

## ESTIMACIÓN DE LA TEXTURA Y CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO A PARTIR DE DATOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA UTILIZANDO GEOESTADÍSTICA MULTIVARIANTE

Glécio Machado Siqueira<sup>1\*</sup>, Jorge Dafonte Dafonte<sup>1</sup> y Antonio Paz González<sup>2</sup>

1: Departamento de Ingeniería Agroforestal  
Escuela Politécnica Superior  
Universidad de Santiago de Compostela  
Campus Universitario s/n, 27002, Lugo, España  
e-mail: glecio.machado@rai.usc.es; jorge.dafonte@lugo.usc.es

2: Facultad de Ciencias  
Universidad de A Coruña  
Campus da Zapateira, 15071, A Coruña, España  
e-mail: tucho@udc.es

**Palabras clave:** Variabilidad espacial, Conductividad eléctrica aparente del suelo, Textura y Contenido de agua en el suelo

**RESUMEN.** *Se ha utilizado un sensor de medida de la conductividad eléctrica aparente ( $CE_a$ ) mediante inducción electromagnética para medir la misma en dipolo horizontal(H) y en dipolo vertical (V), a partir de los datos medidos en una parcela de 6 ha, donde se ha optimizado un esquema de muestreo del suelo de 40 puntos usando el software ESAP-RSSD y las medidas de  $CE_a$ , en estos puntos se han tomado muestras de suelo de la capa de 0,0-0,3 m, y se han determinado los contenidos en arena, arcilla y limo, humedad gravimétrica y CE del extracto de saturación. Se han estudiado las correlaciones entre  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H y las propiedades del suelo medidas, los valores de correlación obtenidos son bajos salvo para el contenido de agua gravimétrico. Se ha utilizado el kriging ordinario y universal para estimar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo medidas, también se ha utilizado el cokriging ordinario y universal para mejorar la estimación de estas propiedades del suelo usando los datos de  $CE_a$  medidos como variable secundaria, pero sólo se han obtenido una mejora en la estimación del contenido en agua con el cokriging respecto al uso del kriging.*

**ABSTRACT.** *It was used a device for measure the apparent soil electrical conductivity ( $EC_a$ ) using electromagnetic induction in horizontal(H) and vertical(V) dipole, using the  $EC_a$  data measured and ESAP-RSSD software in a 6 ha area, a optimized sample scheme of 40 points was obtained, soil samples were taken from 0.0-0.3 m depth, the properties measured were sand, clay and silt content, gravimetric water content and EC of saturated paste. It was studied the correlations between  $EC_a$ -V and  $EC_a$ -H and the measured soil properties, correlation values are low except for the gravimetric water content. Ordinary and universal kriging has been used to estimate the spatial variability of measured soil properties, it has also been used ordinary and universal cokriging to improve the estimation of these soil properties using the data of  $EC_a$  as secondary variable, but there are only improvement in the estimation of water content using cokriging compared kriging.*

### 1. INTRODUCCIÓN

En la agricultura de precisión el proceso de recogida de información es el que más influye sobre los resultados, pues todas las informaciones adquiridas en esta fase favorecen la utilización de tecnologías geoespaciales para la determinación de la variabilidad espacial y posterior determinación de las denominadas “unidades de gestión”. No obstante, para la determinación de la variabilidad espacial del suelo generalmente son necesarias un gran número de muestras, lo que aumenta los costes de producción. En este sentido se pueden utilizar variables del

suelo de rápida medida para la mejora de la estimación de otras propiedades del suelo de más difícil medida, con las cuales tengan una buena correlación. La medida de la conductividad eléctrica aparente del suelo ( $CE_a$ ) es un método de muestreo práctico, rápido y fiable, que favorece la recogida de informaciones sobre el suelo y de la distribución espacial de otras propiedades con las cuales está correlacionada. De acuerdo con Rhoades y Corwin (1984) los principales métodos para medida de la  $CE_a$  del suelo son por contacto y por inducción electromagnética. McNeill (1980), Sudduth et al. (2005), Corwin y Lesch (2005) y Kühn et al. (2008) señalan que la  $CE_a$  está influida por el contenido de agua en el suelo, textura, contenido de materia orgánica, tamaño y distribución de los poros, salinidad, capacidad de intercambio catiónico, concentración de los electrolitos disueltos en la solución del suelo, temperatura, composición de los coloides del suelo, etc.. De esta manera, el uso de la  $CE_a$  para la clasificación del suelo permite el reconocimiento y delimitación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que desempeñan un papel importante en los procesos de producción agraria y de conservación ambiental. Así, este tipo de datos son esenciales para el seguimiento temporal de la condición del suelo, y para una aplicación de los procesos de gestión (Johnson et al., 2001). Por lo tanto, la  $CE_a$  se usa como un parámetro de ayuda en la agricultura de precisión, al favorecer la evaluación de la variabilidad espacial del suelo y la definición de unidades de gestión.

El uso de la geoestadística posee grandes ventajas porque permite el estudio de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo de interés agrícola, así como su predicción en los puntos no muestreados usando el kriging, favoreciendo la aplicación del manejo diferenciado del suelo y la práctica de la agricultura de precisión. Diversos autores se han dedicado al estudio de métodos de optimización del muestreo del suelo (Lesch et al., 1995; van Groeningen et al., 1999; Lesch et al., 2000; Minasny y McBratney, 2007), no obstante, el éxito de estos métodos depende del uso de variables secundarias que sean de fácil medición, como la  $CE_a$ , permitiendo cartografiar la variabilidad espacial del suelo con eficacia y con un gran número de datos, que a su vez permite definir los puntos de muestreo de otras variables del suelo.

Así, el objetivo de este trabajo es mejorar la estimación de la variabilidad espacial de la textura y del contenido de agua en el suelo utilizando técnicas de geoestadística multivariante usando como información secundaria medidas de conductividad eléctrica aparente del suelo ( $CE_a$ ) obtenidas mediante inducción electromagnética.

## 2. MATERIAL Y METODOS

El área de estudio tiene 6 ha y está localizada en Castro de Ribeiras de Lea (Lugo, España). Las coordenadas geográficas son: 43° 09' 49" N y 7° 29' 47" W, con una altitud media de 410 m y pendiente del 2 % (Figura 1). La zona donde está enclavada la parcela es representativa del tipo de suelo y topografía de la región de "Terra Chá", que es una zona de importante producción agrícola-ganadera, caracterizada por problemas de hidromorfía estacionales. El clima de la región, según la clasificación climática de Köppen, es del tipo templado (Cfb), con verano cálido y sin estación seca, con una precipitación media anual de 930 mm. El suelo de la parcela es un Cambisol gleyco (FAO-ISRIC, 1994), y tiene como material de origen sedimentos miopliocénicos en cuyo techo se aprecian capas alternantes de materiales arcillosos y arenosos, frecuentemente recubiertos por un manto cuaternario más o menos espeso (Castelao y Díaz-Fierros, 1992). Según Neira (1994) el suelo del área se caracteriza por tener en su perfil una capa de sedimentos con granulometría heterogénea. El contenido de materia orgánica es elevado en el horizonte  $A_p$  (5,05%) contrastando con las demás capas del perfil del suelo. La textura del suelo (fracción < 2 mm) es franco-arenosa en el horizonte  $A_p$ , franco-arcillo-arenosa en horizonte  $B_w$  y arcillosa en el horizonte  $B_{tg}$ , caracterizándose por tener un elevado contenido en gravas 37% y 45% para los horizontes A y  $B_w$  respectivamente.

En el momento de las mediciones el área se encontraba recién sembrada con maíz (*Zea mays* L.) bajo no laboreo para producción de ensilado. En los últimos años el área de estudio fue cultivada con pradera permanente para producción de ensilado.

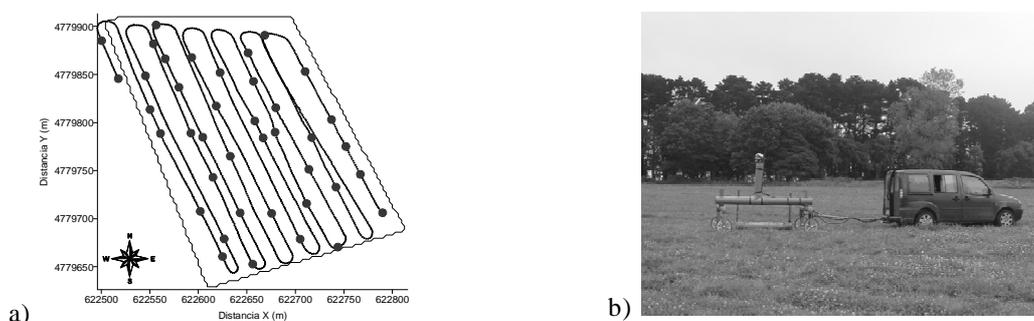
La conductividad eléctrica aparente del suelo ( $CE_a$ ) fue medida utilizando un equipo de inducción electromagnética EM38-DD (Geonics Limited, 2005) que consta de dos dipolos colocados perpendicularmente, cuya curva de respuesta relativa demuestra una mayor sensibilidad del aparato hasta 0,4 m en el dipolo horizontal y de 1,5 m en el dipolo vertical (Geonics Limited, 2005). La  $CE_a$ -H y  $CE_a$ -V

fue medida en 1859 puntos de muestreo (Figura 2a), usando también un GPS RTK para realizar el georeferenciamento de las medidas, el EM38-DD fue instalado en un carro construido con materiales plásticos diseñado por nuestro grupo de investigación (Figura 2b).

El 23/06/2008, se midió conductividad eléctrica aparente del suelo en dipolo horizontal ( $CE_a-H$ ,  $mS\ m^{-1}$ ) y en dipolo vertical ( $CE_a-V$ ,  $mS\ m^{-1}$ ). Anteriormente fueron medidas la  $CE_a-H$  y la  $CE_a-V$  los días 14/03/2008 y 3/04/2008, en la misma área, pero en puntos diferentes.



**Figura 1.** Localización geográfica del área de estudio (a) y mapa de elevación digital (b).



**Figura 2.** Esquema de medidas de la conductividad eléctrica aparente del suelo medida por inducción electromagnética (línea continua) y el esquema de muestreo de los 40 puntos de toma de muestra de suelo (círculos) del 23/06/2008 (a), y el carro donde va instalado el EM38DD (b).

El software ESAP 2.35 (Electrical Conductivity or Salinity, Sampling, Assessment and Prediction) (Lesch et al., 2000) fue utilizado para determinar 40 puntos de muestreo optimizado del suelo donde fueron tomadas muestras de suelo para determinación de textura, humedad y conductividad eléctrica del extracto de saturación en la capa de 0,00-0,30 m de profundidad, por medio de la herramienta computacional ESAP-RSSD (Response Surface Sampling Design) que utiliza un modelo de regresión lineal múltiple (Lesch et al., 1995, Lesch et al., 2000) para la determinación optimizada de los nuevos puntos de muestreo considerando los datos de conductividad eléctrica aparente del suelo ( $CE_a$ ) medidos con los dipolos horizontal ( $CE_a-H$ ) y vertical ( $CE_a-V$ ) (Figura 2a). La causa de que no se tomarán muestras a mayor profundidad es debido a que existe una capa de gravas a unos 0,30 m de profundidad que dificulta la toma de muestras en capas más profundas.

La textura del suelo (arcilla, limo y arena) ( $g\ kg^{-1}$ ) fue determinada por medio del método de la pipeta de acuerdo con Camargo et al. (1986), utilizando como dispersante químico una mezcla de hidróxido de sodio y hexametáfosfato de sodio. La humedad gravimétrica ( $\theta_g$ , %) fue determinada por pesada de la masa de la muestra húmeda y seca, de acuerdo a Camargo et al. (1986). La conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo fue determinada utilizando una mezcla de suelo y agua destilada de 1:1 de acuerdo al USDA (1999) y la conductividad eléctrica medida utilizando un conductímetro ORION® Model 122.

El análisis de la variabilidad espacial de cada una de las propiedades físicas se realizó utilizando el

semivariograma experimental, el ajuste del modelo de semivariograma fue realizado usando el método descrito por Vieira (2000), basado en la validación cruzada. El análisis inicial mostró que el semivariograma de alguna de las propiedades estudiadas presentan tendencia, debido a lo cual fue utilizado el krigeado universal, el cual necesita la obtención del semivariograma de los residuos (Goovaerts, 1997), para aquellas variables que no presentaron tendencia se utilizó el krigeado ordinario.

El semivariograma cruzado fue utilizado para estudiar la correlación espacial entre las variables del suelo medidas, si existía tendencia en alguna de las variables se utilizó el cokrigeado universal (Goovaerts, 1997), en vez del cokrigeado ordinario. El programa informático utilizado para realizar el krigeado ordinario, krigeado universal y cokrigeado universal fue gstat (Pebesma 2001). Una dificultad que existe para realizar el cokrigeado es que la matriz de los tres modelos deben de ser condicionalmente positiva para cualquier vector  $h$ , para evitar la aparición de varianzas negativas a la hora de resolver las ecuaciones de cokrigeado. Para cumplir esta condición es suficiente modelar los semivariogramas como combinaciones lineales de los modelos básicos, surgiendo así los llamados modelos lineales de corregionalización (Goovaerts, 1997, 1999, Deutsch y Journel, 1997, Chilès y Delfiner, 1999).

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis estadístico de los datos (Tabla 1) indica que no existe gran variación entre las muestras, de acuerdo con los bajos ( $CV = < 12\%$ ) y medianos ( $CV = 12-60\%$ ) valores de coeficientes de variación, según la clasificación de Warrick y Nielsen (1980). El contenido medio de arcilla ( $168,37 \text{ g kg}^{-1}$ ), limo ( $296,25 \text{ g kg}^{-1}$ ) y arena ( $535,37 \text{ g kg}^{-1}$ ) en el área de estudio (Tabla 1) en la capa de 0,00-0,30 m de profundidad son ligeramente diferentes que los valores descritos por Neira Seijo (1993) que indica valores medios para el perfil característico del área de estudio en la capa de 0,00-0,35 m de profundidad como siendo de  $175,00 \text{ g kg}^{-1}$ ,  $191,00 \text{ g kg}^{-1}$  y  $634,00 \text{ g kg}^{-1}$ , respectivamente para la arcilla, limo y arena.

Los valores de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo ( $CE_e$ ) son más elevados que los valores de la  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H, este hecho ocurre porque la conductividad eléctrica del extracto de saturación ( $CE_e$ ) es más dependiente del contenido de aniones y cationes en la solución del suelo, y no del contenido de humedad, ya que éste es homogéneo en todas las muestras, al estar saturadas, y la conductividad eléctrica aparente del suelo medida con el equipo EM38-DD ( $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H) explora un mayor volumen de suelo, y sus valores están muy influidos por el contenido de humedad en el suelo (McNeill, 1980; Sudduth et al., 2005; Kühn et al., 2008).

**Tabla 1.** Parámetros estadísticos.

Variable	Unidad	N	Mínimo	Máximo	Media aritmética	Varianza	Coefficiente de variación	Coefficiente de asimetría	Coefficiente de curtosis	D
$CE_a$ -V		1886	4,13	20,13	11,21	6,12	22,07	0,485	-0,243	0,071Ln
$CE_a$ -H	$\text{mS m}^{-1}$	1886	6,63	20,00	12,12	3,22	14,81	0,839	1,285	0,092Ln
$CE_e$		40	7,00	28,00	13,82	25,94	0,36	1,200	1,008	0,159n
Arcilla		40	119,00	220,00	168,37	956,54	18,37	-0,190	-1,321	0,153n
Limo	$\text{g kg}^{-1}$	40	233,00	357,00	296,25	1229,73	11,84	0,149	-1,041	0,098n
Arena		40	487,00	586,00	535,37	507,72	4,21	0,055	-0,270	0,069n
$\theta_g$	%	38	13,41	45,67	26,74	49,50	26,30	-2,904	6,510	0,085n

N: número de datos; D: desviación máxima en relación a la distribución de frecuencia normal usando el test estadístico de Kolmogorov-Smirnov con probabilidad del error de 1 %, Ln log-normal, n- normal.

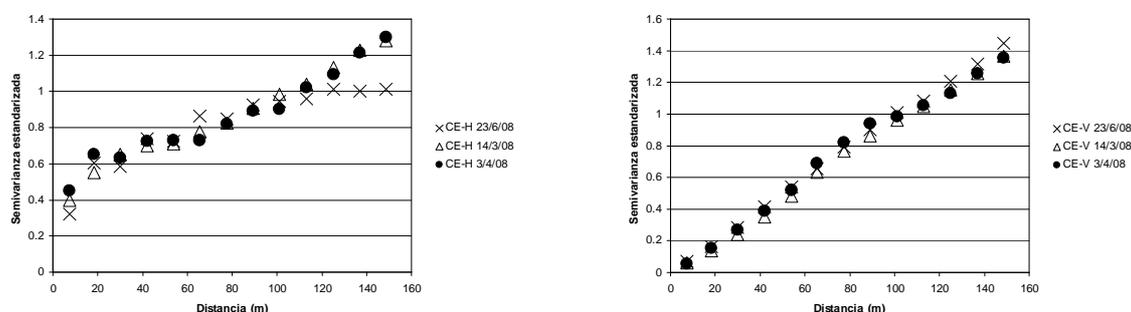
La  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H presentan distribución de datos de tipo logarítmico por lo que se utilizarán los logaritmos de los datos, para realizar los análisis geoestadísticos. Los valores de los coeficientes de correlación de Pearson (Tabla 2) muestran que entre la mayoría de las variables existen correlaciones débiles positivas o débiles negativas ( $0,1 \leq |r| < 0,5$ ), según la clasificación de Santos (2007). La correlación entre  $CE_a$ -V x  $CE_a$ -H, entre  $CE_a$ -V x  $\theta_g$  y entre  $CE_a$ -H x  $\theta_g$  es moderada positiva ( $0,5 \leq r < 0,8$ ). De manera, general se esperaban valores más elevados de correlación entre la conductividad eléctrica aparente del suelo medida por inducción electromagnética ( $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H) y la conductividad eléctrica

del extracto de saturación ( $CE_e$ ) y los valores de arcilla. Los valores de  $CE_a$ -V se encuentran afectados por el nivel freático lo cual se deduce al observar la tendencia del semivariograma (Figura 3) y conociendo las condiciones de hidromorfía del área de estudio, como se puede ver en los semivariogramas estandarizados con el valor de la varianza muestral también los datos de  $CE_a$ -V medidos el 14/03/2008 y 3/04/2008 presentan tendencia, siguiendo el mismo patrón del mapa de elevación digital del área (Figura 1b). Analizando los semivariogramas estandarizados de los datos de  $CE_a$ -H, se aprecia que sólo presentan tendencia los medidos el 14/03/2008 y 3/04/2008, pero no el semivariograma de los medidos el 23/06/2008, indicando que el nivel freático se encontraba por debajo de la profundidad de suelo medido con el dipolo horizontal en la última fecha.

**Tabla 2.** Matriz de correlación lineal

	Log $CE_a$ -V	Log $CE_a$ -H	$CE_e$	Arcilla	Limo	Arena	$\theta_g$
Log $CE_a$ -V	1.000						
Log $CE_a$ -H	0.752	1.000					
$CE_e$	0.685	0.649	1.000				
Arcilla	0.253	0.346	0.221	1.000			
Limo	-0.137	-0.228	-0.145	-0.773	1.000		
Arena	-0.133	-0.119	-0.076	-0.170	-0.494	1.000	
$\theta_g$	0.156	0.225	0.005	0.109	-0.020	-0.118	1.000

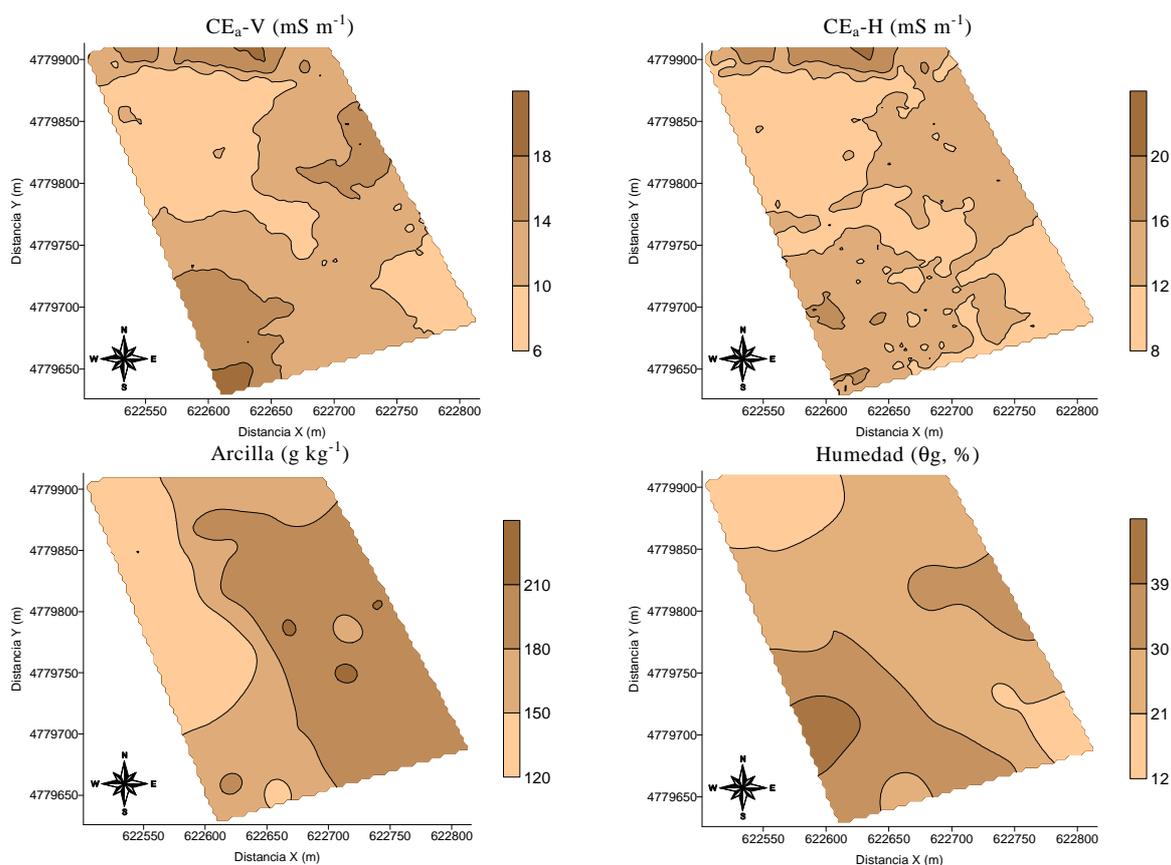
Corwin y Lesch (2005) encontraron mayores valores de correlación entre los datos de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H y la conductividad eléctrica del extracto de saturación y el contenido de arcilla, pero inferiores a los encontrados para  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H y el contenido de agua en el suelo en este trabajo. Martínez y Vanderlinden (2007) describen una mayor correlación entre la  $CE_a$  y el contenido de agua en suelos francos, mientras que en suelos arcillosos la correlación fue baja. También se comprueba que los coeficientes de correlación de  $CE_e$ , arcilla, limo y  $\theta_g$  con la  $CE_a$ -H son mayores que con la  $CE_a$ -V, lo cual era esperado debido a que la  $CE_a$ -H mide principalmente la capa de 0-0,40 m y las muestras de suelo proceden de la capa de 0-0,30 m.



**Figura 3.** Semivariogramas estandarizados con la varianza de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H para las tres fechas de medida.

La causa de esta baja correlación entre los datos de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H y la conductividad eléctrica del extracto de saturación y el contenido de arcilla, puede deberse a varios motivos el principal es que dentro de las variables analizadas la que presenta un mayor valor del coeficiente de variación (Tabla 1) es  $\theta_g$ , con lo que influye más en los valores de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H, que el contenido en arcilla que tiene un coeficiente de variación inferior. Para poder detectar mejor la correlación entre los valores de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H y el contenido en arcilla habría que tener un contenido en agua lo más homogéneo posible dentro del área de estudio, mejor si está próximo a capacidad de campo, y a su vez que el nivel freático estuviera lo más bajo posible, por lo que la mejor época para realizar las medidas en estas condiciones sería en los meses de otoño, cuando hubiera precipitaciones importantes, pero el nivel freático aún no hubiera ascendido lo suficiente para estar próximo a la superficie.

Los parámetros de ajuste del semivariograma (Tabla 3) demuestran que el modelo esférico fue el que mejor se ajustó a los atributos en estudio, de acuerdo con Cambardella et al. (1994), Goovaerts (1997) y Vieira (2000) que describen este modelo como el que habitualmente se ajusta mejor a los parámetros de suelo y planta. Todos los atributos presentaron bajos valores de efecto pepita ( $C_0$ ). Los valores de alcance (a) varían entre 70,00 m (arena) y 130,00 m (arcilla y humedad). Los mapas de variabilidad espacial obtenidos con krigeado universal (Figura 3) muestran que existe una similitud entre los mapas de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H (Figura 3a y 3b). Se comprueba también que el mapa de  $CE_a$ -V (Figura 3a) y de contenido de agua en el suelo obtenido con krigeado ordinario (Figura 3d) presentan un aspecto similar. Se comprueba además que el mapa de  $CE_a$ -V,  $CE_a$ -H y humedad presentan similitud con el mapa de elevación digital del terreno (Figura 1b).



**Figura 4.** Mapas de variabilidad espacial para algunas de las propiedades estudiadas.

**Tabla 3.** Parámetros ajustados del semivariograma.

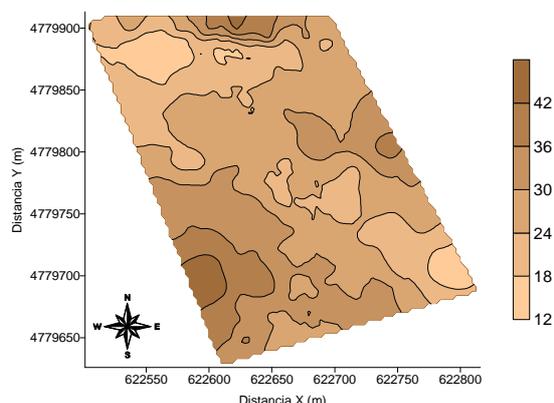
Variable	Modelo	$C_0$	$C_1$	a (m)
Log $CE_a$ -V Residuos	Esférico	0,001	0,01	130
Log $CE_a$ -H	Esférico	0,001	0,005	130
$CE_c$ Residuos	Esférico	0,00025	0,0018	100,00
Arcilla	Esférico	0,001	1060,00	130,00
Limo	Esférico	0,00	1400,00	130,00
Arena	Esférico	0,00	510,00	70,00
$\theta_g$	Esférico	0,001	60,00	130,00

Sólo se muestran los parámetros de los semivariogramas cruzados de  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H con arcilla y humedad, ya que son las variables que presentan mayor correlación con los datos de  $CE_a$ . Los

semivariogramas cruzados se ajustaron a un modelo esférico y con un mismo alcance para obtener un modelo lineal de correogionalización (Tabla 4). Los mapas de variabilidad espacial construidos por medio del cokrigado ordinario y universal (Figura 4) demuestran que el uso de la conductividad eléctrica aparente medida por inducción electromagnética ( $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H) como variable secundaria mejora la estimación del contenido de humedad usando cokrigado, ya que es la variable del suelo medida con la que mejor se correlaciona  $CE_a$ -V y  $CE_a$ -H, esta mejora en la estimación se puede observar en la tabla 6, existiendo un incremento del valor del coeficiente de correlación. También se observa un mapa mucho menos suavizado en el caso de la estimación del del contenido de agua obtenido con el cokrigado ordinario usando como información secundaria los datos de  $CE_a$ -H (Figura 5). Según se muestra en la tabla 5, en el caso de la arcilla la mejora obtenida utilizando cokrigado respecto a la utilización del krigado es muy pequeña, lo cual era esperado debido al bajo valor del coeficiente de correlación entre ambas variables.

**Tabla 5.** Parámetros ajustados del semivariograma cruzado.

Variable	Modelo	$C_0$	$C_1$	a (m)
Arcilla x Log $CE_a$ -V	Esférico	0,001	60,00	130,00
Arcilla x Log $CE_a$ -H	Esférico	0,00	40,00	130,00
$\theta_g$ x Log $CE_a$ -V	Esférico	1,00	20,00	130,00
$\theta_g$ x Log $CE_a$ -H	Esférico	0,00	15,00	130,00



**Figura 5** Mapa de  $\theta_g$  obtenido mediante cokrigado ordinario.

**Tabla 5.** Valores del coeficiente de correlación entre los datos medidos y estimados mediante krigado y cokrigado.

Arcilla (Krigado ordinario)	0,765	Arcilla x Log $CE_a$ -V (Cokrigado universal)	0,765
		Arcilla x Log $CE_a$ -H (Cokrigado ordinario)	0,776
$\theta_g$ (Krigado ordinario)	0,637	$\theta_g$ x Log $CE_a$ -V (Cokrigado universal)	0,746
		$\theta_g$ x Log $CE_a$ -H (Cokrigado ordinario)	0,756

#### 4. CONCLUSIONES

Se encontraron bajos valores de correlación de las medidas de  $CE_a$  con las propiedades del suelo estudiadas en el área, excepto para el contenido de agua en el suelo. La correlación de las medidas de  $CE_a$  con el contenido de limo y arcilla podría aumentar, si el contenido de humedad del suelo fuera más uniforme en el momento de la medida. La utilización del cokrigado usando como variable secundaria los datos de  $CE_a$  ha permitido mejorar la estimación del contenido de agua en el suelo, respecto a la utilización del krigado.

*Agradecimientos.* Al Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación (MAEC-AECID) por la Beca de Doctorado concedida al primero autor. Al Ministerio de Educación y Ciencia (Proyecto CGL2005-08219-C02-02), a Xunta de Galicia (Proyecto PGIDIT06PXIC291062PN) y al Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) por el financiamiento parcial de este trabajo y a la granja provincial de Gaioso-Castro

de la Deputación de Lugo por permitarnos usar sus instalaciones para llevar a cabo este trabajo. También deseamos agradecer las aportaciones realizadas por los dos revisores de este trabajo.

## REFERENCIAS

- Camargo, O.A., A.C. Moniz, J.A. Jorge, J.M.A.S. Valadares, 1986. *Métodos de análise química y física de solos do Instituto Agronômico*. Campinas: Instituto Agronômico, 94p. (Boletim técnico, 106).
- Cambardella, C.A., T.B. Moorman, J.M. Novak, T.B. Parkin, D.L. Karlem, R.F. Turvo, A.E. Konopa, 1994. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47, 1501-1511.
- Carvalho, J.R.P., P.M. Silveira, S.R. Vieira, 2002. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesq. Agropec. Bras.*, 37(8), 1151-1159.
- Castelao Gegunde, A., F. Diaz-Fierros, 1992. *Os solos de Terra Chá. Tipos, xénes e aproveitamento*. Publ. Diputación Provincial de Lugo, 166p.
- Chilès, J-P y P. Delfiner. 1999. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. Wiley Inter-Science. New York.
- Corwin, D.L., S.M. Lesch, 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity Part I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture* 46, 103-133.
- Deutsch, C.V. y A.G. Journel. 1997. *GSLIB. Geostatistical Software Library and User's Guide*. Second Edition. Oxford University Press. New York.
- FAO-ISRIC, 1994. *World reference base for soil resources*. 161pp. Roma y Wageningen
- GEONICS, 2005. *EMD38-DD Ground Conductivity Meter-Dual Dipole* Version. Ontario, 34p.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma*, 89: 1-45.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press. New York.
- Kühn, J., A. Brenning, M. Wehrhan, S. Kozinski, M. Sommer, Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture*. doi: 10.1007/s11119-008-9103-z.
- Lesch, S.M., D.J. Strauss, J.D. Rhoades, 1995. Spatial prediction of soil salinity using electromagnetic induction techniques. 1. Statistical prediction models: a comparison of multiple linear regression and cokriging. *Water Resour. Res.* 3,373-386.
- Lesch, S.M., J.D. Rhoades, D.L. Corwin, 2000. *The ESAP Version 2.01r user manual and tutorial guide*. Research Report v.146. George E. Brown Jr., Salinity Laboratory, Riverside, CA, 153pp. (currently under review).
- Martínez, G., K. Vanderlinden, 2007. *Análisis de la relación espacial entre la humedad gravimétrica del suelo y la conductividad eléctrica aparente*. Bellinfante, N. y Jordán, A. (Eds). *Tendencias actuales de la ciencia del suelo*, pp 29-36. Sevilla.
- McKenzie, R.C., R.J. George, S.A. Woods, M.E. Cannon, D.L. Bennet. 1997. Use of the electromagnetic induction meter as a tool in managing salinization. *Hydrology Journal* 5(1), 37-50.
- McNeill, J.D., 1980. *Electrical conductivity of soils and rocks*. Technical Note, TN-5, Geonics Ltda, Ontario, 22p.
- Minasny, B., A.B. McBratney, 2007. The variance quad-tree algorithm: use for spatial sampling design. *Computers & Geosciences* 33, 383-392.
- Neira Seijo, X.X., 1993. *Desenrolo de técnicas de manexo de auga axeitadas a um uso racional de regadiós*. 1993, 259p. Universidade de Santiago de Compostela, Escola Politécnica Superior.
- Paz González, A. X. X. Neira Seijo, E. Benito Rueda, 1997. Compacidad de los suelos desarrollados sobre sedimentos Terciario-Cuaternarios en Terra Cha (Lugo). *Cad. Lab. Xeo. Laxe* 22, 15-28.
- Pebesma, E.J. 2001. *Gstat user's manual*. Department of Physical Geography. Utrecht University.
- Rhoades, J.D., D.L. Corwin, 1984. Measurement of inverted electrical conductivity profiles using electromagnetic induction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 288-291.
- Santos, C.M.A., 2007. *Estatística Descritiva - Manual de Auto-aprendizagem* Edições Sílabo, Lisboa.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, W.J. Wiebold, 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Eletronics in Agriculture*, 43: 263-283.
- USDA, 1999. *Guía para evaluación y calidad y salud del suelo*. USDA, Washington.
- van Groenigen, J.W., W. Siderius, A. Stein, 1999. Constrained optimisation of soil sampling for minimization of the kriging variance. *Geoderma* 87, 239-259.
- Vieira, S.R., 2000. *Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo*. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (ed.) *Tópicos em Ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54.
- Warrick, A.W., R.R. Nielsen, 1980. *Spatial variability of soil physical properties in the field*. In: HILLEL, D. *Applications of soil physics*. New York: Academic Press.