

## **APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA FUNCIONAL PARA A ANÁLISE ESPACIAL DA INFILTRAÇÃO**

**VIVIANA M VARÓN-RAMÍREZ<sup>(1)</sup>, JESÚS H CAMACHO-TAMAYO<sup>(2)</sup>, NAPOLEÓN ORDOÑEZ DELGADO<sup>(3)</sup>, DIEGO L CORTÉS-D<sup>(4)</sup>, RAMÓN GIRALDO H<sup>(5)</sup>**

<sup>(1)</sup> Ingeniera Agrícola, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería civil y agrícola, Universidad Nacional de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, Cr 30 48 51, Bogotá, Colombia. Tel: (57-1) 3134046665, E-mail: vmvaronr@unal.edu.co. <sup>(2)</sup> Ingeniero Agrícola, M.Sc., Ph.D. Departamento de Ingeniería civil y agrícola, Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Colombia. <sup>(3)</sup> Agrólogo. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, Cr 30 48 51, Bogotá, Colombia. <sup>(4)</sup> Ingeniero Agrícola, M.Sc., Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Subdirección de Agrología, Cr 30 48 51, Bogotá, Colombia. <sup>(5)</sup> Ph.D en Estadística, Departamento de estadística, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Colombia.

Apresentado no  
XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015  
13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro- SP, Brasil

**RESUMO:** A infiltração de água no solo é um parâmetro necessária para o desenvolvimento de sistemas de irrigação. O seu comportamento no espaço permite a manipulação localizada da água, de acordo com as condições do solo e dos requerimentos das culturas. O objetivo deste estudo foi analisar e prever o comportamento espacial da infiltração, utilizando os parâmetros dos modelos de Kostiakov e Philip. O estudo foi realizado em uma área de 75 ha nos solos do Centro Agrícola Marengo (CAM) da Universidade Nacional da Colômbia, por meio de amostragem de malha rígida de 75 pontos (um ponto por hectare), utilizando infiltrômetros duplos. Baseado nos dados observados, realizou-se análise estatística e regressão com base em dados observados e logo, utilizando geoestatística funcional (GF) foi predita a infiltração em locais não amostrados. Verificou-se que as estimativas dos parâmetros teóricos se ajustaram a modelos teóricos de variogramas e que a infiltração apresentou alta variabilidade espacial. Resultados da validação cruzada permitem concluir que a GF prediz adequadamente as curvas da infiltração e estima as curvas em locais não amostrados, como observado na correlação, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 99%.

**PALAVRAS-CHAVE:** agricultura de precisão, dados funcionais, Kriging funcional, variabilidade especial

## **FUNCTIONAL GEOSTATISTICS APPLICATION FOR SPATIAL ANALYSIS OF INFILTRATION**

**ABSTRACT:** The water infiltration into the soil is an important parameter for the design of irrigation systems. Their behavior in space allows site-specific management, according to the soil conditions and crop requirements. The aim of this study was to analyze and predict the spatial behavior of infiltration, using the model parameters of Kostiakov and Philip. The study was conducted in an area of 75 ha in the soils of the Marengo Agricultural Center (CAM) of the National University of Colombia, through sampling of rigid grid of 75 points (one point per hectare), using double infiltrimeters rings. A statistical and regression analysis based on observed data and then using functional geostatistics (GF) infiltration behavior in no sampled sites was predicted. It was found that the theoretical parameter estimates were adjusted in variogram models and infiltration showed high spatial variability. The results of cross-validation can be concluded that the GF adequately predicts infiltration curves and allows to estimate the curve in unsampled sites, as observed in the correlation, which presented a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 99%.

**PALAVRAS-CHAVE:** precisión farming, funtional data, funtional Kriging, spatial variability

**INTRODUCCIÓN-** Conocer los patrones de infiltración y comportamiento de agua en el suelo es determinante para el diseño de sistemas de riego que sean eficientes para así hacer uso racional del recurso agua. El flujo de agua es un proceso dinámico que afecta las condiciones química, físicas y biológicas del suelo, e influyen en la nutrición, el desarrollo vegetativo y la degradación del mismo (Hincapié y Tobón, 2012). Así pues el estudio del flujo de agua es importante en la concepción de sistemas de producción eficiente y sustentable.

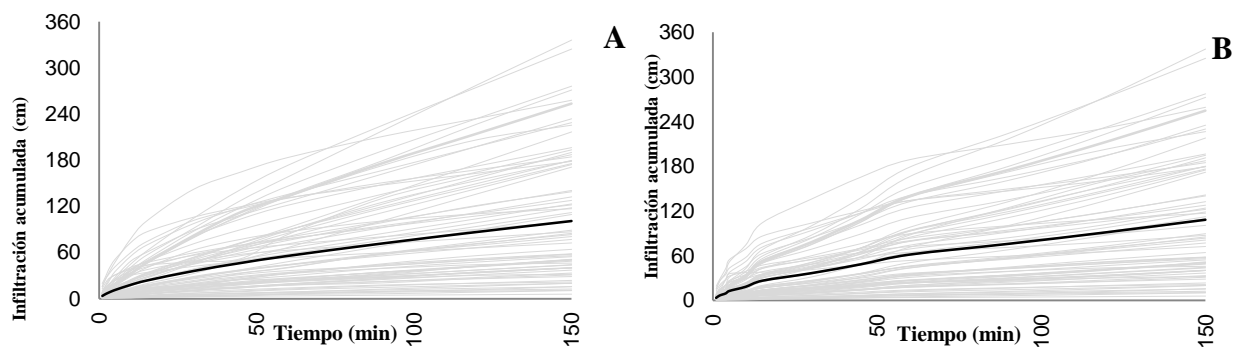
Quando se tiene un conjunto de datos se hacen mapas de contorno con geostatística univariada, sin embargo, la infiltración en cada sitio muestreado define una curva de comportamiento. Ramón et al., (2010) propone la aplicación de la geostatística funcional (GF) para el análisis espacial y la predicción de funciones en sitios no muestreados. Para usar esta metodología es necesario aplicar, como fase previa, técnicas no paramétricas de suavizado para convertir los datos discretos de cada sitio en funciones.

El objetivo del presente trabajo fue aplicar GF a curvas de infiltración para evaluar su capacidad predictiva y su potencial como herramienta para el análisis espacial de este tipo de datos, así como identificar zonas de manejo homogéneo en la aplicación del riego de acuerdo a las condiciones del suelo.

**MATERIALES Y MÉTODOS-** El área de estudio corresponde al Centro Agropecuario Marengo (CAM) ubicado en Mosquera (Cundinamarca) – Colombia a una altitud de 2.543 msnm. Los suelos del área experimental según Ordóñez y Bolívar, (2014) corresponden al orden Inceptisol (con características ándicas), Molisol y Andisol (62, 29 y 13%) respectivamente. Se realizaron 82 ensayos de infiltración por el método de los anillos infiltrómetros de Muntz cubriendo un área experimental de 76 ha obteniendo en cada punto una curva de infiltración acumulada por espacio de 150 min.

Se aplicó Kriging funcional (Giraldo, 2009) para predecir 82 curvas en los mismos sitios donde se tenían observaciones. Este proceso consistió en retirar una curva en un sitio específico y con las 81 curvas observadas predecir dicha curva. Posteriormente, los dos conjuntos de curvas se ajustaron a los modelos teóricos de infiltración de Kostakiov (1932) y Philip (1957) y estimaron los parámetros (Infiltración básica (Ib) e Infiltración acumulada (Ia) y Sortividad (S) y conductividad (K)) respectivamente.

**RESULTADOS Y DISCUSIÓN-** Se obtuvo dos conjuntos de curvas observadas y predichas, en la figura 1 se observa que presentan el mismo patrón de comportamiento. Al hacer una validación cruzada (CVC) por medio de una regresión lineal simple se encuentra un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0,9984 indicando que más del 99% de los datos son explicados por el predictor propuesto.



**Figura 1.** (A) Curvas de Ia observadas. (B) Curvas de Ia predichas mediante Kriging funcional.

De la tabla 1 se puede observar que los estadísticos para cada uno de los parámetros de los dos modelos de ajustes observados y predichos son muy similares de los cuales se puede decir que en general no son distribuciones simétricas que presentan una alta variabilidad espacial (Warrick y Nielsen, 1980). La  $I_b$  promedio en la zona de estudio según Montenegro y Malagón (1990) es rápida a muy rápida (25,17 y 25,12  $\text{cm h}^{-1}$ ), sin embargo se encuentran infiltraciones desde muy lentas a muy rápidas.

Modelo	PARA M	Media	Mediana	CV	K	As	Mín	Máx.	Modelo Semivar.	$C_0$	$C_0 + C$	Alcance, m	CVC	GD E
Kostiakov	Ib <sub>Obs</sub>	25,17	14,74	0,97	1,61	1,46	0,64	111,74	Gaussiano	227	517	549	0,85	0,56
	Ib <sub>Pre</sub>	25,12	14,71	0,97	1,61	1,46	0,63	111,48	Gaussiano	167	525	511	0,81	0,68
	Ia <sub>Obs</sub>	101,02	74,81	0,81	0,13	0,98	6,10	335,95	Gaussiano	3430	6861	759	0,91	0,51
	Ia <sub>Pre</sub>	101,41	74,98	0,81	0,12	0,98	6,14	337,45	Gaussiano	3300	6645	660	0,93	0,51
Philip	S <sub>Obs</sub>	40,37	24,47	1,02	4,20	1,91	1,24	202,87	Exponencial	125	833	98	0,95	0,85
	S <sub>Pre</sub>	40,43	24,51	1,02	4,19	1,91	1,22	202,93	Exponencial	125	834	98	0,96	0,85
	K <sub>Obs</sub>	17,89	10,98	1,46	0,90	0,78	-45,27	97,91	Esférico	134	544	592	0,77	0,75
	K <sub>Pre</sub>	17,82	10,95	1,46	0,90	0,77	-45,29	97,65	Esférico	164	551	600	0,74	0,71

**Tabla 1.** Estadística descriptiva y geoestadísticos para cada uno de los parámetros de los modelos de Kostakiyov y Philip ajustados a las curvas observadas y predichas.

Los dos conjuntos de datos se ajustaron a modelos teóricos de semivariograma describiendo grados de dependencia espacial GDE moderados según Cambardella (1994). Por otra parte en la Figura 2, se puede observar que la distribución espacial de los parámetros de estudio tiene el mismo comportamiento para los datos observados y predichos comprobando la veracidad del predictor propuesto.

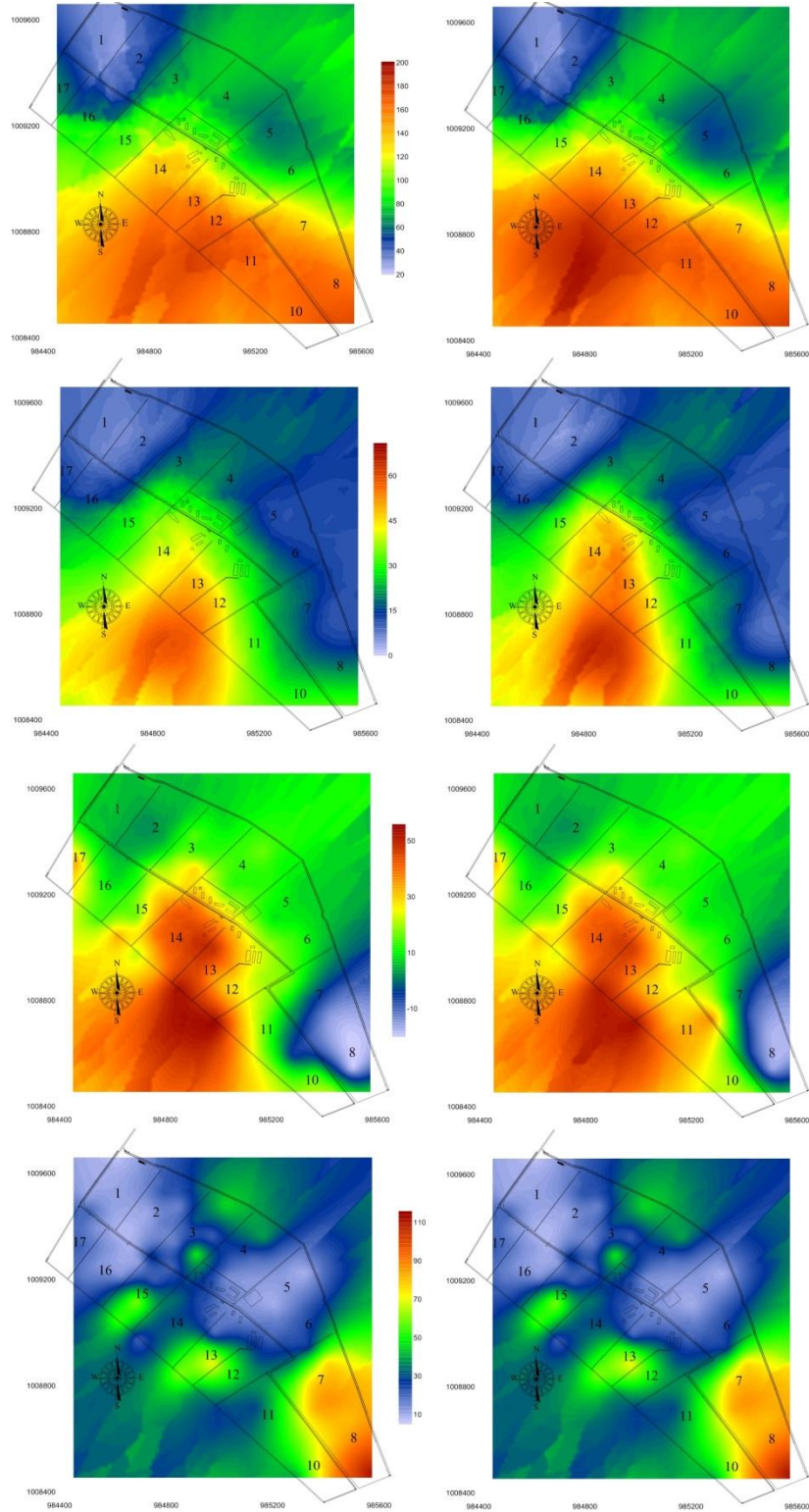
## CONCLUSIONES:

Los resultados de validación cruzada dan evidencia del buen ajuste de la metodología propuesta, dadas las similitudes encontradas, entre los datos experimentales y los obtenidos mediante Kriging funcional.

Los resultados permiten inferir que es conveniente que las prácticas de riego y aprovechamiento del agua sean diseñadas específicamente para dos zonas homogéneas (Zona 1: 1 a 6 y 15 a 17 y Zona 2: Lotes 7 a 14) con lo cual se lograría la disminución de los costos de producción, así como minimizar posibles riesgos de degradación del suelo en la producción de cultivos.

## REFERENCIAS

- Giraldo, R., Delicado, P. & Mateu, J. 2010.** Continuous time-varying Kriging for spatial prediction of functional data: an environmental application. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*. 15, 66–82.
- Giraldo, R. 2009.** Geostatistical analysis of functional data. Barcelona. PhD Thesis submitted to Universitat Politècnica de Catalunya.
- Hincapié, E.; C. Tobón - Marín. 2012.** Dinámica del Agua en Andisoles Bajo Condiciones de Ladera. *Rev.Fac.Nal.Agr.Medellín*. 65, 6765-6777.
- Montenegro H. & Malagón D. 1990.** Propiedades físicas de los suelos. Colombia: Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Ordóñez D, N y Bolívar G, A. 2014.** Levantamiento Agrológico del Centro Agropecuario Marengo (CAM). Subdirección de Agrología. Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC. Bogotá – Colombia.



**Figura 2.** Mapas de contorno para Ib, Ia, S y K para las curvas observadas y predichas.