

METODOLOGÍA PARA ESTIMACIÓN DE LA TURBIDEZ DE UN LAGO MEDIANTE LA CLASIFICACIÓN ORIENTADA A OBJETOS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES

• Carlos Quintana-Sotomayor •
Dirección General de Aguas, Chile

• Mario Lillo-Saavedra •
Universidad de Concepción, Chile

• Consuelo Gonzalo-Martín •
Universidad Politécnica de Madrid, España

• Juan Alberto Barrera-Berrocal •
Universidad de Concepción, Chile

Resumen

En este trabajo se implementó una metodología de clasificación de imágenes multiespectrales mediante técnicas orientadas a objeto, para cuantificar niveles de turbidez en la Laguna Grande de San Pedro (Chile) (36° 51' S, 73° 06' W). El procedimiento global considera una primera etapa de segmentación multi-resolución. En una segunda etapa se definieron clases a partir de la selección de áreas de entrenamiento asociadas con datos registrados *in situ* y descriptores de textura, para caracterizar la cubierta de la laguna. En una última etapa, la precisión alcanzada por cada prueba se evaluó mediante el índice de Pertenencia Global (P_G) y el índice de Estabilidad Global (E_G) propuestos en este trabajo, y se realizó un proceso de refinamiento de los resultados. Como resultado de la metodología propuesta, se generaron mapas de turbidez de la Laguna Grande de San Pedro en Chile, asociando el 86% de la cubierta de la laguna a una turbidez comprendida entre 1.0 y 1.7 NTU, que en comparación con estudios de otros sistemas lénticos, indican una reducida y homogénea turbidez del agua.

Palabras clave: lago, turbidez, análisis de imagen orientado a objetos, textura, teledetección ambiental.

Introducción

El estado trófico de un sistema lacustre es un indicador relevante de la calidad y el potencial uso de sus aguas (Olvera-Viascán, 1992), el cual puede determinarse por al menos cuatro parámetros (Olmanson *et al.*, 2008): concentración de nitrógeno, concentración de fósforo, concentración de clorofila-a y turbidez. En particular, para evaluar el estado trófico de un lago, usualmente se utilizan medidas de concentración de sólidos en suspensión, biomasa

de fitoplancton (definida por la concentración de clorofila-a) y concentración de materia orgánica disuelta que condicionan la turbidez del agua (Tyler *et al.*, 2006).

En la caracterización de la calidad del agua de un lago o embalse, el monitoreo *in situ* de los parámetros mencionados presenta la dificultad de definir el número de muestras, así como su distribución espacial y temporal, lo cual incide sobre la representatividad de las mediciones, y el uso de recursos económicos y humanos.

La superficie de agua absorbe gran parte de la radiación que recibe, incrementándose su absorptividad a mayores longitudes de onda. Múltiples estudios (Doxaran *et al.*, 2002; Ritchie *et al.*, 2001) han revelado que un aumento en la concentración de materiales en suspensión, como la clorofila-a, se detecta fácilmente en las longitudes de ondas corta correspondientes a los espectros electromagnéticos del azul y el verde. En el caso de la turbidez del agua, ésta se relaciona más bien con la concentración de sedimentos y genera un aumento de la reflectividad en el rango del espectro visible e infrarrojo cercano (IRC).

El uso de la teledetección en el estudio de calidad del agua en lagos y embalses ha sido objeto de investigación durante décadas, permitiendo llevar adelante un seguimiento más detallado del estado trófico de estos sistemas acuáticos y abriendo nuevas interrogantes ante la posibilidad de incrementar la capacidad de gestionarlos.

Con la incorporación de mejoras tecnológicas en los sensores remotos, se dispone de imágenes con mayor resolución espacial, incrementando el nivel de detalle con que se describe una cubierta terrestre. Si bien lo anterior representa una oportunidad, en el caso de cubiertas muy texturadas, la variabilidad de la información contenida en píxeles contiguos ha requerido la aplicación de técnicas de análisis no-tradicionales (Blaschke *et al.*, 2004).

Dentro de las técnicas no-tradicionales, los métodos de clasificación de imágenes orientados a objetos integran la relación de vecindario mediante la agrupación de píxeles en regiones u objetos según criterios de homogeneidad y escala (Chuvienco, 2002). Para este tipo de análisis, las medidas de textura (Haralick *et al.*, 1973) proveen importante información acerca de la disposición de los objetos y sus relaciones espaciales dentro de la imagen, lo que resulta determinante en la clasificación de una cubierta (Blaschke *et al.*, 2004).

Las técnicas de clasificación orientadas a objetos han sido aplicadas con relativo éxito

en diversos campos, enfrentando el problema de análisis de cubiertas fuertemente texturadas con imágenes de alta y muy alta resolución. La aplicación de estas técnicas requiere la definición de estrategias de segmentación de la imagen y clasificación de los objetos generados. La precisión de los resultados depende, principalmente, de la definición de los parámetros involucrados en el algoritmo de segmentación.

El objetivo de este trabajo es proponer una metodología para la estimación de la turbidez en lagos mediante la clasificación orientada a objetos de imágenes multiespectrales, utilizando datos *in situ*.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde a la Laguna Grande de San Pedro en Chile (36° 51' S y 73° 06' W). Este sistema léntico abarca una superficie aproximada de 1.55 km², y presenta profundidades máxima y media aproximada de 11.8 m y 8.3 m, respectivamente (Parra, 1989). Estudios señalan que hidrodinámicamente, la laguna presenta un periodo de mezcla de la columna de agua durante invierno y una marcada estratificación en verano (Poch Ambiental y DGA, 2009).

Datos *in situ*

Los datos de turbidez de la laguna fueron registrados mediante una sonda Hydrolab modelo DS5 el 24 de diciembre de 2008 (figura 1). El sensor dispone de una sensibilidad de 0.1 NTU en el rango 0.0 a 400 NTU.

Imagen multiespectral

La imagen utilizada fue capturada por el sensor SPOT5 el día 18 de diciembre del 2008. Posterior a la corrección atmosférica y ortorectificación, la resolución espacial de la imagen fue mejorada de 10 a 2.5 m

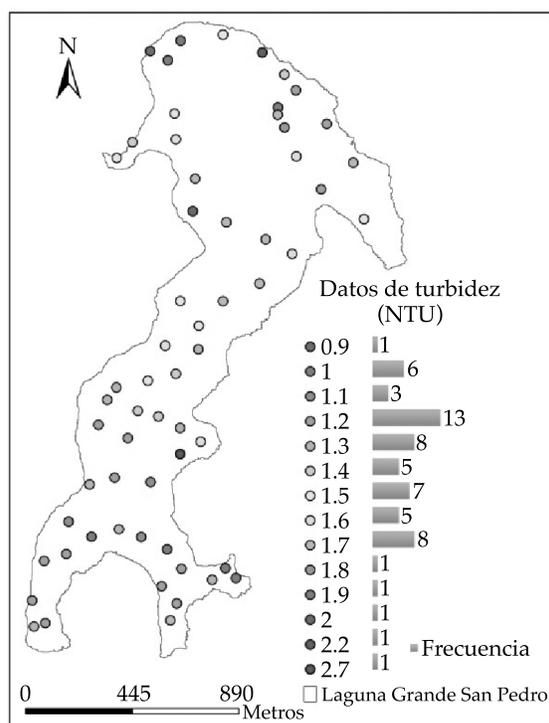


Figura 1. Distribución espacial y frecuencial de datos de turbidez registrados *in situ* en la Laguna Grande de San Pedro el 24 de diciembre de 2008.

mediante un proceso de fusión de las bandas multiespectrales (MULTI), con su respectiva imagen pancromática (PAN), para lo cual se utilizó la metodología propuesta por Gonzalo-Martín y Lillo-Saavedra (2007), manteniendo el sistema de coordenadas y proyección (UTM, 18S, WGS84).

Software

El software *eCognition Professional 4.0* (Definiens Imaging, 2004) fue utilizado para implementar los procesos de segmentación, definición de clases y clasificación de la imagen multiespectral.

Metodología

Como datos de entrada se seleccionaron tres bandas de la imagen SPOT5-fusionada, correspondientes al espectro del verde, rojo e IRC

(B1, B2, B3, respectivamente). A partir de las bandas espectrales se generaron cinco bandas sintéticas utilizadas en la detección de niveles de turbidez en cuerpos de agua (Dewidar y Khedr, 2001; Zhang *et al.*, 2002; Doxaran *et al.*, 2002). Las bandas sintéticas generadas son las siguientes: $BS1 = B1 / B2$, $BS2 = B1 / B3$, $BS3 = B2 / B3$, $BS4 = (B2 - B3) / B1$ y $BS5$ es el índice de agua de diferencia normalizada modificado (MNDWI) (Xu, 2006).

El algoritmo de segmentación implementado en *eCognition* utiliza una técnica de agrupación de objetos en un sentido ascendente desde el punto de vista de la escala (*bottom-up*). Esto es, desde objetos del tamaño de un píxel, que son unidos, formando objetos de mayor tamaño de acuerdo con criterios de heterogeneidad. Esto permite generar una red jerárquica de objetos de diferentes tamaños y heterogeneidad a partir de tres factores: factor de escala, factor de color (heterogeneidad espectral) y factor de forma: compacidad y suavidad (heterogeneidad espacial) (Batz *et al.*, 2004).

Clasificación de los objetos

Para la clasificación de los objetos se utilizó el método del vecino más próximo. Como un primer proceso de la clasificación se definieron las clases en función de las magnitudes de turbidez detectadas *in situ*. En un segundo paso, la definición de áreas de entrenamiento para las clases se realizó mediante la selección de objetos localizados en los puntos muestreados en la laguna y se llevó a cabo el análisis de distancia entre clases para su redefinición, agrupando aquellas que resultaron más próximas.

En el proceso de clasificación misma, la definición de las clases y la evaluación de distancias se deben realizar con base en un conjunto de medidas o descriptores de los objetos. Se seleccionaron dos descriptores espectrales (ND medio y desviación estándar de ND medio) y ocho descriptores de textura de Haralick (Haralick *et al.*, 1973): contraste, correlación, disimilaridad, entropía, homogeneidad, 2°

momento angular, media y desviación estándar. Cada descriptor evaluado sobre la base de una banda de los datos de entrada genera un rasgo asociado con un objeto o una clase (Baatz et al., 2004). Para maximizar la distancia entre clases, se buscó la combinación óptima de rasgos. Para ello, se utilizó la herramienta *Feature Space Optimization* implementada en *eCognition*.

Junto con evaluar la relación entre la magnitud de los parámetros de segmentación y la precisión de la clasificación, se evaluó el efecto de utilizar tres combinaciones distintas de datos de entrada (cuadro 1). Las pruebas A1, A2 y A3 utilizan todos los datos de entrada (ocho bandas); la prueba B1 utiliza sólo bandas sintéticas (cinco bandas) y la prueba C1 utiliza sólo bandas espectrales (tres bandas).

Evaluación de la precisión y el refinamiento de los resultados

La proximidad de un objeto a una clase y su consecuente clasificación difusa con un alto nivel de pertenencia no necesariamente indica que la clasificación es correcta. Ante una escasa diferencia entre la proximidad de un objeto a dos clases, la clasificación resultante se considera inestable. A partir de las estadísticas generadas en cada prueba de clasificación se calculó la pertenencia y estabilidad global como un promedio ponderado por la superficie de los objetos clasificados. Se proponen en este trabajo los índices de Pertenencia Global (P_G) y de Estabilidad Global (E_G) como un método para calcular la precisión alcanzada en cada clasificación:

$$P_G = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot Z_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

$$E_G = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot \Delta Z_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

Donde A_i es el área de un objeto i -ésimo que se ha clasificado y que no forma parte de los objetos asignados a las áreas de entrenamiento de una clase; Z_i y ΔZ_i son la pertenencia máxima y la estabilidad de la clasificación difusa del objeto i -ésimo, con i desde 1 al número de objetos clasificados (n); con $0 \leq P_G \leq 1$ y $0 \leq E_G \leq 1$.

Con los índices antes definidos, se comparó la precisión alcanzada en cada prueba de clasificación. La prueba mejor evaluada fue seleccionada para un refinamiento de los resultados en dos aspectos: (1) incrementar la discretización de niveles de turbidez e (2) incrementar el umbral de asignación difusa de un objeto a su clase más próxima desde 0.1 hasta 0.4.

Resultados y discusión

Para los resultados obtenidos en este caso de estudio se debe considerar que las clases fueron creadas en función de las magnitudes de turbidez detectadas *in situ* (en NTU). Los 61 datos registrados fueron asociados con objetos localizados en los puntos de muestreo y se asignaron como área de entrenamiento (figura 1). Los resultados de los análisis de

Cuadro 1. Estrategias de segmentación para las pruebas de clasificación. Bandas de datos asociadas con las pruebas; A1, A2, A3 (todas las bandas); B1 (bandas sintéticas); C1 (bandas espectrales).

Prueba	Núm. de bandas	Escala	Forma/color	Compacidad/suavidad
A1	8	1, 3 y 5	0.1/0.9	0.1/0.9
A2	8	1, 3 y 5	0.05/0.95	0.0/1.0
A3	8	1, 3 y 5	0.0/1.0	-
B1	5	1, 3 y 5	0.0/1.0	-
C1	5	1, 3 y 5	0.0/1.0	-

distancia entre clases realizados en cada una de las pruebas mostraron una mayor proximidad entre las clases "1.0", "1.2", "1.3", "1.4", "1.5", "1.6" y "1.7". Esto significa que el 85% de los objetos seleccionados como área de entrenamiento resultó espectral y texturalmente muy similar, lo cual refleja la alta homogeneidad de la radiancia de la laguna y la dificultad para detectar diferencias sutiles en el nivel de turbidez de ésta.

Si bien se observó una variación menor en la distancia entre clases al evaluarse con objetos generados a distintas escalas, la tendencia de proximidad de las clases señaladas se repitió en cada uno de los análisis, con independencia del factor de forma, factor de escala y compacidad utilizada para la generación de los objetos. Las clases anteriormente mencionadas fueron agrupadas en las clases "1.0 + [1.2 - 1.7]".

Los resultados de la clasificación del total de las pruebas definidas mostraron que entre el 82.7 y el 96.4% de la superficie de la laguna se asignó a clase "1.0 + [1.2 - 1.7]". La segunda clase con mayor superficie fue "1.1", que abarcó entre un 2.6 y un 6.8%. La superficie no clasificada resultó menor al 0.8% y se redujo conforme

los objetos fueron generados con un mayor factor de escala. Los objetos no clasificados se concentraron principalmente en la proximidad al perímetro de la laguna, donde los objetos se mostraron menos homogéneos. Con los datos utilizados y las pruebas definidas, los resultados señalaron que los objetos generados con un factor de escala 3 permiten aumentar la distancia entre clases e incrementar el rango dinámico de turbidez detectado en la laguna.

La precisión de la clasificación se evaluó en función de dos índices: Pertenencia Global y Estabilidad Global (figura 2). Así, el resultado mejor evaluado se obtuvo para la segmentación de las bandas correspondientes al espectro verde, rojo e infrarrojo cercano, con factor de escala 3 y un nulo factor de forma (prueba C1). Sobre esta prueba, los resultados fueron sometidos a un proceso de refinamiento, incrementándose E_G en un 25% y se mejoró el nivel de detalle mostrado en los mapas de turbidez generados (figura 3).

Considerando los resultados obtenidos, la metodología propuesta es una herramienta útil en la caracterización de condiciones tróficas de un lago, permitiendo realizar un análisis

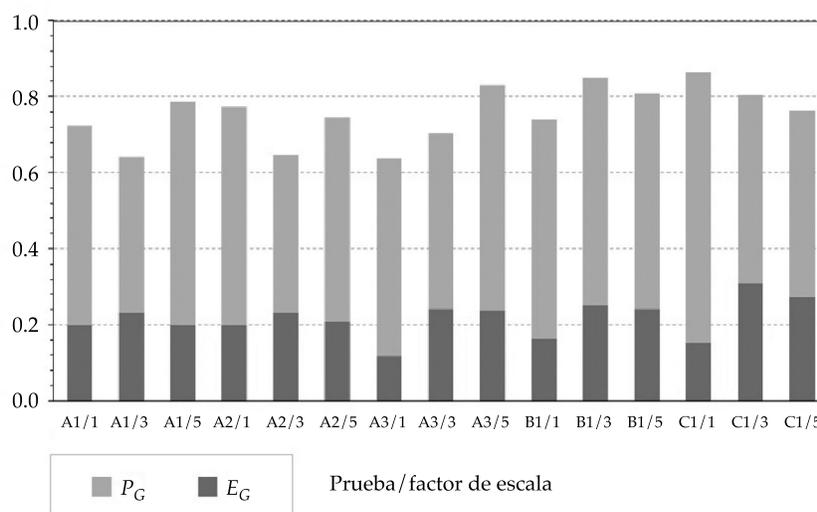


Figura 2. Magnitud de los índices de Pertenencia Global (P_G) y Estabilidad Global (E_G) propuestos para comparar la precisión de los resultados obtenidos en cada prueba de clasificación.

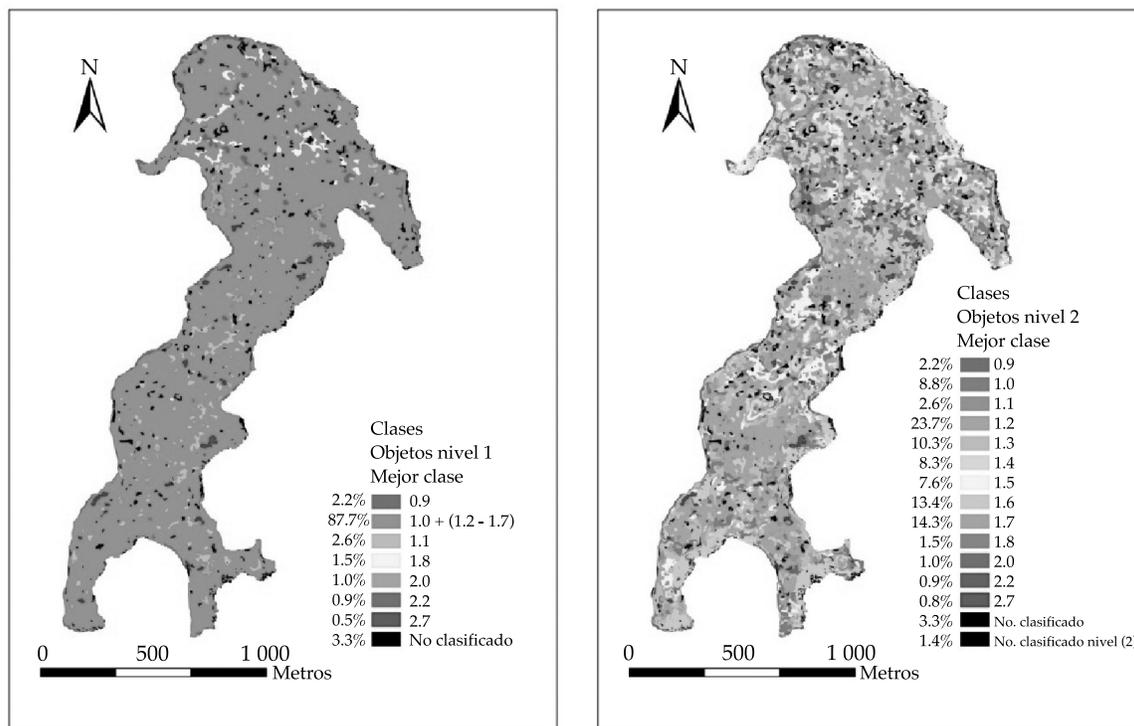


Figura 3. Mapas de turbidez de la Laguna Grande de San Pedro generados mediante metodología propuesta. Izquierda: resultado de clasificación de prueba C1; derecha: resultado de proceso de refinamiento aplicado a la prueba C1.

especialmente distribuido con aplicación en la planificación de campañas de monitoreo. En comparación con el estudio desarrollado por Poch Ambiental y DGA (2009), este trabajo coincide en la recomendación de monitorear la Laguna Grande de San Pedro en un único punto situado en la zona norte.

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto la clasificación de imágenes multispectrales mediante técnicas orientadas a objetos en una nueva aplicación para la detección de niveles de turbidez en un sistema léntico. Mediante la integración de una imagen SPOT5 y datos *in situ*, los resultados obtenidos permitieron generar mapas temáticos que pueden aportar a una mejor gestión de la Laguna Grande de San Pedro (Chile). Los alcances de este estudio se resumen en los siguientes puntos:

- Los índices P_G y E_G propuestos son una herramienta útil para comparar la pertenencia global y la estabilidad global alcanzada en las distintas pruebas de clasificación difusa. Los resultados más precisos se obtuvieron al segmentar la banda verde, roja e IRC de la imagen SPOT5, con un factor de escala 3 y un factor de color igual a 1.
- De los análisis de selección de rasgos para maximizar la distancia entre clases, los resultados mostraron que los descriptores de textura MCNG correlación, 2º momento angular, media y desviación estándar fueron los rasgos que mayor información aportaron.
- Finalmente, los mapas de turbidez generados permitieron conocer una aproximación de la distribución espacial de este parámetro y la aplicabilidad de la metodología se proyecta hacia la detección

de otros parámetros asociados con el estado trófico de un sistema léntico.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Dirección de Investigación y Creación Artística de la Universidad de Concepción, Chile (DIUC 211.131.014-1.0), y a la Universidad Politécnica de Madrid, España (AL09-P(I+D)20).

Recibido: 04/03/11
Aceptado: 19/04/12

Referencias

- BAATZ, M., BENZ, U., and DEHGhani, S. *eCognition User Guide 4 (Definiens Imagine)*. 2004.
- BLASCHKE, T., BURNETT, C., and PEKKARINEN, A. *Remote Sensing Image Analysis: Including the Spatial Domain (Chapter 12)*. Meer, S.M. (editor). Springer, 2004.
- CHUVIECO, E. *Teledetección ambiental: la observación de la Tierra desde el espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia, 2002.
- DEWIDAR, K. and KHEDR, A. Water quality assessment with simultaneous Landsat-5 TM, Egypt. *Hydrobiologia*. Vol. 457, 2001, pp. 49-58.
- DOXARAN, D., FROIDEFOND, J., LAVENDER, S., and CASTAING, P. Spectral signature of highly turbid waters application with spot data to quantify suspended particulate matter concentrations. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 81, 2002, pp.149-161.
- GONZALEZ, R. and WOODS, R. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2002.
- GONZALO-MARTÍN, C. y LILLO-SAAVEDRA, M. Fusión de Imágenes *QuickBird* mediante una Representación Conjunta Multirresolución-Multidireccional. *IEEE Latin America Transactions*. Vol. 5, núm. 1, 2007, pp. 32-37.
- HARALICK, R.M., SHANMUGAM, K., and DINSTEN, I. Textural features for image classification. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 3, No. 6, 1973, pp. 610-621.
- OLMANSON, L.G., BAUER, M.E., and BREZONIK, P.L. A 20-year landsat water clarity census of minnesota's 10,000 lakes. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 112, No. 11, 2008, pp. 4086-4097.
- OLVERA-VIASCÁN, V. Estudio de eutroficación de la presa Valle de Bravo, México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. VII, núms. 2/3, mayo-diciembre de 1992, pp. 148-161.
- PARRA, O. La eutroficación de la Laguna Grande de San Pedro, Concepción, Chile: un caso de estudio. *Ambiente y Desarrollo*. Vol. 5, núm. 1, 1989, pp. 117-136.
- POCH AMBIENTAL y DGA. *Redefinición de la Red Mínima de Lagos*. Chile: Dirección General de Aguas, Ministerio de Obras Públicas, 2009.
- RITCHIE, J., SEYFRIED, S., CHOPPING, M., and PACHEPSKY, Y. Airborne laser technology for measuring rangeland conditions. *J. Range Manage.* Vol. 54, No. 2, 2001, pp. 8-21.
- XU, H. Modification of nomalized difference water index (NDWI) to enhance open water featres in remotely sensed imagery. *Journal of Remote Sensing*. Vol. 27, 2006, pp. 3025-3033.
- ZHANG, Y., PULLIAINEN, J., KOPONEN, S., and HALLIKAINEN, M. Application of an empirical neural network to surface water quality estimation in the gulf of optical data and microwave data. *Remote Sensing of Environment*. Vol. 8, 2002, pp. 327-336.

Abstract

QUINTANA-SOTOMAYOR, C., LILLO-SAAVEDRA, M., GONZALO-MARTÍN, C. & BARRERA-BERROCAL, J.A. Methodology to estimate lake turbidity using object-oriented classification of multispectral images. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*. Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 143-150.

This work implements an object-oriented multispectral image classification to quantify turbidity levels in the Grande Lagoon of San Pedro (Chile) (36° 51' S, 73° 06' W). The first step in this methodology is multiscale segmentation; then, to characterize the lagoon cover, different classes are defined according to the selection of training areas associated with data recorded in situ and texture descriptors. In the last stage, the accuracy of each test is evaluated using the Global Membership (P_G) and the Global Stability (E_G) indices proposed by this work and the results underwent a refinement process. The proposed methodology resulted in the creation of turbidity maps of the Grande Lagoon of San Pedro, Chile, where 86% of the lagoon surface is associated with a turbidity level between 1.0 and 1.7 NTU, indicating that the turbidity of this lagoon is low and homogeneous as compared to other lentic systems studied.

Keywords: lake, turbidity, object-based image analysis, texture, environmental remote sensing.

Dirección institucional de los autores

Ing. Mg. Carlos Quintana Sotomayor

Departamento de Conservación y Protección de Recursos
Hídricos
Dirección General de Aguas
Ministerio de Obras Públicas
Morandé 59, Piso 8, Santiago, CHILE
Teléfono: +56 (2) 4493 950
carquint@udec.cl

Dr. Mario Lillo Saavedra

Facultad de Ingeniería Agrícola
Universidad de Concepción
Av. Vicente Méndez 595, Casilla 537, Chillán, CHILE
Teléfono: +56 (42) 208 807
Fax: +56 (42) 275 303
malillo@udec.cl

Dra. Consuelo Gonzalo Martín

Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas
Informáticos
Facultad de Informática
Universidad Politécnica de Madrid
Campus de Montegancedo, Boadilla del Monte
28660 Madrid, ESPAÑA
Teléfono: +34 (91) 3367 382
Teléfono: +34 (91) 3366 702
consuelo.gonzalo@upm.es

Dr. Juan Alberto Barrera Berrocal

Facultad de Agronomía
Universidad de Concepción
Av. Vicente Méndez 595, Chillán, CHILE
Teléfono: +56 (42) 208 881
jbarrera@udec.cl