



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

SIMULACIÓN GEOESTADÍSTICA DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA TRANSPARENCIA DEL AGUA EN EL EMBALSE DE RÍO TERCERO, CÓRDOBA, ARGENTINA.

Mg. Cs. Bonino Facundo Ubaldo 1
Mg. Cs. Reynoso Viviana 2
Esp. Carreño Joel ¹
Ing. Qco. Rolando Quinteros ¹
Dr. Bonansea Matías¹

Resumen: El manejo del agua es clave para el desarrollo humano, especialmente en América del Sur, donde alrededor del 50% de los cuerpos de agua están contaminados. Este trabajo se realizó en el embalse Río Tercero, en Córdoba, Argentina. Este reservorio de agua es crucial para el consumo humano, generación de energía y control de inundaciones. Sin embargo, enfrenta problemas ambientales como la eutrofización, que deteriora la calidad del agua. En este estudio se aplicó la técnica geoestadística de la simulación Gaussiana condicionada para mapear variables como la transparencia del agua en el embalse, mostrando variaciones espaciales significativas. Los resultados destacan la zonificación del embalse, con menor transparencia cerca de los tributarios y mayor transparencia en zonas profundas. Se concluye que es necesario un enfoque sistémico que integre el estudio del embalse y su cuenca, considerando las actividades humanas y naturales que afectan la calidad del agua.

Palabras clave: Calidad de aguas – Geoestadística - Simulación Gaussiana.

1. INTRODUCCIÓN

El manejo del agua es fundamental para el desarrollo humano debido a su importancia como soporte vital y recurso económico. Los lagos y embalses proveen agua para el consumo humano y permiten realizar una serie de funciones sumamente valiosas, entre las más destacadas figuran la generación de energía, la provisión de agua para consumo humano, animal y riego, la atenuación de crecientes y la provisión de hábitat para especies animales y vegetales (Sriwongsitanon et al., 2011). Sin embargo, estos cuerpos de agua enfrentan desafíos ambientales significativos, como la eutrofización, que deteriora la calidad del agua y afecta negativamente a los ecosistemas. La eutrofización puede ser un proceso natural, pero se acelera con la actividad humana, incluyendo urbanización, agricultura intensiva y descargas de desechos. Esto genera un enriquecimiento excesivo de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo, que disminuyen la vida útil del embalse y producen impactos ecológicos y económicos adversos (BONANSEA et al., 2012).

¹ Área de Matemática-Departamento de Estudios Básicos y Agropecuarios-Facultad de Agronomía y Veterinaria-UNRC.

² Cátedra de Ecología-Departamento de Estudios Básicos y Agropecuarios-Facultad de Agronomía y Veterinaria-UNRC.



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

En América del Sur, alrededor del 50% de los recursos acuáticos presentan problemas de contaminación debido al crecimiento de las actividades mineras, agrícola-ganaderas y al aumento de la población (Guerrero et al., 2006). Esto ha generado que la preocupación de los países por contar con agua suficiente, en cantidad y calidad, para diferentes actividades sea cada vez mayor.

En la resolución de los problemas relacionados con los recursos hídricos son necesarias tanto la representación espacial del sistema como la comprensión del problema con la finalidad de tomar decisiones precisas, ajustadas a la realidad y de forma eficaz. (TORRES-BEJARANO et al, 2016).

En este contexto, la geoestadística se presenta como una herramienta poderosa, pues permite el análisis y predicción de fenómenos naturales utilizando la correlación espacial, lo que facilita la representación y modelación de datos espaciales (MORAL GARCÍA et al., 2002).

Las técnicas de kriging y simulación Gaussiana condicionada son destacadas en la geoestadística por su capacidad para construir mapas detallados de la distribución de las variables de interés. El kriging proporciona una única representación estimada de un atributo, mientras que la simulación Gaussiana genera múltiples representaciones que permiten evaluar la incertidumbre y obtener mapas menos suavizados, mejorando la comprensión de los patrones espaciales.

El objetivo general de la investigación fue aplicar la técnica de simulación Gaussiana condicionada para construir mapas que reflejen la distribución espacial de variables indicadoras de calidad del agua en el embalse Río Tercero, éste embalse se encuentra ubicado en el centro de la provincia de Córdoba, República Argentina.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de Estudio y Descripción de Variables

El estudio se llevó a cabo en el embalse Río Tercero, el más grande de la provincia de Córdoba, Argentina, construido sobre el río Tercero con fines de generación hidroeléctrica, riego y control de inundaciones. Tiene una superficie de 54,3 km² y una profundidad máxima de 46,5 m. Se trabajó con la variable transparencia del agua en verano. Esta variable es esencial para evaluar la calidad del agua, los procesos vitales de los organismos acuáticos y la dinámica del ecosistema.

La figura 1 muestra la ubicación del embalse:

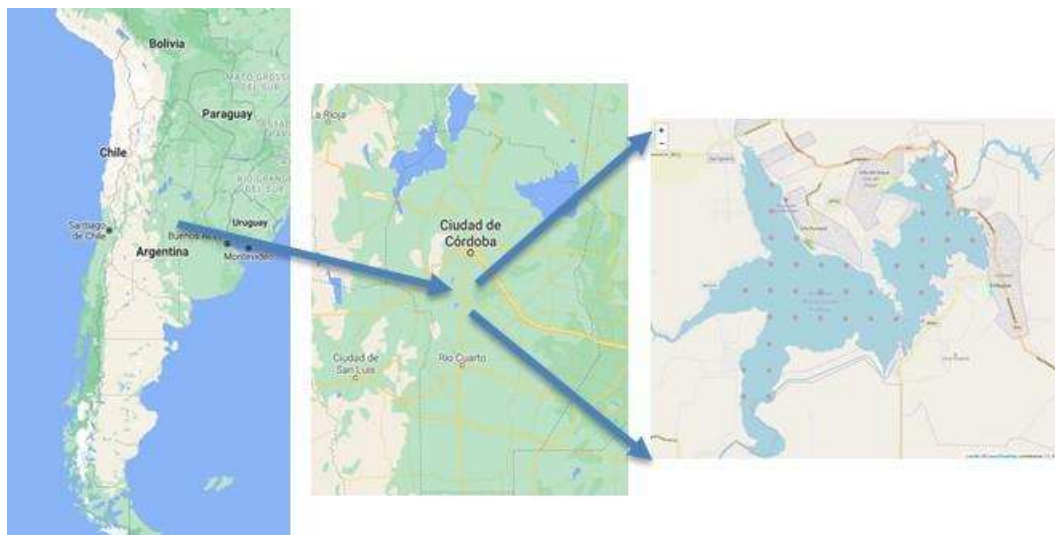
Figura 1 – Ubicación del área de estudio. Embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina.



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



2.2 Muestreo y recolección de datos

Como parte de un programa de monitoreo de embalses de Córdoba, se realizó durante el verano de 2020 una campaña de muestreo donde en 36 sitios de muestreo se analizaron distintas variables físicas, químicas y biológicas. Para este estudio, solo se analizaron los resultados de la variable transparencia del agua según el disco de Secchi, ya que la misma es utilizada internacionalmente como un indicador de rápido y bajo costo de la calidad del agua.

2.3 Análisis Geoestadístico

Previo al análisis geoestadístico los datos fueron trabajados desde la estadística clásica para la verificación del cumplimiento de los supuestos y la detección y/o eliminación de posibles outliers e inliers.

El análisis geoestadístico incluyó la construcción de semivariogramas experimentales para la variable y su ajuste con modelos teóricos (esférico, exponencial, gaussiano) seleccionados en función del Error Cuadrático Medio (RMSE) más cercano a 1, lo cual asegura la mejor representación de la variabilidad espacial.

2.4 Técnica de Simulación

Para la estimación y representación de la variabilidad de la transparencia según el disco de Secchi, se empleó la técnica de Simulación Gaussiana Condicionada, determinando en primera instancia si la variable presentaba una autocorrelación espacial significativa. mediante esta técnica, se lograron crear mapas menos suavizados que reflejan mejor la heterogeneidad de la distribución de la variable en el embalse. Esta técnica genera múltiples realizaciones posibles de la variable estudiada, permitiendo evaluar la incertidumbre en las estimaciones y mejorar la comprensión de los patrones espaciales.



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

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

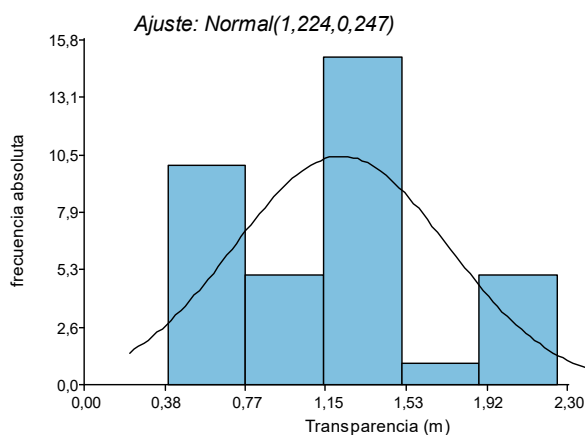
En primera instancia se realizó un análisis estadístico tradicional para la variable transparencia del agua registrada en el embalse Río Tercero. Las medidas de tendencia central y dispersión se muestran en la tabla 1.

Tabla 1: Medidas resumen para la variable transparencia del agua.

Variable	Estadístico	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvío estándar	Coefficiente de Variación	Asimetría
	Estación del año							
Transparencia (m)	Verano	1.22	1.25	0.4	2.25	0.49	40.64	0.14

El análisis de la distribución de los datos se realizó con un histograma (Figura 2)

Figura 2 – Histograma para la transparencia del agua medida en la estación verano.



El gráfico sugiere un posible ajuste a una función de densidad normal. Para sacar conclusiones a nivel poblacional se realizó la prueba de Shapiro-Wilks obteniéndose un $p=0.098$, lo que concuerda con la representación dada por el histograma.

Para determinar la posible existencia de dependencia espacial se realizó el cálculo del Índice de Autocorrelación Espacial Global de Moran y la correspondiente prueba de hipótesis que plantea en su



DE 14 À 19 DE OUTUBRO DE 2024
DEL 14 AL 19 DE OCTUBRE DE 2024

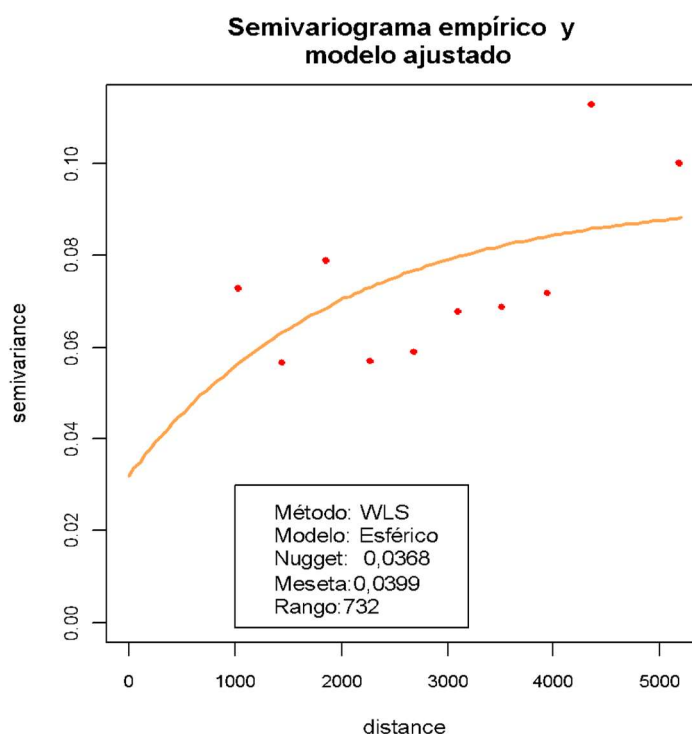
V SLACTIA

SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA
SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA AGROPECUARIA

hipótesis nula la no existencia de autocorrelación espacial. Mediante la realización de esta prueba se obtuvo un $p=0.00002$, lo que indica una clara dependencia espacial.

La estructura de correlación espacial del proceso aleatorio $Z(x)$, bajo el supuesto de que el mismo es intrínsecamente estacionario se cuantifica por medio de la función semivariograma $\gamma(h)$. La figura 3 muestra el semivariograma empírico y el mejor ajuste:

Figura 3 – Semivariograma empírico y ajuste para la transparencia del agua en verano.



En este trabajo se utilizó la simulación secuencial Gaussiana. Ésta se sustenta en la hipótesis multi-Gaussiana, que permite solucionar el problema de la forma de las distribuciones condicionales.

El algoritmo requiere transformar los datos originales a una distribución normal estándar y trabaja en el espacio normal. Al concluir la generación de múltiples realizaciones, éstas se transforman nuevamente a las unidades de la variable original. La reproducción del histograma está garantizada debido a que la distribución normal estándar se utilizó como distribución de referencia. El mapa obtenido se muestra en la Figura 3:

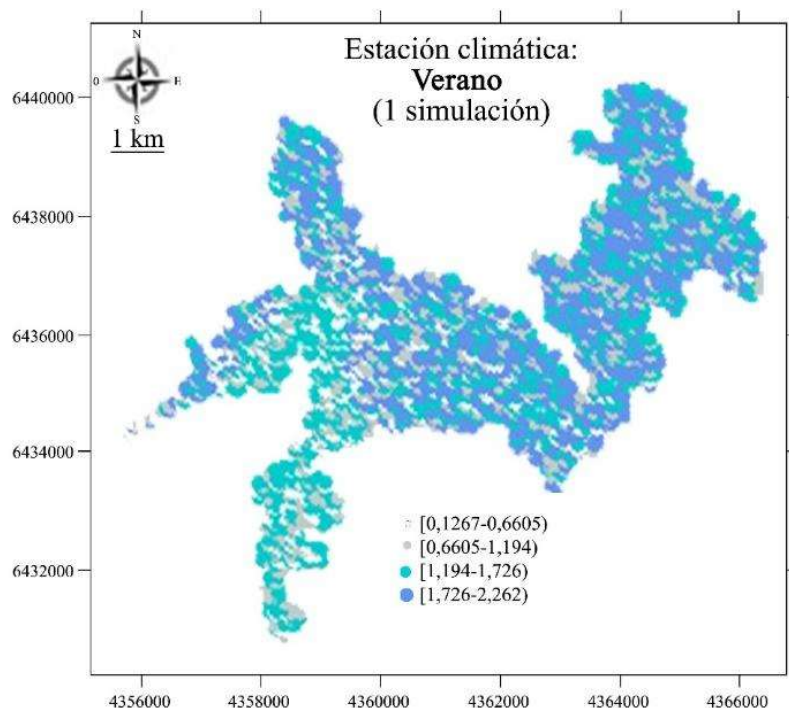


DE 14 À 19 DE OUTUBRO DE 2024
DEL 14 AL 19 DE OCTUBRE DE 2024

V SLACTIA

SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA
SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN EN LA AGROPECUARIA

Figura 3 – Mapa de la distribución de transparencia del agua en verano generado por una simulación Gaussiana.



La distribución de la variable transparencia del agua del embalse Río Tercero durante el período analizado evidenció a través del mapa simulado una variación que osciló entre valores próximos a los 0.127 m, en las regiones cercanas a las desembocaduras de los ríos (lóbulo Oeste), hasta los 2.262 m de profundidad en el lóbulo Este. Esto demostró la presencia de una zonificación latitudinal con los valores más bajos en las áreas cercanas a los tributarios, debido al aporte por parte de éstos de materiales en suspensión y sólidos disueltos, disminuyendo así la penetración de la luz y la transparencia del agua.

Por el contrario, los registros más altos se encontraron en el lóbulo Este del embalse en el que la profundidad es mayor, donde el movimiento del agua es menor y por lo tanto los procesos de sedimentación son más notorios. Una zonificación similar fue hallada por BONANSEA, 2012 en este mismo embalse.

4. CONCLUSIÓN

Es importante destacar que en el procesamiento de los datos que se ha empleado en este trabajo es fundamental la generación de los semivariogramas, porque éstos son la herramienta principal para la simulación de las variables de interés.



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

El enfoque metodológico proporciona una comprensión detallada de la dinámica de la variable analizada para el estudio de la calidad del agua en el embalse Río Tercero. Este método permitió no solo mapear la distribución de las variables clave, sino también identificar áreas críticas que requieren atención para la gestión y conservación del recurso hídrico.

Cuando el interés no es visualizar el valor medio esperado sino la variabilidad general del fenómeno se recomienda recurrir a las simulaciones Gaussianas condicionadas.

Se concluye además que debido a que el ingreso de los tributarios genera una disminución en la transparencia del embalse, se podría definir una fuerte interrelación cuenca-embalse. Así, resulta bastante difícil estudiar al embalse como un sistema independiente de su entorno, ya que las características físico-químicas y ecológicas de los sistemas acuáticos dependen en gran medida de los sistemas terrestres naturales que los rodean, así también como de las poblaciones y actividades humanas que se realizan en sus cuencas. De esta manera, se recomienda el uso de métodos geoestadísticos multivariantes e inferenciales para realizar un estudio que contemple un enfoque sistémico.

5. REFERENCIAS

- GUERRERO, E. La aplicación del enfoque ecosistémico en la gestión de los recursos hídricos: un análisis de estudios de caso en América Latina: **Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza**. 2006.
- SRIWONGSITANON, N. Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application. **Journal of Hydrology**, 401(3-4), 203-220. 2011.
- BONANSEA, M. Concentración de clorofila-a y límite de zona fótica en el embalse Río Tercero (Argentina) utilizando imágenes del satélite CBERS-2B/Concentração de clorofila-a e limite de zona fótica no reservatório Rio Tercero (Argentina) utilizando imagens do satélite CBERS-2B. **Revista Ambiente & Água**, 7(3), 61. 2012
- Rodríguez, M. I., Ruiz, M., Vilchez, G., Crema, N., Ruibal Conti, A., Bustamante, M., López, F. MONITOREO INTEGRAL DE UN CUERPO DE AGUA EUTRÓFICO EMBALSE SAN ROQUE (CÓRDOBA, ARGENTINA). Paper presented at the **I Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua**. 2006.
- TORRES-BEJARANO, F. La modelación hidrodinámica para la gestión hídrica del embalse del Guájaro, Colombia. **Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería**, 32(3), 163-172. 2016
- MORAL GARCÍA, F. Ejemplo de una representación gráfica de una variable regionalizada. Paper presented at the **XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica, España**. 2002.