DE 14 À 19 DE OUTUBRO DE 2024
DEL 14 AL 19 DE OCTUBRE DE 2024
V SLACTIA
SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA
SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA AGROPECUARIA

RECURSOS NATURALES Y PROTECCIÓN AMBIENTAL

UTILIZACIÓN DE UN MODELO GEOESTADÍSTICO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESTADO TRÓFICO DE UN EMBALSE DEL CENTRO DE ARGENTINA

Dra. Mg. Claudia Rosa Ledesma [1]
Dr.Wagner de Souza Tassinari [3]
Ing. Ag. Nazarena Solla Pastén [2]
Ing. Qco. Rolando Quinteros [1]
Dra. María Claudia Rodrígu

[1] Cátedra Matemática y Bioestadística; Departamento Estudios Básicos y Agropecuarios; Facultad de Agronomía y Veterinaria; UNRC; cledesma@ayv.unrc.edu.ar
[2] Incivet; Conicet-UNRC.
[3] Universidad Federal Rural do Río de Janeiro.

DE 14 À 19 DE OUTUBRO DE 2024
DEL 14 AL 19 DE OCTUBRE DE 2024
V SLACTIA
SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA
SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA AGROPECUARIA

Resumen: Los recursos hídricos superficiales en nuestro país han sufrido considerables alteraciones producto de la intervención antrópica en el ambiente. Los modelos estadísticos basados en datos georreferenciados permiten estimar el estado trófico de estos recursos. El objetivo de este trabajo fue generar un modelo geoestadístico de la variable concentración de clorofila-a, indicadora de calidad de agua, para determinar su distribución espacial en el embalse Río Tercero, Córdoba. Se consideró el muestreo correspondiente al verano del 2009, se realizaron mediciones in situ y se tomaron muestras de agua de sitios seleccionados para el posterior análisis de parámetros físicos, químicos y biológicos en el laboratorio. Se obtuvieron los semivariogramas experimentales para la variable concentración de clorofila-a y se ajustaron los modelos teóricos exponencial y esférico. El criterio de evaluación fue el error cuadrático medio ECM normalizado. Con los parámetros estimados por el modelo exponencial seleccionado (ECM normalizado= 1.366201), se realizó la interpolación espacial mediante kriging ordinario y se construyó el mapa de distribución espacial que permitió predecir valores de la variable en sitios no muestreados. Se puede concluir, que las herramientas y técnicas utilizadas en esta investigación para la modelización de variables indicadoras de eutrofización de las aguas del embalse Río Tercero, podrán servir de líneas extrapolables a futuras investigaciones en otros reservorios, al mismo tiempo que podrán utilizarse para ampliar los estudios realizados en el mismo.

Palabras-claves: Calidad de agua, Eutrofización, Modelado Geoestadístico.

1. INTRODUCCIÓN

La eutrofización es una perturbación ambiental que se produce por exceso de nutrientes, principalmente en lagos y embalses. Esta perturbación provoca la proliferación de algas, dañando la calidad del agua y aumentando los niveles de turbidez (Ledesma et al., 2013a-2013b).

En la zona centro-norte de Argentina, embalses como el río Tercero han acelerado sus procesos naturales de sedimentación y eutrofización, presentando altas cargas de nutrientes, altas concentraciones de clorofila-a y floraciones algales recurrentes (Mariazzi et al., 1989; Mancini; Rodríguez, 1999; Ledesma, et al., 2008; Ledesma, 2012; Rodríguez, et al., 2018; Ledesma M, et al., 2018).

El estado trófico de un lago (o embalse), definido como la tasa de materia orgánica suministrada por o hacia un lago, se utiliza para describir la cantidad de nutrientes en una masa de agua, o para denotar los efectos de la calidad general del agua. El estado trófico es un indicador de la "salud" del sistema y constituye un concepto fundamental en su gestión (Fabrel et al., 2010).

Se pueden adoptar diferentes criterios para determinar el estado trófico y la calidad del agua de estos sistemas, tales como, como indicadores biológicos, índices tróficos, determinación de parámetros

fisicoquímicos y biológicos y modelos geoestadísticos que mejoran la calidad predictiva (Dai et al., 2018).

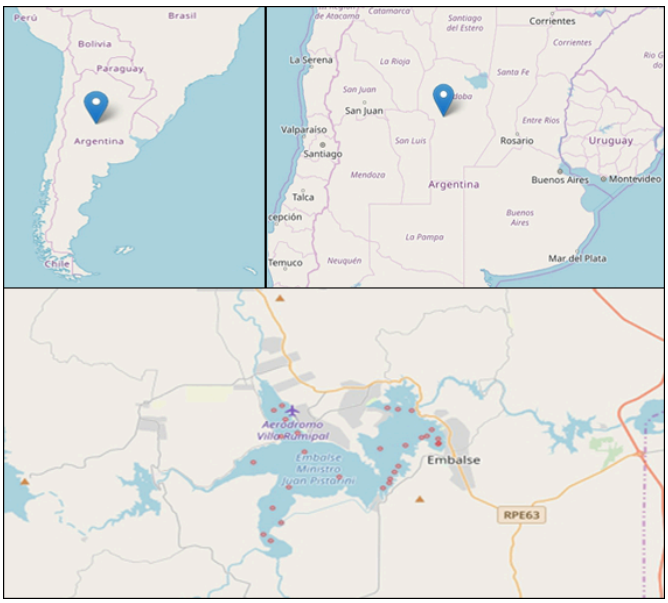
Las investigaciones comúnmente involucran situaciones donde es difícil utilizar los modelos lineales clásicos del análisis de varianza y regresión porque no se cumplen los supuestos de independencia, normalidad, igualdad de varianzas e incluso linealidad. La variabilidad espacial genera correlaciones entre las observaciones de una misma variable sobre el espacio, y por tanto los datos no pueden tratarse como independientes. Bajo estructuras de autocorrelación, los modelos de análisis estadísticos clásicos para estimar diferencias de medias y varianzas, pueden resultar inapropiados. Estos generalmente asumen datos independientes y no toman en cuenta correlaciones entre observaciones debidas a su localización espacial (Kim et al., 2017).

La modelación estadística basada en datos georreferenciados, geoestadística, no ha sido una herramienta ampliamente utilizada en el estudio de la eutrofización de recursos hídricos superficiales, el objetivo de este trabajo, fue describir la variabilidad espacial de la variable concentración de clorofila-a en el embalse de Río Tercero utilizando el modelado geoestadístico. Los mapas generados a partir de estos modelos, permiten inferir la concentración de clorofila-a en sitios no muestreados y determinar el estado trófico del reservorio (Mejía Rivera et al., 2007; Córdoba et al., 2014).

2. METODOLOGÍA

El embalse Río Tercero está ubicado en las Sierras Chicas, en la provincia de Córdoba, Argentina (32º21'28" S, 64º46'73"W). Su altura con relación al nivel del mar es de 529,4 m. Posee una superficie de 54,3 km^2, una profundidad media de 13,5 m y una profundidad máxima de 46,5 m. Fue construido sobre el río Tercero o Ctalamochita con fines de generación hidroeléctrica y nuclear, riego, control de inundaciones y actividades recreativas, en él, se consideraron 28 sitios de muestreo georeferenciados (Figura 1).

Figura 1: Ubicación del área de estudio y sitios de muestreo. Embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina.



Fuente: Google Maps.

Se tomaron muestras a 20 cm de profundidad y se consideró el muestreo realizado el verano del 2009. In situ y en laboratorio, se determinaron variables físico- químicas y biológicas (APHA, 2000).

Se utilizaron los softwares InfoStat Prof. (Di Rienzo et al., 2018) y R Studio, R 3.4.4 (http://www.R-project.org).

El modelado geoestadístico se puede dividir en dos fases (Schabenberger; Gotway, 2006). En la primera fase, se explora la correlación entre puntos en el espacio, se determina la dependencia espacial utilizando los variogramas o semivariogramas (Chica-Olmo, 2005).

El variograma ϒ(h) es un estadístico que expresa la variabilidad media de una función aleatoria Z(x), cuya expresión está dada por (1) ó (2):

$$\gamma(x_i, x_j) = \frac{1}{2} E[(Z(x_i) - Z(x_j))^2] \qquad (1)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(x + h) - Z(x))^2] \qquad (2)$$

donde:

ϒ(h) = variograma
h = vector de separación entre dos puntos, expresa la separación entre xi - xj
x_i , x_j = posición de una observación
Z= valor de la variable aleatoria en una posición

El variograma experimental o empírico es ajustado a un modelo teórico. El método de mínimos cuadrados ponderados (WLS) es el elegido para la estimación de las funciones de semivariogramas (Pelissari et al., 2017). Los tipos de variogramas teóricos usados son: exponencial, esférico y gaussiano. El error cuadrático medio de predicción normalizado (ECM normalizado) es utilizado para seleccionar el modelo más adecuado.

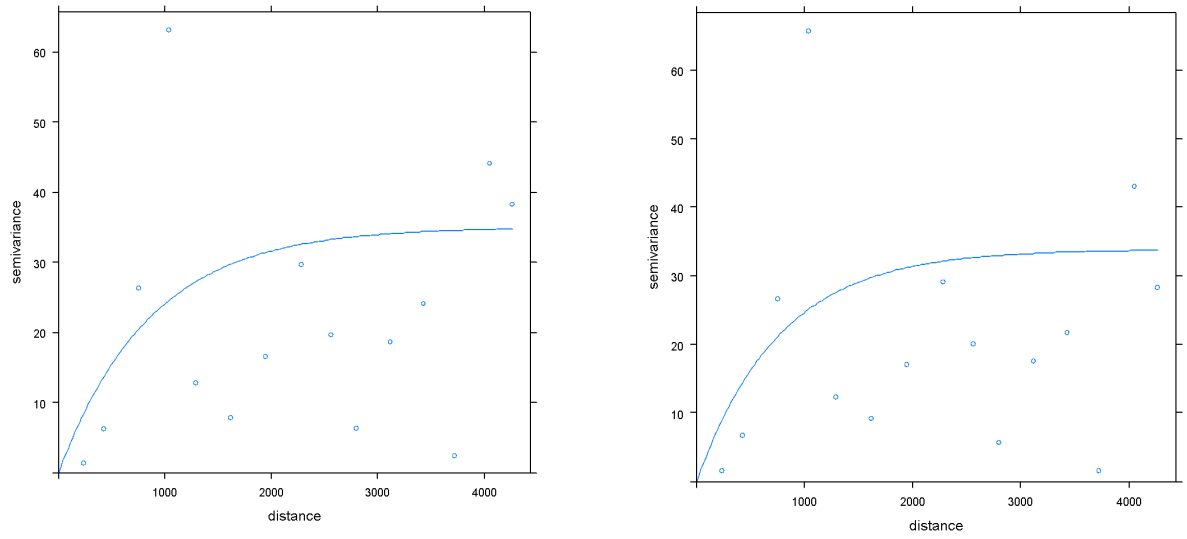
En la segunda fase, se hace predicción de valores en sitios no muestreados, por medio del método de estimación espacial denominado kriging (Toro-Chacón et al., 2020). Éste método de interpolación espacial permite generar mapas de predicción espacial de la variable concentración de clorofila-a y mapas de varianza del error de estimación en el embalse de Río Tercero.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la variable concentración de clorofila-a, se obtuvo el semivariograma experimental y se ajustaron los modelos teóricos, exponencial y esférico, sin tendencia y con tendencia. Estos dos modelos son frecuentemente usados en los estudios medioambientales (Wu et al., 2008).

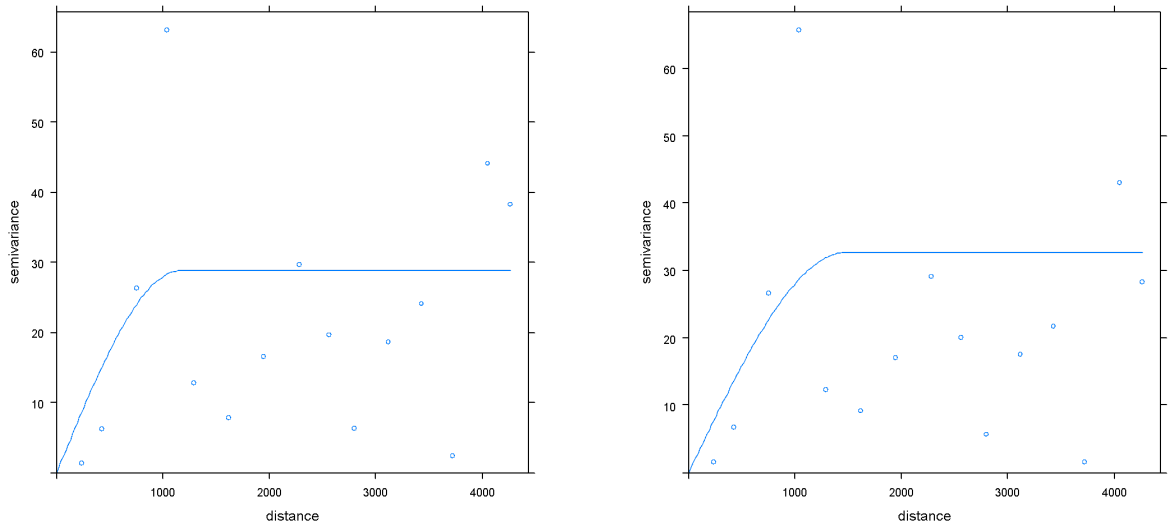
Las Figuras 2 y 3 muestran los semivariogramas empíricos y los modelos teóricos exponencial y esférico, sin tendencia y con tendencia, ajustados por el método de mínimos cuadrados ponderados (WLS).

Figura 2: Semivariograma experimental (puntos) y Modelo teórico exponencial (línea), sin tendencia y con tendencia.



Fuente: C, Ledesma , 2024.

Figura 3: Semivariograma experimental (puntos) y Modelo teórico esférico (línea), sin tendencia y con tendencia.



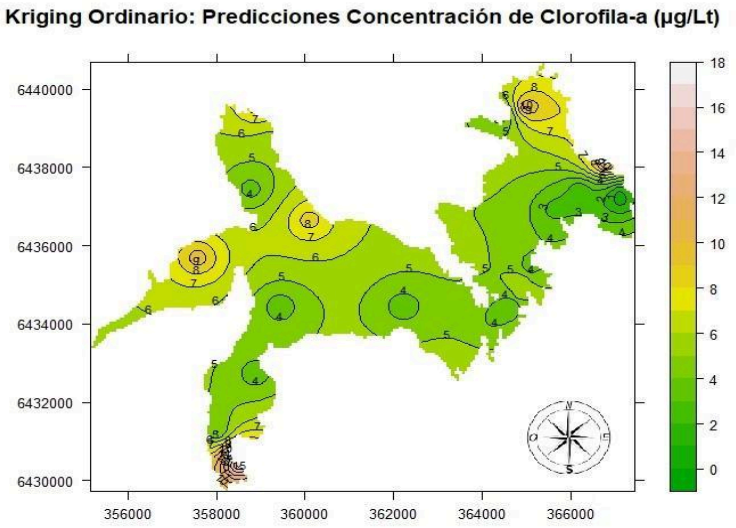
Fuente: C, Ledesma , 2024.

Se pudo verificar la adecuación entre los datos y los parámetros adoptados, utilizando la técnica de validación cruzada (Dos Santos et al., 2011). Mediante esta técnica se seleccionó el modelo adecuado, el criterio de selección fue el error cuadrático medio de predicción normalizado (ECM normalizado). Se observó que el modelo propuesto para la modelación de la eutrofización de las aguas del embalse Río Tercero utilizando la geoestadística clásica fue el semivariograma exponencial sin tendencia (ECM normalizado=1.366201) (Córdoba et al., 2014).

Con los parámetros estimados del modelo (psill=34.99, Rango=854.68, Nugett=0), se realizó la interpolación espacial, por kriging ordinario, para predecir valores de la variable concentración de clorofila-a en sitios no muestreados (Xu et al., 2000; Mir et al., 2017). Se construyeron los mapas de Predicción espacial y de Varianza del error de estimación para la variable concentración de clorofila-a en el embalse Río Tercero (Figuras 4 y 5).

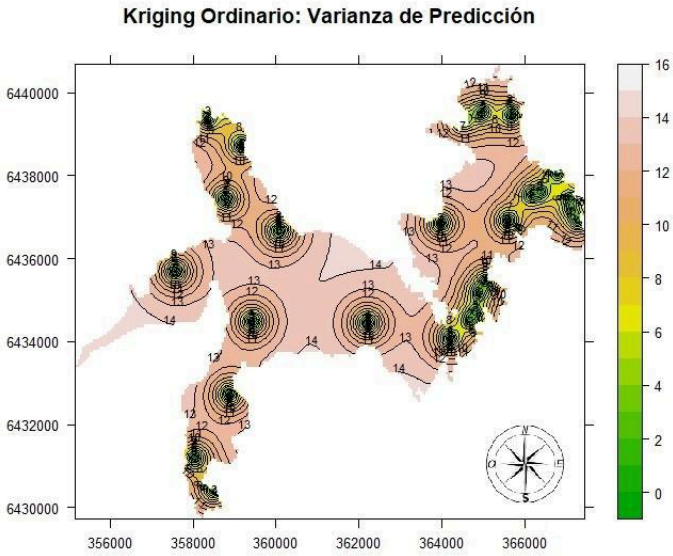
Se observaron altas concentraciones de clorofila-a en el lóbulo izquierdo, en la zona del canal de enfriamiento, según la escala gráfica, se pueden estimar valores próximos a los 8 µg/L. Por otro lado, en la zona de la desembocadura de los ríos Quillinzo y La Cruz, denominada Confluencia de los Ríos, se observó la influencia de dicho ingreso. En el lóbulo derecho, se detectaron las menores concentraciones de clorofila-a. La varianza del error de estimación, permitió evaluar y cuantificar la incertidumbre, a medida que nos alejamos del sitio de muestreo el error de estimación aumenta.

Figura 4: Mapa de Predicción espacial de la concentración de clorofila-a en el embalse Río Tercero.



Fuente: C, Ledesma , 2024.

Figura 5: Mapa de Varianza del error de estimación en el embalse Río Tercero.



Fuente: C, Ledesma , 2024.

6. CONCLUSIONES

• La capacidad predictiva del modelo geoestadístico obtenido para modelar la eutrofización de las aguas del embalse de Río Tercero fue satisfactoria.

• El mapa de predicción espacial construido permitió predecir la concentración de clorofila-a en sitios no muestreados y, así, evaluar su variabilidad espacial.

• El mapa de varianza del error de estimación indicó que el error de predicción para el modelo obtenido fue en promedio del 13.6%.

• Si bien no se conocen trabajos donde se utilice la geoestadística clásica para modelar la eutrofización del embalse de Río Tercero, este trabajo constituye una línea base para otros modelos como: GAM (modelo aditivo generalizado) o ANN (red neuronal artificial), entre otros.

REFERENCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standart methods for the examination of water and wastewater**, Washington. 2000.

CHICA-OLMO, M, J.A. LUQUE ESPINAR; J.P. RUIZ CASTELLANO; I. CARPINTERO SALVO; M.J. GARCÍA SOLDADO. Integración de datos de calidad de aguas subterráneas mediante modelos geoestadísticos. De lo local a lo global: nuevas tecnologías de la información geográfica para el desarrollo. **IX Conferencia Iberoamericana SIG. VII Congreso Nacional AESIG. II Reunión GMCSIG Cáceres 2003- Universidad de Extremadura: Servicio de Publicaciones.** ISBN: 84-7723-661-5. 2005.

CÓRDOBA, M; C. BRUNO; F. AGUATE; M. TABLADA; M. BALZARINI. Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. Manual de Buenas Prácticas. **Ed. Eudecor. Córdoba, Argentina**. ISBN 978-987-1536-66-5. 2014.

DAI, L.; L. WANG; L. LI; T. LIANG; Y. ZHANG; C. MA; B. XING. Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang Lake in China. **Science of the Total Environment** 621 (2018) 1433-1444. 2018.

DI RIENZO J.A.; F. CASANOVES; M.G. BALZARINI; L. GONZÁLEZ; M. TABLADA; C.W. ROBLEDO. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, **Universidad Nacional de Córdoba, Argentina**. URL. http://www.infostat.com.ar. 2018.

FABRE, A; C. CARBALLO; E. HERNÁNDEZ; P. PIRIZ; L. BERGAMINO; L. MELLO; S. GONZÁLEZ; G. PÉREZ; J. G. LEÓN; L. AUBRIOT; S. BONILLA; C. KRUKI. El nitrógeno y la relación zona eufótica/zona de mezcla explican la presencia de cianobacterias en pequeños lagos subtropicales, artificiales de Uruguay. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences** (2010), 5(1): 112-125. 2010.

KIM, J-H; K-H. KIM; N. T. THAO; B. BATSAIKHAN; S-T. YUN. Hydrochemical assessment of freshening saline groundwater using multiple end-members mixing modeling: A study of Red River delta aquifer, Vietnam. **Journal of Hydrology.** Volume 549, June 2017, Pages 703-714. Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.040. 2017.

LEDESMA, C.; F. BONATTO; M. BONANSEA; C. PROSPERI; C. RODRÍGUEZ. Status trophic and spatial variability of reservoir Río Tercero. Córdoba, **Biocell** ISSN 0327-9545(print)- ISSN 1667-5746 (electronic). 32 (1), 169. 2008.

LEDESMA, C. Modelos geoestadísticos basados en datos satelitales para el mapeo de concentraciones de clorofila-a en el embalse Río Tercero, Argentina. [Tesis de maestría]. **Universidad Nacional de Río Cuarto**, Río Cuarto, Argentina. 2012.

LEDESMA, C., BONANSEA, M., RODRÍGUEZ, C.; SÁNCHEZ DELGADO A. Determinación de indicadores de eutrofización en el embalse Río Tercero, Córdoba (Argentina). **Ciência Agronômica**, 44(3), 419-425. 2013a.

LEDESMA, C.; M. BONANSEA; C. RODRÍGUEZ; A. SÁNCHEZ DELGADO. Calidad del agua en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando sistemas de información geográfica y modelos lineales de regresión. **Revista Ambiente & Agua**, 8(2): 67-76. ISSN: 1980-993X-doi: 10.4136/1980-993X. 2013b.

LEDESMA M.; M. BONANSEA; C. LEDESMA; C. RODRÍGUEZ; L. PINOTTI. Water quality assessment of the Cassaffousth Reservoir using multivariate statistical techniques. Revista Científica FAV-UNRC **Ab Intus.** 2 (1): 27-38 ISSN: 2618-2734. 2018.

MANCINI, M.; C. RODRÍGUEZ. Informe estudio embalse Río Tercero. FAV. UNRC. **Com. Personal**. 1999.

MARIAZZI, A.A.; M.C. ROMERO; V.H. CONZONNO; A.J. MARIÑELARENA. Results of a limnological study in a reservoir previous the functioning of a nuclear power plant (embalse del Río III, Argentina). **Revista asociación de ciencias naturales del litoral** 20 (1 y 2) 57-68. 1989.

MEJÍA RIVERA, O.; T. BETANCUR VARGAS; L. LONDOÑO CIRO. Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrología del Bajo Cauca Antioqueño. **Dyna,** Año 74, Nro. 152, pp 137-149. Medellín, junio de 2007. ISSN 0012-7353. 2007.

MORAL GARCÍA, F.J. Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. **Ecosistemas** 13 (1). Asociación española de ecología terrestre. http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp. 2004.

RODRÍGUEZ, M.C.; M. BONANSEA; L. PINOTTI; C. LEDESMA; M. MANCINI; V. REYNOSO. Monitoring Program in Reservoirs of the Tercero River Basin Córdoba, Argentina. **Joint Event on Proceedings of World Congress on CHROMATOGRAPHY AND SEPARATION SCIENCE & International Conference and Exhibition on SATELLITE AND SPACE MISSIONS.** Realizado en Roma Italia. Noviembre. 2018.

SCHABENBERGER, O.; C. GOTWAY. Statistical methods for spatial data analysis, **Chapman & hall-crc** 42-150. 2006.

TORO CHACÓN, L., DÍAZ CELIZ, C., CÁRDENAS, J., AGUILAR, L., PIMIENTA RUEDA, A. y TORRES MORA, M. Aplicación de tecnologías SIG en el análisis geoespacial de determinantes de calidad del agua: Oxígeno disuelto, pH y temperatura del agua. Universidad de los Llanos, Villavicencio, Colombia. **Centro de Innovación y Tecnología Instituto Colombiano del petróleo (ICP), Ecopetrol S.A.,Villavicencio,** Colombia. 2020.

WU, C.; J. WU; Y. LUO; H. ZHANG; Y. TENG. Statistical and geoestatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units. **Geoderma** 144 (2008) 171-179. Elsevier B. V. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.11.001. 2008.

XU, F.; S. TAO; R.W. DAWSON; B. LI. A GIS-based method of lake eutrophication assessment. **Ecological Modelling.** 144: 231-244. 2000.