

Aplicaciones de fusión de datos en datos geospaciales: Caso de estudio fusión de clasificadores múltiples en el Lago de Chapala

Alejandra A. López-Caloca

*Centro de Investigación en Geografía y Geomática Ing. Jorge L. Tamayo A.C. (CentroGeo)
Mexico City / México*

RESUMEN

La fusión de datos fue planteada originalmente para resolver problemas de control, sistemas, robótica y cibernética aprovechando todos los datos de diferentes fuentes. Para el caso de datos geospaciales, el aprovechamiento de los recursos de percepción remota y el procesamiento digital es fundamental para contar con mejores técnicas de reconocimiento de patrones. Los principios y conceptos de fusión de datos se continúan construyendo; asimismo, se interceptan en forma transversal disciplinas como la percepción remota, el procesamiento digital de imágenes y señales, y la geocomputación, entre otras. Este trabajo, describe parte del marco de fusión de datos y el aprovechamiento de sus fundamentos, en la búsqueda de información y conocimiento en los datos de percepción remota. En este contexto, se investiga y desarrolla una técnica de fusión de múltiples clasificadores aplicada a la clasificación del cuerpo de agua del Lago de Chapala, ubicado en la parte central del territorio mexicano. Las fluctuaciones del lago han reducido su volumen hasta dejar grandes extensiones al descubierto. Estas alteraciones producen importantes efectos negativos principalmente en agroproductores y pescadores de la zona. Los alcances de la metodología propuesta están relacionados con los conceptos geocibernéticos de control y monitoreo.

Palabras clave: fusión de datos, fusión de clasificadores múltiples, inpainting, Chapala

ABSTRACT

Data fusion was originally proposed to resolve problems with control, systems, robotics and cybernetics by taking advantage of all the data from the different sources. In the case of geospatial data, the use of remote sensing and digital processing is key to having better techniques to recognize patterns. The principles and concepts involved in data fusion are still being developed. In addition, several disciplines intersect transversally, such as remote sensing, the digital processing of images and geocomputation, among others. This work describes part of the framework for data fusion and the use of its fundamentals in the search for information and knowledge in remote sensing data. A technique is investigated and developed to apply multiple classifier fusion of multiply classifiers to the classification of Chapala Lake located in central Mexico. Fluctuations in the lake have reduced its volume to the point of leaving large areas uncovered. These changes produce significant negative effects on agriculture and fishing in the zone. The scope of the proposed methodology encompasses geocybernetic concepts about control and monitoring.

Keywords: Chapala, data fusion, fusion of multiple classifiers, (multiple classifier fusion) inpainting.

1. INTRODUCCIÓN

El avance científico y el desarrollo tecnológico de los satélites han logrado información de la superficie terrestre a nivel global, regional y local, donde cada vez se tienen más observaciones coordinadas entre sensores y datos in situ. Como consecuencia, es momento para plantear soluciones de innovación en el campo de observación de la tierra y hacer frente al procesamiento de los datos remotos, que tengan sentido en problemas planteados en el territorio como el buen uso de las reservas y recursos naturales, la planeación urbana o la preparación para mitigar un desastre natural, entre otros.

La percepción remota se ha integrado en forma transdisciplinaria en busca de soluciones encaminada a la conservación del medio ambiente y al bienestar de la sociedad. Considerando los fundamentos teóricos y metodológicos planteados por las propias disciplinas, la percepción remota y el procesamiento digital han construido una plataforma con gran número de soluciones en el uso y la búsqueda, clasificación, predicción y modelado de datos satelitales. El desarrollo de la geocomputación también ha apoyado a las tareas de análisis, ya que cada vez se tienen mejores arquitecturas de computadores que pueden procesar datos en mayor cantidad y menor tiempo.

Existen una gran cantidad de recursos de percepción remota. Solberg (2012,463-483) utiliza el término compuesto "multi" con las modalidades de adquisición de los sensores remotos como: multitemporal, multispectral, multifrecuencia, multipolarización y multisensor. Así se tiene que la fusión de datos surge al conjuntar la fortaleza de diferentes fuentes de datos y comprender su complejidad y heterogeneidad. La complementariedad entre datos implica una combinación de elementos en diferentes grados de abstracción para lograr una estimación nueva y selectiva, que muestre la información relevante.

Al planear y establecer las posibles soluciones en fusión de datos, se evalúan las características del proceso de estudio, seleccionando las fuentes de datos que deben ser integradas, y se propone un modelo de fusión, que genere un resultado con calidad e interpretación consistentes.

Desde hace tiempo los conceptos de fusión de datos se han aplicado a la información procedente de múltiples fuentes de percepción remota (Pohl y Genderen 1998, 823-824). El objetivo de este trabajo es mostrar la utilidad de la fusión de datos geoespaciales y específicamente el caso de fusión para mejorar una clasificación utilizando datos de Landsat 7 ETM+. Recordemos que desde mayo del 2003 se afectaron los productos de Landsat 7 ETM+ al dejar de funcionar el SLC (Scan Line Corrector): una serie de líneas diagonales sin información aparecen en todas las bandas. Para mostrar los potenciales de fusión de datos, proponemos la segmentación del cuerpo de agua del Lago de Chapala para el 22 de abril del 2004; primero una restauración con la técnica de inpainting, que consiste en rellenar el espacio interpíxel, y, posteriormente utilizando un modelo de fusión conocido como fusión de múltiples clasificadores. El objetivo final es definir adecuadamente el borde del cuerpo de agua para lo cual se proponen dos clasificadores, el primero por máquinas de soporte vectorial, que a su vez se integran al segundo clasificador contextual de campos aleatorios de Markov (CAM).

2. VISIÓN MACRO DE FUSIÓN DE DATOS Y APLICACIÓN SOBRE DATOS DE PERCEPCIÓN REMOTA

La fusión de datos basa sus conceptos fundamentales en el estudio de la actividad mental humana cuando una persona percibe imágenes y es capaz de establecer relaciones, almacenarlas y seleccionar solo la información relevante.

Wald (2002, 26) remarca estas capacidades de razonamiento como un proceso de fusión de la información. Establece diferencia entre términos como unión (merging), combinación (combination) y términos más amplios que implican operaciones en al menos dos conjuntos de información; integración (integration), descrita más en el rol de sistemas referido a concatenación; y asimilación (assimilation), como un término muy utilizado en el proceso de predicción del tiempo, que consiste en conocer la manera de "incorporar" en el sistema las observaciones obtenidas al "modelo numérico".

Existen revisiones en la literatura sobre la definición de fusión. Khaleghi et al. (2013) la definen de la siguiente manera: "Fusión de datos es un área de investigación

multidisciplinaria con ideas prestadas de diversos campos, tales como procesamiento de señales, teoría de la información, estimación e inferencia estadística e inteligencia artificial”.

Conceptualmente existen dos modelos de fusión de datos que han cobrado importancia particular: el JDL (Joint Directors of Laboratories) y el Dasarathy.

El modelo propuesto por JDL (1991) permite aplicar un proceso de fusión de datos con multisensores. Inicialmente considera un nivel de preprocesamiento y propone cuatro niveles de abstracción interconectados: el nivel objetos, el nivel de situación, el nivel de impacto y el nivel de perfeccionamiento.

Dasarathy (1997, 28; 2001, 75-76) establece un modelo que considera la fusión de datos como una arquitectura jerárquica que utiliza medidas, señales, características o decisiones. En cada nivel de abstracción plantea una entrada que alimenta el modo de fusión y su correspondiente salida. El nivel inferior se desarrolla en los dominios de una señal o imágenes (entrada y salida). En el nivel intermedio las entradas y salidas son las características o atributos. Y el último nivel consiste en una entrada y salida, como decisiones, y también se conoce como símbolo o decisión.

Wald (2002, 55) plantea la fusión de datos como la elección de una arquitectura que se diseña con base a la naturaleza de la información y de las inferencias buscadas.

La fusión de datos geoespaciales ha sido impulsada por organizaciones como European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL), The Image Analysis and Data Fusion Technical Committee (IADFTC) y Geoscience and Remote Sensing Society; esta última desde 2006 presenta temáticas de investigación que entre otras incluyen la técnica llamada pan-sharpen images, la fusión de datos de radar y ópticos y la fusión multimodal/multitemporal de muy alta resolución espacial.

Cuando las observaciones solo son generadas por uno o varios sensores, se conoce como fusión de sensor o fusión de multisensores. Una subclase es la fusión de

imágenes o fusión de píxel. A este nivel se tiene el modo pansharpening, cuya idea es fusionar las imágenes multispectrales de baja resolución espacial con una banda pancromática de alta resolución, con el propósito de aprovechar el contenido espacial e introducirlo a la multispectral, conservando la información espectral. Algunos métodos de fusión de imágenes son el de transformación wavelet (Duttilleux 1987, 298-304); el de Gram-Schmidt (Laben y Brower 2006); el de transformación al espacio IHS (intensidad-saturación-brillo) (Pohl y Genderen 1998); y el de componentes principales (Chavez et al.1991, 295-303).

Otro enfoque muy utilizado en fusión de datos es el nivel de decisión. Se ha aplicado para mejorar la clasificación de datos de percepción remota, construyendo una función de combinación que permita decisiones que pueden incrementar las fortalezas de los clasificadores seleccionados y combinarlos de forma óptima. Thiel (2004,13-14) remarca que la razón para utilizar la fusión de clasificador múltiple es combinar clasificadores, sobre todo para aumentar la precisión de clasificación. La fusión de clasificador múltiple es la combinación de las respuestas de diferentes clasificadores pertenecientes a una muestra u objeto de estudio para generar una respuesta global. Su combinación se espera sea más precisa que las respuestas de los clasificadores individuales. Para esta finalidad existen varios métodos de fusión que se describen en la sección 4.

3. CASO DE ESTUDIO: LAGO CHAPALA

Los estudios de los lagos como el de Chapala tienen alta importancia ecológica y económica en la planeación del uso del agua, la productividad pesquera o el diseño de estrategias de restauración. Un ejemplo de gestión del manejo es el Atlas del Lago de Chapala desarrollado en el CentroGeo (Reyes y Martínez 2005, 143). El Lago de Chapala, el más grande del país, es un cuerpo de agua individual que a lo largo de su historia ha visto modificado su volumen no solo por las condiciones climáticas, sino también por factores humanos como el excesivo bombeo para abastecimiento de la ciudad de Guadalajara. El procesamiento de imágenes de satélite ayuda al análisis de patrones de cuerpos de agua. Determinada la superficie de un lago con datos

satelitales, estos datos se pueden utilizar en estudios de morfometría. En este campo, la morfología permite estudiar tanto las formas de los lagos y vincularlas con su estructura (cambio de formas muy variadas) como los movimientos de agua que determinan la dinámica de difusión de los materiales disueltos en el lago, según las características geológicas propias y del contexto de su cuenca. Los parámetros físicos que se pueden determinar en forma directa o indirecta con datos satelitales incluyen, entre otros, longitud máxima, área, volumen, línea de orilla y ancho máximo.

Para obtener parámetros morfológicos confiables, se requiere una segmentación de los cuerpos de agua, que defina bien el contorno del lago. La línea o borde de orilla resulta difícil de determinar cuando la transición de la tierra con el agua fluctúa por cambios internos de un lago. La figura 1 muestra una serie histórica que visualiza el contorno del Lago de Chapala reportado por López-Caloca A. et al. (2008, 7104-7105). Su contorno ha presentado variaciones importantes en diferentes tiempos. En este trabajo se determinaron variables morfológicas y se relacionaron con los volúmenes medidos en el lago.

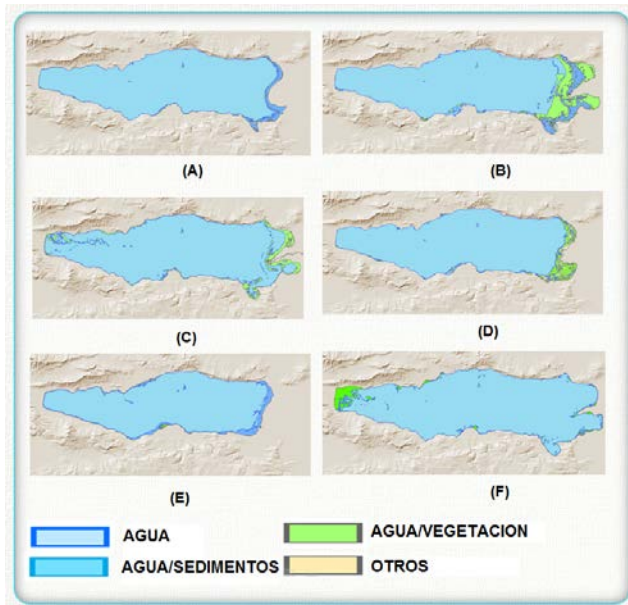


Fig. 1. Serie histórica de la cobertura del Lago de Chapala obtenida a partir de productos Landsat. En cada imagen se muestran las clases: agua, agua/sedimentos, agua/vegetación y otros (otras coberturas) en los siguientes años: A) 03/07/1990, B) 04/21/1992, C) 10/17/1996, D) 03/11/1999, E) 03/09/2001, F) 12/12/2005. (Cortesía de López-Caloca et al. 2008.)

El Lago de Chapala tuvo cambios en sus niveles durante el año 2003; a finales del mismo la precipitación hizo que el lago recuperara algo de su volumen. La figura 2 muestra un acercamiento de la variabilidad en el lado este, donde se observan zonas de cultivo (figura 2A), cubiertas posteriormente por el agua en el 2005 (figura 2D); el periodo de transición provocó, entre otros aspectos, sedimentos y aguas poco profundas, lodos, vegetación. Dada la complejidad del lago en el sentido de sus cambios internos, se dificulta el proceso de segmentación de imágenes.

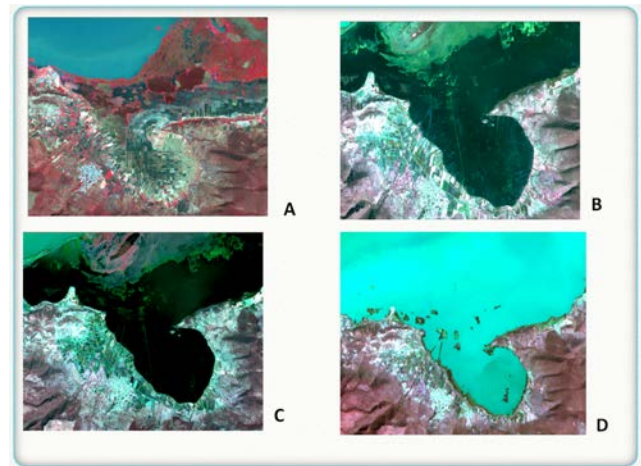


Fig. 2. Se muestran imágenes SPOT-5. A) 1999-11-03, B) 2003-12-15, C) 2004-03-14, D) 2005-11-02. En 1999 los niveles de agua bajaron por los cambios de uso del suelo (intensificación agrícola, deforestación), la extracción de agua y el retorno de efluentes, y grandes desviaciones de ríos. En 2003, imagen B, las condiciones de precipitación retomaron el espacio del lago. Entre 2003 y 2004 se formaron grandes aéreas de lodos y vegetación. Hasta el 2005 el lago recuperó parte de su extensión.

Los datos de la misión Landsat han permitido el monitoreo del Lago de Chapala desde 1973. La resolución espacial y temporal permite monitorear todo el lago en una sola observación. Estas características posibilitan estudiar la evolución, tendencias, cambios y periodicidad de aspectos que permiten entender el comportamiento del lago. Para trabajar con datos de SPOT-5 se requieren alrededor de 3 a 5 imágenes para el lago, de diferentes días de adquisición, lo que implica realizar mosaicos con todas las imágenes. Puede no ser rentable el uso de sensores con muy alta resolución espacial para monitorear el Lago de Chapala.

Desde mayo del 2003 los productos de Landsat 7 ETM+ se afectaron al dejar de funcionar el SLC (Scan Line

Corrector); una serie de líneas diagonales sin información afectan todas las bandas, la máscara de estas zonas sin información se reporta junto con los datos de las imágenes. Para continuar una serie histórica con los productos de Landsat es necesario considerar Landsat-5 y Landsat 7 ETM+ y proponer metodologías de restauración antes de la clasificación y fusión.

4. METODOLOGÍA

4.1 Revisión de trabajos en fusión de múltiples clasificadores

En el campo de reconocimiento de patrones, uno de los puntos fundamentales de investigación es mejorar la identificación de patrones a través de la fusión. Se ha observado en experimentos de clasificación de una escena que al aplicarse diferentes algoritmos se generan diferentes resultados y rendimientos. Así, el potencial de la fusión de la información pueden obtenerse utilizando diferentes clasificadores. (Polikar et al. 2006, 7-9; Huenupán 2010,14-20).

En este orden de ideas, el objetivo de estos métodos es realizar una inferencia de alto nivel. Los métodos más utilizados para realizar fusión de decisiones sobre el patrón de estudio pueden dividirse en tres grupos (Castanedo 2010,41): a) métodos probabilísticos o estadísticos (inferencia bayesiana, redes bayesianas e inferencia Dempster-Shafer); b) métodos basados en técnicas de inteligencia artificial (razonamiento abductivo y fusión semántica); c) métodos basados en la teoría de la información (métodos de votación). Por otro lado, Thiel (2004,15) clasifica los métodos para la fusión de múltiples clasificadores (MCF-Multiple Classifier Fusion) en dos clases: los estáticos, en los que la regla de fusión es una función que hace la clasificación sin usar más información que las entradas; y los dinámicos, que tienen en cuenta información usando el conocimiento de la clases y orienta el comportamiento del clasificador.

Fauve et al., (2006, 2828) muestran una aplicación de fusión de múltiples clasificadores con imágenes IKONOS para una zona urbana. Establecen dos pasos en el

proceso de fusión. En el primero los datos son procesados por separado para cada clasificador y cada clasificación utiliza su propia representación, sobre cada píxel en un grado de pertenencia a las clases propuestas. En el segundo paso se aplica una regla de decisión difusa (fuzzy decision) y posteriormente se agregan los resultados de acuerdo con las reglas. Este trabajo demostró que esta clasificación tiene una mejor precisión. La idea de mejorar la exactitud de clasificación ha sido utilizada por otros autores: Dalponte et al. (2008, 1416-1427) llevan un proceso de fusión con datos de LIDAR y de imágenes hiperespectrales para mejorar la clasificación de una zona de bosque; utilizaron un clasificador GML (Gaussian maximum-likelihood) y máquinas de soporte vectorial (SVMs, support vector machines), que logran una separabilidad a nivel de especies de árboles. En general, la fusión de múltiples clasificadores permite integrar adecuadamente la información multisensor. Con la finalidad de enfoque de mejorar el desempeño de la clasificación, Tarabalka et al. (2010, 736-740) utilizan imágenes hiperespectrales separando dos tipos de información; la primera extracción busca generar una clasificación considerando las clases en el sentido espectral mediante la aplicación de un algoritmo de máquinas de soporte vectorial y la utilización de un kernel de tipo RBF (Gaussian radial basis function); la segunda extracción de información es un gradiente que define una función de borde y no borde borroso (fuzzy no-edge/edge). Ambos resultados se integran por campos aleatorios de Markov donde una función de energía preserva los bordes durante la regularización espacial. Los resultados experimentales presentan mapas de clasificación con óptimo desempeño.

La figura 3 muestra el diagrama de proceso de la fusión que se utilizará en este trabajo; por separado entran las características o atributos extraídos por cada clasificador. En el módulo de fusión, los patrones de entrada se les aplica la regla de combinación de votación por mayoría (Majority Vote Rule), (Ruta y Gabrys 2000, 3; Kittler y Alkoot 2003, 110-115) para la integración. En un nivel alto de abstracción, en cada clasificador se realiza una decisión y posteriormente son combinadas.

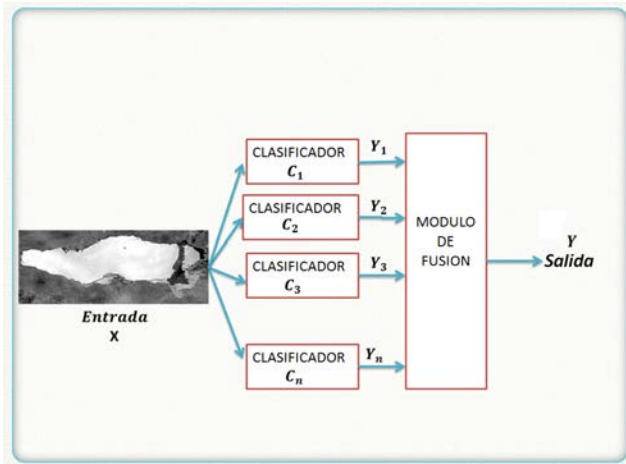


Fig. 3. Módulo de fusión.

En los métodos de votación las decisiones obtienen la coincidencia de dos o más decisiones sobre una misma clase (la mayoría); en caso contrario se irán a la clase de rechazo.

Para propósitos de este trabajo, se utilizarán los clasificadores de máquinas de soporte vectorial y campos aleatorios de Markov, y, posteriormente, la fusión. La definición del contorno de la orilla del Lago de Chapala, para el año 2004, se ve compuesta de vegetación acuática, gradientes en las orillas de aguas poco profundas, vegetación y lodo.

4.2 Material y métodos

La imagen de prueba utilizada fue adquirida el 22 de abril del 2004, identificada en el Path/Row = 29/46 de Landsat7 ETM+ SLC-off y con resolución espacial de 15 m. También se utilizó una imagen SPOT-5 del 14 de marzo del 2004 con resolución espacial de 10 m.

4.2.1 Corrección geométrica y atmosférica

Se corrigió el efecto atmosférico en las bandas y a su vez se transformaron los datos a reflectancia, a nivel de la superficie, utilizando para ello el método ATCOR 2, con el software de PCI Geomatics. Se realizó la corrección geométrica geocodificada a una proyección UTM (universal transversa de Mercator).

4.2.2 Generación de índice de diferencia normalizada de agua

Para reconocer el patrón de cuerpo de agua se realizó un realce con el índice de diferencia normalizada de

agua (NDWI: normalized difference water index). La tabla 1 muestra las formas para calcularlo.

| Ecuación | Longitud de onda (µm) |
|--|-----------------------|
| $NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$ (Gao, 1996). | verde (0,52 – 0,60), |
| $NDWI = (verde - NIR) / (verde + NIR)$ (McFeeters, 1996). | NIR (0.76-0.90), |
| $MNDWI = (verde - SWIR) / (verde + SWIR)$ (Xu, 2006) | SWIR (1.55-1.75), |

Tabla 1. Ecuaciones para calcular el índice de diferencia normalizada de agua (NDWI) según diferentes autores.

Este índice presenta valores positivos en un cuerpo de agua, mientras que sus valores en el suelo o presencia de la vegetación se acercan a cero o son negativos. A partir del NDWI se efectuó la restauración como se explica en la siguiente sección.

4.2.3 Restauración para el relleno de huecos en imágenes. Metodología de inpainting utilizando campo de expertos

Uno de los problemas más significativos en las imágenes Landsat-7 ETM+ es el bandeo que genera líneas sin datos por el efecto del SLC-off en las imágenes. Para restaurar los huecos sin información del NDWI que tienen los efectos de líneas sin datos, se utilizó la metodología de inpainting, propuesta por Roth y Black (2005, 6). La metodología de restauración propuesta se fundamenta en el campo de la restauración manual y artística (retouching, inpainting), utilizada ahora en el dominio digital de las imágenes. Se analiza la zona que se va restaurar (rellenar el espacio interpíxel sin información) y se utiliza la información de frontera, cercana a esta zona. Las fronteras de restauración deben permitir continuidad en las líneas y bordes, así como rellenar las zonas internas.

Para resolver este problema Bertalmio et al. (2000, 417-424) aplica la secuencia metodológica: 1) la primera etapa es una búsqueda global sobre la imagen, determinándose los huecos que han de rellenarse; 2) dada la información de las estructuras a restaurar llamada Ω , el relleno se hará mediante un proceso de prolongación o difusión desde las zonas de frontera $\delta\Omega$ hacia el interior del área a restaurar; 3) las regiones regeneradas dan lugar a la nueva imagen con las nuevas

zonas de frontera $\delta\Omega$, que se utilizarán en el relleno de la siguiente zona (figura 4)

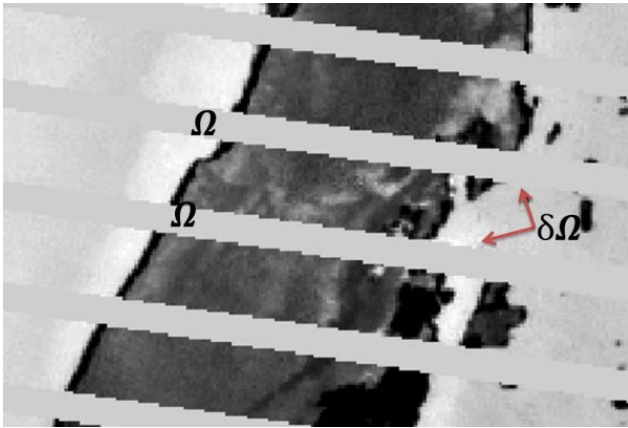


Fig. 4. Dada la matriz de una imagen digital $I(i,j)$, Ω es la región objetivo a restaurar (inpainting) y $\delta\Omega$ = es la región frontera.

La técnica empleada en el presente trabajo es el algoritmo desarrollado por Roth y Black (2005). El método se denomina campo de expertos (Field of Experts- FoE) y modela la probabilidad de una imagen en términos de un campo aleatorio de Markov (CAM), con parches sobrepuestos (producidos por algoritmos que buscan reproducir la región sin información con zonas similares) cuyos potenciales son representados como un producto de expertos.

Para realizar la técnica de inpainting, se trabajan las zonas dañadas utilizando una máscara binaria; por tanto, la aplicación viene limitada por esta máscara y el algoritmo solo actúa sobre esta zona. Las imágenes de Landsat 7ETM+ con los problemas de líneas sin información traen esta máscara para cada banda. El algoritmo de inpainting se aplicó directamente sobre el índice de diferencia normalizada de agua. Otro parámetro que influye en la restauración es el número de iteraciones, que requiere de bastante tiempo de cómputo.

Algunas consideraciones cualitativas en las técnicas de restauración de imágenes las describe Mastriani M. (2011, 88-90): 1) invarianza geométrica: 2) invarianza de contraste, 3) no introducir ruido ni artefactos, 4) preservación de los bordes y transiciones, 5) aliasing, 6) preservación de texturas y 7) sobreesuavizado. La idea es conservar los detalles de la imagen, es decir, preservar

los patrones en relación con su geometría, luminosidad, bordes, transiciones y texturas, además de evitar introducir información como ruido, artefactos (duplicar bordes) o introducir efectos visuales no deseados, por ejemplo, bordes entrecortados o de tipo sierra o escalón.

5. RESULTADOS

5.1 Inpainting y generación del NDWI

En la imagen de prueba Landsat ETM+ del 22 de abril 2004, el Lago de Chapala presenta atributos en su contexto temporal. Presenta vegetación (lirios de agua, algas y otros), sedimentos en suspensión (lodos); esto dificulta la segmentación del cuerpo de agua. Inicialmente se probó una restauración con datos de la escena Landsat ETM+ (2004) directamente sobre las bandas originales, e interpolación a partir de una triangulación con la herramienta de Image Gap Filling del software ENVI 4.6 (<http://www.yale.edu/ceo>). Se observó que las propiedades espectrales se modificaban y que al hacer acercamientos no conservan las estructuras geométricas. Se notó incluso suavizado en algunas zonas dentro de la imagen. Al realizar el NDWI no se dio un realce adecuado al cuerpo de agua. Dados estos resultados, se calculó el NDWI directo con las imágenes en reflectividad y se trató de restaurar por el algoritmo de campos expertos, como se explicó antes. El método de inpainting está programado en Matlab (Roth y Black 2005, 7) y requiere una máscara binaria. Para la imagen de prueba se utilizó la reportada para este producto Landsat 7 ETM+, utilizando la suma de las bandas empleadas para generar el NDWI.

La figura 5a muestra la reparación de la imagen Landsat 7 ETM+. Se encontraron buenos resultados visuales siguiendo los criterios de preservar las geometrías y dimensiones relativas del lago en las zonas de fronteras. Las orillas se restauraron con bordes y transiciones definidas (figura 5C). La zona este del lago tiene una complejidad natural, se presentan varias clases (agua, agua/vegetación, agua/sedimentos) y una gran cantidad de texturas; se observaron algunos efectos de bordes entrecortados, lo que no se presentó en la parte oeste. El proceso de las metodologías de inpainting implicó un costo computacional alto en tiempo.

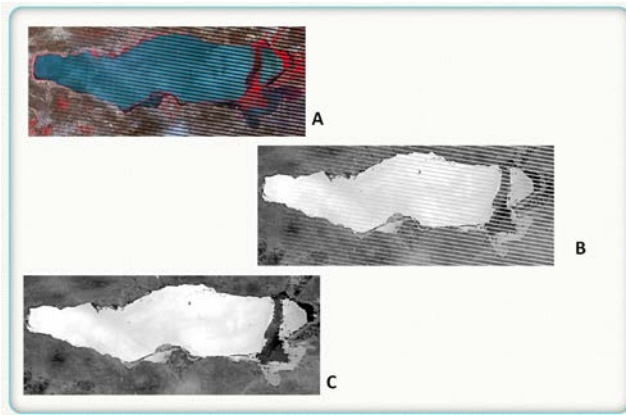


Fig.5. A) Composición en color de la imagen Landsat-7 ETM+, rojo [(banda 4(0.76-0.9µm)], verde [banda 3(0.63-0.69µm)], azul [banda 2 (0.52-0.60µm)]; B) se muestra la imagen original con líneas sin información; C) resultado de NDWI restaurado.

5.2 Clasificación y fusión

Después de la restauración, para este trabajo se aplicaron las técnicas de clasificación. Una primera prueba de clasificación sobre el NDWI, se realizó con el algoritmo ISODATA. La figura 6D mostró visualmente confusión en la clasificación de las clases. Por esta razón se consideraron mejores clasificadores utilizando campos aleatorios de Markov (Descombes et al., 1996, 123-132; Deng y Clausi 2005, 528-538) y máquinas de soporte vectorial, (Melgani y Bruzzone 2004, 1778-1790). Para el algoritmo de máquinas de soporte vectorial (MSV) se utilizaron las herramientas del ENVI 4.6. La función de base radial (RBF: radial basis function) se empleó como kernel de la MSV, y para campos aleatorios de Markov, se programó en Matlab. En ambos casos se utilizaron las clases agua, agua/sedimentos, agua/vegetación y otros; para los experimentos de clasificación de imágenes, las muestras de entrenamiento se extrajeron de la propia imagen.

En esta etapa se segmentó el NDWI restaurado, considerando dos técnicas de clasificación, una de tipo contextual y otra espectral, la de máquinas de soporte vectorial. La fusión de clasificadores considera a los clasificadores que participan como igualmente expertos. El resultado después de aplicar la regla de la votación de la fusión de clasificadores múltiples se muestra en las figuras 6F y 7C.

La validación de resultados de la fusión se enfocó en dos partes; la primera correspondió a una interpretación visual del Lago de Chapala con la imagen original

Landsat-7 ETM+, y con una imagen SPOT-5 de 10m de resolución espacial de fecha muy cercana. Una segunda prueba de análisis fue considerar una comparación, al aplicar la metodología de fusión de múltiples clasificadores sobre la imagen SPOT-5. Los resultados se muestran en las figuras 7C para Landsat7 ETM+ y 7D para SPOT-5. En términos de interpretación visual general, se aprecia una clasificación que muestra las capacidades del método de fusión de múltiples clasificadores. El proceso determinó el área de agua en el lago para las imágenes clasificadas de Landsat 7 ETM+ y SPOT-5 en 85.78% y 87.6, respectivamente.

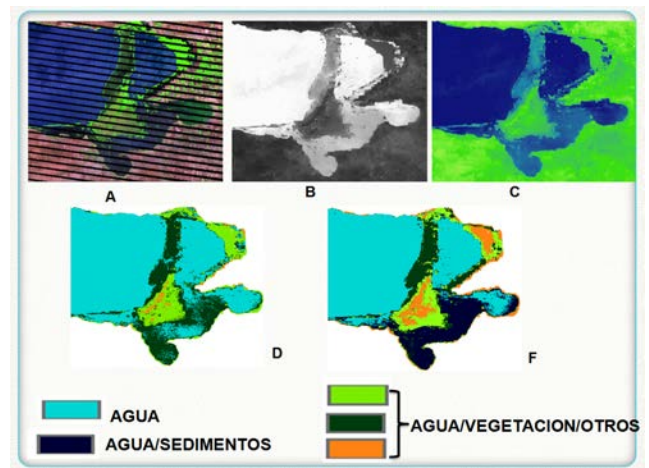


Fig. 6. A) Composición en color de la imagen Landsat-7 ETM+, rojo (B5-1.55-1.75 µm), verde (B4-0.76-0.9µm), azul (B3-0.63-0.69µm); B), resultado de NDWI restaurado; D) resultado de NDWI restaurado en un gradiente de color; D) clasificación con ISODATA, F) clasificación con fusión de múltiples clasificadores.

La técnica mostrada en la identificación del cuerpo del agua se mejoró por el proceso de fusión con base en la complementariedad de las fuentes de clasificadores espectral y textural. De acuerdo con los resultados obtenidos, la fusión de datos por decisión tiene un impacto positivo en la clasificación resultante.

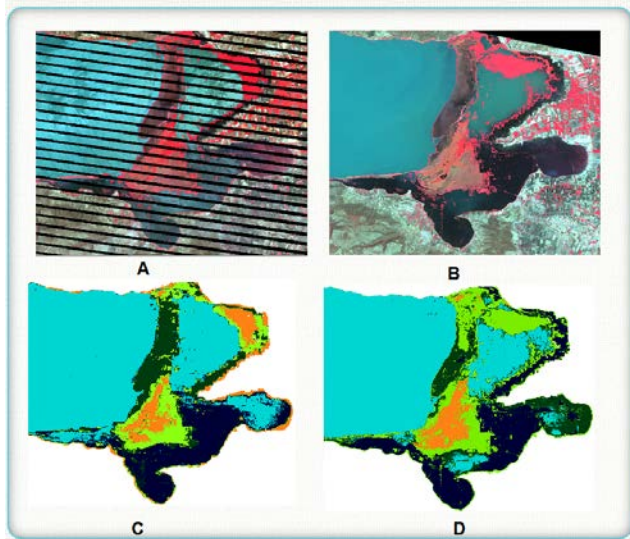


Fig. 7. A) Landsat 7 ETM+, 22 de abril del 2004, rojo (banda 4:0.76-0.9 μ m), verde (banda 3:0.63-0.69 μ m), azul (banda 2:0.52-0.60 μ m); B) SPOT-5, 14 de marzo del 2004, rojo (banda 0.830 μ m), verde (banda 0.660 μ m), azul (banda 0.55 μ m); C) imagen clasificada de Landsat 7 ETM+ por fusión de clasificadores múltiples; D) imagen clasificada de SPOT por fusión de clasificadores múltiples.

6. CONCLUSIONES

El marco formal de fusión de datos se usa ampliamente. Para el caso de datos geospaciales, este marco permite proponer y evaluar nuevas estrategias de arquitecturas de combinación, como es el caso de fusión de multisensores y multclasificadores. Esto abre temas de investigación a futuro.

El uso de múltiples tipos de sensores remotos o multclasificadores permite incrementar el reconocimiento de patrones que será observado y caracterizado, siempre que se realice un diseño o arquitectura de fusión adecuado. El problema esencial y prioritario de combinar datos es la conservación de patrones, es decir, conservar detalles importantes de los componentes de los datos. Los procesos de integración de datos no deberán introducir patrones que interfieran los análisis subsecuentes. La forma de diseñar una estrategia de fusión apropiada dependerá de la aplicación requerida, para obtener un resultado más fiable.

Especialmente, la utilización de las imágenes Landsat 7 ETM+ permite la estimación de grandes cuerpos de agua, lo que facilita las tareas de monitoreo y control en

el Lago de Chapala. La corrección realizada a estas imágenes mediante métodos inpainting permitió obtener un área continua del lago, que puede ser cartografiada con mayor eficiencia, con el fin de estimar sus bordes. Sin embargo, esta metodología requiere mucho tiempo de cómputo.

El resultado de NDWI restaurado permitió proceder con un esquema de clasificación y fusión. La combinación de clasificadores es un integrador eficiente de información. En el ejemplo presentado se comprueba que mejora la eficiencia de reconocimiento de patrones. La continuidad de este trabajo será la validación in situ, considerando los volúmenes medidos.

Estas metodologías de procesamiento se están aplicando en el CentroGeo para el monitoreo a corto plazo del Lago de Chapala, que continuamente presenta cambios en sus niveles e impacta de manera negativa a los habitantes de la región.

AGRADECIMIENTOS

Las imágenes SPOT fueron proporcionadas por la Secretaria de Marina, SPOT 5: © CNES 1999, 2004,2003, 2005, producida por estación de Recepción México de la Constelación SPOT (ERMEXS) bajo licencia de Spot Image

INFORMACIÓN DEL AUTOR

Alejandra A. López-Caloca es doctora en tratamiento digital de imágenes y señales, por la UNAM. Actualmente es investigador y docente en el Centro de Investigación en Geografía y Geomática “Jorge L. Tamayo” (CentroGeo). Trabaja en líneas de investigación básica y aplicada relacionadas con fusión de datos e imágenes; sistemas dinámicos; análisis espacio-temporal; detección de cambios; clasificadores digitales, percepción remota y geocibernética.

E-mail: alopez@centrogeo.edu.mx

REFERENCIAS

- Bertalmío Marcelo, Sapiro Guillermo, Caselles Vincent y Ballester Coloma. 2000. "Image Inpainting." Proceedings of SIGGRAPH 2000: New Orleans, EUA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. New York, NY. (Julio): 417-424.
- Castanedo Federico. 2010. "Fusión de Datos Distribuida en Redes de Sensores Visuales Utilizando Sistemas Multi-Agente." Tesis de doctorado, Universidad Carlos III de Madrid, 2010.
- Chavez S. Pat, Sides C. Jr., Anderson A. Jeffrey. 1991. "Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic." Photogrammetry Engineering & Remote Sens. vol. 57. no. 3 (March): 295-303.
- Dalponte Michele, Bruzzone Lorenzo y Gianelle Damiano. 2008. "Fusion of Hyperspectral and LIDAR Remote Sensing Data for Classification of Complex Forest Areas." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 46. no.5:1416-1427.
- Dasarathy Belur V.1997. "Sensor fusion potential exploitation-innovative architectures and illustrative applications." Proceedings of the IEEE. vol. 85. no.1 (January): 24-38.
- Dasarathy Belur. V. 2001. "What, where, why, when, and how?." Information Fusion. vol.2. no.2: 75-76.
- Deng Huawu, Clausi David A. 2005. "Unsupervised Segmentation of synthetic aperture radar sea ice imagery using a novel markov random field model." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol.43. no.3:528-538.
- Descombes X., Moctezuma M., Maitre H., Rudant J.P.1996. "Coastline detection by Markovian segmentation on SAR images." Signal Processing. no. 55:123-132.
- Dutilleul, P. 1987. "An implementation of the algorithm à trous to compute the wavelet transform." Compt-rendus du congrès ondelettes et méthodes temps-fréquence et espace des phases, J. Combes, A. Grossmann and Ph. Tchanitchian, eds. Marseille, Springer-Verlag. 298-304.
- Fauvel Mathieu, Chanussot Jocelyn & Benediktsson Jón Atli.2006. "Decision Fusion for the Classification of Urban Remote Sensing Images." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol. 44. no.10: 2828-2838.
- Gao Bo-Cai. 1996. "NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space." Remote Sensing of Environment, vol.58, no.3:257-266.
- Huenupán Quinan Fernando. "Fusión de múltiples clasificadores en verificación de locutor." Tesis de doctorado en Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Chile, 2010.
- Joint Directors of Laboratories (JDL). 1991. Data fusion lexicon, U.S. Department of Defense, Data Fusion Subpanel of the Joint Directors of Laboratories, Technical Panel for C3.
- Khaleghi Bahador, Khamis Alaa, Karray Fakhreddine O., Razavi SaiedehN. 2013. "Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art." Information Fusion. vol.14. no.1: 28-44.
- Kittler Josef, and Alkoot Fuad M. 2003. "Sum versus Vote Fusion in Multiple Classifier Systems." IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. vol.25. no.1 (febrero):110-115.
- Laben Craig A. y Browl Bernard V. 2000. "Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-sharpening." Technical Report, US Patent No. 6,011,875, Eastman Kodak Company. Accessed. <http://www.freepatentsonline.com/6011875.html>.
- López-Caloca Alejandra A., Tapia-Silva Omar F., Escalante-Ramírez Boris. 2008. "Lake Chapala change detection using time series." Proceedings of the SPIE Europe Remote Sensing, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology X. 7104-5, Cardiff, Wales, United Kingdom.
- Mastriani Mario. 2011. "Supercompresion de video y aplicaciones." Tesis de doctorado, Argentina: Instituto de Ciencias, Universidad Nacional de General Sarmiento, 88-90. Disponible en: http://www.ungs.edu.ar/ms_ungs/wp-content/uploads/2011/11/mastriani4.pdf
- Melgani F. & L. Bruzzone Lorenzo. 2004. "Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines." IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. vol.42. no.8:1778-1790.
- McFeeters, S.K. 1996. "The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features." International Journal of Remote Sensing. vol.17. no.7:1425-1432.

- Pohl C., & Van Genderen J.L. 1998. "Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications." *International Journal of Remote Sensing*. vol.19:823-854.
- Polikar R., Parikh D. & Mandayam S. 2006. "Multiple Classifier Systems for Multisensor Data Fusion." *SAS 2006 – IEEE Sensors Applications Symposium Houston, Texas USA, (February)*: 7-9.
- Reyes, Carmen and Martinez, Elvia. 2005. "Technology and Culture in Cybercartography." In *Cybercartography: Theory and Practice*, Vol. 4 in *Modern Cartography Series*, edited by D.R. Fraser Taylor. Amsterdam: Elsevier, 143-144.
- Ruta Dymitr y Gabrys Bogdan. 2000. "An Overview of Classifier Fusion Methods, Computing and Information Systems." *University of Paisley*. no.7:1-10.
- Roth Stefan, & Black Michael. J. 2005. "Fields of experts: A framework for learning image priors." *Proceedings de la IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Diego, California, EUA. no.2 (junio): 860-867
- Solberg Anne H. 2012. "Data fusion for remote sensing applications, in *Signal and Image Processing for Remote Sensing*." Ed. C. H. Chen. Florida. Taylor and Francis Books. 463-483.
- Tarabalka Yuliya, Fauvel Mathieu, Chanussot Jocelyn and Benediktsson Jón Atli. 2010. "SVM- and MRF-Based Method for Accurate Classification of Hyperspectral Images." *IEEE Geoscience and remote sensing letters*. vol. 7.no. 4 (October): 736-740.
- Thiel Christian. 2004. "Multiple Classifier Fusion Incorporating Certainty Factors." PhD diss., Ulm, Alemania, Universidad de Ulm. Accessed: <http://www.scribd.com/doc/509901/Master-Thesis-Diplomarbeit-Christian-Thiel-2004>), 13-18.
- Wald Lucien. 1998. "An overview of concepts in fusion of Earth data." In *Proceedings, EARSeL Symposium 1997 "Future Trends in Remote Sensing"*. Lyngby, Denmark, P. Gudmansen Ed., A. A. Balkema Publ., Rotterdam. 385-390.
- Wald Lucien. 2002. "Data Fusion: Definitions and Architectures: Fusion of Images of Different Spatial Resolutions." *Les Presses, École des Mines de Paris*. 46,55-72.
- Xu Hanqiu. 2006. "Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery." *International Journal of Remote Sensing*. vol. 27.no.14: 3025-3033.