
IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE HUMEDALES LÉNTICOS EN EL VALLE ALTO DEL RÍO CAUCA MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE



Andrés Parra M, Ing.

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
andrepame04@yahoo.com

Francisco L. Hernández T., Esp.

Director del Grupo de Investigación en Percepción
Remota, GIPER.
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática.
Universidad del Valle, Cali, Colombia.
flhernand@gmail.com

RESUMEN

Se elaboró la identificación y delimitación de los humedales lénticos naturales del departamento del Valle del Cauca (Colombia) mediante el tratamiento digital de imágenes del satélite Quickbird. Se utilizó el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación para diferenciar los cuerpos de agua de la cubierta vegetal y se realizaron dos tipos de clasificaciones: supervisada con base a píxeles y orientada a objetos. Se compararon los resultados obtenidos con ambas clasificaciones y se seleccionó la clasificación que mejores resultados arrojó para generar la cartografía de los ecosistemas de humedales a escala 1:10.000, donde se identifica el espejo de agua con el que cuentan los humedales y se diferencia entre tres tipos de vegetación acuática predominantes en estos ecosistemas. La aplicación de las

**Recibido: Mayo 10 2010 *Junio 8 2010*

técnicas de teledetección al seguimiento multitemporal de los humedales, permite derivar datos tan cruciales como la disminución de la superficie de una zona húmeda concreta, así como la estimación de las superficies de inundación, procesos periódicos esenciales para la conservación de muchos de estos ecosistemas.

PALABRAS CLAVE

Delimitación de humedales lénticos, Teledetección, Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación

ABSTRACT

It was developed the identification and mapping of natural lentic wetlands of the department through digital processing of Quickbird satellite images. The Normalized Difference Vegetation Index to differentiate water bodies from vegetation cover, and there were two types of classifications, supervised pixel-based and object-oriented. The results were compared and the best performing classification was selected to generate the mapping of wetland ecosystems at 1:10,000, which is identified with the water surface wetlands that count and differentiate among three types of aquatic vegetations predominant in these ecosystems. The application of remote sensing techniques to multi-temporal monitoring of wetlands, allows deriving such crucial data as the decrease in the surface of a particular wetland, and the estimation of flood areas, periodic processes essential for the conservation of many of these ecosystems..

KEYWORDS

Lentic wetland delineation, Remote Sensing, Index Normalized Difference Vegetation

1. INTRODUCCIÓN

Para la identificación y delimitación de humedales se empleaban en un principio métodos tradicionales de cartografía mediante trabajos de campo. La aparición de las técnicas de fotointerpretación permitieron realizar

mapas de humedales de manera más eficiente y precisa a partir de fotografías aéreas, las cuales han sido el insumo más utilizado en el inventario de humedales, como lo reportan los trabajos de Warner (1990), Ibrahim y Hashim (1990) y Tiner (1990). Más tarde se realizaron varios estudios donde se utilizaron datos procedentes del satélite Landsat del Escáner Multiespectral (MSS) Mapeador Temático (TM) para distinguir masas de agua del suelo seco circundante o de la vegetación, según cita Smith (1997).

Otros sensores, como el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR), de la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera de los Estados Unidos (NOAA), el Visor de Alta Resolución (HRV), del Sensor para la Observación de la Tierra (SPOT) y el Satélite Meteorológico METEOSAT, también se han empleado para diferenciar áreas inundadas dentro de los humedales. Los SAR (Synthetic Aperture Radar), con mayor resolución espacial, permiten la detección de zonas inundadas bajo un dosel forestal. Los más utilizados son los satélites ERS-1 y ERS-2 de la Agencia Europea Espacial y el satélite japonés JERS-1. Ramsey, (1998) recoge diversas experiencias realizadas en el estudio de humedales con SAR.

La presencia de muy pequeñas y efímeras masas de agua es difícil de cartografiar debido a que su nivel, o incluso su existencia, son muy variables dependiendo de la distribución de lluvias y de la tasa de evaporación. Work y Gilmer (1976) mostraron cómo las bandas espectrales de 80 m de resolución del Landsat MSS eran capaces de detectar lagunas de áreas inferiores a 1.6 ha en Dakota. Por su parte, Ernst-Dottavio, Hoffer y Mroczynski (1981) identificaron pequeños humedales al noreste de Indiana a partir de datos Landsat MSS. En Colorado, Eckhardt y Litke (1988) detectaron lagunas menores de 0.5 y 0.1 ha utilizando imágenes Landsat MSS y SPOT-HRV, respectivamente. Según reportó Verdin (1996), en el Sahel (Níger), donde existen numerosas superficies de agua pequeñas y efímeras dispersas por la región, se examinaron 21 lagos utilizando seis imágenes NOAA-AVHRR con una resolución de 1-1km durante la estación seca de los años 1988-1989. En España, el CEDEX obtuvo, mediante el empleo de técnicas basadas en el análisis digital de imágenes Landsat-5 TM, la localización y ubicación geográfica de las superficies de agua existentes en las cuencas de los ríos Duero, Guadiana, Júcar y Segura. En la cuenca del Guadiana se utilizaron imágenes, ya corregidas

geométricamente, de fechas entre el 4 de junio y 6 de julio de 1994, procedentes del Instituto Geográfico Nacional. La superficie de agua detectada fue de 5.581 ha, oscilando su extensión entre las 1.788 ha del embalse de Orellana y los 625 m² de menor superficie detectada (Soriano, 1996).

En la India, la cartografía de humedales se ha llevado a cabo utilizando datos de teledetección. Se cartografiaron las zonas húmedas de 236 distritos bajo el programa “*Nationwide Wasteland Mapping*”. Diferentes autores cartografiaron las áreas de Khaziranga, Bharatpur y Sundarbans, utilizando datos del satélite indio IRS-IA y el sensor LISS (Linear Imaging Self-Scanning Sensor). También se cartografiaron los humedales costeros del delta Sundaban a partir de datos de IRS-1B LISS-II combinados con datos SAR procedentes del ERS-1 (Dwivedi, 1999). Algunos estudios encaminados a evaluar el potencial de los sistemas SAR para la clasificación de zonas inundadas y no inundadas se realizaron en la parte alta de los humedales del río Níger a su paso por Malí. Se utilizó una serie temporal de imágenes SAR del satélite ERS-1, desde noviembre de 1992 hasta octubre de 1993 (cada 35 días), seleccionando las imágenes de la estación seca y de máxima inundación. También se usaron datos adicionales disponibles de la NASA/DARA, imágenes radar transportado RADAR-C (SIR-C), X-SAR 994 e imágenes AVHRR.

Se dispuso de varios métodos normalizados de inventario que se han aplicado con éxito en distintas circunstancias, países o regiones. Ejemplos notables son el inventario de la Iniciativa para los Humedales Mediterráneos (MedWet), el inventario nacional de humedales del Servicio de Pesca y Fauna Silvestre de los Estados Unidos, el inventario nacional de humedales de Uganda, el inventario de los humedales de Asia y el inventario nacional de los humedales del Ecuador.

En Colombia, los humedales gradualmente se han ido perdiendo o alterando debido a los mismos procesos naturales y a la presión antrópica a través de la agricultura intensiva, la urbanización, la contaminación, la desecación y otras formas de intervención. La degradación de estos sistemas y la pérdida de su capacidad productiva ameritan acciones agresivas y prioritarias en el contexto nacional, regional y local. Esta situación no es ajena para el valle alto del río Cauca. Las inundaciones y los niveles de agua altos dan lugar a un proceso de labrado de orillas, donde el río y sus meandros en su propia evolución generan lagunas y madre viejas que

conforman las zonas de almacenamiento natural de las aguas de exceso, las cuales ejercen un papel importante en la regulación del caudal al captar grandes volúmenes de agua en el invierno para liberarlos lentamente en el verano.

En la década de 1950 existían más de 160 madre viejas, de las cuales la gran mayoría estaban asociadas al río. En 1955 el área de éstas era aproximadamente 17,500 ha (CVC, 2007). En la década del 60 el aumento de la población y el crecimiento socioeconómico del Valle del Cauca implicaron la expansión urbana y de la frontera agrícola y con ello la necesidad de realizar obras de adecuación de tierras para la protección contra las inundaciones. Estas modificaciones incidieron en la disminución de las áreas de los humedales a menos de 3000 ha a finales de los años ochenta.

En el departamento del Valle del Cauca, el inventario de humedales existentes ha tenido como prioridad a aquellos de tipo natural lénticos, ubicados en el valle geográfico del río Cauca, principalmente, madre viejas del río, ciénagas, lagunas de inundación y zonas de inundación generadas por intervención humana tales como cultivos de arroz. El área de estudio se caracteriza por tener una influencia directa del río Cauca, especialmente en las partes aledañas a éste, las cuales están sometidas a la acción de las crecientes y los desbordes en época de lluvias. Lo anterior hace que el paisaje creado sea dinámico y variable, puesto que las crecientes periódicas del río determinan aumentos en los niveles de todos los humedales del valle así como de las áreas cercanas a éstos. Al llegar la temporada seca, el nivel de las aguas desciende y la extensión de estos hábitats se reduce significativamente.

Los trabajos realizados para obtener la información existente del inventario de humedales en el valle alto geográfico del río Cauca se deben principalmente a estudios de la CVC (1956, 1986, 1997, 2002), basados en restitución fotogramétrica y trabajos de campo. De los resultados de estos trabajos, se obtuvo cartografía análoga con la ubicación de los humedales, la cual se utiliza en la formulación de planes de manejo ambiental integral para algunos de los humedales inventariados con el objeto de gestionar y planificar la conservación adecuada de los mismos.

Para la realización del inventario se tuvo en cuenta el marco estructurado para la planificación del inventario de humedales establecido por la Convención Ramsar y se

llevó a cabo mediante el análisis digital de tres imágenes multiespectrales del satélite Quickbird de 2.4 metros de resolución espacial de los años 2002 y 2004; también se utilizó la información que existe sobre los humedales como son los Planes de Manejo Ambiental, elaborados por la CVC, y la cartografía análoga de estos ecosistemas.

Se aplicó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI), el cual permite diferenciar los cuerpos de agua de otras coberturas.

Posteriormente, se aplicó a cada imagen dos métodos de clasificación, como son la clasificación supervisada con base a píxeles y la clasificación supervisada orientada a objetos; este último método tiene en cuenta aspectos como la forma y la textura y no sólo la información espectral de cada píxel. Los resultados obtenidos con cada método de clasificación se compararon mediante la matriz de confusión y el coeficiente Kappa. Se generó la cartografía digital con los humedales identificados en las tres imágenes. La metodología empleada permitirá la identificación y delimitación de los humedales lénticos y la cobertura asociada a estos ecosistemas de manera eficiente y permanente y servirá de apoyo para la elaboración de planes de acción encaminados a la protección de estos ecosistemas.

2. ÁREA DE ESTUDIO

El valle alto geográfico del Río Cauca comprende toda la franja plana que atraviesa este afluente en su paso por los departamentos de Cauca y Valle del Cauca; la parte más amplia del valle se ubica en inmediaciones del municipio de Yumbo y la más angosta hacia el municipio de Buga, en el centro del departamento del Valle del Cauca, como lo muestra la Figura 1. La zona de estudio está demarcada por las coordenadas geográficas: Latitud 3° 44' 11.82" N, Longitud 76° 24' 46.02" O (esquina superior izquierda) y Latitud 3° 41' 56.85" N, Longitud 76° 22' 14.30" O (esquina inferior derecha).

Los humedales existentes en la región en la actualidad son básicamente madre viejas del río Cauca, ciénagas, lagunas de inundación y zonas de inundación generadas por intervención humana tales como cultivos de arroz.

Las imágenes de satélite adquiridas con sensores de

alta resolución espacial y espectral se convierten en la nueva alternativa para obtener información periódica que permita caracterizar estos importantes ecosistemas que se encuentran en alto riesgo de desaparecer.

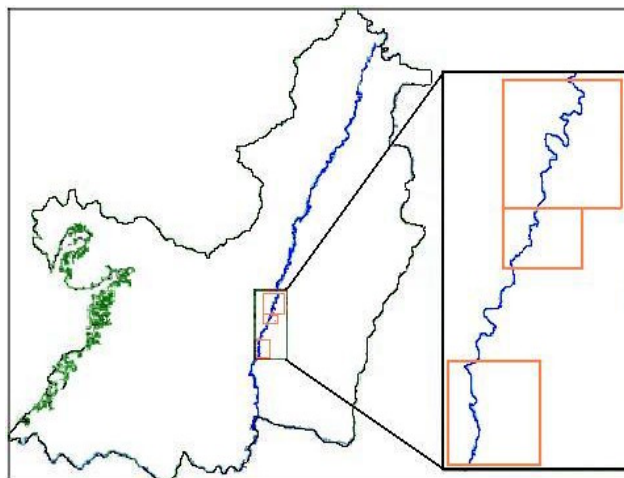


Figura 2. Identificación de la zona de estudio

2.1. MATERIALES Y MÉTODOS

La identificación de los humedales se llevó a cabo mediante el procesamiento digital de tres imágenes multiespectrales del satélite Quickbird del año 2002 y 2004, cada imagen cuenta con 4 bandas espectrales (azul, 450-520 nm; verde 520-600 nm; rojo, 630-690 nm; infrarrojo cercano, 760-900 nm). Una de las imágenes cubre una parte del río Cauca a su paso por el municipio de Yumbo y las otras dos cubren la zona del valle geográfico de los municipios de Vijes y Guacarí; también se utilizó la información de los Planes de Manejo Ambiental de los humedales elaborados por la CVC y la cartografía digital de la zona de estudio.

Las tres imágenes son del satélite Quickbird de tipo Standard, lo que significa que se ha corregido de manera aproximada el desplazamiento producido por el relieve con respecto al elipsoide de referencia mediante un modelo de elevaciones digital (DEM, por sus siglas en inglés) lo suficientemente vasto. El grado de normalización es relativamente pequeño, y aunque cada imagen cuenta con correcciones del terreno no se consideran imágenes ortorrectificadas.

La precisión estimada del producto en “geo-localización absoluta” es de 23 m para el 90% de los puntos (CE90%), excluyendo desplazamientos por topografía y por desplazamientos del ángulo nadir al momento de la toma, aunque en terrenos planos se puede llegar a los 14 m. El control terrestre se extrae de la información de las efemérides del satélite y su altitud. Para realizar cada uno de los pasos del pre-procesamiento de las imágenes, se utilizó el programa ERDAS v9.2

2.2. CORRECCIÓN DE EFECTOS ATMOSFÈRICOS

La radiación electromagnética se ve notablemente afectada por los distintos componentes de la atmósfera. La presencia de aerosoles y vapor de agua dispersa, de forma selectiva, la radiación transmitida entre la superficie terrestre y el sensor. La radiancia finalmente detectada por el sensor no corresponde exactamente a la que parte de la superficie terrestre, sino que cuenta con un porcentaje añadido, a consecuencia del efecto dispersor de la atmósfera (Chuvieco, 1996).

Los gases atmosféricos y los aerosoles contribuyen a la absorción y la dispersión de la luz solar directa y de la luz solar reflejada por la superficie terrestre. La absorción reduce la cantidad de energía disponible en una longitud de onda determinada, mientras que la dispersión redistribuye la energía cambiando su dirección. Aunque la dispersión no cambia las propiedades de la radiación distintas a su dirección, el resultado es una disminución del contraste de los objetos observados, produciéndose una degradación de los contornos.

La dispersión (o scattering) afecta fundamentalmente a la dirección de la radiación visible pero puede alterar también la distribución espectral de las longitudes de onda del visible y las próximas a él. El principal problema que implica la dispersión es su carácter heterogéneo en el espacio y en el tiempo; en otras palabras, la dispersión atmosférica no es constante en la imagen sino que en determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua. Además, el efecto es dependiente de la longitud de onda y varía entre imágenes de forma difícil de predecir. Desafortunadamente, resulta muy complejo abordar una corrección rigurosa de la dispersión atmosférica, por cuanto requiere una serie de medidas simultáneas a la adquisición de la imagen (Chuvieco, 1996).

Para la corrección de efectos atmosféricos de cada imagen se utilizó el método de Corrección del Histograma por sus Valores Mínimos (Chávez, 1996).

2.3 GEORREFERENCIACIÓN

Antes de realizar la georreferenciación de cada imagen se procedió a realizar un mosaico con las imágenes correspondientes a los municipios de Vijes y Guacarí. La georreferenciación de cada imagen se hizo a partir de cartografía digital a escala 1:10.000 de la zona de estudio, proporcionada por la CVC.

Para llevar a cabo el proceso de georreferenciación se seleccionaron en cada una de las 3 imágenes un total de 20 puntos de control terrestre (GCP, por sus siglas en inglés). La georreferenciación se realizó en tres fases: (i) localización de los puntos de control terrestre en la imagen y en la cartografía digital, (ii) cálculo de las funciones de transformación entre las coordenadas de la imagen y las de la cartografía, y (iii) remuestreo o reubicación de los niveles digitales (ND) originales a la nueva posición. Para esta última fase se utilizó la geocodificación polinomial de segundo orden y el criterio de interpolación del vecino más cercano (*nearest neighbor*), porque supone una menor transformación de los ND originales.

El error medio cuadrático (RMS) debe ser menor a un píxel. En este trabajo se logró un RMS menor a 0.25. El RMS es una medida de la precisión de los GCP en las imágenes expresada en el tamaño de píxel de la imagen. Valores menores a 1 contemplan una gran precisión. Un RMS igual a 1 equivale a tener un error equivalente a la resolución espacial de la imagen satelital.

2.4 RECORTE DE LAS IMÁGENES

Una vez las imágenes fueron georreferenciadas se procedió a realizar un subconjunto de cada imagen, tanto de la imagen correspondiente al municipio de Yumbo como del mosaico realizado con las imágenes de Vijes y Guacarí (ver Figura 2).

Al identificar los cuerpos de agua y el tipo de vegetación presente en los humedales se pudo observar que se presentaba confusión debido a que los cuerpos de agua ofrecían una respuesta espectral similar a las sombras presentes en cada imagen esta misma situación se presentaba entre parte de las nubes y los tipos de vegetación que se intentaba clasificar en cada humedal, por lo cual fue necesario enmascarar las sombras y las nubes para eliminarlas de las imágenes. Para ello se realizó una clasificación supervisada de cada imagen, en la que se tomó como muestra de cada clase las zonas de las imágenes que se confundían con las nubes y las

nubes y las sombras quedaran correctamente clasificadas, evitando la confusión con otro tipo de coberturas.

Una vez clasificadas las nubes y las sombras, se recodificó la clasificación para obtener una nueva imagen sin la presencia de nubes y sombras. Las clases correspondientes a las nubes y las sombras se codificaron con un valor igual a cero y las clases restantes con un valor de uno. Posteriormente, se interceptaron las imágenes georreferenciadas y recodificadas de la clasificación de las nubes y las sombras. La imagen resultante posee la información completa de las cuatro bandas y las zonas en las cuales era posible observar que las nubes y las sombras aparecen en negro debido a que los píxeles han tomado el valor de cero.

2.5 CORRECCIÓN RADIOMÉTRICA

La corrección radiométrica de las imágenes se realizó para convertir los niveles digitales de cada píxel en valores de radiancia espectral, utilizando los coeficientes de calibración y los anchos de banda efectivo obtenidos del encabezado de las imágenes, ilustrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de calibración y anchos de banda efectivo

Banda Espectral	Irradiancia Solar Extraterrestre (E_0) (W/m ²)
1	1969,00
2	1840,00
3	1551,00
4	1044,00
5	255,70
6	82,07
7	1368,00

Fuente: DigitalGlobe, Inc

El proceso de calibración radiométrica se dividió en 2 etapas (Digital Globe, 2003): La primera etapa consistió en obtener la radiancia integrada para cada banda como lo muestra la Ecuación 1.

$$L_{Pixel, Banda} = K_{Banda} * Q_{Pixel, Banda} \quad (1)$$

donde :

La segunda etapa consistió en obtener la radiancia media espectral por banda.

$$L_{\lambda_{Pixel, Banda}} = \frac{L_{Pixel, Banda}}{\Delta \lambda_{Banda}} \quad (2)$$

Conviene considerar que la radiancia detectada por el sensor ($L_{\lambda_{Pixel, Banda}}$) depende de varios factores. Principalmente, es una función de la radiación solar incidente, de la respuesta de la cubierta terrestre a dicha radiación y del aporte de radiancia debida a la atmósfera. En suma, se expresa, según Mather (1987) como:

$$L_{\lambda_{Pixel, Banda(k)}} = L_{su(k)} * \rho_{(k)} * \tau_{(k)} + L_{a(k)} \quad (3)$$

A partir de esta expresión se puede obtener la reflectividad:

$$\rho_{(k)} = \frac{L_{\lambda_{Pixel, Banda(k)}} - L_{a(k)}}{L_{su(k)} * \tau_{(k)}} \quad (4)$$

Asumiendo que la superficie tiene un comportamiento lambertiano, Se puede estimar la radiancia que llega al suelo ($L_{su(k)}$) en la fecha concreta de adquisición de la imagen a partir de los siguientes parámetros:

$$L_{su(k)} = \frac{E_{o(k)} * \cos \theta}{K * \pi} \quad (5)$$

donde $E_{o(k)}$ es la irradiancia solar extraterrestre (en esa banda del espectro), θ es el ángulo cenital y K es el factor corrector de la distancia Tierra – Sol calculado como:

$$K = 1 + 0,0167 \left[\sin \frac{2\pi(n - 93,5)}{365} \right]^2 \quad (6)$$

donde n corresponde al día juliano del año.

Para evitar la variación de la radiancia con respecto a la variación anual de la irradiancia solar, se debe realizar una normalización por irradiancia solar, convirtiendo la radiancia espectral a reflectividad planetaria. Tal variable

combina la reflectividad de la superficie terrestre con los efectos atmosféricos y puede obtenerse mediante la siguiente expresión (Ormeño, (2006):

$$\rho_{(k)} = \frac{L_{\lambda_{Pixel}, Banda(k)} * K * \pi}{E_{0(k)} * \cos \theta} \quad (7)$$

En la Tabla 2 presenta los valores de la irradiancia solar para cada banda, las cuales se han empleado para el cálculo de la reflectividad y han sido tomados de la documentación publicada por la NASA para el programa Landsat

Tabla 2. Valores de irradiancia solar extraterrestre para el programa Landsat

Banda Espectral	Coefficiente de calibración	Ancho de banda efectivo
1 (azul)	0,01604120	0,068
2 (verde)	0,01438470	0,099
3 (roja)	0,01267350	0,071
4 (infrarroja cercana)	0,01542420	0,114

Fuente: NASA

2.6 Procesamiento de las Imágenes

Para mejorar la discriminación de algunos rasgos temáticos presentes en las imágenes, específicamente para diferenciar entre suelos y vegetación, se utilizó el Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI).

El NDVI refleja el estado y la densidad de la vegetación y la actividad fotosintética. Está relacionado con la biomasa y correlacionado con la evapotranspiración (Nemani y Running, 1989; Sawamoto y Shin, 1997, citados por CONABIO). El NDVI integra dos aspectos claves del comportamiento espectral de los tejidos fotosintéticos: la baja reflectancia en longitudes de onda correspondientes al rojo (debido a la absorción por parte de la clorofila) y la alta reflectancia en la porción del infrarrojo cercano (debido a la estructura del mesófilo de las hojas). El NDVI se calcula así (Rouse *et al.*, 1973, citado por CONABIO):

$$NDVI = \frac{IRc - R}{IRc + R} \quad (8)$$

donde R e IRc corresponden a la reflectancia en la porción roja e infrarroja cercana del espectro electromagnético, respectivamente.

Una de las ventajas del NDVI es que varía entre -1 y 1, lo cual facilita su interpretación. Puede señalarse como umbral crítico para cubiertas vegetales un valor de NDVI de 0.1 y para la vegetación densa de 0.5. Cualquier valor negativo implica ausencia de vegetación.

En la identificación de los humedales el NDVI se utilizó como una imagen auxiliar para discriminar el agua de la tierra y otro tipo de coberturas (suelos desnudos, otra vegetación) con el objetivo de identificar los ecosistemas de humedales.

2.7 Clasificación de las Imágenes

En un principio se realizó una clasificación no-supervisada en cada imagen, donde el número de clases varió entre 10 y 20; esto con el objeto de determinar de una manera más clara el número de clases que se clasificarían en cada imagen. Se utilizó el algoritmo ISODATA (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*), el cual utiliza la mínima distancia espectral para asignar un píxel a un grupo (ERDAS, 1997).

Partiendo de las imágenes obtenidas con las clasificaciones no-supervisadas se procedió a realizar la clasificación de tipo supervisada con base en píxeles y con base en objetos.

Para llevar a cabo la clasificación con base en píxeles se seleccionaron las muestras de píxeles para cada clase que se definió en cada imagen de acuerdo con los resultados obtenidos de las clasificaciones de tipo no-supervisado y el algoritmo escogido para asignar cada píxel a una clase fue el de mínima distancia. El resultado de la clasificación fue una imagen temática de 9 y 12 clases para la imagen de Yumbo y el mosaico Vije-Guacará, respectivamente (ver Figura 3).

Para realizar esta clasificación con base en objetos se utilizó el programa eCognition v4.0. El primer paso en el análisis orientado a objetos es agrupar los píxeles (consideradas las regiones iniciales) en grupos homogéneos, es decir, realizar la segmentación de la imagen

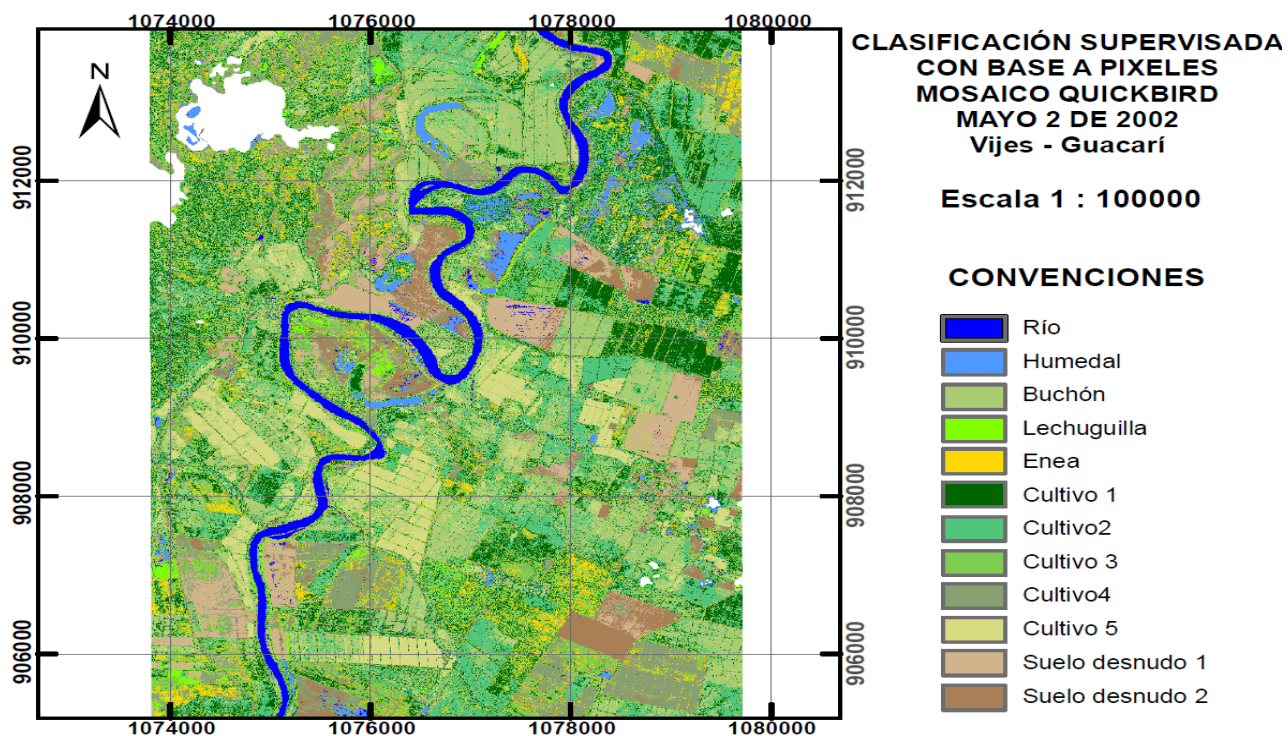


Figura 3. Clasificación con base en píxeles de las imágenes de Yumbo y Vijes-Guacarí

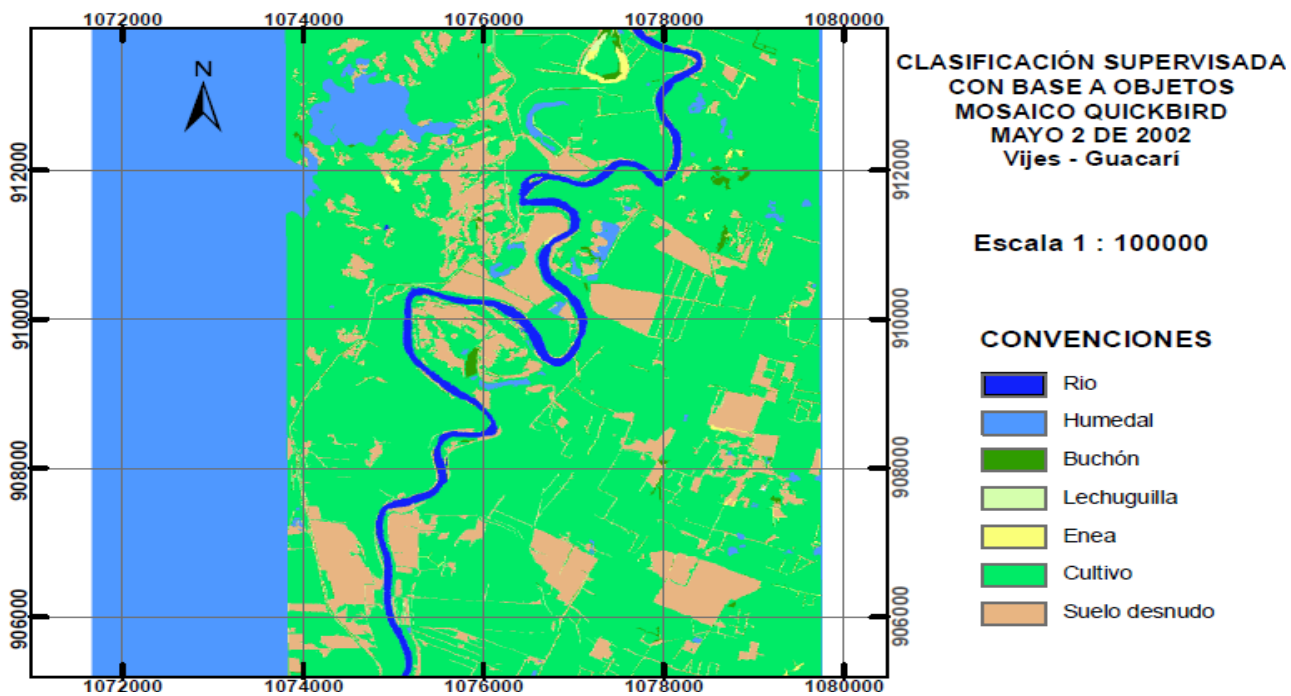


Figura 4. Clasificación con base a objetos de las imágenes de Yumbo y Vijes-Guacarí

para posteriormente clasificar los objetos extraídos. El tamaño y la forma de los objetos resultantes se determinaron de manera empírica. El grado de similitud varía en función de la máxima heterogeneidad permitida para un objeto en la imagen, definida por el parámetro “factor de escala”.

Además, se incluyó el criterio de homogeneidad, definido por el parámetro “compactibilidad”, que optimiza el objeto en la imagen en relación al conjunto y la forma que ayuda a evitar la alta fragmentación del objeto en la imagen.

Se realizaron varias pruebas para definir los valores de estos parámetros en el proceso de segmentación, definiendo finalmente para cada imagen los siguientes (100, 0.3 y 0.5); para los parámetros escala, forma y homogeneidad, respectivamente. El valor de escala empleado fue el que más se aproximó a la información vectorial que se tenía de la zona de estudio, principalmente de los ecosistemas de humedales.

Luego de la segmentación de cada imagen, se procedió a tomar las muestras de cada clase. Es importante resaltar que con este método de clasificación el número de clases definidas en cada imagen disminuyó debido a que es posible tomar varias muestras de una misma clase, por lo cual no fue necesario distinguir entre cultivos que se encontraron en un estado fenológico diferente sino que se generó una sola clase para los cultivos.

Una vez se definieron las muestras, se escogió como criterio de asignación el del vecino más cercano y por último se realizó la clasificación.

El resultado de la clasificación fue una imagen temática de 6 clases para la imagen de Yumbo y de 7 clases para el mosaico Vijes-Guacarí, respectivamente (ver Figura 4).

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados de las clasificaciones de las imágenes obtenidas con ambos métodos se evaluaron mediante la matriz de confusión que se genera para cada clasificación y con la cual es posible determinar su fiabilidad.

También se calculó el coeficiente Kappa, el cual mide el grado de ajuste debido sólo a la exactitud de la classifica-

ción, prescindiendo del causado por factores aleatorios.

Este estimador adoptará valores más próximos a la unidad en tanto el ajuste sea significativamente mejor que el obtenido mediante clasificación aleatoria (Pinilla, 1995), y se define mediante el siguiente modelo:

$$K = \frac{n \sum_k x_{kk} - \sum_k x_{k+} x_{+k}}{n^2 - \sum_k x_{k+} x_{+k}}$$

donde: x_{kk} indica el acuerdo observado y $x_{k+} x_{+k}$ el producto de los marginales indican el acuerdo esperado

En las matrices de confusión generadas para la clasificación supervisada con base a píxeles, se pudo observar que en general la fiabilidad de la clasificación realizada en ambas imágenes es buena con un valor del 75% para la imagen de Yumbo y del 72% para el mosaico Vijes-Guacarí. El índice Kappa alcanzó un 72% y 70% para cada imagen, lo cual significa que la clasificación es mejor en un 70% que si se realizara de manera aleatoria.

Con relación a de los ecosistemas de humedales objeto de este proyecto, la clasificación del espejo de agua es muy alta: 100% para la exactitud del productor y 90% para la exactitud del usuario. Ahora, examinando los resultados de la clasificación para los tres tipos de vegetación (buchón, enea y lechuguilla) que se diferenciaron para cada humedal, se puede notar que los resultados no son muy alentadores. Esta situación se explica a partir de la similitud de la respuesta espectral del buchón y de otros cultivos, al igual que con la enea que se confunde con el suelo.

En un intento por mejorar el resultado obtenido con este primer método de clasificación, a cada imagen se le calculó el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), pero aun así el resultado obtenido no varió significativamente. La vegetación del humedal continuó confundiendo con los cultivos y el suelo.

Con el método de clasificación orientado a objetos, los resultados fueron mejores de los esperados. Para ambas imágenes se obtuvo una fiabilidad de 100% en la clasificación. El mismo valor se obtuvo para el coeficiente Kappa. Refiriéndose propiamente a los ecosistemas de humedales, la clasificación de las coberturas del

espejo de agua y la vegetación de los humedales fue muy elevada, tanto para la exactitud del productor como para la del usuario, el valor obtenido fue prácticamente del 100) en ambas imágenes.

Por otra parte, para validar el uso de la imágenes de satélite en la identificación y delimitación de los humedales, se realizó una sobreposición de los humedales clasificados sobre la cartografía existente de estos ecosistemas que data de fotografías aéreas de 1998. Al sobreponer la clasificación con la que se obtuvo los mejores resultados sobre la cartografía de referencia, se puede notar que el espejo de agua con el que contaban los humedales, en un período de cuatro años (que es el lapso que existe entre las fotografías aéreas y las imágenes de satélite) ha sufrido cambios considerables, como lo muestra la Tabla 3.

Tabla 3. Comparación del espejo de agua de los humedales

Humedal	Área Espejo de Agua (ha)	
	Fotografía Aérea (1998)	Imagen Quickbird (2002-2004)
Higueroncito	8.062	0
Carambola	15.130	1.122
Videles	9.257	4.700
Román	4.511	2.713
Maizena	4.560	7.678
El Cocal	6.750	0

Fuente: Elaboración propia

Es necesario aclarar que la extensión del humedal como tal no ha disminuido, lo que ha sucedido, es que con el paso de los años el espejo de agua ha sufrido una transformación, se ha ido cubriendo por vegetación acuática.

4. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo fue identificar y delimitar los humedales lénticos naturales del Valle del

Cauca con imágenes de satélite, para lo cual, las imágenes QuickBird empleadas resultaron apropiadas, debido a su buena resolución espacial y sus características espectrales, lo que las hace adecuadas para este tipo de estudios.

El Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI) calculado para cada imagen fue de gran ayuda como un primer paso para la identificación de los cuerpos de agua, específicamente del espejo de agua de los humedales objetivo de este trabajo.

Respecto a los métodos de clasificación utilizados se pudo observar que el método supervisado con base a píxeles presentó inconvenientes en cuanto a la diferenciación de los tres tipos de vegetación predominante en los ecosistemas de humedales estudiados y que se clasificaron en cada imagen. Puede notarse en las matrices de confusión que para el buchón, la enea y la lechuguilla, tanto la exactitud del usuario como el índice Kappa para cada clase no superan el 20%. En cambio, con el método orientado a objetos la clasificación obtenida fue muy alta en cuanto a la exactitud de la clasificación tanto del productor como del usuario; esto se debe a que este método reduce en gran medida los problemas asociados al utilizar imágenes de alta resolución, mejorando considerablemente los niveles de precisión en la clasificación. Además, la exactitud del usuario y el índice Kappa para cada tipo de vegetación clasificada en los humedales alcanzan un valor del 100%.

Al observar la comparación que se realizó con los resultados obtenidos de la clasificación orientada a objetos y la cartografía existente de los humedales del año 98, se puede ver que las imágenes de satélite son una herramienta de gran utilidad para la identificación de los espejos de agua de los humedales. También es posible notar cómo el espejo de agua de los seis humedales identificados ha disminuido de manera considerable y en su mayoría han sufrido una disminución del 50%, dos de ellos no cuentan con espejo de agua y sólo en la madre vieja Maizena ha ocurrido lo contrario, el espejo de agua en lugar de disminuir, aumentó.

Analizando a qué se deben estos cambios en los espejos de agua de los humedales, en la clasificación realizada en cada imagen se observa cómo el área de espejo de cada humedal se ha ido cubriendo por vegetación hidrófila: flotante como el buchón y la lechuguilla y emergente como la enea.

En los humedales Higueroncito y El Cocal es muy

notorio cómo han empezado el proceso de cambio de un estado lacustre (estado inicial en que aparece un humedal) a un estado de tipo palustre (estado en el cual el fondo no se encuentra consolidado).

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede concluir que los humedales más fáciles de identificar son las áreas permanentemente inundadas y el grado de dificultad para detectarlos aumenta a medida que cada humedal va pasando de un estado húmedo (lacustre) a un estado más seco (bosque).

El método de Corrección del Histograma por sus Valores Mínimos empleado para realizar la corrección de efectos atmosféricos de cada imagen, es un método sencillo que depende de la existencia de objetos oscuros en la imagen, dichos objetos en teoría deberían ser negros. En la corrección radiométrica no sólo se tuvo en cuenta los coeficientes de calibración, sino también los anchos de banda efectivos contenidos en el encabezado de cada imagen y se siguieron las indicaciones de Digital Globe para lograr una correcta conversión de los valores digitales de cada píxel en valores de radiancia espectral.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC, al Laboratorio de Sensores Remotos –LASER de la Universidad del Valle, al Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y a la firma Prosis Procáculo.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beyhaut, J. I., Podestá, L., y Casanova, R. (2005). Metodología para el inventario de humedales. Instituto de Agrimensura, Facultad de Ingeniería, Universidad de la república de Uruguay.

Brenner, J. (1997). Estimación de Batimetría utilizando datos multiespectrales caso de estudio Laguna La Nacha, Tamaulipas. Páginas 35-37.

Castillo, L. F. (2007). Informe final, Evaluación de humedales en el valle del río Cauca.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). Acuerdo 038 de 2007. Diario oficial N° 46765, Septiembre 2007.

Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) y Universidad del Valle (autores corporativos), María Clemencia Sandoval y Carlos Alberto Ramírez (Compiladores) (2007). El río Cauca en su valle alto: un aporte al conocimiento de uno de los ríos más importantes de Colombia.

Digital Globe™, 2003: Radiometric Radiance Conversion for QB Data.

Dwivedi, R. S.; Rao, B. R. M y Bhattacharya, S. (1999). Mapping wetlands of the Sundaban Delta and environs using ERS-1 SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 11 (20). pp. 2235-2247.

Eckhardt, D. W. y Litke, D. W. (1988). Estimation of reservoir surface areas using satellite imagery. Upper Gussison Basin. Colorado. *Conference on Water Data for Water Resources Management*. Tucson. Arizona. U.S.A. August (Bethesda, MD: American Water Resources Association) pp. 691-702.

Ernest-Dottavio, C. L.; Hoffer, R. M., y Mroczynski, R. P. (1981). Spectral Characteristics of Wetland Habitats. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2 (47) pp. 223-227.

García, E., y Chiong, J. (1995). La teledetección aplicada la cartografiado de humedales altoandinos, Cuenca alta del río Acarí.

Haralick, R. y Shapiro, L. (1992): Computer and robot vision, vol. 1. Boston, Massachusetts, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc.

Harris, A. R. y Mason, I. M. (1989) Lake measurement using AVHRR, a case study. *International Journal of Remote Sensing*, 10. pp. 885-895.

Ibrahim, S. y Hashmin, I. (1990). "Classification of mangrove forest by using 1:40000 scale aerial photographs", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp.583-892.

- Joao da Gama Minas (2005). Estimación de variables biofísicas en Olivar mediante métodos de teledetección por satélite y sensores aerotransportados para su integración en agricultura de precisión. Páginas 41 y 42.
- Mather, P. (1999). Computer processing of remotely-sensed images: an introduction. Chichester, John Wiley and Sons. 306 p
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)(2006). Guía técnica para la formulación de planes de manejo para humedales en Colombia. Resolución 196 de Febrero de 2006, páginas 21 y 22.
- Olivares A., M. O. (2001). Estudio del crecimiento urbano a través del uso integrado de imágenes de satélite, sig y gps. Páginas 123-131.
- Ormeño, V. S., (2006). Teledetección Fundamental, tercera edición, Universidad Politécnica, Madrid.
- Palacios, R. A. y Perafán, G. (2009). Diseño de una metodología para realizar batimetría en ríos por medio de imágenes satelitales, prueba piloto tramo río Cauca.
- Piaton, H. et Puech, C. (1992). Apport de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau d'irrigation pour la mise en valeur des plans d'eau à caractère permanent ou semi-permanent au Niger. Rapport de synthèse. Série Hydraulique Agricole. Comité Interafricain d'Études Hydrauliques. Laboratoire Commun de télédétection CEMAGREF/ENGREF compte du Ministère de la Coopération Montpellier. France.. 80 p texte + 80 p annexes.
- Pinilla, C. (1995). Elementos de teledetección. RaMa Editorial. Madrid. España.
- Ramsey III, E. W. (1998), "Radar remote sensing of wetlands", Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications, Ann Arbor Press, Michigan.
- Salinas C. W. E., Treviño G. E. J., Jaramillo T., J. G., y Campos F., Jesús A., (2002). Identificación y delimitación de humedales interiores del estado de Tamaulipas por percepción remota y sistemas de información geográfica. Investigaciones geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, N° 49, página 77. Consulta: Junio 16 de 2008.
- Secretaría de la Convención de Ramsar, (2007). Inventario de humedales: Un Marco de Ramsar para el Inventario de humedales. Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales, 3ª edición, vol. 12. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
- Smith, L. C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage and discharge: A review. *Hydrological Processes*, 11. pp. 1427-1439.
- Soriano, J., Fernández, F., García, E., Allende, F. y García, M. A. (1996). Utilización conjunta de la teledetección y de los sistemas de información geográfica en la detección de superficies de agua en la cuenca del Guadiana. *Ingeniería Civil*, 104. pp. 5-11.
- Tiner, R. W. Jr. (1990). "Use a high-altitude aerial photography for inventorying forested wetlands in the United States", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp. 593-604.
- Vega M., L. (2006). La teledetección aplicada al inventario de humedales. Mapping interactivo. Número 110 Consulta: Junio 10 de 2008.
- Verdin, J. P. (1996). Remote Sensing of ephemeral water bodies in western Niger. *International Journal of Remote Sensing*, 4 (17). pp. 733-748.
- Warner, W. S. (1990). "A PC-based analytical stereoplottter for wetlands inventories: an efficient and economical photogrammetric instrument for field offices", *Forest Ecology and Management*, vol 33/34, pp. 573-582.
- Work, E. A. y Gilmer, D. S. (1976). Utilization of satellite data for inventorying prairie ponds and lakes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 42 pp. 685-694.

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.