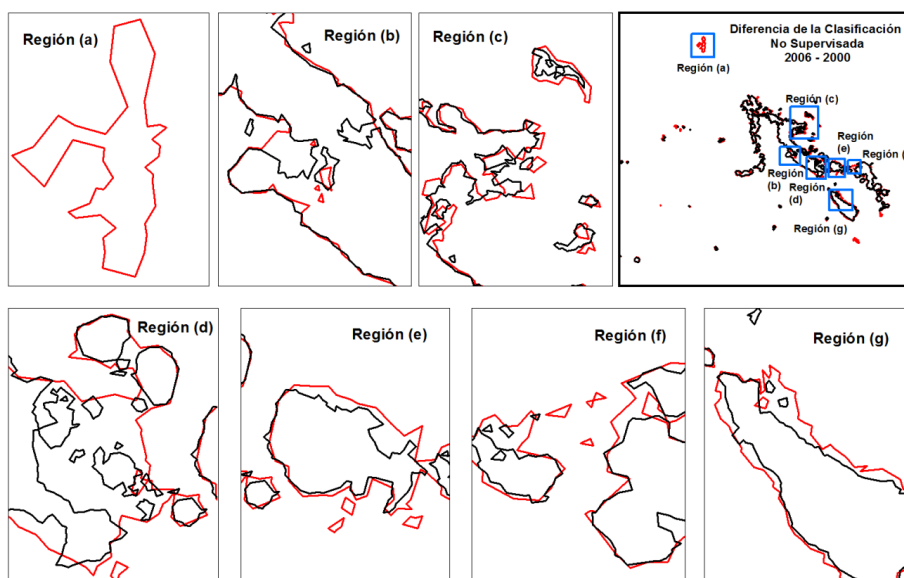


Figura 5.8.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2000 (línea roja) y 2006 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación No Supervisada (periodo 2006 - 2007)

Tabla 5.9.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2006 y 2007.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2006 - 2007	Se presenta la misma tendencia que el periodo anterior con un decremento del 7% de superficie lacustre en el 2007 con respecto al 2006, cuantificado en 40.43 ha.	Región (a)	La laguna presenta un pequeño cuerpo de agua, como evidencia de su existencia.
		Regiones (b),(c) y (d)	Las partes noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo disminuyen su extensión superficial de agua para el año 2007.
		Región (e)	Las lagunas Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta y El Arco, presentan una reducción en el área cubierta de agua.

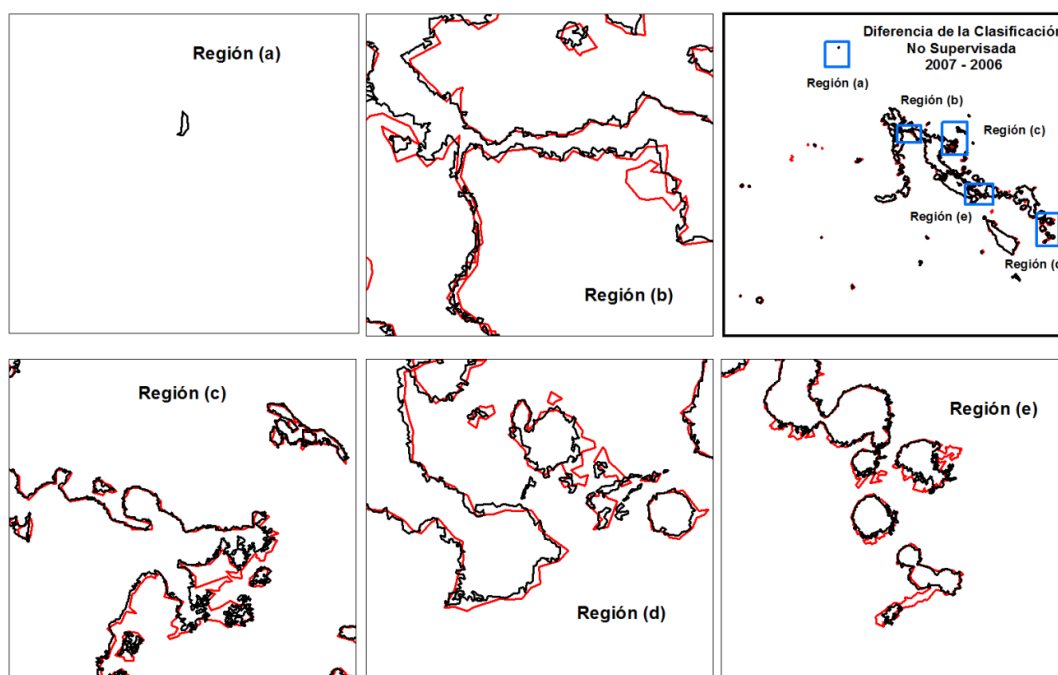


Figura 5.9.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2006 (línea roja) y 2007 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación No Supervisada (periodo 2007 - 2009)

Tabla 5.10.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2007 y 2009.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2007 - 2009	El sistema lagunar se recupera con un crecimiento parcial de 22.62 ha por año, es decir, de 45.24 ha durante el presente periodo. Estos valores equivalen a un incremento del 9% con respecto del 2007.	Región (a)	La laguna y la conectividad que sale de ella, tienen un incremento en su superficie cubierta de agua, de tal forma, que se puede apreciar el canal muy bien definido.
		Región (b)	La parte noreste de la laguna de San Lorenzo aumenta en su extensión lacustre.
		Región (c)	La laguna de Tepancoapan se incrementa en la parte norte de ésta.
		Región (d)	Reaparecen las conectividades superficiales entre las lagunas de Tepancoapan y Bosque Azul.
		Región (e)	Presenta un incremento a lo largo del borde este, la laguna San José.

Región (a)

Región (b)

Diferencia de la Clasificación No Supervisada 2009 - 2007

Región (c)

Región (d)

Región (e)

Figura 5.10.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2007 (línea roja) y 2009 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación No Supervisada (periodo 2009 - 2010)

Tabla 5.11.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2009 y 2010.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2009 - 2010	El crecimiento que alcanza el sistema lagunar es del 15% con respecto del 2009 con un valor de 80.51 ha, siendo la recuperación más alta del sistema.	Región (a)	La laguna reaparece con una gran extensión de cubierta de agua, presentando dicho cuerpo de agua, la mayor área del presente estudio.
		Regiones (b) y (c)	Se incrementa la superficie de cubierta de agua de la parte noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (d)	Al igual que el periodo pasado, el sur de la laguna de San Lorenzo, se incrementa y algunos pequeños cuerpos de agua, se unen entre sí.
		Región (e)	La laguna de Tepancoapan tiene un crecimiento en el borde de su parte norte.
		Región (f)	La laguna de San José, tiene un decremento al noreste, sin embargo, predominan las ganancias en todo el sistema.

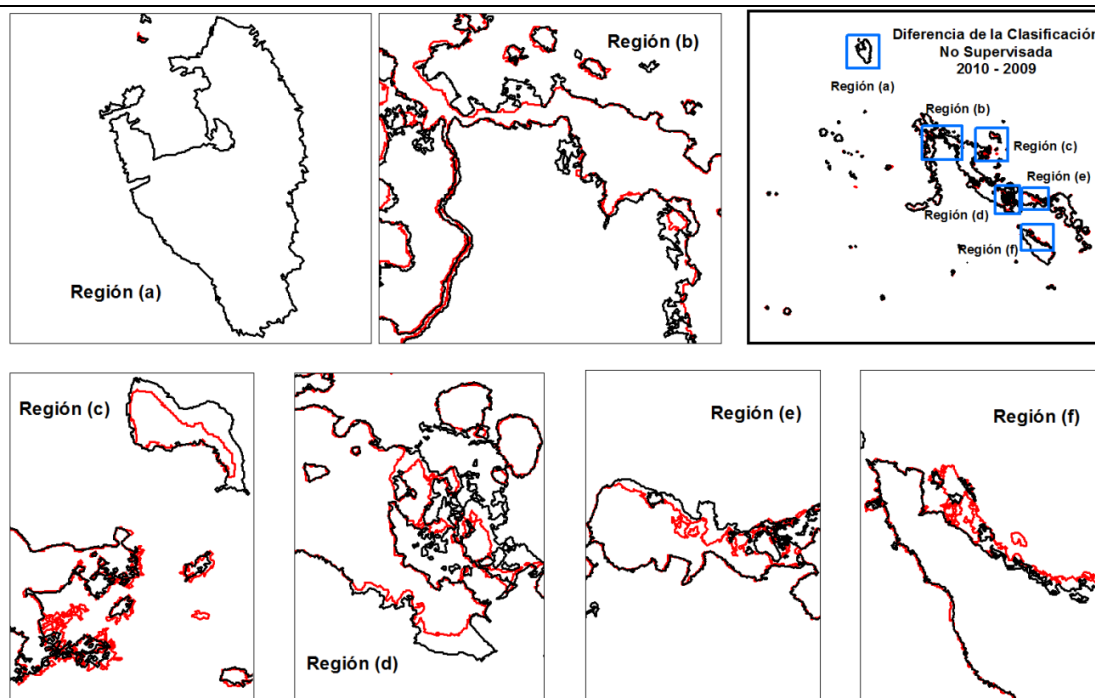


Figura 5.11.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2009 (línea roja) y 2010 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación No Supervisada (periodo 2010 - 2012)

Tabla 5.12.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2010 y 2012.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2010 - 2012	En el último periodo de estudio se presenta un recaída del sistema de 119.68 ha durante el periodo, es decir, de 59.84 ha por año. Dicho valor del periodo de dos años, equivale a un 19% de decremento con respecto al 2010.	Región (a)	La laguna desaparece casi en su totalidad
		Región (b)	La laguna de Balantetic, tiene un decremento de forma general, alrededor de su borde.
		Regiones (c) y (d)	Las partes noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo disminuyen su extensión superficial de agua.
		Región (e)	La laguna de San Lorenzo, en su región sur, se presenta una pérdida en la cubierta de agua, de tal forma que desaparecen pequeños cuerpos de agua.
		Región (f)	La laguna de San José, tiene un decremento al sureste del borde.

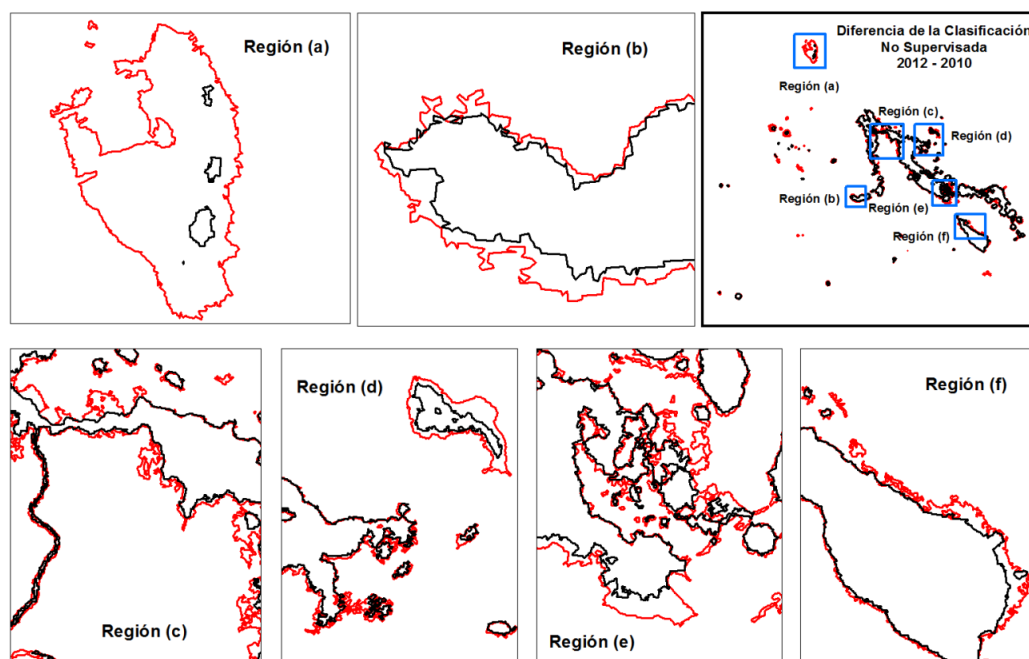


Figura 5.12.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones No Supervisadas de los años 2010 (línea roja) y 2012 (línea negra) de las imágenes.

La Figura 5.13 muestra, en una gráfica la totalidad de las áreas cubiertas de agua, de la zona de estudio. El año 2007, presentó menor cobertura de área lacustre, mientras que el 2010 fue el año con mayor extensión de agua, en los cuerpos lagunares del sistema. Sin embargo para los años del 2006 y 2007 hubo un decremento considerable, de aproximadamente el 20%, en el 2007 con respecto al 2000. En 2009 y 2010, se recupera el sistema lacustre siendo este último año, el de mayor superficie de agua en el presente trabajo, con un crecimiento de alrededor del 25%, con respecto al 2007. Aunque, en el año que finaliza el presente estudio (2012) presenta una tendencia a reducir el área cubierta de agua, teniendo una pérdida mayor al 21%, con respecto al 2000.

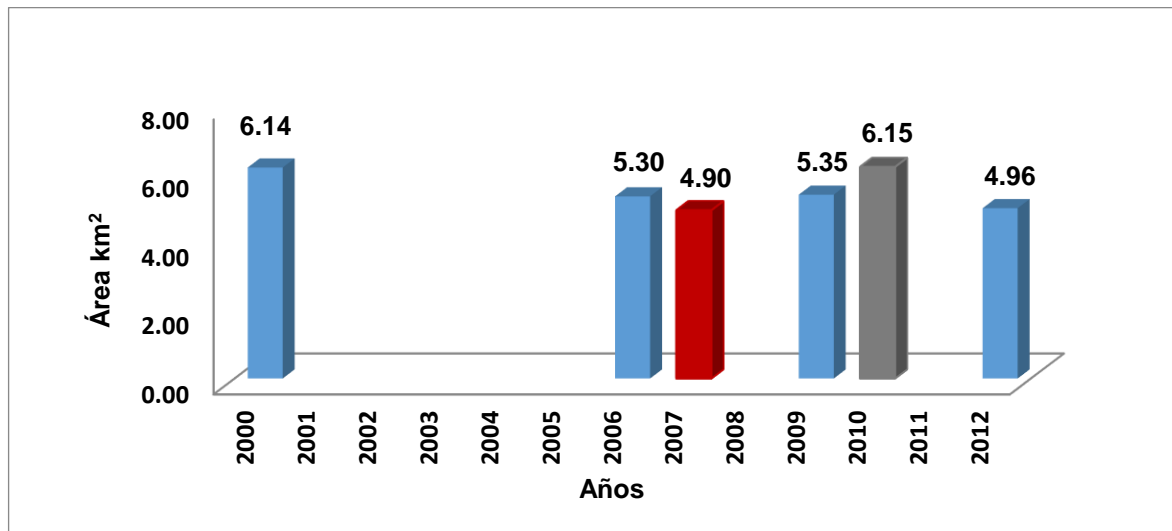


Figura 5.13.- Superficie total cubierta con agua en el Sistema Lacustre de Montebello, cuantificada para diferentes años usando Clasificación No Supervisada.

5.4.- PROCESO DE LA CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

La clasificación Supervisada, al igual que la No Supervisada, para cada imagen del presente estudio, permitió identificar dos clases que caracterizan la cobertura de agua (clase 1) de la que, no es agua (clase 2). Los mapas temáticos obtenidos, con las dos clases anteriormente mencionadas, se pueden observar de las Figuras A.25 – A.30 del Anexo. En esta clasificación, se observa el mismo patrón de

comportamiento de cambios, que en las imágenes de los NDWIs, donde el año 2000 presenta zonas cubiertas de agua, no existentes en los años 2006, 2007, 2009 y 2012, mientras que en el 2010, reaparecen esas mismas superficies de agua.

Las Figuras A.31 a A.36, del Anexo, muestran las máscaras de las clasificaciones supervisadas, resaltando con círculos rojos algunos de los cambios visuales más evidentes ocurridos en la zona lacustre para diferentes épocas, podemos mencionar:

Las variaciones de la laguna (sin nombre) ubicada fuera del PNLM, al norte del sistema (círculo 1), la parte noroeste y sureste de San Lorenzo (círculo 2 y 3), los canales que conectan a los cuerpos lacustres de Tepancoapan y Bosque azul (círculo 4), y la laguna de San José (círculo 5). Estos cambios tienen un patrón similar a los resultados encontrados al realizar el procesamiento de los NDWIs. Presentan incrementos y decrementos en la superficie de agua para las mismas áreas; la diferencia radica en la cantidad de superficie cubierta.

Los cambios cuantitativos se pueden observar en las áreas totales de agua calculadas a partir de las diferentes máscaras, de las clasificaciones supervisadas, generadas, por cada año de estudio. Los resultados presentan el mismo comportamiento que las áreas de las máscaras de los NDWIs, donde el año 2000_{marzo} fue el que presentó mayor extensión de agua, seguido del 2010_{diciembre} y 2009_{diciembre}. Los años con menor presencia de agua fueron 2012_{enero}, 2006_{enero} y 2007_{febrero} con el área más pequeña de superficie lacustre (Tabla 5.13).

Tabla 5.13.- Áreas en hectáreas de cubierta de agua usando las máscaras de las clasificaciones supervisadas de las imágenes utilizadas en el presente trabajo.

Año	Área en Ha	Cambio anual	Cambio por periodo
2000 marzo	633.04		
2006 enero	536.36	-16.11 ha	-96.68 ha
2007 febrero	495.91	-40.45 ha	-40.45 ha
2009 diciembre	552.96	28.52 ha	57.05 ha
2010 diciembre	624.96	72.00 ha	72.00 ha
2012 enero	546.53	-39.21 ha	-78.43 ha

Al igual que las dos metodologías anteriores, las principales diferencias entre las cinco comparaciones de cada par de años, se mencionan en las Tablas 5.14 a la 5.18, mientras que las Figuras 5.14 – 5.18 presentan dichas comparaciones entre las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas, resaltando los acercamientos de las variaciones mencionadas en las tablas anteriores, por regiones de cambio.

Clasificación Supervisada (periodo 2000 - 2006)

Tabla 5.14.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2000 y 2006.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2000 - 2006	El sistema lacustre presenta una pérdida parcial anual de 16.11 ha, con un total de 96.68 ha durante el periodo, equivalente al 15% de cubierta de agua con respecto al 2000.	Región (a)	La laguna desaparece prácticamente en su totalidad en el 2006.
		Región (b)	La parte media de la laguna San Lorenzo disminuye su cubierta de agua, provocando se fragmente la zona.
		Regiones (c) y (d)	Las partes noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo disminuyen su extensión superficial de agua.
		Región (e)	Decrece el área lacustre de la parte sur de la laguna San Lorenzo, provocando la fragmentación de ésta región en cuerpos pequeños.
		Región (f)	Las conectividades superficiales entre las lagunas de Tepancoapan y Bosque Azul desaparecen por completo.
		Región (g)	La laguna San José, presenta un decremento en la región noreste del borde.

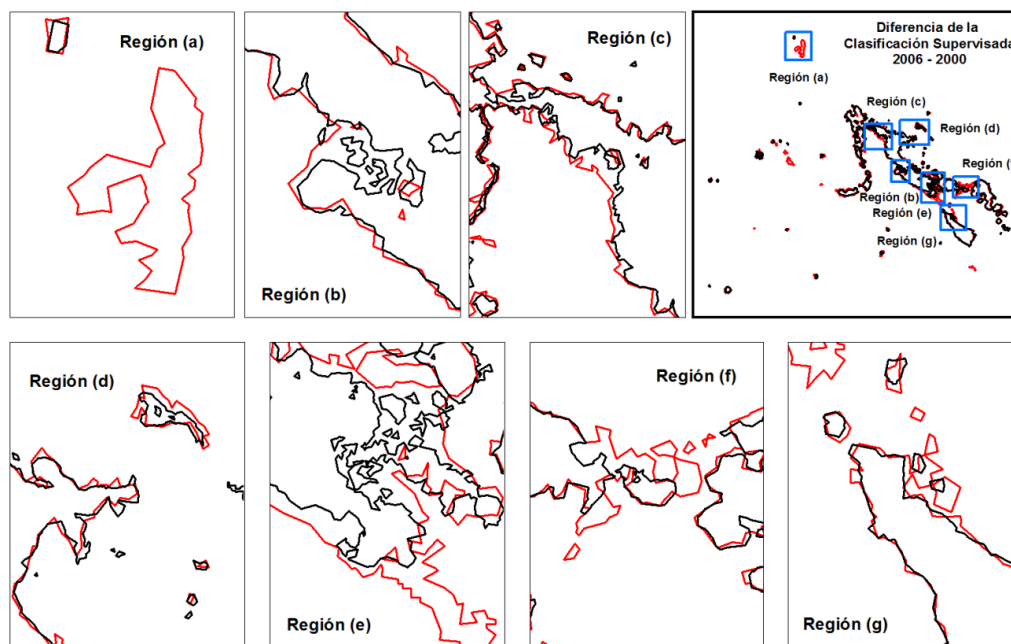


Figura 5.14.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2000 (línea roja) y 2006 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación Supervisada (periodo 2006 - 2007)

Tabla 5.15.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2006 y 2007.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2006 - 2007	Se presenta la misma tendencia que el periodo anterior con un decremento del 7% de superficie lacustre en el 2007 con respecto al 2006, cuantificado en 40.45 ha.	Región (a)	La laguna presenta pequeños cuerpos de agua, como evidencia de su existencia.
		Regiones (b) y (c)	Las partes noroeste y sur de la laguna de San Lorenzo disminuyen su extensión superficial de agua para el año 2007.
		Región (d)	Se decrementa todo el norte de la laguna de Tepancoapan.
		Región (e)	La laguna de San José presenta un pequeño incremento, a pesas de esta tendencia, predomina el decremento del sistema.

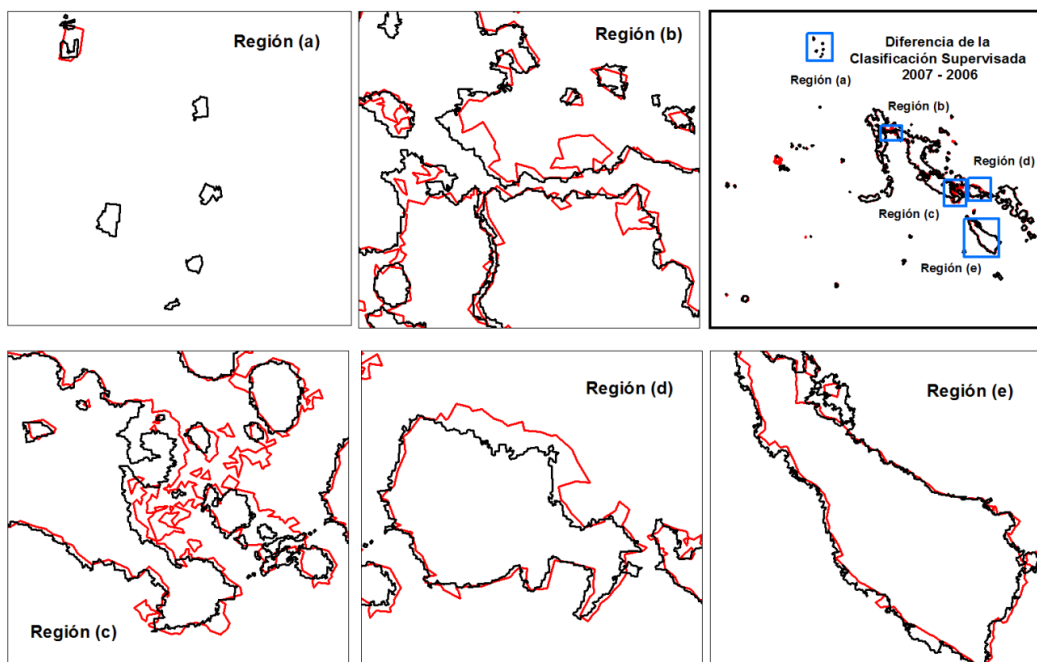


Figura 5.15.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2006 (línea roja) y 2007 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación Supervisada (periodo 2007 - 2009)

Tabla 5.16.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2007 y 2009.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2007 - 2009	El sistema lagunar se recupera con un crecimiento parcial de 28.52 ha por año, es decir, de 57.05 ha durante el presente periodo. Estos valores equivalen a un incremento del 11% con respecto del 2007.	Región (a)	Desaparecen pequeños cuerpos de agua que conformaban la laguna.
		Región (b)	La parte noreste de la laguna de San Lorenzo aumenta en su extensión lacustre.
		Región (c)	La laguna de Tepancoapan se incrementa en la parte norte de ésta.
		Región (d)	Reaparecen las conectividades superficiales entre las lagunas de Tepancoapan y Bosque Azul.
		Región (e)	La laguna San José presenta un incremento al sureste, las lagunas de Encantada, Esmeralda, Ensueño, Agua Tinta y El Arco, tienen un crecimiento general en todo su borde.

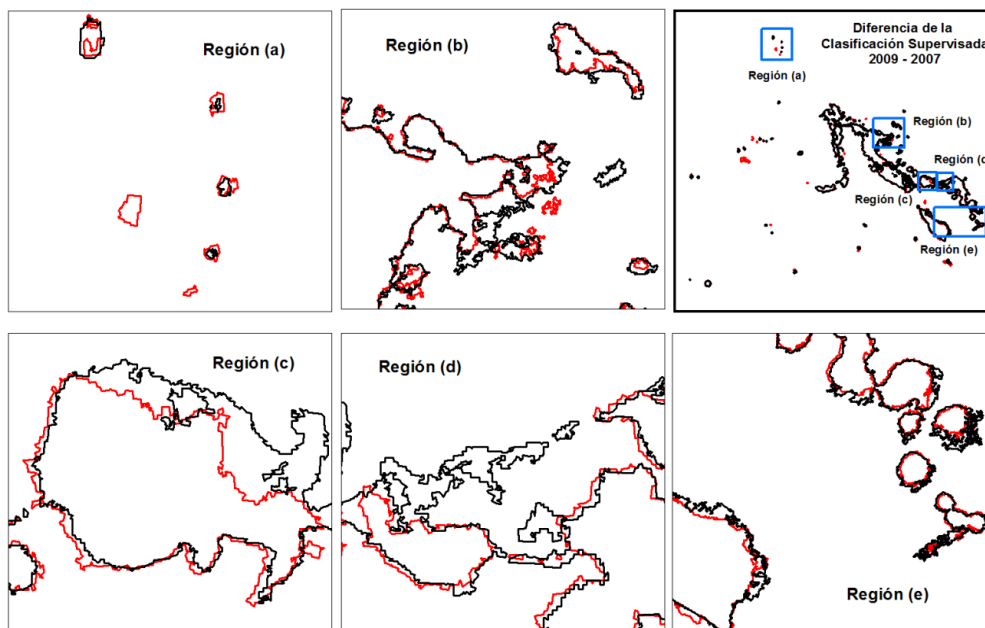


Figura 5.16.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2007 (línea roja) y 2009 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación Supervisada (periodo 2000 - 2010)

Tabla 5.17.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2009 y 2010.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2009 - 2010	El sistema lacustre presenta un crecimiento del 13% con respecto del año 2009 con un valor de 72.00 ha.	Región (a)	La laguna reaparece con una gran extensión de cubierta de agua, presentando dicho cuerpo de agua, la mayor área del presente estudio.
		Regiones (b) y (c)	Se incrementa el área cubierta de agua de la parte noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (d)	El sur de la laguna de San Lorenzo, se incrementa y algunos pequeños cuerpos de agua, se unen entre sí.
		Región (e)	La laguna de Tepancoapan tiene un crecimiento en toda su parte norte del borde.
		Región (f)	La laguna de San José, tiene un decremento al noreste, sin embargo, predominan el crecimiento de todo el sistema.

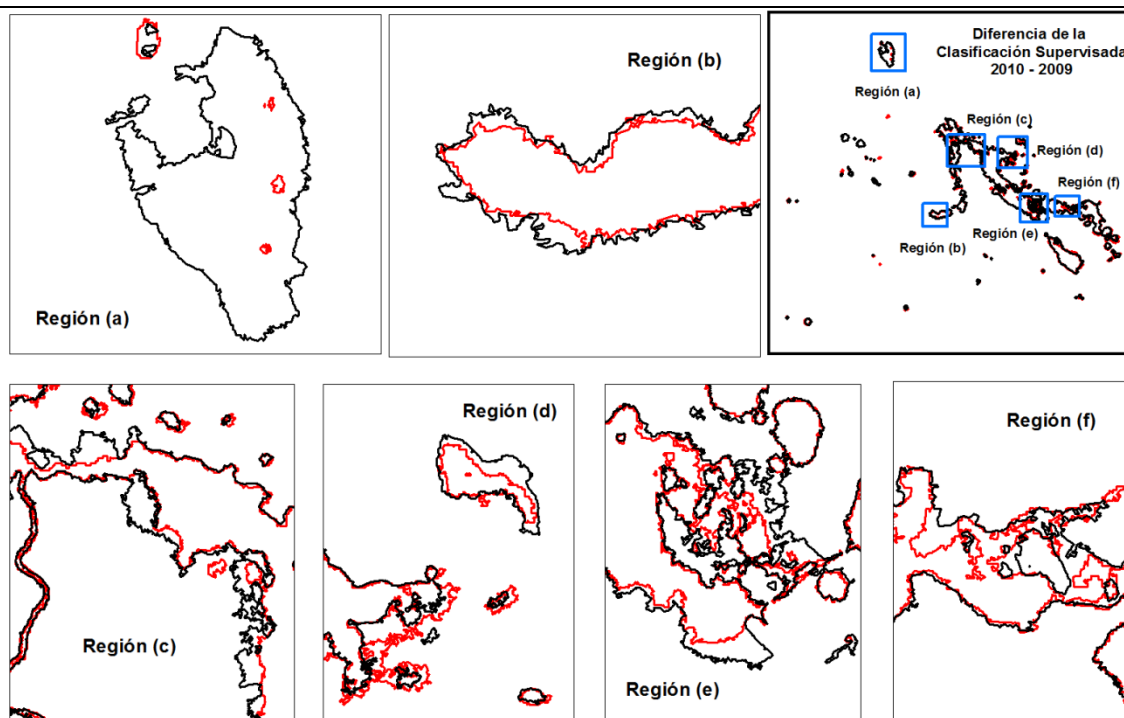


Figura 5.17.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2009 (línea roja) y 2010 (línea negra) de las imágenes.

Clasificación Supervisada (periodo 2010 - 2012)

Tabla 5.18.- Principales variaciones entre las imágenes de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2010 y 2012.

Diferencias de las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas			
Periodo	Efecto General	Región Afectada	Descripción
2010 - 2012	Reducción del área cubierta de agua de 78.43 ha, equivalente al 12% del área 2010, con una pérdida parcial por año de 39.21 ha.	Región (a)	Se pierde casi en su totalidad la laguna, quedando sólo pequeñas porciones de agua.
		Región (b)	La laguna de Balantetic reduce su extensión de cubierta de agua, en su parte oeste y suroeste, principalmente.
		Regiones (c) y (d)	Disminuyen el área de las partes noroeste y noreste de la laguna de San Lorenzo.
		Región (d)	La parte fragmentada del sur de la laguna de San Lorenzo, se decrementa.
		Región (e)	La parte oeste y este de la laguna San José tienen un incremento, predominando las pérdidas en general de todo el sistema.
		Región (f)	

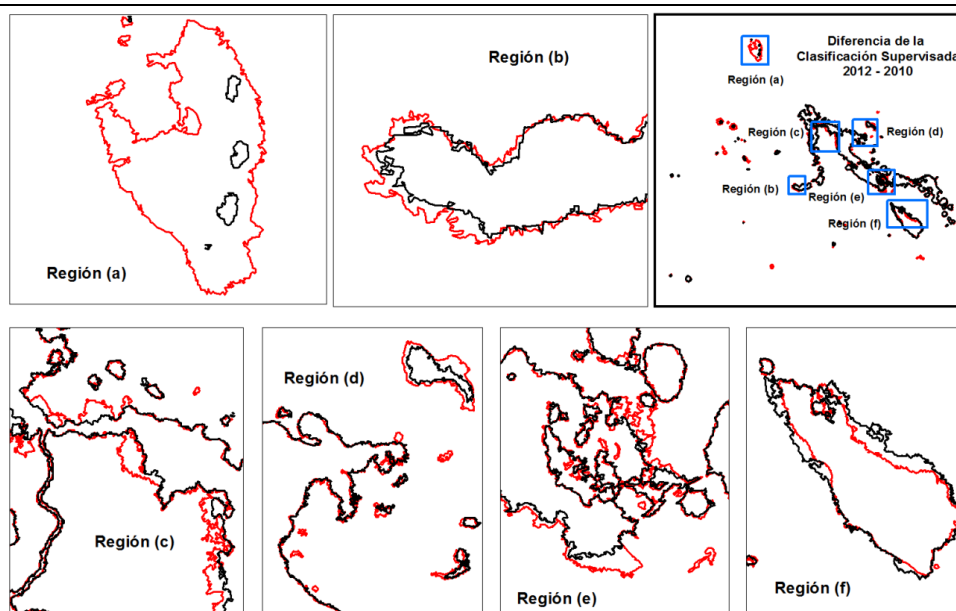


Figura 5.18.- Principales diferencias cualitativas entre las máscaras de las Clasificaciones Supervisadas de los años 2010 (línea roja) y 2012 (línea negra) de las imágenes.

La totalidad de la superficie cubierta de agua, en la zona de estudio para diferentes fechas, se muestra en la Figura 5.19. El año 2007 que presentó la menor cantidad de extensión de agua, mientras que el 2000 fue el año, con mayor extensión de agua en los cuerpos lagunares del sistema. Se puede observar que del 2000 al 2007 hubo una reducción de alrededor del 22%, con respecto al 2000. En los años 2009 y 2010 se recupera el sistema lacustre, alcanzando en 2010 aproximadamente en un 99% del área total cubierta de agua que había en el 2000. Sin embargo, en el año que finaliza el presente estudio (2012) se presenta una tendencia a reducirse el área cubierta con 13%, respecto al primer año de estudio (2000).

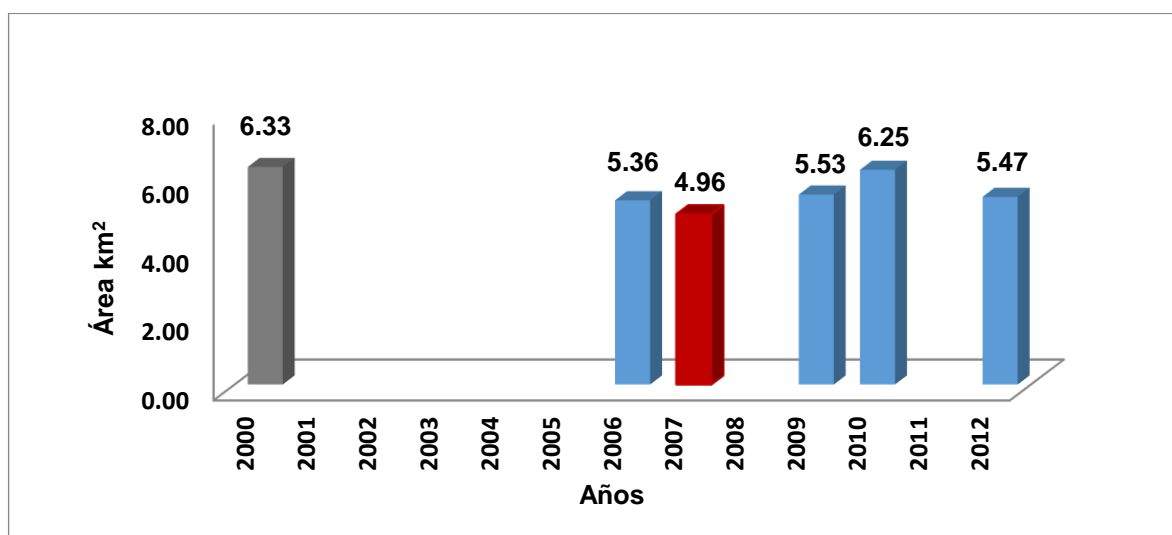


Figura 5.19.- Superficie total calculada para diferentes años en el Sistema Lacustre de Montebello utilizando la Clasificación Supervisada.

5.5.- ANÁLISIS CONJUNTO DE LAS TRES METODOLOGÍAS UTILIZADAS

Finalmente, analizando y haciendo una pequeña discusión de las tres metodologías, el índice Normalizado de Agua, la Clasificación No Supervisada y la Supervisada (Figura 5.20); existe una correlación en la tendencia de incremento o decremento, presentando un semejante patrón para las tres metodologías. Para el año de inicio de la serie de tiempo (2000), inician con un valor grande que va decreciendo en el 2006, hasta llegar a un valor mínimo en el 2007, seguido de un

incremento en el 2009 y 2010, para finalmente tener una caída en el último año de estudio, el 2012.

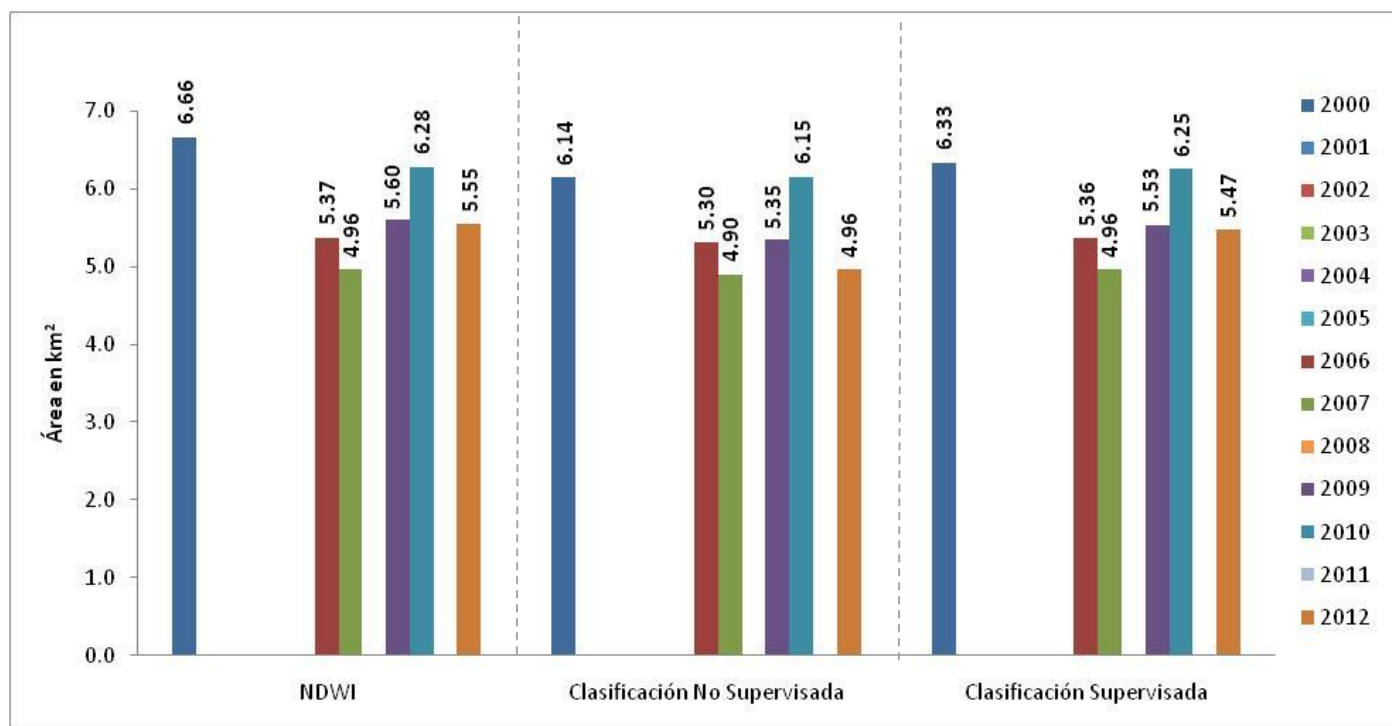


Figura 5.20.- Superficie total cubierta en el Sistema Lacustre de Montebello cuantificada para las tres metodologías: NDWI, Clasificación No Supervisada y Clasificación Supervisada.

5.6.- ANÁLISIS DE LOS SUBSISTEMAS DEL PNLM CON LAS TRES METODOLOGÍAS UTILIZADAS

En la Tabla 5.19 se muestran las áreas de extensión ocupadas por los principales subsistemas del Sistema Lagunar Montebello, es decir, se dividió en tres partes el área de estudio, basándose en las conectividades superficiales, que hay entre las lagunas para observar de manera más local, dónde se encuentran los cambios con mayor variación, quedando de la siguiente manera:

- I. Subsistema San Lorenzo (SSL).- inicia con la laguna de Balantetic y termina con la de San Lorenzo.

- II. Subsistema Bosque Azul (SBA).- abarca de las lagunas de Tepancoapan hasta Los Arcos.
- III. Subsistema San José (SSJ).- consta exclusivamente de la laguna San José y sus pequeños cuerpos de agua aledaños, ya que es la única que aparentemente no está intercomunicada.

Se observa como el patrón de variación no es el mismo, tanto en los tres subsistemas por año, como en las metodologías aplicadas, ya que presentan cambios de comportamiento variados. En resultados anteriores, se había observado cómo cambia el sistema completo, según el año, sin embargo haciendo el análisis local, se puede ver que los subsistemas no cambian con el mismo factor, ya que uno puede presentar más variaciones con respecto, de los otros en el mismo año.

Tabla 5.19.- Áreas lacustres presentes en cada subsistema para diferentes fechas, y métodos utilizados en el presente estudio.

Años	Subsistema	NDWI	Clasificación	Clasificación
		m ²	Supervisada m ²	No Supervisada m ²
2000	SSL	4117985.6624	4064646.7671	3736218.3684
	SBA	1479028.0865	1177463.6138	1293904.5703
	SSJ	755126.6966	726140.8463	875487.4056
2006	SSL	3412791.1316	3411813.6482	3350463.2043
	SBA	1202096.5591	1068482.7164	1144946.6097
	SSJ	653806.8769	703004.3688	691549.9156
2007	SSL	3169524.1213	3134815.6666	3108099.5483
	SBA	1048457.8998	996818.8243	1043461.4562
	SSJ	650334.9302	723604.5436	661282.8055
2009	SSL	3483031.5872	3406986.3944	3301026.9739
	SBA	1255020.4255	1200570.4205	1148673.0030
	SSJ	739183.2973	777250.0099	776763.6159
2010	SSL	3789554.7253	3692281.9018	3622847.4952
	SBA	1203592.4276	1209013.2777	1222020.6978
	SSJ	701087.2435	750680.1137	729193.2150

2012	SSL	3473237.5723	3412665.5584	3094030.0618
	SBA	1239408.7944	1181928.5049	1101516.8612
	SSJ	670637.8716	719530.9458	637903.1367

Para mejor visualización e interpretación de las coberturas de agua, en las tres distintas metodologías, se hizo una gráfica (Figura 5.21) con la información de la tabla anterior. Como se puede observar, los subsistemas SSL y SBA, muestran un patrón de comportamiento similar, donde las mayores diferencias se presentan en SSL. Mientras que el SSJ, presenta pocas variaciones y un comportamiento diferente a los dos subsistemas antes mencionados.

Resultados anteriores (ver subcapítulo 5.5), muestran que el análisis a nivel regional (todo el conjunto de lagunas del PNLM), presentan el mismo patrón de variaciones, por lo que se puede mencionar que el análisis es consistente, en las tres diferentes metodologías aplicadas, tanto a nivel regional como local.

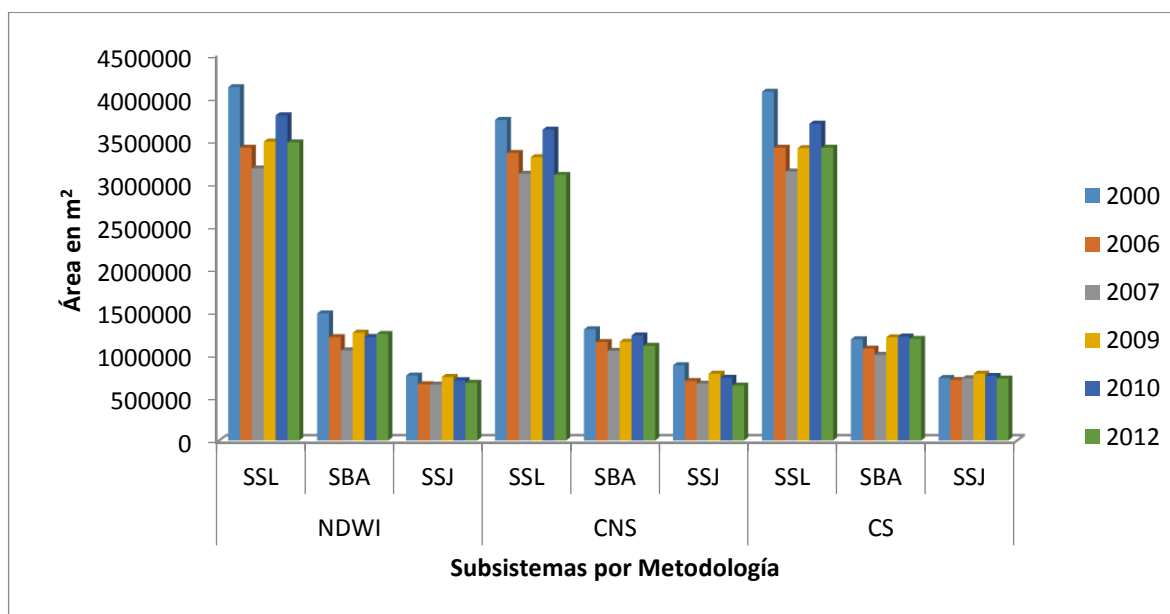


Figura 5.21.- Superficie total cubierta por subsistema por cada una de las metodologías utilizadas en el presente trabajo, NDWI, Clasificación No Supervisada (CNS) y Clasificación Supervisada (CS) para cada año de estudio.

5.7.- VALIDACIÓN DE LAS TRES METODOLOGÍAS UTILIZADAS

La escasa información que existe sobre el Parque Nacional “Lagunas de Montebello”, la ausencia de estudios previos acerca de cambios que ha presentado el sistema lagunar y el desconocimiento del área de estudio, hacen difícil la validación de los resultados obtenidos, así como una explicación adecuada de los fenómenos y efectos, que ocurren en la región. Por lo que se optó por:

- Analizar la base de datos de precipitación diaria, de 1990 al 2012, con el fin de encontrar patrones de comportamiento, y comparar los resultados cuantitativos de la superficie cubierta de agua de cada año para cada metodología desarrollada, con el volumen total de precipitación de la serie de tiempo de la estación meteorológica de Comitán, y encontrar alguna relación existente.
- Aplicar las mismas metodologías de extracción temática, y detección de cambios, a una imagen WorldView-2, tomada en noviembre del año 2011, para después comparar resultados, entre ésta, y los resultados obtenidos al aplicar las metodologías en la imagen SPOT-5, tomada en enero del 2012.
- Evaluar la exactitud de las clasificaciones, no supervisada y supervisada de la imagen SPOT-5 del año 2012.

5.7.1.- COMPARACIÓN CON DATOS DE PRECIPITACIÓN

Debido al medio geológico, en el que se encuentra el Parque Nacional Lagunas de Montebello, las características kársticas del suelo, la topografía de la zona y la complejidad del sistema hidrogeológico, que alimenta la zona, dificultan relacionar fenómenos naturales y antropogénicos que determine, el patrón de comportamiento del sistema lagunar. La Figura 5.22 muestra el Modelo Digital del Terreno (MDT) del área de estudio, con la finalidad de visualizar algunas de las características antes mencionadas, así como las elevaciones que rodean el sistema lacustre. Las lagunas están situadas en una especie de meseta, rodeadas al norte por la sierra, lo que

sugiere posibles aportaciones por escurrimiento (dependiendo del suelo); y el MDT da una idea de la dirección hacia donde las lagunas les es más fácil tener un incremento en su extensión superficial.

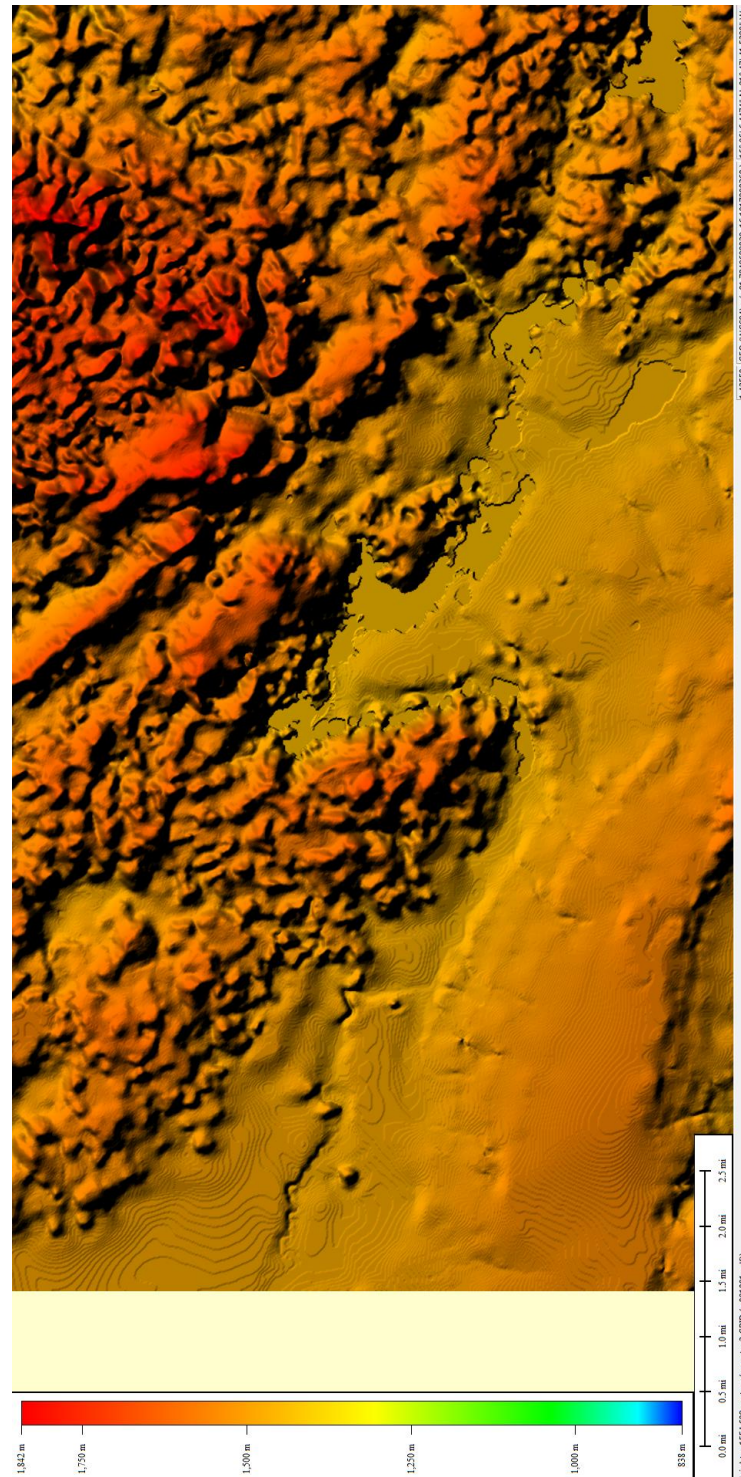


Figura 5.22.- Modelo Digital del Terreno de la zona de estudio.

En la Figura 5.23 se presentan los datos de precipitación diarios a lo largo de 22 años (1990-2012). Se observa un patrón de comportamiento anual, que puede ser asociado con el ciclo anual presente en la región, aunque existen variaciones producto de huracanes y tormentas tropicales que se presentan en el estado. La grafica de la Figura 5.24 muestra tres picos principales que corresponden a las frecuencias de 0.002747, 0.00824 y 0.1099 ciclo/día, que equivalen, en periodicidades de 364, 121 y 91 días, respectivamente (Figura 5.25) estableciendo el comportamiento típico promedio de la precipitación en la región.. Estos resultados indican que la primera frecuencia corresponde posiblemente al periodo anual, la segunda a un fenómeno de recurrencia de cuatro meses y la última de tres meses.

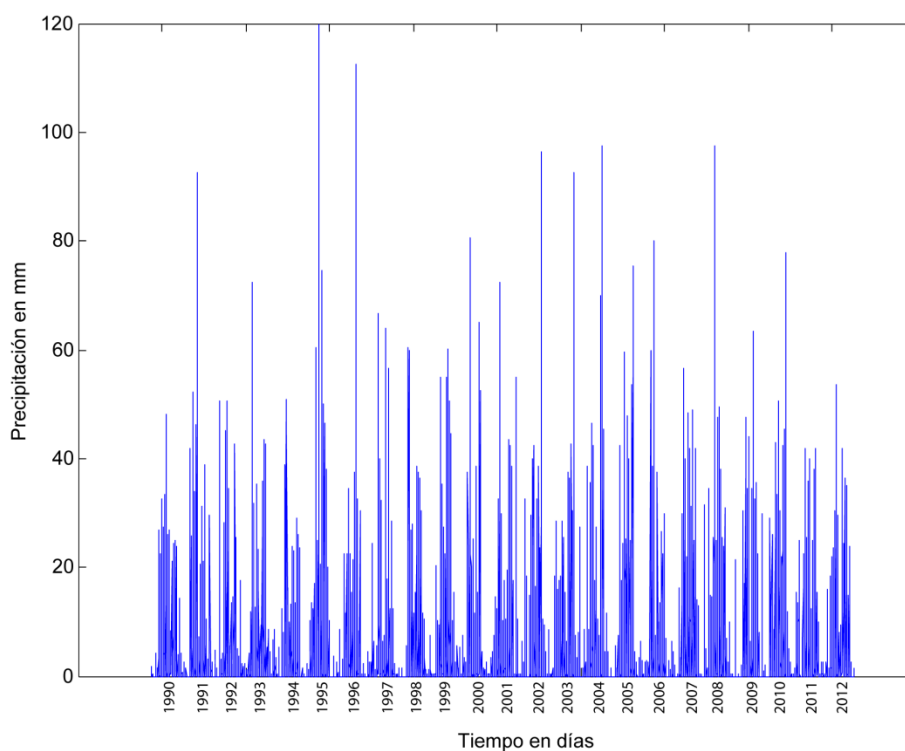


Figura 5.23.- Grafica de la serie de precipitación a lo largo de 22 años (1990 - 2012) con respecto al tiempo, de la estación meteorológica de Comitán (Proporcionada por el Dr. Tomás González Morán).

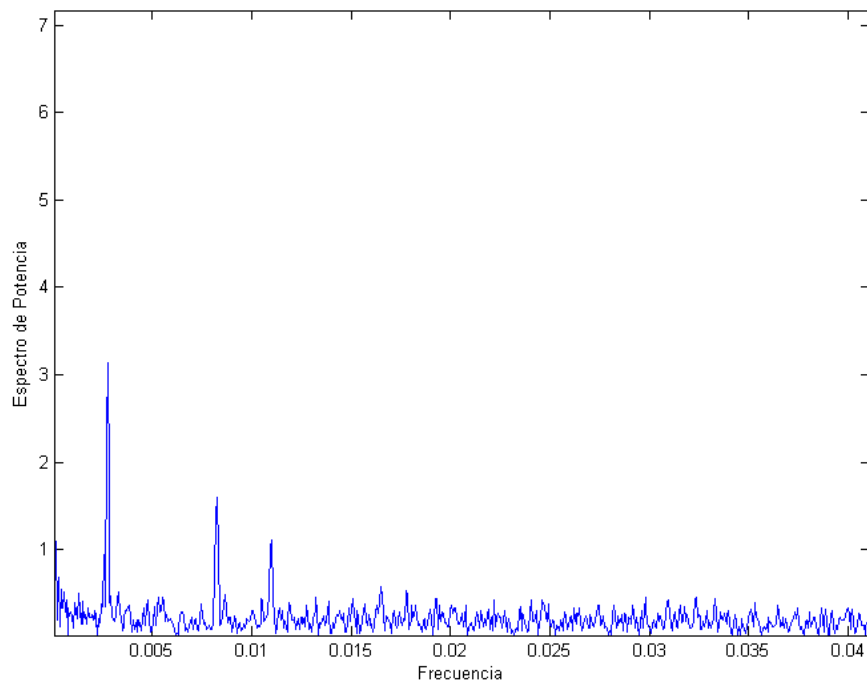


Figura 5.24.- Grafica de la serie de precipitación a lo largo de 22 años (1990 - 2012) con respecto al tiempo, de la estación meteorológica de Comitán Proporcionada por el Dr. Tomás González Morán.

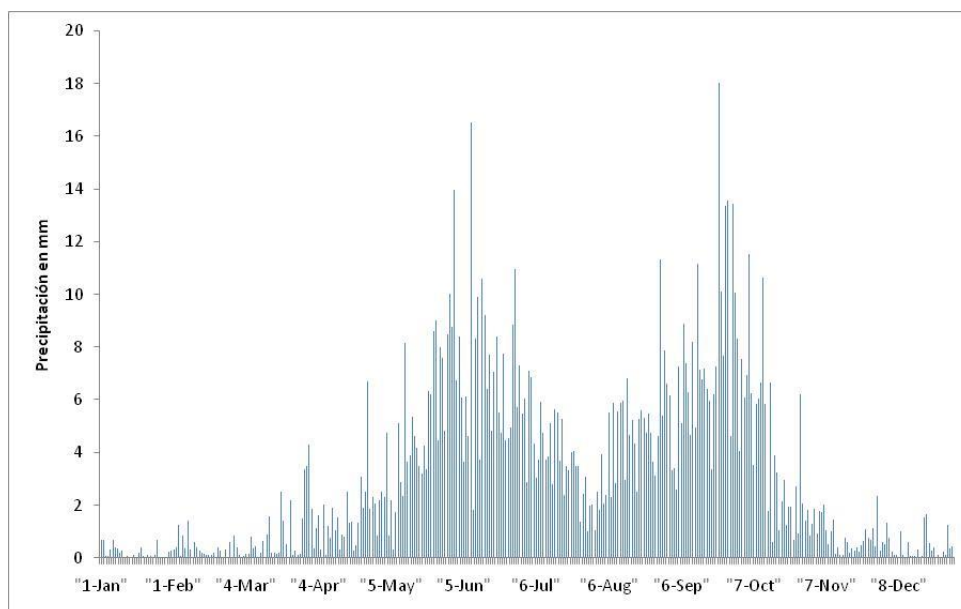


Figura 5.25.- Grafica anual de promedios diarios de la serie de precipitación a lo largo de 22 años (1990 – 2012), de la estación meteorológica de Comitán Proporcionada por el Dr. Tomás González Morán.

A continuación se hará una recopilación de los volúmenes anuales presentes en la zona, la Figura 5.26, muestra estos resultados. Se observa que el año 2010, tiene un pico con un volumen anual de 1454 mm, mientras que el 2000 presenta un volumen de 1144 mm al año, teniendo una posible relación con los resultados de la clasificación no supervisada ya que coincide que el 2010 es el año con mayor extensión de hectáreas de agua, empero, el año con mayor área cubierta de agua para el NDWI y la clasificación supervisada fue el 2000. Otro año importante en los resultados, fue el 2007, ya que presenta la menor superficie lacustre, en el estudio, en las tres diferentes metodologías. Sin embargo, en la gráfica de precipitación anual el 2006 fue el año con menor volumen anual de lluvia. Estos resultados infieren que posiblemente, no haya una correlación entre la cantidad de volumen de precipitación anual y el comportamiento de las lagunas de Montebello.

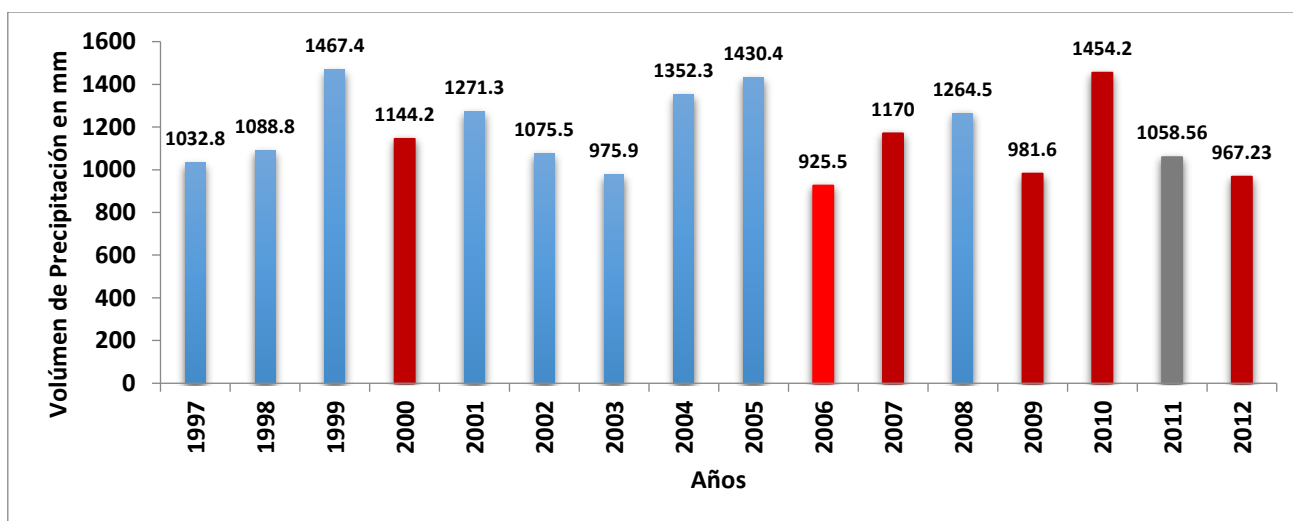


Figura 5.26.- Volúmenes anuales de precipitación, de la estación de Comitán de 1997 - 2012. Las barras de color rojo, representan los años en que se tienen las imágenes satelitales SPOT y la barra de color verde la WorldView-2.

5.7.2.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LAS IMÁGENES SPOT-5 Y WORLDVIEW-2

A lo largo del trabajo se utilizaron tres metodologías que fueron aplicadas a la imagen Worldview-2, del mes de noviembre del 2011, cuyos resultados se

compararon con los obtenidos con la imagen Spot 5, de enero del 2012. A pesar de ser tomada en diferente año, se encuentra ubicada en la misma temporada de estiaje, con sólo dos meses de diferencia.

En la tabla 5.20 para las imágenes antes mencionadas, se muestran las áreas calculadas, para cada metodología aplicada, en el presente estudio: NDWI, Clasificación No Supervisada y Supervisada. Los valores de la cubierta de agua, entre las imágenes SPOT-5 y WorldView-2 son parecidos especialmente las tratadas con el NDWI y la Clasificación No Supervisada. Sin embargo, la precisión alcanzada es menor, en la metodología de la Clasificación Supervisada.

En un contexto regional, se podría mencionar que las diferencias entre los valores de las imágenes SPOT-5 y WorldView-2, no son significativas y por tanto, es válido decir que las tres metodologías, son consistentes en sus resultados.

Tabla 5.20.- Áreas lacustres de las diferentes metodologías aplicadas a las imágenes SPOT-5 y WorldView-2.

	NDWI	Clasificación No Supervisada	Clasificación Supervisada
	km²	km²	km²
SPOT-5	5.3735	4.8208	5.3079
WorldView-2	5.1528	4.9665	4.8860

5.7.3.- EVALUACIÓN DE LA EXACTITUD EN LAS CLASIFICACIONES NO SUPERVISADA Y SUPERVISADA, DE LA IMAGEN SPOT-5 DEL AÑO 2012

La evaluación de la exactitud se aplicó para la imagen SPOT-5, del año 2012, con el objetivo de tener datos de referencia para establecer cuál de las dos clasificaciones (no supervisada y supervisada) proporciona resultados más exactos.

No se realizó este procedimiento, para el NDWI, ya que los valores que usa esta metodología, para definir si la cubierta es o no es agua, son diferentes.

Desafortunadamente, no se contó con ninguna imagen de referencia o puntos de control para realizar la evaluación de la exactitud. Se optó por tomar la imagen SPOT-5, del año 2012, sin procesar para extraer de ésta puntos que permitieran identificar zonas de agua o no agua y con base a estos datos de entrada tomados como referencia, llevar a cabo el proceso de la evaluación de la exactitud. A pesar de ser un proceso poco factible, los resultados permiten tener una idea de que metodología probablemente, sea mejor.

5.7.3.1.- CLASIFICACIÓN NO SUPERVISADA

Para llevar a cabo la evaluación de la exactitud se tomaron de referencia 400 puntos, donde 200 son agua y el resto no lo son. Congalton (1991) describe algunas técnicas para la evaluación de la exactitud, de las cuales se utilizaron la matriz de error, y la técnica de Kappa.

Los resultados de la matriz de error de la imagen de clasificación, no supervisada (Figura 5.27), registra que del total de puntos que se tomaron de cobertura de agua, como referencia, estableció sólo 191 puntos como agua y 9 que no los consideró, dentro de la clasificación; mientras que de los 200 tomados como cobertura diferente de agua, 199 puntos consideró no-agua y sólo un punto pertenece realmente a la clase de agua. La exactitud del productor, para la clase de agua y no agua, es de 95.5% y 99.50%, respectivamente; mientras que la exactitud del usuario es de 99.48% para la clase de agua y de 95.67%, para la de no agua.

En términos generales, la exactitud de esta metodología es de 97.5%, mientras que la exactitud calculada por la técnica de Kappa es de 95%, por lo que se puede decir, que la clasificación no supervisada es buena, infiriendo que los resultados que se obtuvieron son confiables.

```

ACCURACY TOTALS
-----
      Class Reference Classified Number Producers Users
      Name   Totals     Totals  Correct Accuracy Accuracy
-----
Class 0         0         0         0         ---     ---
Class 1        200        192        191        95.50%    99.48%
Class 2        200        208        199        99.50%    95.67%

Totals         400         400        390

Overall Classification Accuracy =    97.50%

----- End of Accuracy Totals -----

KAPPA (K^) STATISTICS
-----
Overall Kappa Statistics = 0.9500
Conditional Kappa for each Category.
-----
      Class Name           Kappa
-----
      Class 0             0.0000
      Class 1             0.9896
      Class 2             0.9135

```

Figura 5.27.- Matriz de error de la evaluación de la exactitud y resultados de la técnica de Kappa para la clasificación No Supervisada.

5.7.3.2.- CLASIFICACIÓN SUPERVISADA

La evaluación de la exactitud, en un contexto general, para esta clasificación fue de 97.75% (Figura 5.28). La exactitudes del productor fueron de 95.5% para la clase de agua y 100% para la clase de no agua, mientras que para la del usuario fueron de 100%, para la clase de agua y de 95.69%, para la de no agua. La matriz de error muestra que de los 200 puntos, que se tienen de referencia como agua, 191 si lo fueron y 9 realmente, eran no agua, mientras que los 200 puntos que se designaron como no agua, coincidieron en su totalidad.

La técnica de Kappa arroja un resultado de 95.5% de exactitud, por lo que se puede decir que esta metodología de clasificación supervisada también es confiable al igual, que la no supervisada.

```

ACCURACY TOTALS
-----
      Class Reference  Classified  Number  Producers  Users
      Name   Totals   Totals    Correct Accuracy Accuracy
-----
Class 0         0         0         0         ---         ---
Class 1        200        191        191        95.50%      100.00%
Class 2        200        209        200        100.00%      95.69%

      Totals         400         400        391

Overall Classification Accuracy = 97.75%

----- End of Accuracy Totals -----

KAPPA (K^ ) STATISTICS
-----
Overall Kappa Statistics = 0.9550
Conditional Kappa for each Category.
-----
      Class Name           Kappa
-----
      Class 0             0.0000
      Class 1             1.0000
      Class 2             0.9139

```

Figura 5.28.- Matriz de error de la evaluación de la exactitud y resultados de la técnica de Kappa para la clasificación Supervisada.

Basándose en los resultados de las evaluaciones de las exactitudes, ambas Clasificaciones son confiables.

CAPÍTULO VI

6.- CONCLUSIONES

Los resultados del presente estudio, permiten concluir que se han presentado cambios en los cuerpos lacustres a lo largo de 12 años (2000 - 2012), debido a las variaciones de extensión de agua superficial que presentaron.

La implementación de la técnica de PCA “mejorado” basado en el algoritmo “à trous”, permitió mejorar sustancialmente el nivel de realce (de 10m. a 2.5m.), en las imágenes SPOT-5, alcanzando uno similar a la resolución espacial de las imágenes multiespectrales WorldView-2. Esta metodología permite para un estudio regional, como el presente, alcanzar resultados aceptables a los de las imágenes WV-2, usando las imágenes multiespectrales y pancromáticas de las SPOT-5.

El empleo de las metodologías utilizadas por diferentes autores para la identificación y caracterización de cuerpos de agua (NDWI, Clasificación No Supervisada y Supervisada) permitieron obtener resultados, equivalentes y un patrón de comportamiento de fluctuaciones de extensión del sistema lacustre consistente.

Las tres metodologías utilizadas en el presente estudio, establecen que el año 2007, presenta menor cubierta lacustre, con respecto al resto de imágenes estudiadas, mientras que en el año 2010, presentan una tendencia a recuperarse, aunque no llega a alcanzar los niveles iniciales del año 2000.

El umbral seleccionado de acuerdo a criterios de McFeeters (1996) y Xu (2006) para la metodología del NDWI, resultó adecuado, sin embargo queda abierta la posibilidad de optimizarlo y adecuarlo a la zona de estudio, con la finalidad de obtener resultados más precisos.

Los índices diferenciales normalizados de agua utilizan la banda del infrarrojo cercano (NIR), debido a que la reflectancia entre las superficies de agua y las de tierra son

muy diferentes, especialmente en las bandas del infrarrojo. Esta banda permite interpretar de forma visual y rápida cuerpos de agua, ya que el agua absorbe en gran cantidad la radiación, al contrario de lo diferentes suelos y vegetación que la reflejan fuertemente, lo que permiten detectar con mayor claridad las diferentes coberturas.

La diferencia de la clasificación supervisada de la SPOT-5 del año 2012, resultó tener una diferencia de extensión de agua, de aproximadamente cincuenta hectáreas, con respecto a la WV-2, probablemente a la falta de conocimiento en campo del área de estudio, y por tanto a posibles errores en la determinación de clases de la metodología.

Dado al medio geológico, en que se ubica el sistema lagunar, así como a sus características topográficas e hidrogeológicas, el patrón de comportamiento reflejado del Sistema Lagunar de Montebello en la extensión del área cubierta de agua, posiblemente no está correlacionado con los aportes de agua subterránea, las temporadas y las cantidades de lluvia de la zona, sino al sistema cárstico en el que se encuentra el PNLM que causa un retraso en el aporte de agua a las lagunas.

Analizando una serie de tiempo de 22 años de aportes de precipitación de la estación meteorológica de Comitán, permitió establecer la existencia de un patrón estacional anual, y la obtención de las variaciones típicas anuales a lo largo del tiempo, con dos periodos bien establecidos de lluvias (abril – julio y agosto - noviembre). El espectro de amplitud permitió establecer la existencia de tres frecuencias fundamentales, a variaciones estacionales de la precipitación de la región (periodos de 364, 121 y 91 días) que posiblemente afecten el PNLM, particularmente en el área cubierta de agua, aunque no de manera inmediata.

De acuerdo a diferentes características (forma, tamaño, conectividades, ubicación geográfica) se definieron la existencia de tres sistemas diferentes en el área de estudio, para facilitar el análisis. De esta manera, el Sistema de San Lorenzo (SSL) es el que presenta mayor influencia a cambios superficiales y de agua regional con respecto del Sistema Bosque Azul y San José, probablemente por la influencia de prácticas agrícolas y

ganaderas en sus alrededores y variaciones en el régimen hidrológico por cambios en la cubierta vegetal.

REFERENCIAS

- ANDERSON, J. R., 1977, Land use and land cover changes. A framework for monitoring. *Journal of Research by the Geological Survey*, 5, 143-153.
- BUKATA, R. P., JEROME, J. H., KONDRATYEV, K. Y., and POZDNYAKOV, D. V., 1995, *Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters*. CRC Press, USA, pp. 32-34,65-66,117-122.
- CAMPBELL, J. B., 2011, *Introduction to Remote Sensing*. Editorial The Guilford Press., Quinta Edición, pp. 3 – 53.
- CARPER, W. J., LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., 1990, The use of intensity-hue-saturation transformations for merging SPOT panchromatic and multispectral image data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 459-467.
- CentroGEO visita al sitio 17-02-2014, (<http://www.geowebrum.org/0contenidos/cursos/percepcion/012.html>).
- CFE (Comisión Federal de Electricidad), 2012, *Estudio para conocer la calidad del agua de las lagunas de Montebello, Chiapas. Informe de la primera etapa: Diagnóstico*.
- CHAVEZ, P. S., 1996, Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62, 1025 – 1036.
- CHUVIECO, E., 2002, *Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio*. Editorial Ariel, S.A., Primera Edición, pp. 17 – 83, 256 – 259, 267, 292, 376.
- CONANP, 2007, *Programa de Conservación y Manejo Parque Nacional Lagunas de Montebello*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, ECOSUR. 194 páginas.

- CONGALTON, R. G., 1991, A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environmental*, 37, 35 – 46.
- CONGALTON, R. G., and PLOURDE, L., 2002, Quality assurance and accuracy assessment of information derived from remotely sensed data. In *Manual of Geospatial Science and Technology*, edited by J. Bossler (London: Taylor & Francis), pp. 349 – 361.
- COPPIN, P. R., and BAUER, M. E., 1996, Digital change detection in forest ecosystems with remote sensing imagery. *Remote Sensing Reviews*, 13, 207 – 234.
- DEER, P. J., 1995, Digital change detection techniques: civilian and military applications. *International Symposium on Spectral Sensing Research 1995 Report (Green belt, MD: Goddard Space Flight Center)*, <http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/ISSSR-95/digitalc.htm>.
- DigitalGlobe visita al sitio 27-06-2014, (<http://www.digitalglobe.com>).
- DOF (Diario Oficial de la Federación), 16 de Diciembre de 1959.
- ESCOLERO, O., 2013, Estudio Hidrológico y de Calidad del Agua del Sistema Lagunar de Montebello, Chis., del Fondo Sectorial CONAGUA-CONACyT (167603).
- EUROPEAN COMMISSION, 1998, *Remote Sensing of Mediterranean Desertification and Environmental Changes (Resmedes)* (Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities).
- FENG, M., SEXTON, O. J., CHANNAN, S., and TOWNSHEND, J. R., 2016, A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: first result of a topographic-spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 9:2, 113-133.

- FEYISA, L. G., MEILBY, H., FENSHOLT, R., and PROUD, S. R., 2014, Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 140, 23-35.
- GeoSoluciones, 2014, Manual de PCI Geomática V10, Cortesía de GeoSoluciones, Sitioweb: www.geosoluciones.cl/documentos/PCI-Geomatica/Manual_PCI_Geomatica10.pdf
- GONZÁLEZ-AUDÍCANA, M., SALETA, J. L., CATALÁN, R. G. and GARCÍA R., 2004, Fusion of Multispectral and Panchromatic Images Using Improved IHS and PCA Mergers Based on Wavelet Decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42:6, 1291 – 1299, DOI: 10.1109/TGRS.2004.825593.
- GONZÁLEZ-AUDÍCANA, M., OTAZU, X., FORS. O. and SECO, A., 2005, Comparison between Mallat's and the 'a trous' discrete wavelet transform based algorithms for the fusion of multispectral and panchromatic images. *International Journal of Remote Sensing*, 26:3, 595 – 614, DOI: 10.1080/01431160512331314056.
- INGRAM, K., KNAPP, E., and ROBINSON, J., W., 1981, Change detection technique development for improved urbanized area delineation. Technical memorandum CSCITM-81/6087, Computer Sciences Corporation, Silver Springs, Maryland, U.S.A.
- JENSEN, J. R., 1996, *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. Segunda Edición, Prentice Hall series in geographic information science, pp. 172.
- JENSEN, J. R., COWEN, D., NARUMALANI, S., and HALLS, J., 1997, Principles of change detection using digital remote sensor data. In *Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing*, edited by J. L. Star, J. E. Estes, and K. C. McGwire (Cambridge: Cambridge University Press), pp. 37–54.

-
- JI, L., ZHANG, L. and WYLIE, B., 2009, Analysis of Dynamic Thresholds for the Normalized Difference Water Index. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75, 1307–1317.
- KIRK, J. T.O., 1994, *Light and Photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 14-24.
- LENCINAS, J., y MOHR-BELL, D., 2007, Estimación de clases de edad de las plantaciones de la provincia de Corrientes, Argentina, con base en datos satelitales Landsat. *Bosque*, 28:2, 106 - 118.
- LU, D. S., MAUSEL, P., BRONDÍZIO, E. S., and MORAN, E., 2004, Change detection techniques. *International Journal of RemoteSensing*, 25:12, 2365–2407.
- LU, S., WU, B., YAN, N., and WANG, H., 2011, Water body mapping method with HJ-1A/B satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 428-434.
- MACLEOD, R. D., and CONGALTON, R. G., 1998, A quantitative comparison of change detection algorithms for monitoring eel grass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64, 207–216.
- MAS, J. F., 1999, Monitoring land-cover changes: a comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20:1, 139–152.
- MCFEETERS, S.K., 1996, The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1425–1432.

- MELO, G. C. y J. CERVANTES, 1986, Propuestas para el programa integral de manejo y desarrollo del Parque Nacional Lagunas de Montebello. Instituto de Geografía, Boletín No. 16. Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
- MOUAT, D. A., MAHIN, G. C., and LANCASTER, J., 1993, Remote sensing techniques in the analysis of change detection. *Geocarto International*, 2, 39–50.
- NELSON, R. F., 1983, Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, 1303–1314.
- NUÑEZ, J., OTAZU, X., FORS, O., PRADES, A., PALÀ, V. and ROMÀN ARBIOL, 1999, Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 37, 1204–1211.
- PRIEUR, L., and SATHYENDRANATH, S., 1981, An Optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnology Oceanography*, 26, 671-689.
- RAMÍREZ, T. A., 2009, Estudio Etnomicológico Comparativo entre dos Comunidades Aledañas al Parque Nacional Lagunas de Montebello, Chiapas. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D. F.
- RAJENDRAN, V., VARGHESE, D., ANNADURAI, S., VAITHIYANATHAN, V. and THAMOTHARAN, B., 2012, A case study on satellite image fusion techniques. *Research Journal of Information Technology*, 4:2, 71 – 78.
- ROKNI, K., AHMAD, A., SOLAIMANI, K., and HAZINI, S., 2015, A new approach for surface water change detection: Integration of pixel level image fusion and image classification techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 226-234.

- SCHEFFER, M., 1997, *Ecology of Shallow Lakes*. Chapman and Hall.
- SCHOWENGERDT, R. A., 1980, Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 1325-1334.
- SERPICO, S. B., and BRUZZONE, L., 1999, Change detection. In *Information Processing for Remote Sensing*, edited by C. H. Chen (Singapore: World Scientific Publishing), pp. 319–336.
- SHEPARD, J. R., 1964, A concept of change detection. *Photogrammetric Engineering*, 30, 648 – 651.
- SINGH, A., 1984, Tropical forest monitoring using digital Landsat data in northeastern India. Ph.D. thesis, University of Reading, Reading, England.
- SINGH, A., 1989, Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 989 – 1003.
- SOMMER, S., HILL, J., and MÉGIER, J., 1998, The potential of remote sensing for monitoring rural land use change and their effects on soil conditions. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 67, 197–209.
- STOW, D. A., TINNEY, L. R., and ESTES, J. E., 1980, Deriving land use/ land cover change statistics from Landsat: a study of prime agriculture land. *Proceedings of the 14th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Vol. 2* (Environmental Institute of Michigan), San Jose , Costa Rica, 23± 30 April 1980, pp. 1227± 1237.
- VÁSQUEZ, M. A. Y E. MÉNDEZ, 1994, Aspectos generales de la región: Lagos de Montebello. Reporte del trabajo para el curso de conservación de naturaleza y

recursos naturales, Maestría en Ciencias: Recursos Naturales y Desarrollo Rural, ECOSUR. San Cristóbal de las Casas, Chiapas, México. 109 páginas.

VisionGeo visita al sitio 27-06-2014,

(http://www.visiongeo.com/Documents/BENEWV2_web.pdf)

XU, H., 2006, Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 3025–3033.

YOCKY, D. A., 1995, Image merging and data fusion by means of the discrete two-dimensional wavelet transform. *Journal of the Optical Society of America*. 12, 1834:1841.

YUAN, D., ELVIDGE, C. D., and LUNETTA, R. S., 1998, Survey of multispectral methods for land cover change analysis. In *Remote Sensing Change Detection: Environmental Monitoring Methods and Applications*, edited by R. S. Lunetta and C. D. Elvidge (Chelsea, MI: Ann Arbor Press), pp. 21–39.

Zhou, X., Jancsó, T., Chen, C. and Wojtaszek, V. M., 2012, Urban Land Cover Mapping Based on Object Oriented Classification Using WorldView 2 Satellite Remote Sensing Images. *International Scientific Conference on Sustainable Development and Ecological Footprint*, 1-10.

ANEXO

Figura A.1.- NDWI del año 2000 ^a.Figura A.2.- NDWI del año 2006 ^b.Figura A.3.- NDWI del año 2007 ^b.Figura A.4.- NDWI del año 2009 ^b.

^a Imagen SPOT-4 © CNES 2000 – Distribución Astrium Services / Spot Image S.A.

^b ©CNES 2013, Producido por Centro Geo, bajo licencia de SPOT IMAGE.

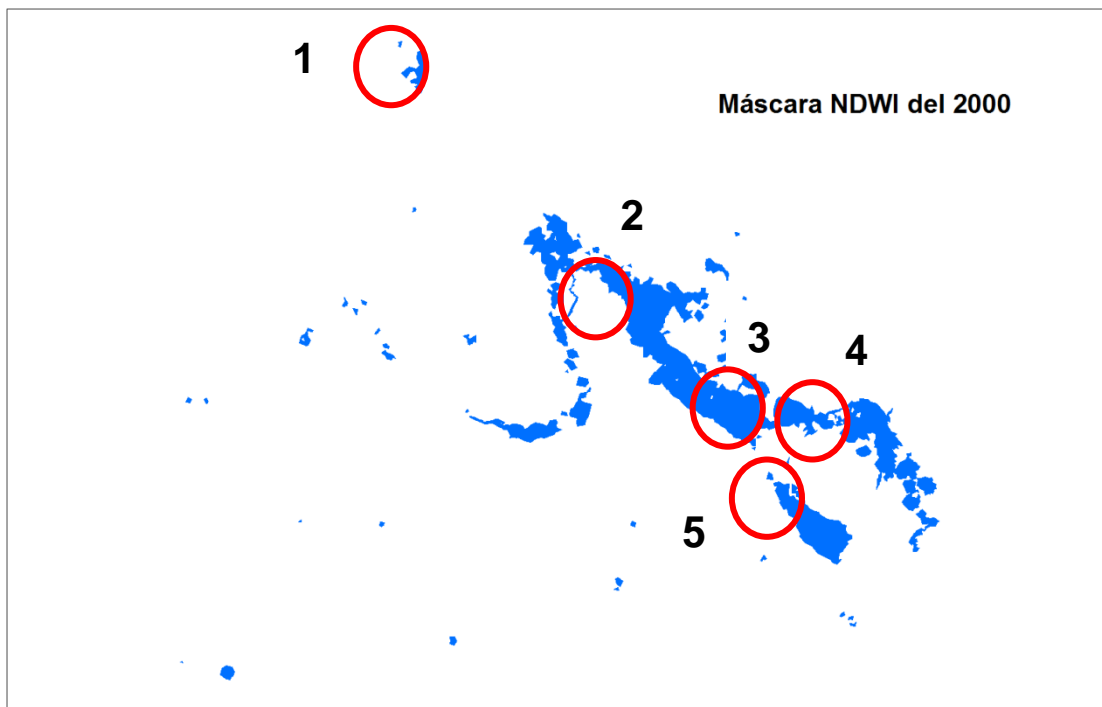
Figura A.5.- NDWI del año 2010 ^b.Figura A.6.- NDWI del año 2012 ^b.

Figura A.7.- Máscara del NDWI del año 2000 con una extensión total de área de 6.6587 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

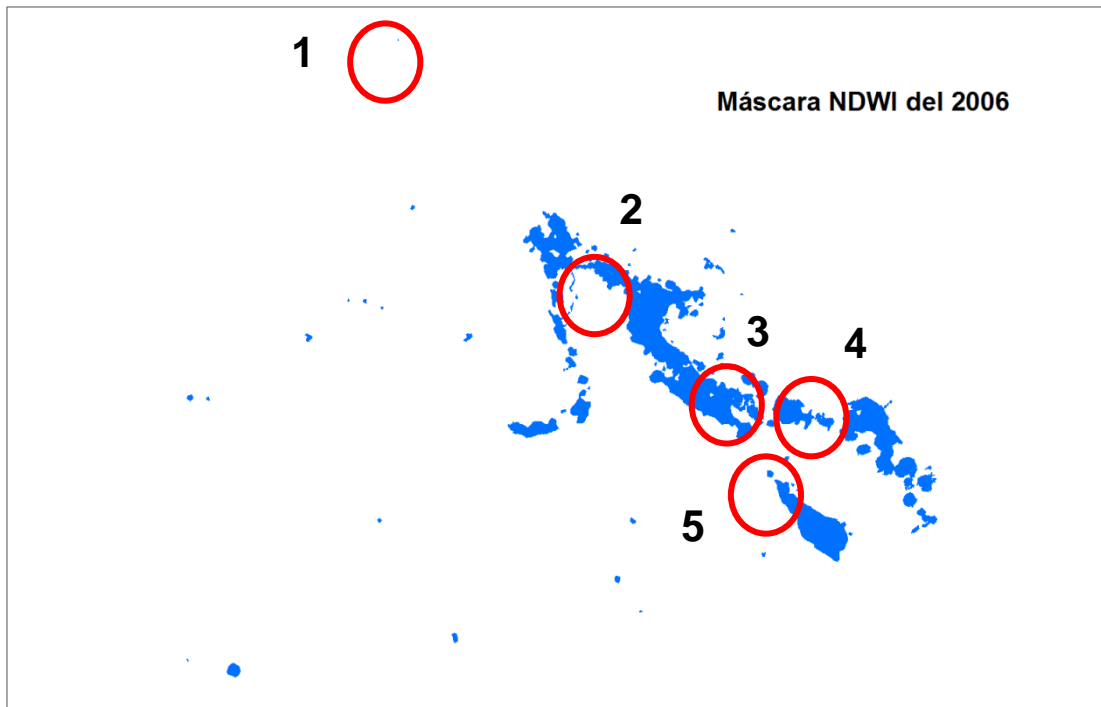


Figura A.8.- Máscara del NDWI del año 2006 con una extensión total de área de 5.3703 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

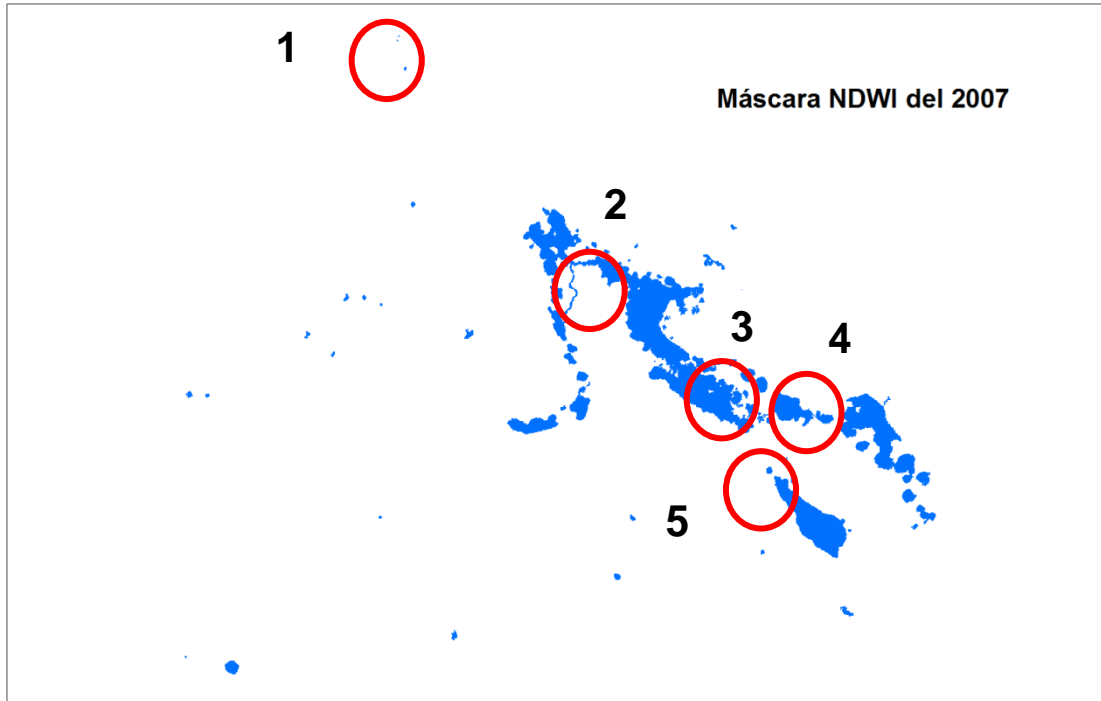


Figura A.9.- Máscara del NDWI del año 2007 con una extensión total de área de 4.9632 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

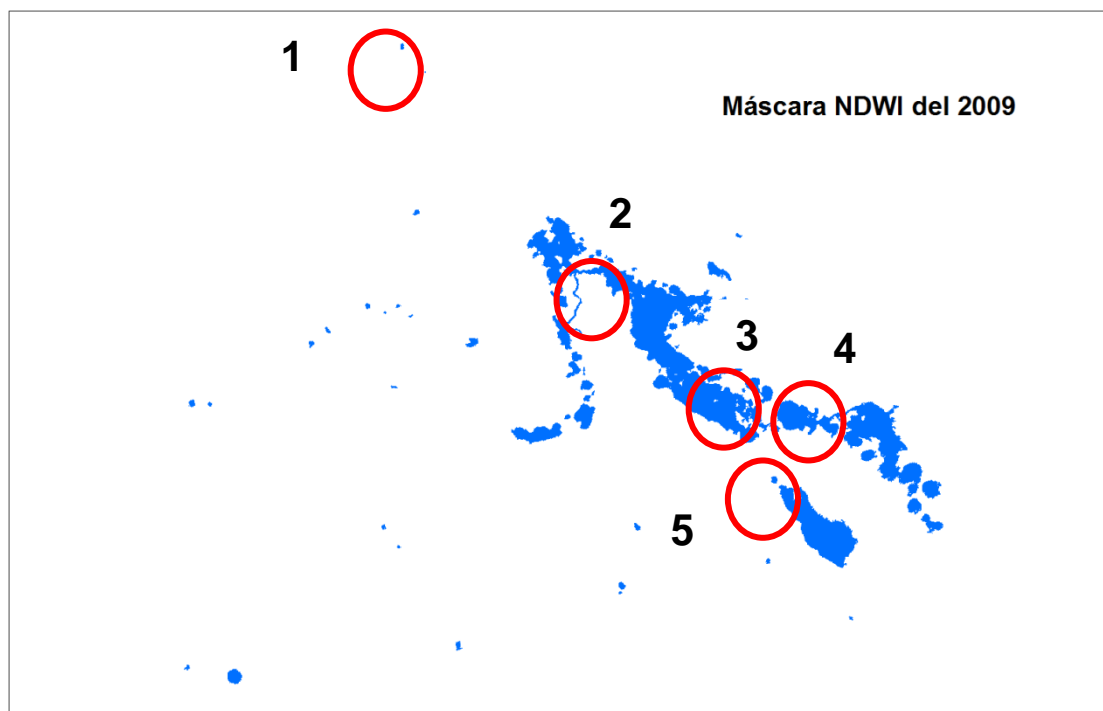


Figura A.10.- Máscara del NDWI del año 2009 con una extensión total de área de 5.6044 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

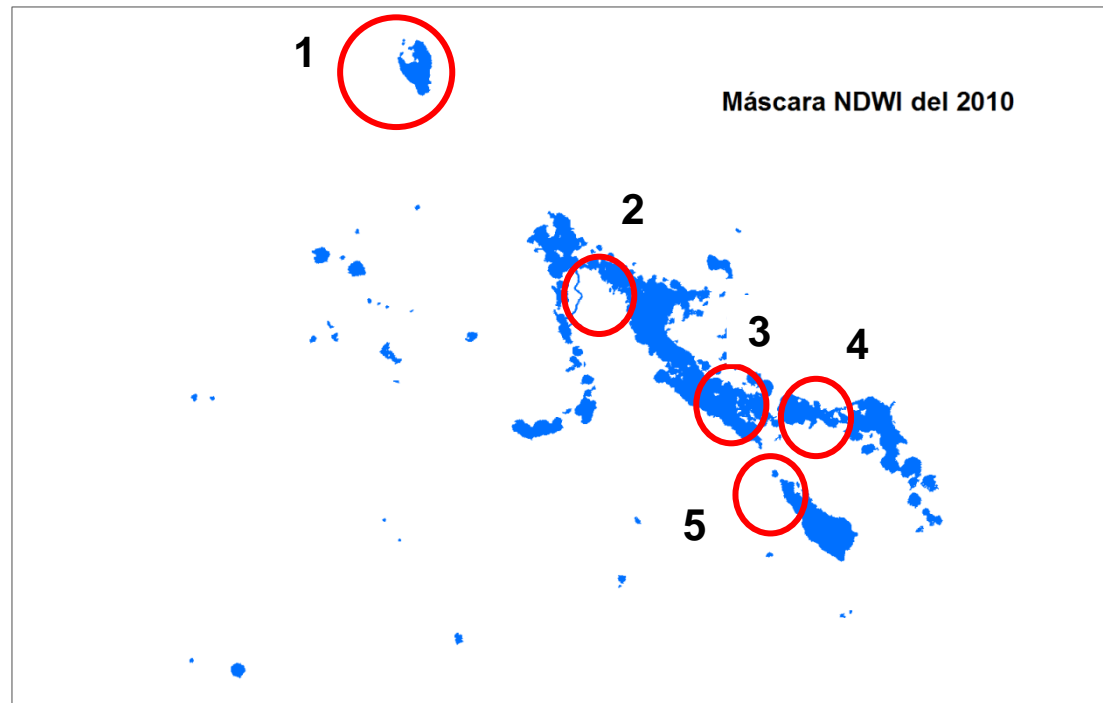


Figura A.11.- Máscara del NDWI del año 2010 con una extensión total de área de 6.2778 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

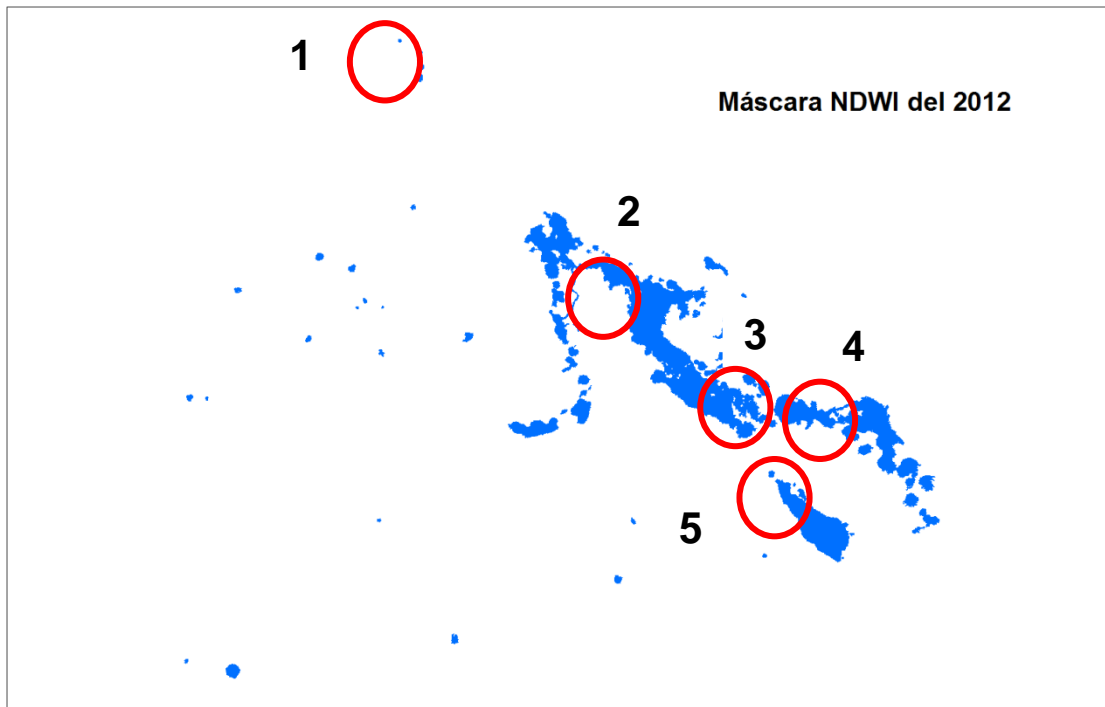


Figura A.12.- Máscara del NDWI del año 2012 con una extensión total de área de 5.5458 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

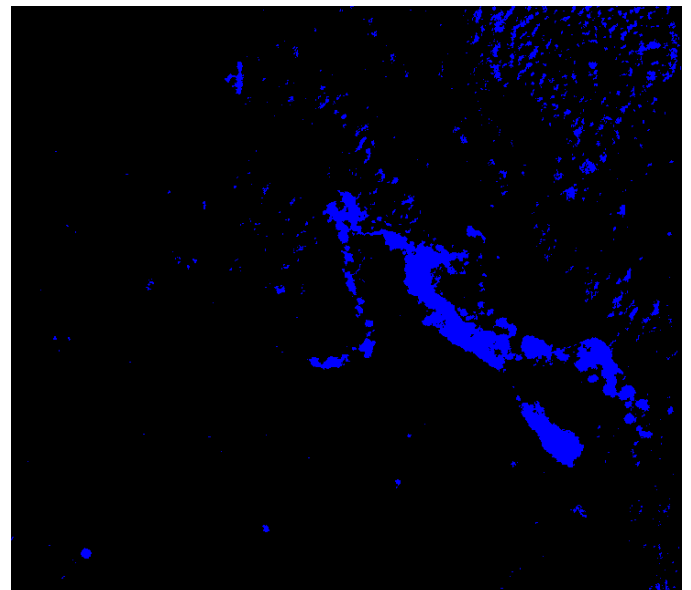
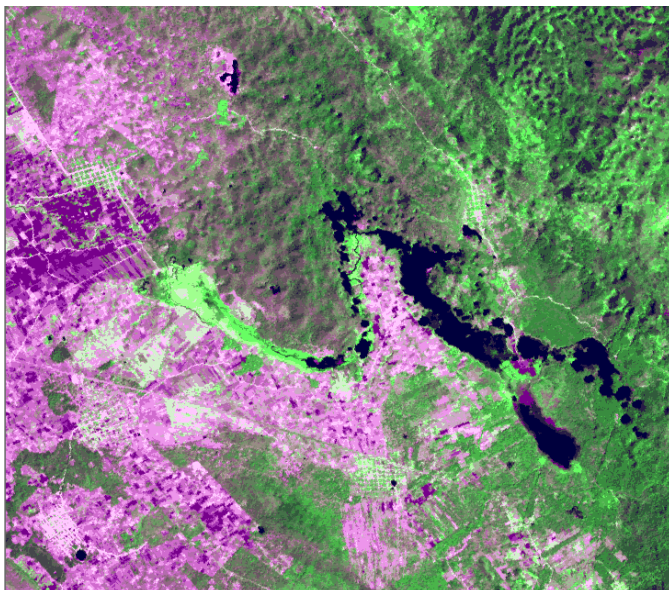


Figura A.13.- Clasificación No Supervisada del año 2000 ^a.

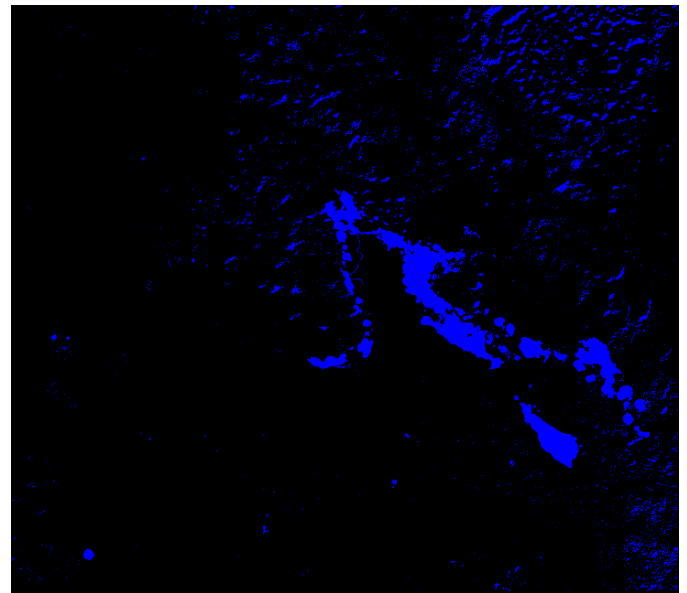
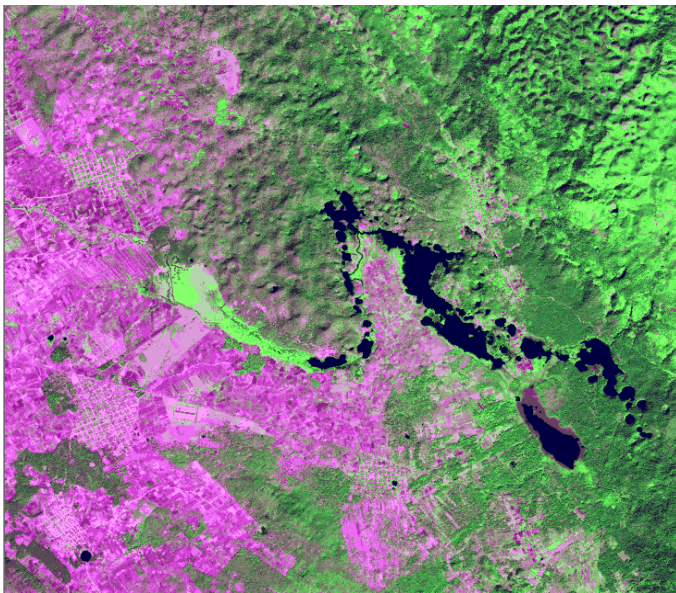


Figura A.14.- Clasificación No Supervisada del año 2006 ^b.

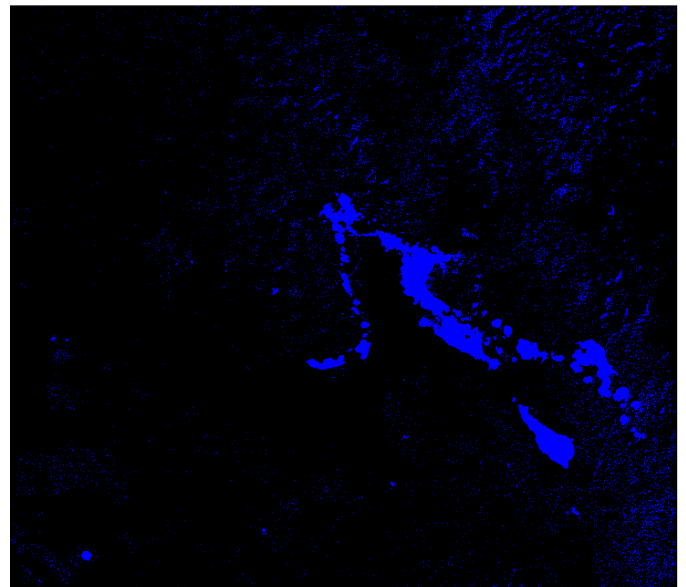
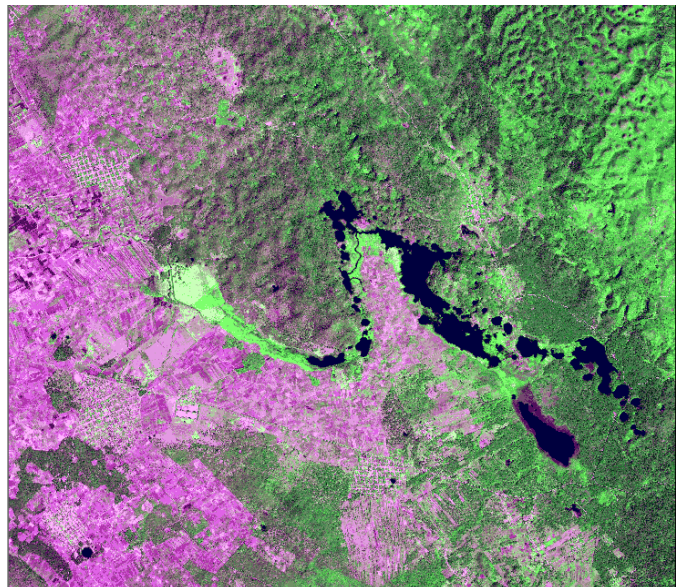


Figura A.15.- Clasificación No Supervisada del año 2007 ^b.

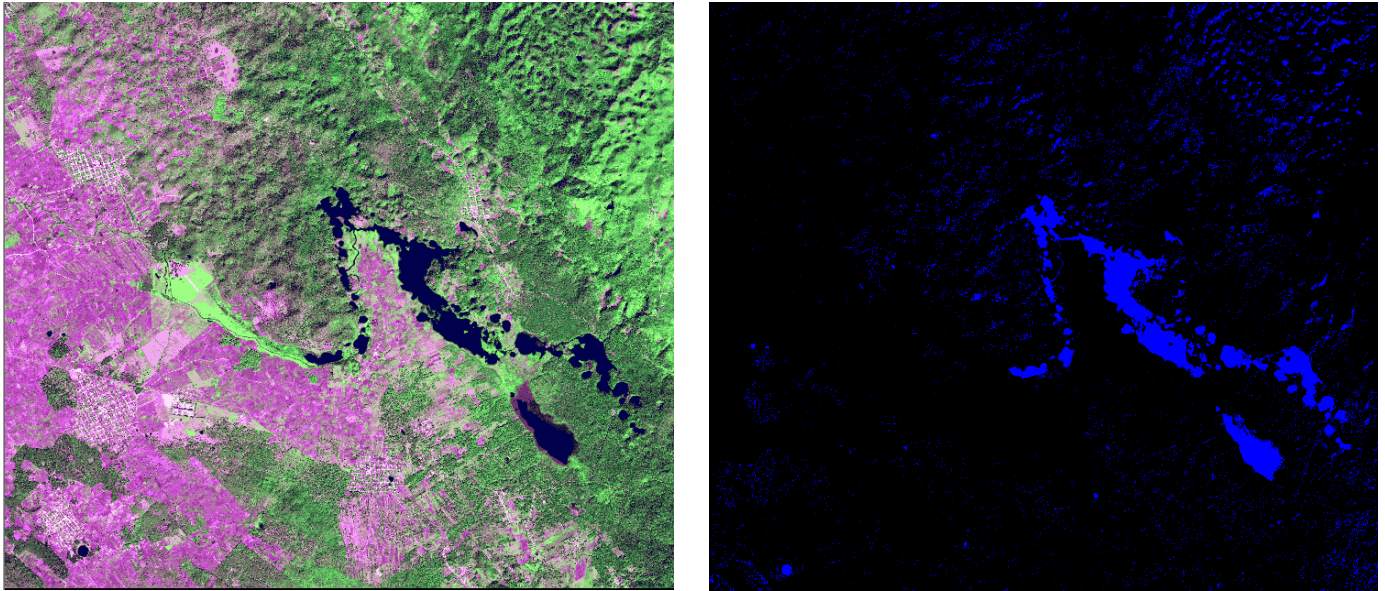


Figura A.16.- Clasificación No Supervisada del año 2009 ^b.

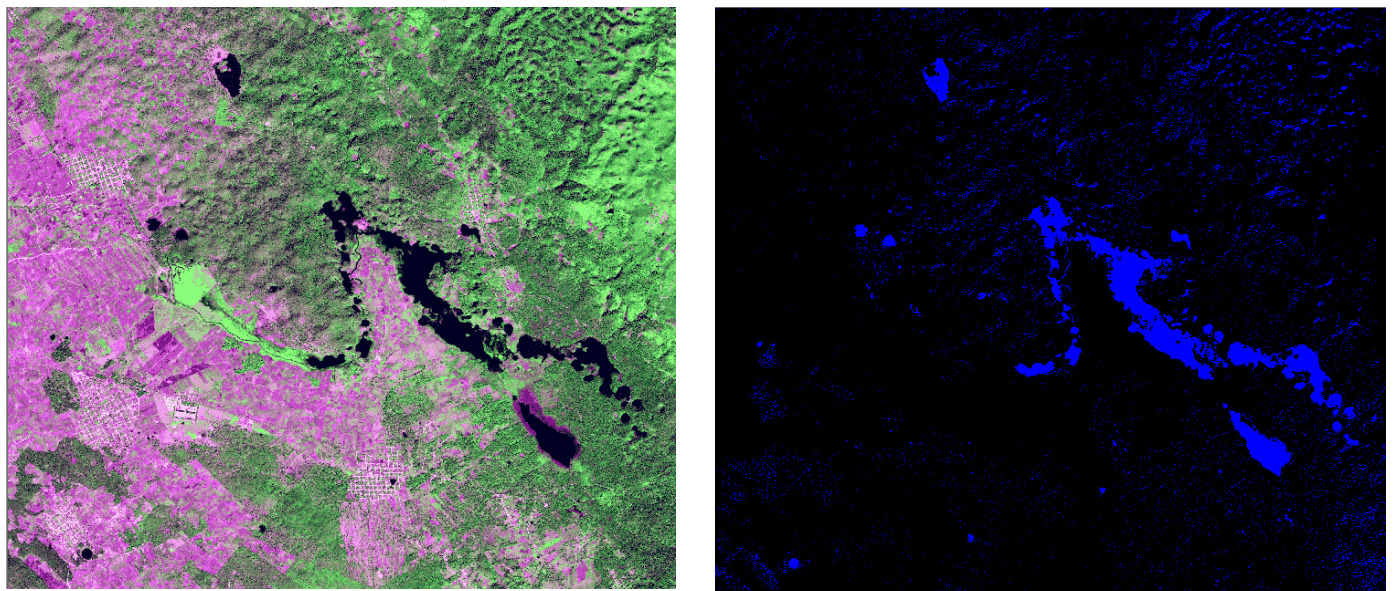


Figura A.17.- Clasificación No Supervisada del año 2010 ^b.

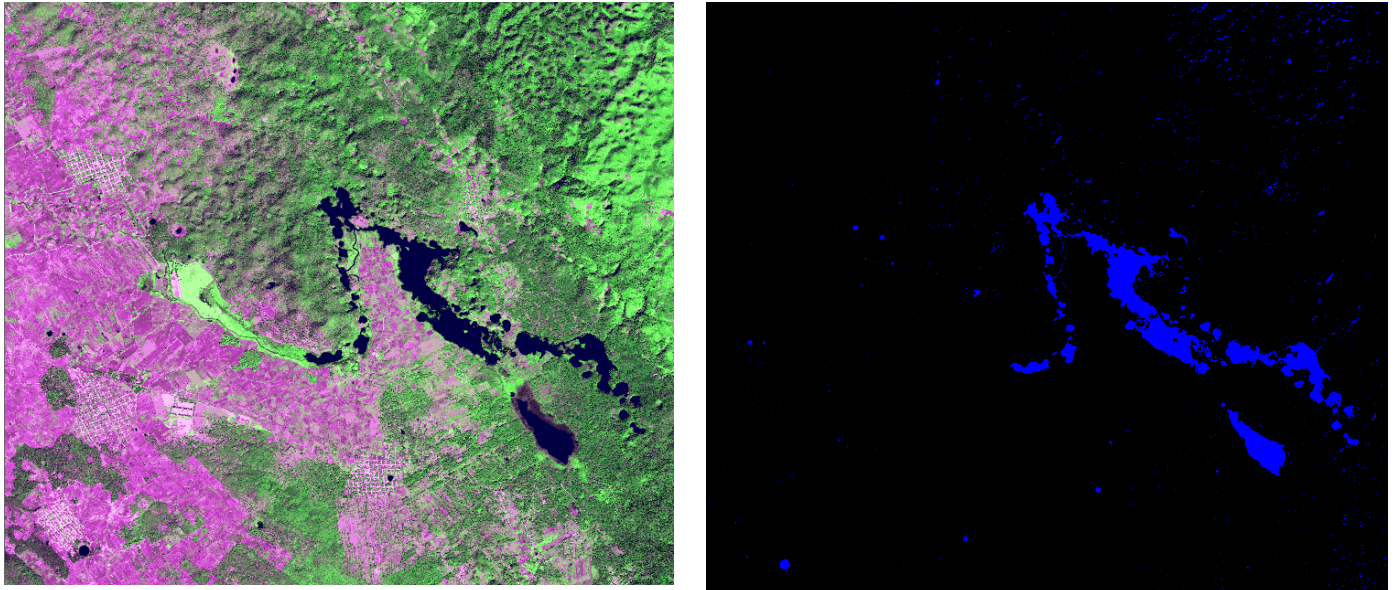


Figura A.18.- Clasificación No Supervisada del año 2012^b.

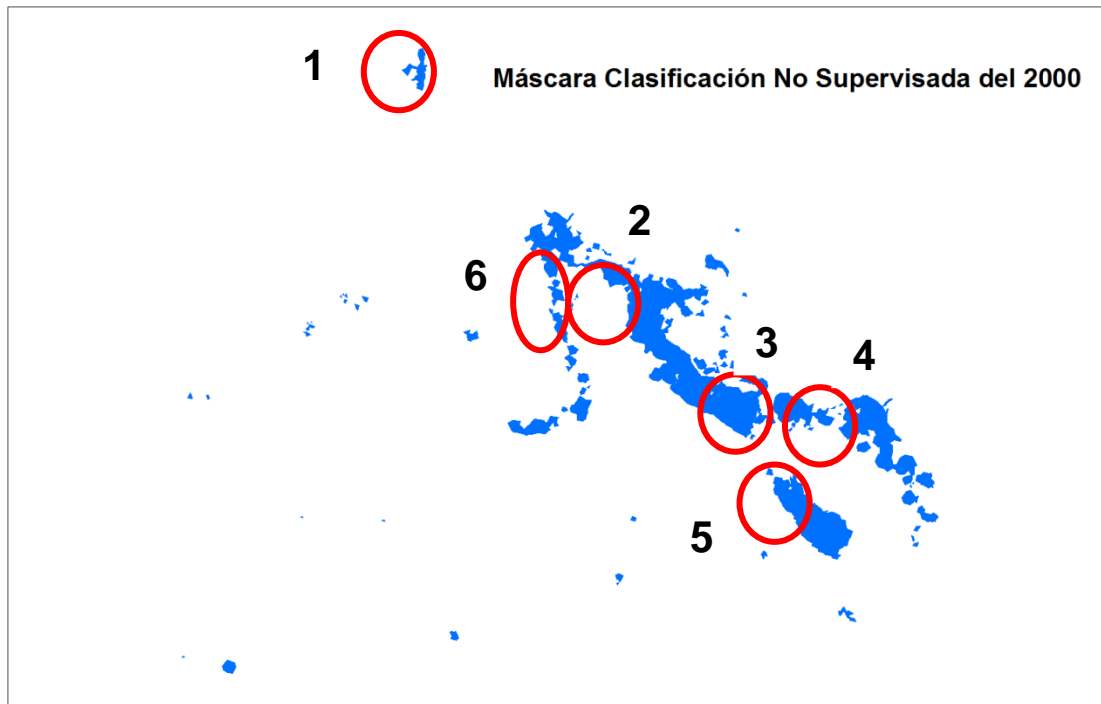


Figura A.19.- Máscara de la clasificación no supervisada del año 2000 con una extensión total de área de 6.1380 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

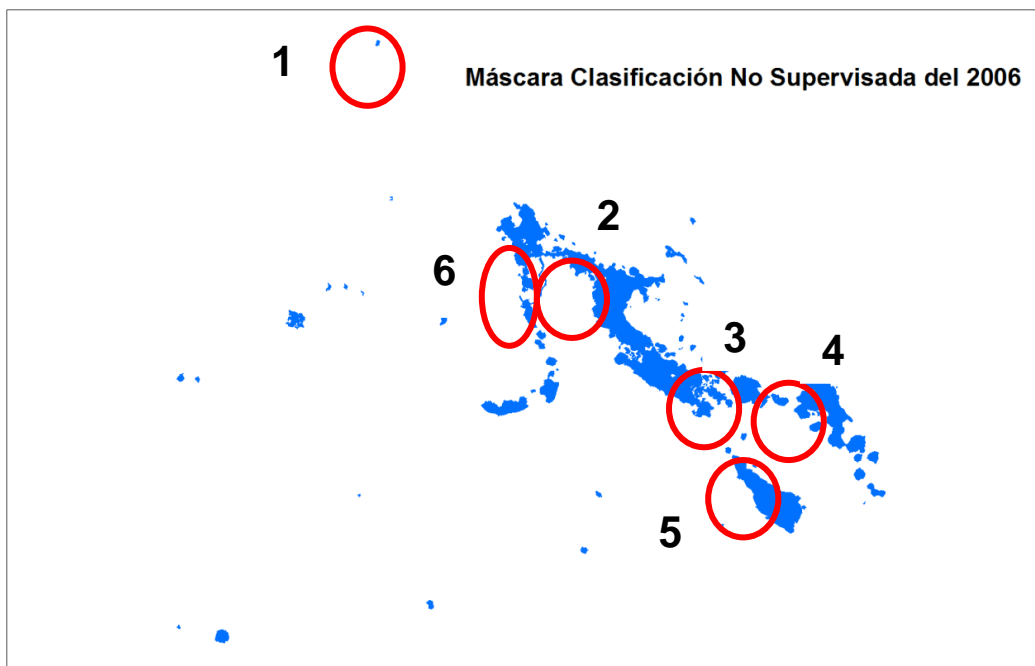


Figura A.20.- Máscara de la clasificación no supervisada del año 2006 con una extensión total de área de 5.3012 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

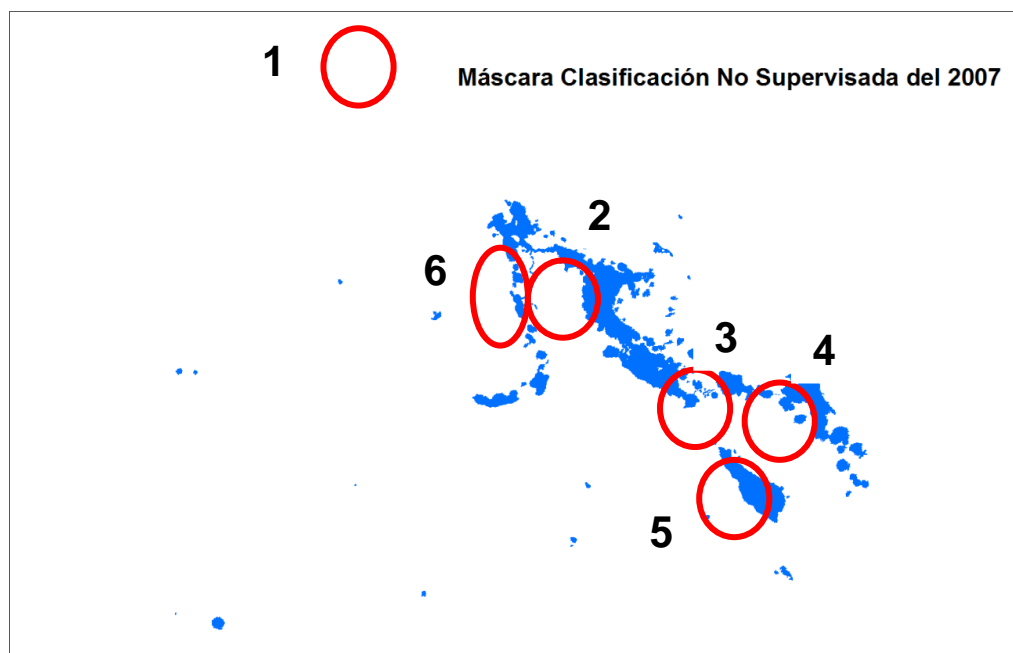


Figura A.21.- Máscara de la clasificación no supervisada del año 2007 con una extensión total de área de 4.8969 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

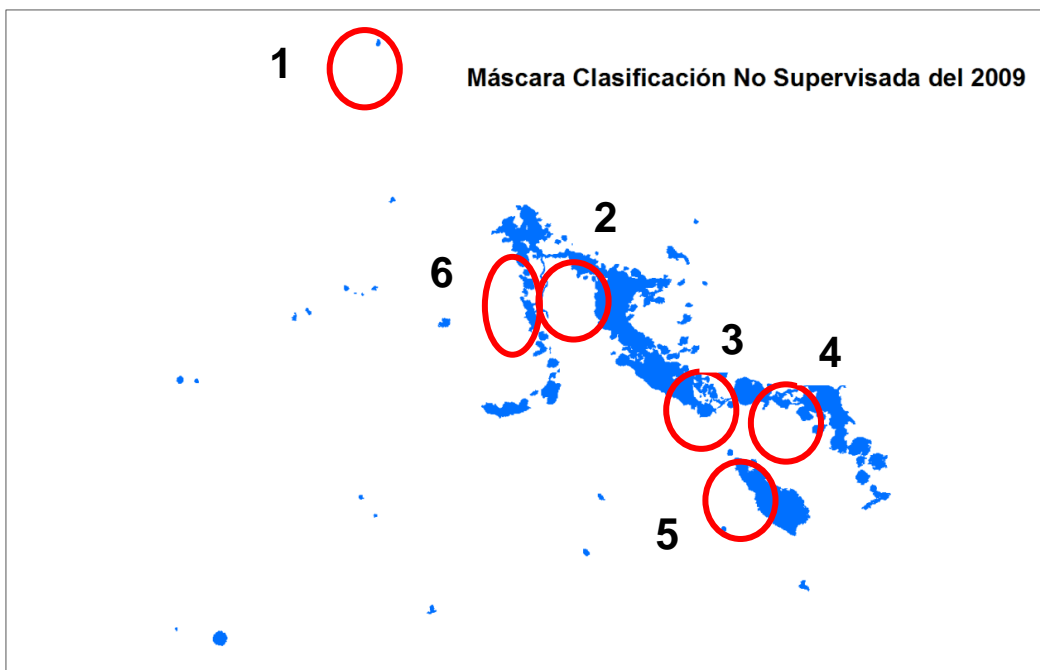


Figura A.22.- Máscara de la clasificación no supervisada del año 2009 con una extensión total de área de 5.3493 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

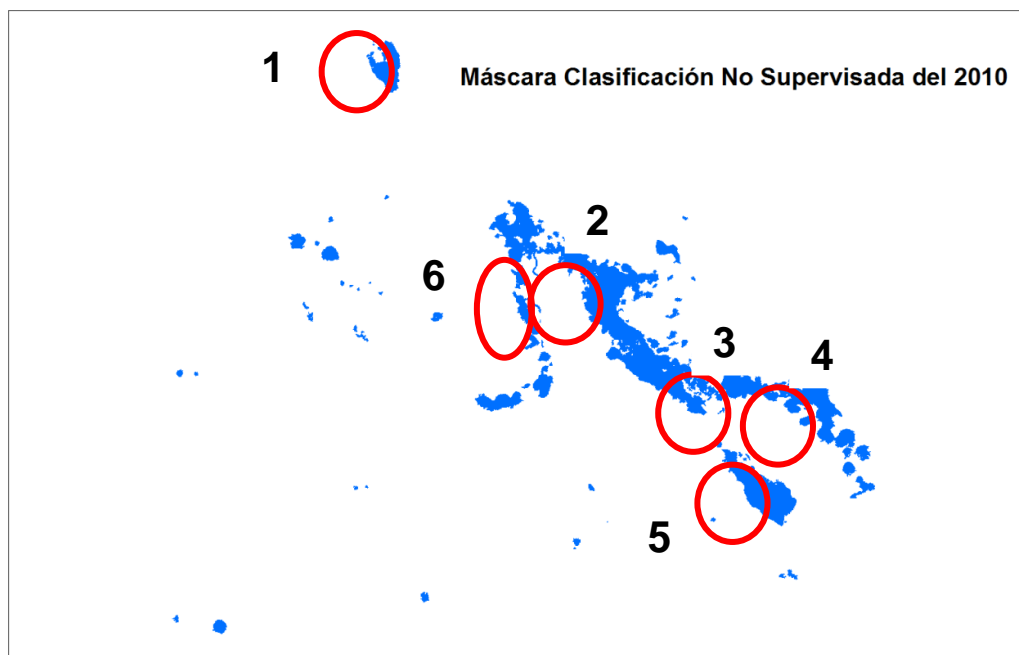


Figura A.23.- Máscara de la clasificación no supervisada del año 2010 con una extensión total de área de 6.1544 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

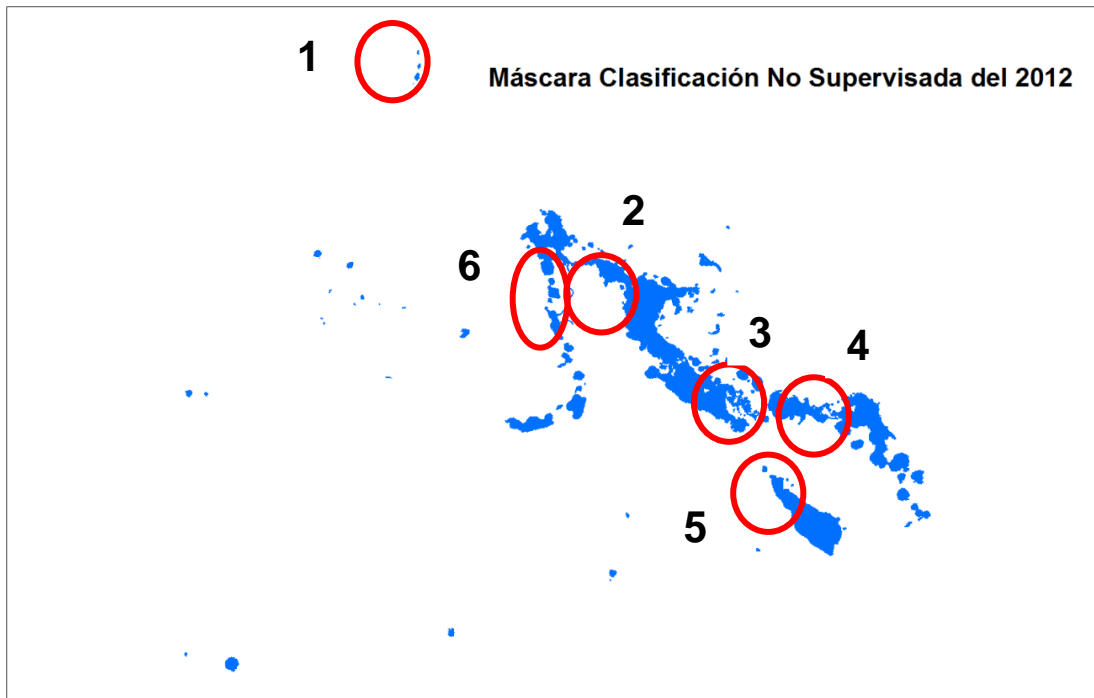


Figura A.24.- Máscara de la clasificación no supervisada del año 2012 con una extensión total de área de 4.9576 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

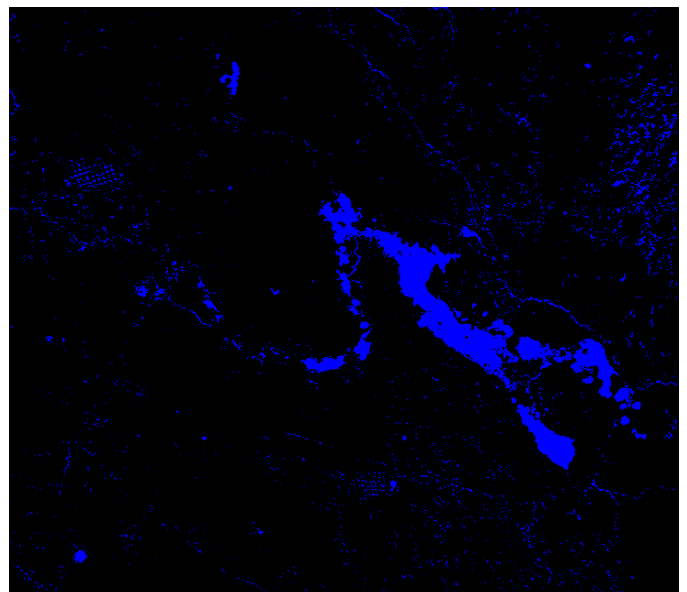
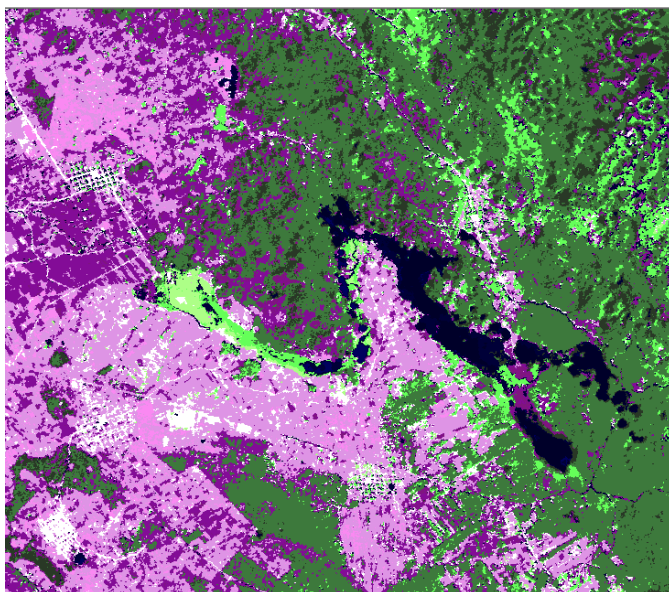


Figura A.25.- Clasificación Supervisada del año 2000 ^a.

^a Imagen SPOT-4 © CNES 2000 – Distribución Astrium Services / Spot Image S.A.

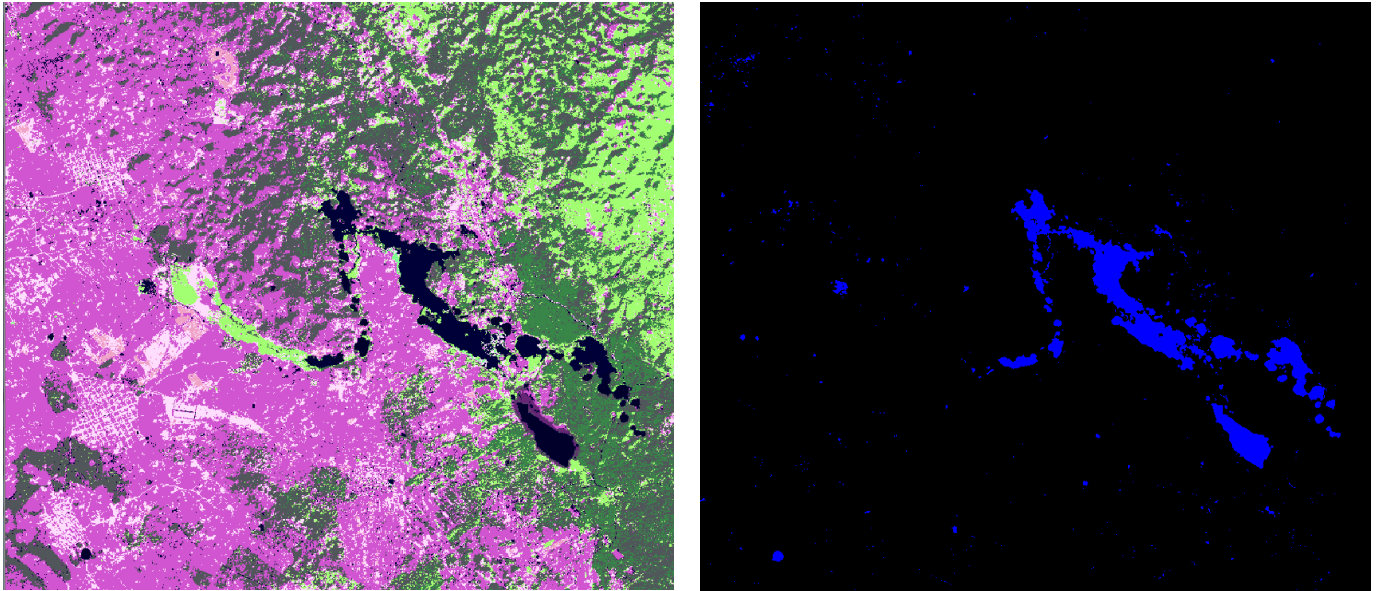


Figura 26.- Clasificación Supervisada del año 2006 ^b.

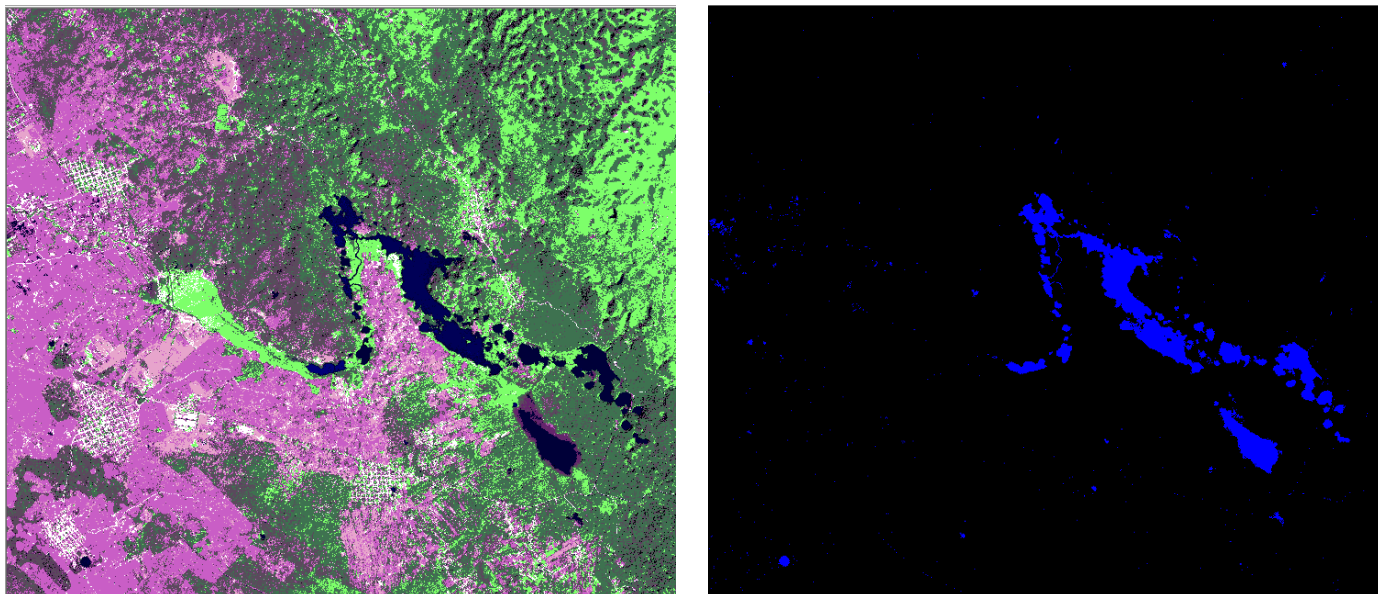


Figura A.27.- Clasificación Supervisada del año 2007 ^b.

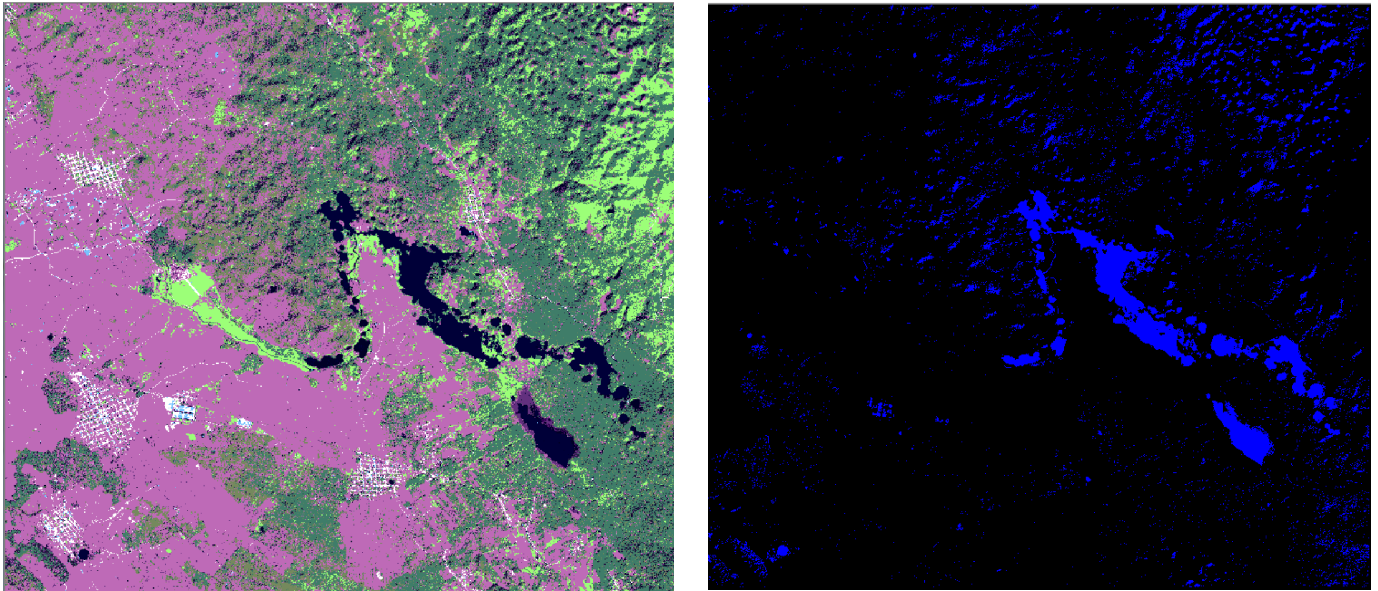


Figura A.28.- Clasificación Supervisada del año 2009 ^b.

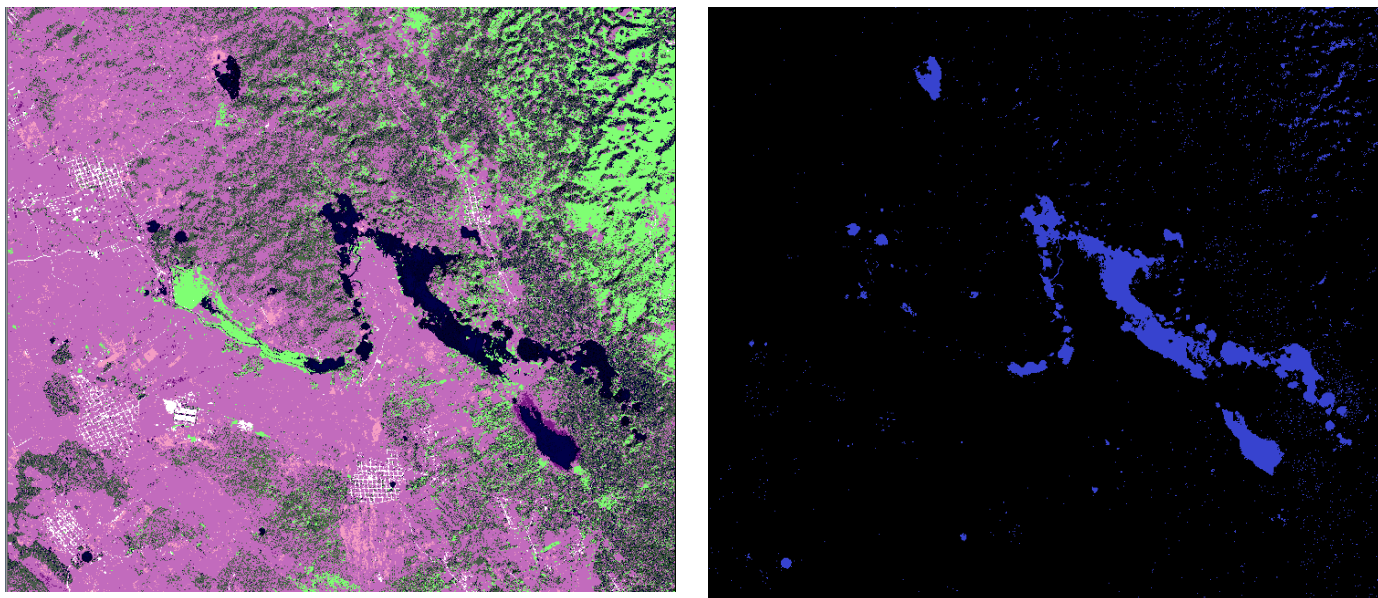


Figura A.29.- Clasificación Supervisada del año 2010 ^b.

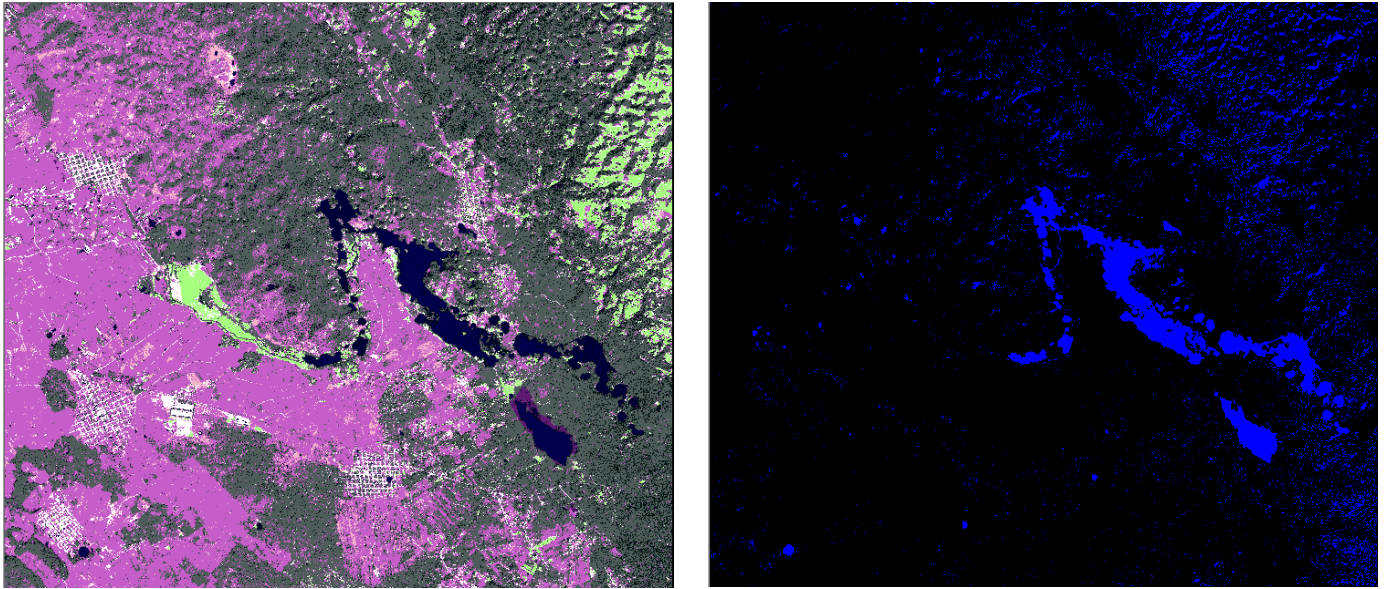


Figura A.30.- Clasificación Supervisada del año 2012 ^b.

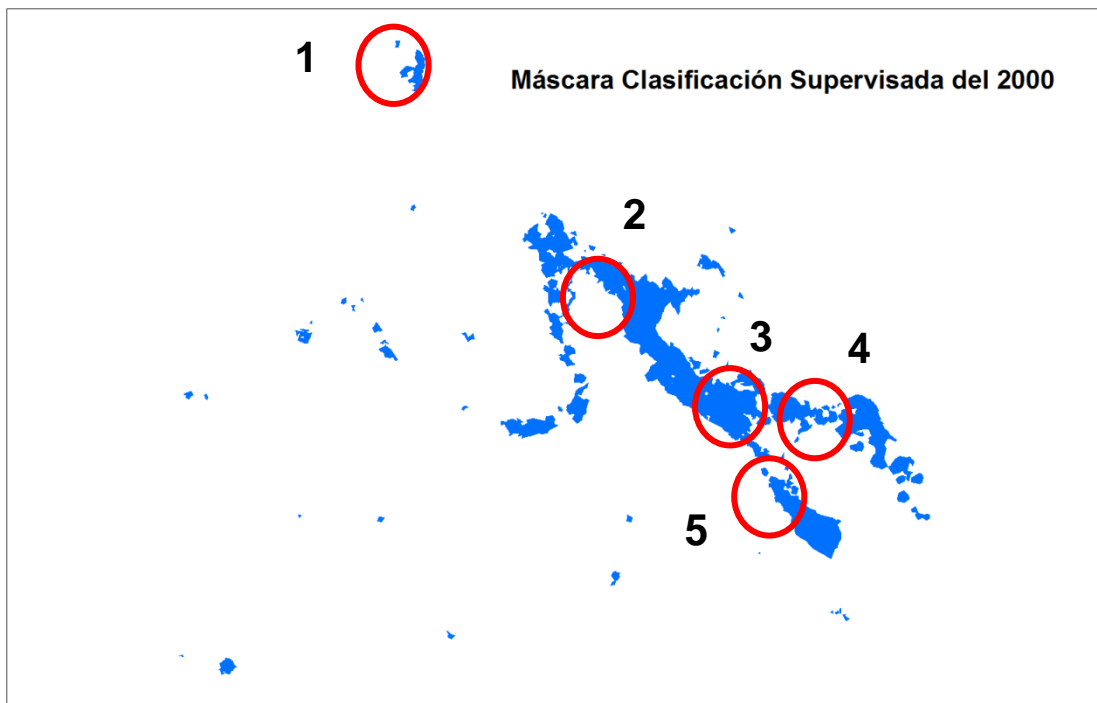


Figura A.31.- Máscara de la clasificación supervisada del año 2000 con una extensión total de área de 6.3304 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

^b @CNES 2013, Producido por Centro Geo, bajo licencia de SPOT IMAGE.

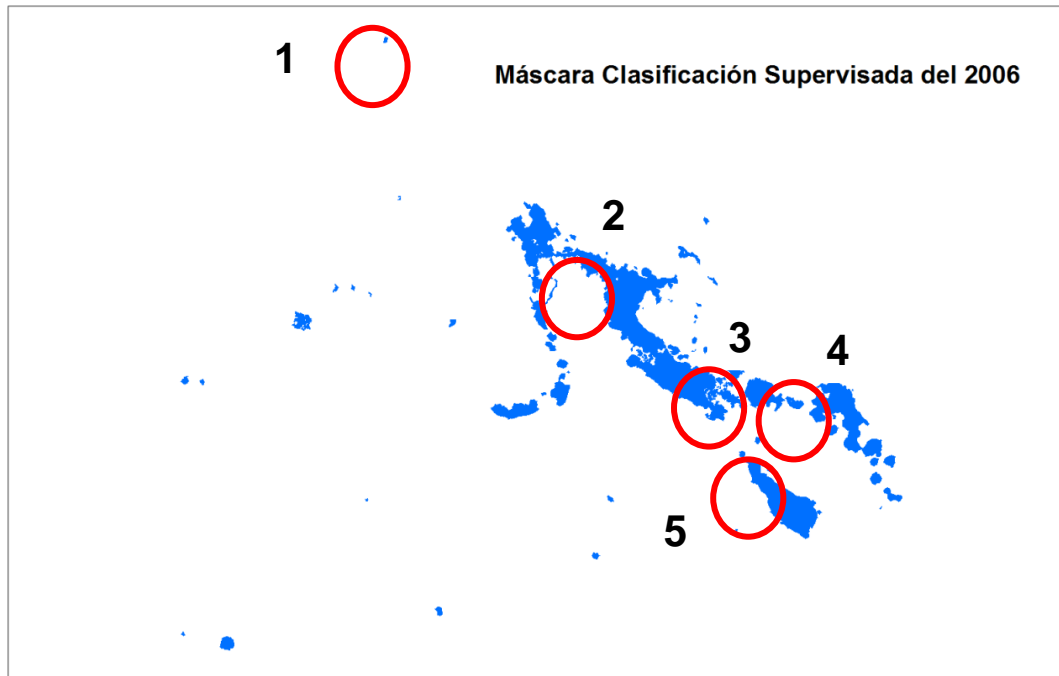


Figura A.32.- Máscara de la clasificación supervisada del año 2006 con una extensión total de área de 5.3636 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

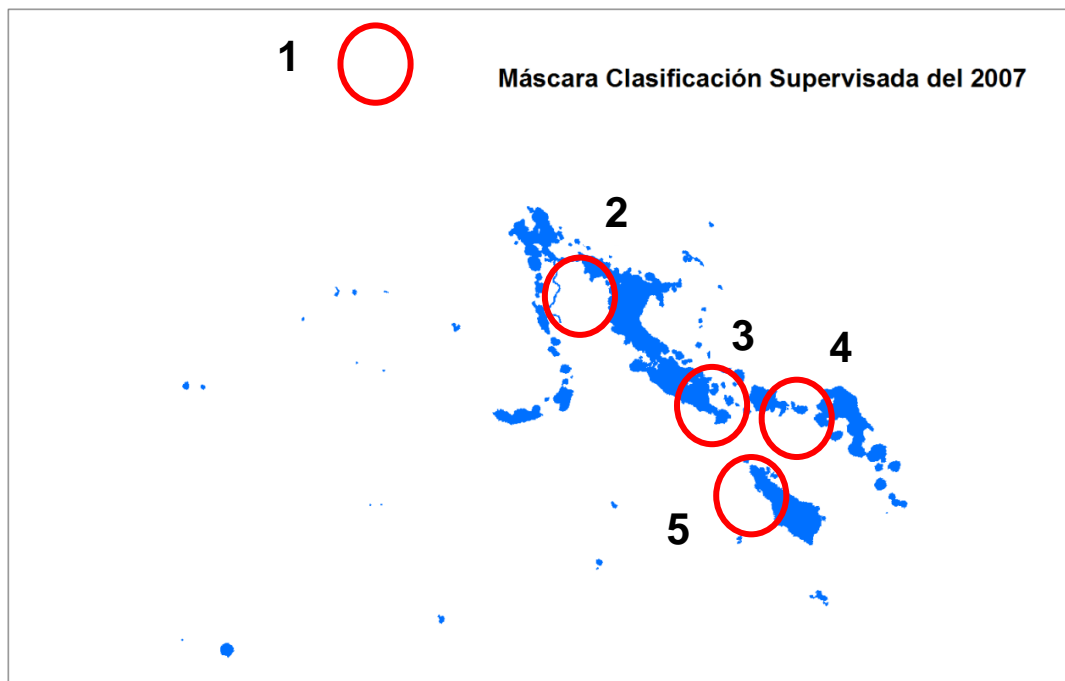


Figura A.33.- Máscara de la clasificación supervisada del año 2007 con una extensión total de área de 4.9591 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

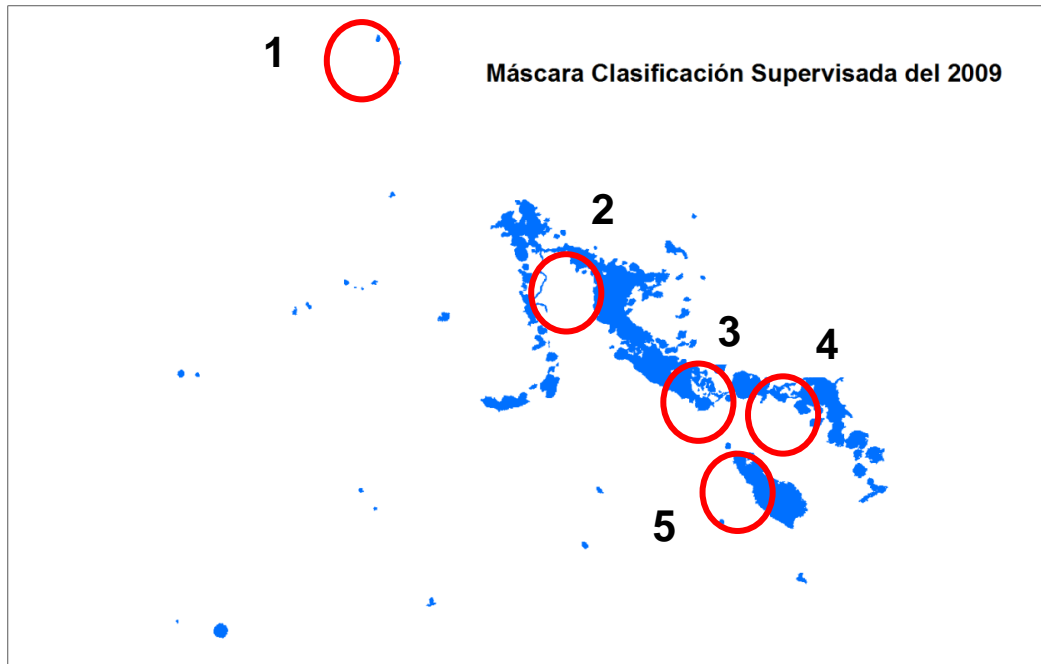


Figura A.34.- Máscara de la clasificación supervisada del año 2009 con una extensión total de área de 5.5296 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

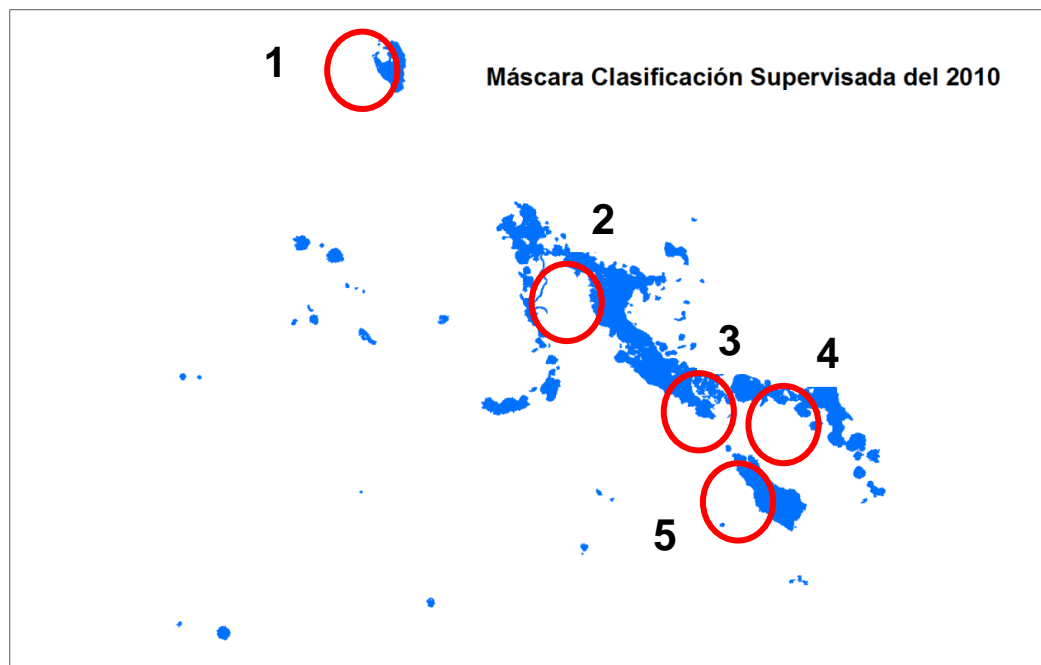


Figura A.35.- Máscara de la clasificación supervisada del año 2010 con una extensión total de área de 6.2496 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.

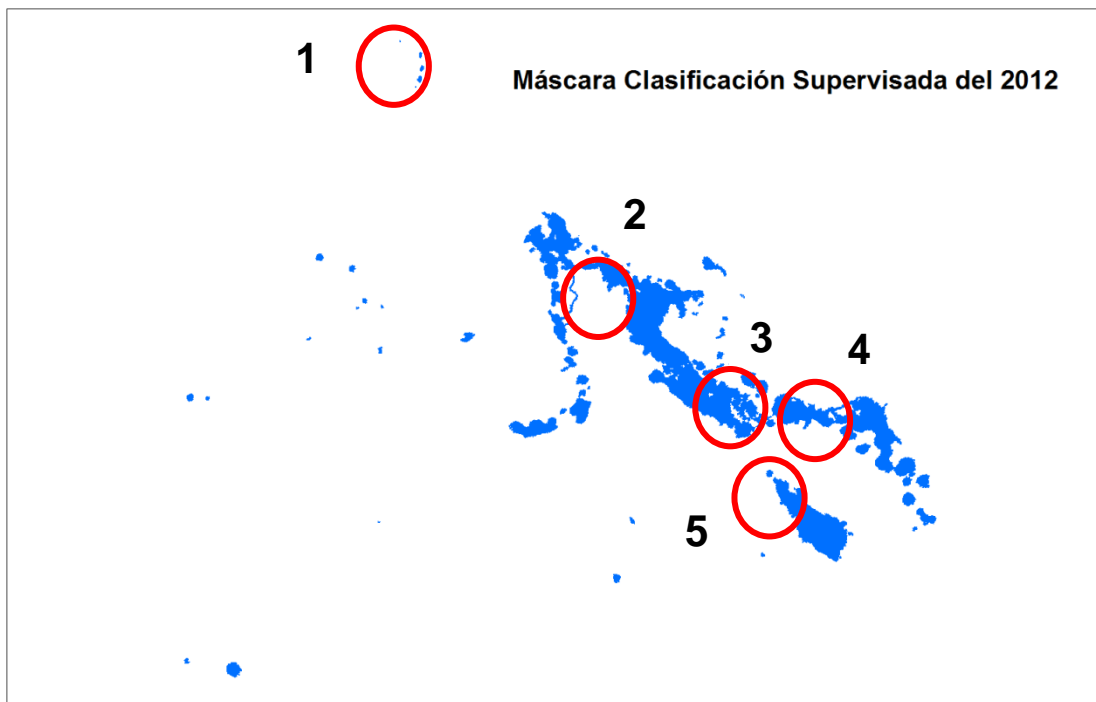


Figura A.36.- Máscara de la clasificación supervisada del año 2012 con una extensión total de área de 5.4653 km², siendo resaltados con círculos rojos los cambios más evidentes.