

## MODELO PARA LA PREDICCIÓN DE PARAMETROS DE CALIDAD DEL AGUA DEL LAGO DE VALENCIA UTILIZANDO IMÁGENES DE SATELITE

C. De La Hoz (\*) y C. Gotilla (\*\*).

(\*)TPM Venezuela. Avda. Paseo Colon. Edif. Torre Polar Oeste piso 11 ofc. A, B, C, D Plaza Venezuela.  
Caracas, 1050. Venezuela. claudiadelahoz@gmail.com

(\*\*)Instituto de Ingeniería. CPDI Urb Monte Elena II, Sartenejas, Baruta. Caracas. Venezuela.

### RESUMEN

El Lago de Valencia es un importante reservorio de agua natural localizado en la región centro norte de la República Bolivariana de Venezuela, que ha sufrido un severo deterioro en la calidad de sus aguas por ser el receptor de los desechos domésticos, agrícolas e industriales que se producen en la cuenca. La disponibilidad de imágenes con una frecuencia de toma diaria, como las obtenidas por el sensor Modis del satélite Terra, complementada con información recopilada en estaciones de medición dentro del cuerpo de agua, permite realizar análisis geoestadístico por medio de técnicas Kriging para construir un modelo que sustente la predicción en la evolución en el tiempo de la concentración de clorofila, como un parámetro-indicador de la eutrofización en el lago y el cual presenta una mejor correlación entre la respuesta espectral en las imágenes y los datos medidos. Se utilizaron imágenes adquiridas en el periodo 2001 al 2003, fechas coincidentes con la disponibilidad de muestreos realizados en el lago. El modelo diseñado anticipa el comportamiento espacial de la clorofila en el cuerpo de agua, resultado que respaldará a las autoridades ambientales venezolanas tomar las acciones necesarias a fin de reducir el proceso de eutrofización que viene presentando este cuerpo de agua.

### ABSTRACT

The Valencia Lake is an important natural water reservoir located in the north central region of the Republic Bolivariana of Venezuela that has suffered a severe quality water deterioration because it is the domestic, agricultural and industrial waste receptor. The daily frequency images taken by the Terra /Modis Sensor satellite, complemented with information compiled from the measuring station inside the water body, allow to carry out geostatistical analysis using the Kriging technique in order to build a model that allows to predict, through time, the evolution of the chlorophyll as a parameter indicator of the lake eutrophication, and it is of a better correlation between the spectral response and the measured data.

Images taken during the period 2001-2003, where there were samples of the water quality parameters, were used.

The designed model allows to predict the spatial behavior of the chlorophyll in the water body, result that will allow environmental authorities to take the necessary actions to reduce the eutrophication process that this water body is presenting.

**Palabras clave:** teledetección, eutrofización, contaminación, modelos, clorofila.

### INTRODUCCION

La conservación de la calidad de las aguas superficiales en diferentes cuerpos de agua tales como: lagos, lagunas o embalses deben ser una de las principales preocupaciones a nivel mundial, ya que son fuentes de abastecimiento para los distintos usos de este vital líquido; el costo que ocasiona el daño en la calidad de las aguas es alto por su deterioro, a veces irreversible, además de las altas erogaciones de dinero.

En la actualidad el uso masivo de las imágenes de satélite permite realizar una evaluación y el monitoreo en el tiempo de parámetros tales como los sólidos en suspensión, la clorofila como indicador de la eutrofización, etc.

El Lago de Valencia ofrece suficientes razones para el seguimiento de su calidad a través de imágenes. Es un cuerpo de agua importante y de gran tamaño ubicado en la zona centro-norte de Venezuela, receptor de grandes cantidades de los desechos provenientes de las diferentes actividades urbanas, agrícolas e industriales que se desarrollan en la cuenca y deterioran su calidad, presenta un acelerado proceso de eutrofización natural y mineralización de sus aguas, producto del gran aporte de nutrientes que fluyen al lago.

Estudios realizados desde el año 1974 indican que las concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P), han pasado del promedio 1,19 mg/l de N y 0,10 mg/l de P a 2,33 mg/l para el N y 0,38 mg/l para el fósforo (Armas, 1997) [1].

Estos dos elementos son limitantes en el crecimiento de plantas acuáticas, donde la concentración de clorofila es elevada sobre todo en la desembocadura de los principales ríos.

En la presente investigación se genera un modelo que permite evaluar y predecir el nivel de contaminación de las aguas del Lago de Valencia a través de la evaluación en el tiempo de la concentración de clorofila mediante técnicas geoestadísticas y de teledetección, con la finalidad que las autoridades encargadas dispongan de una herramienta que se anticipe a determinar la contaminación y tomar las medidas necesarias y que a la vez ayuden a mejorar los índices que causan el problema y mantener el equilibrio ecológico y ambiental en el lago.

#### AREA DE ESTUDIO

La cuenca del Lago de Valencia se localiza en la región centro-norte del país, ocupando una superficie de 2.700 Km<sup>2</sup> (0,3% del territorio nacional) en los estados Aragua y Carabobo, en ella habitan unos dos millones doscientas mil habitantes según censo oficial del 2001. El área superficial del lago es de 356 Km<sup>2</sup>, aproximadamente el 12% de la cuenca almacena un volumen de 700 millones de metros cúbicos de agua, su nivel es de 405msnm, una longitud máxima de 30 km, un ancho máximo de 17 km un ancho medio de 12,7 Km, profundidad máxima de 37m y media de 18 m.

El Lago de Valencia es un cuerpo de agua cerrado, es decir no posee salida superficial de sus aguas y como todo lago endorreico, sus aguas solo pueden escaparse mediante evaporación y en consecuencia todo el material disuelto y suspendido permanece en el lago, salvo que se extraiga por medios artificiales.

Las aguas del lago han sido clasificadas del tipo IV, subtipo IV-A de acuerdo a la ley ambiental vigente venezolana como aguas para el contacto humano total.

El Ministerio del Ambiente desde el año 1978 ha venido realizando estudios, con el fin de evaluar el grado de contaminación del lago y su evolución en el tiempo, ubicando 40 estaciones (señaladas en rojo) distribuidas en todo el lago para realizar los diferentes análisis físico-químicos y biológicos que han contribuido a diagnosticar y evaluar la calidad del agua del lago, actualmente solo 13 de estas estaciones se mantiene activas. (Señaladas en amarillo) (Fig Nro. 1)



Figura 1.- Lago de Valencia. Estaciones de muestreo.

#### METODOLOGÍA

Para realizar este estudio se utilizaron imágenes del Satélite Terra/ Modis obtenidas del sitio web <http://glovis.usgs.gov>, coincidentes con las fechas de muestreo disponibles (2001-2003). Para este estudio solo se tomo la clorofila, el cual es uno de los parámetros indicadores de la eutrofización.

La metodología propuesta tiene por objetivo establecer un modelo del comportamiento de la clorofila basado en la información histórica medida a lo largo de los años 2001-2003 y la obtenida a partir de las imágenes de satélite. Para ello se calcula el índice de vegetación como un indicador asociado a la presencia de clorofila.

Se utilizan diversas técnicas geoestadísticas para parametrizar el comportamiento del parámetro asociado a la clorofila y obtener un modelo que permita predecir su evolución. Para ello se realizó una composición de las imágenes con tres bandas multiespectrales (roja, infrarrojo y azul) permitiendo discriminar bien las zonas donde hay presencia de clorofila.

Adicionalmente, se le aplicó una máscara con la finalidad de eliminar la información de la proporción terrestre en la imagen y poder considerar solo la correspondiente al cuerpo del agua.

Una vez aplicada la máscara a las imágenes, se procedió a extraer la información de clorofila asociada a los sitios de muestreos en las estaciones activas establecidas por el Ministerio del Ambiente, aplicando la ecuación de índice de vegetación y así obtener el valor del pixel en la coordenada respectiva. Con la información obtenida en cada una de las imágenes y en cada punto de muestreo se procedió hallar el mejor modelo de ajuste y definir la orientación principal de la estructura (anisotropía) del variograma.

Tomando la base de datos completa, se procedió en primer lugar a un estudio temporal y, en segundo, a un estudio geostatístico. Para iniciar el monitoreo de la clorofila en cada estación, se realizó el cálculo de la función de autocorrelación, la cual mostro valores positivos entre el nivel de la variable (clorofila) para dos periodos consecutivos (Fig. Nro.2).

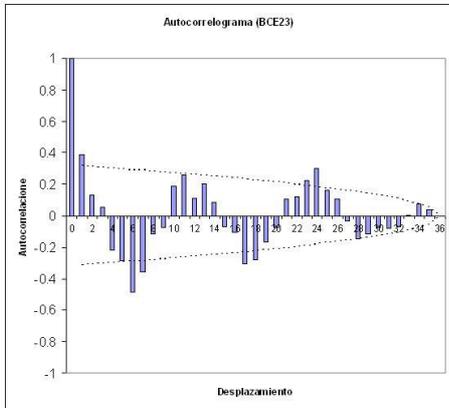


Figura 2.- Autocorrelograma BCE23.

Con dicha estrategia se midió el nivel de clorofila filtrando las series de datos con modelos AR(p), MA(q) y ARMA(p,q) empleando la metodología Box-Jenkins, obteniéndose como subproducto una serie de residuos independientes o incorrelacionados (estructura de ruido blanco).

Luego para la interpolación de los datos se utilizó el método kriging, el cual hace una mejor estimación de la variación a cortas distancias. Los estimados del kriging fueron calculados usando los parámetros de los semivariogramas ajustados (lineal, exponencial, gaussiano, cuadrático racional, cúbico o wave), mediante la siguiente ecuación:

$$Z(x_0) = \sum_I^n \lambda_i Z(x_i)$$

donde, n es el número de muestras  $Z(x_0)$ ;  $\lambda_i$  los pesos aplicados a cada  $Z(x_i)$ . Los pesos se calcularon de acuerdo a la teoría de las variables regionalizadas de Matheron (1970). Luego se realizó una validación para evaluar los estimadores del kriging mediante el cálculo del cuadrado medio de predicción (CMEP) (Bregt et al., 1991) y por último se realizó un

chequeo de los datos medidos en campo y los datos simulados (interpolación) con la finalidad de examinar el grado de ajuste.

## DESARROLLO

Con la finalidad de cubrir el período de estudio de acuerdo a las fechas de muestreo disponible en el Lago se descargaron 36 imágenes distribuidas a 12 por cada año (2001-2003) y con una proyección UTM zona 19. Se tomaron las coordenadas de las 13 estaciones operativas y se calculó la reflectancia, con estos datos se determinaron los modelos de las series temporales, logrando con ellos la predicción del comportamiento del nivel de la clorofila en el lago para el año 2004. En el análisis de las series se observo un leve crecimiento del nivel en algunas estaciones.

Con el objeto de hacer una predicción más óptima se realizó el análisis de la correlación promedio entre dos puntos en el espacio (semivariograma), el resultado en este análisis fue que el modelo que mejor se ajusta a los datos es el cúbico, debido a que presentó el menor error cuadrático medio de predicción. Una vez obtenido el modelo se procedió a realizar la predicción en puntos en el lago de Valencia no muestreados por medio de la técnica kriging, calculando el promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales fueron determinados apropiadamente por la estructura espacial de correlación analizadas (Fig. Nro.3).

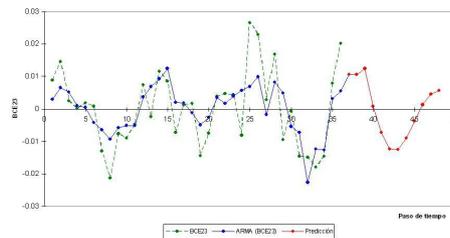


Figura 3.- Predicción de la serie para el año 2004.

En el gráfico del kriging (Fig. Nro. 4) podemos observar como la clorofila se concentra más en las estaciones este y noroeste del lago donde descargan los principales ríos y más contaminados; en la gráfica la mayor concentración se presenta en colores rojos. Desde hace varios años se han venido realizando diversas actividades para su descontaminación a través de la instalación de plantas de tratamientos y la aplicación de la

normativa legal vigente para las industrias ahí presentes. Sin embargo, debido al estado de deterioro que ha presentado el lago a lo largo de los años todavía los resultados no son notorios.

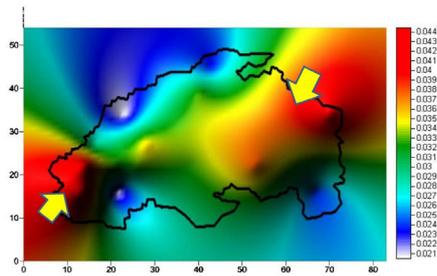


Figura 4.- Kriging (Medido-Simulado).

## CONCLUSIONES

- La utilización de imágenes de satélite en conjunto con técnicas geoestadísticas permiten evaluar espacial y temporalmente la calidad del agua en superficie a través de parámetros como la clorofila, indicador de la eutrofización.
- Las imágenes tomadas por el satélite Terra/Modis permiten realizar una evaluación diaria de la ubicación de las principales fuentes de contaminación.
- Los valores de los parámetros de la clorofila correspondientes a los muestreos del año 2003 son los que presentan mayor similitud con los obtenidos en las imágenes.
- La comparación de los resultados en la simulación numérica usando distintos períodos (simulados vs medidos) presenta resultados aceptables, ya que las diferencias entre ellas son mínimas. Lo que nos permiten realizar las predicciones de forma rápida y tomar las decisiones y medidas necesarias para el control de la contaminación.
- La modelación de la clorofila en el lago de Valencia, a través de la geoestadística y el Kriging, permite observar y ubicar la fuente de las mayores concentraciones de esa sustancia en un momento dado.
- La geoestadística y la teledetección son herramientas útiles, rápidas y de bajo costo que permiten el monitoreo y predicción de los parámetros de calidad en cuerpos de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

- Armas, L. 1997. El papel del Estado ante los desechos domésticos e industriales". *El Universal*.
- Brockwell, P. y Davis, R. 2002. *Introduction to Time Series and Forecasting, Second Edition*, Springer.
- Cressis, Noel. 1990. *Statistics for Spatial Data*, John Wiley & Sons, Revised Edition.
- Chuvieco, E. 1990. *Fundamentos de Teledetección*, Madrid. España.
- MARN. 1997-2000 Estudio integral de los tributarios de la Cuenca del Lago de Valencia. *Convenio MARN-JICA*.
- Matheron, G. 1963. *Principles of geostatistics. Economic Geology*.
- Welhan, John. 2001. *Geostatistics and Spatial Modeling*, Springer.
- AGRADECIMIENTOS**
- Los autores agradecen a las instituciones y proyectos que hicieron posible la realización del presente trabajo:
- Fundación Instituto de Ingeniería. (FII).
  - Proyecto LOCTI (Estudio del Transporte de Contaminantes en el Lago de Valencia).