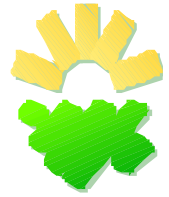




*Universidad Nacional de Córdoba*  
*Facultad de Ciencias Agropecuarias*  
*Escuela para Graduados*

---



# **LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN TIERRAS HIDROHALOMÓRFICAS**

**Silvina P. Debelis**

Tesis

Para optar al Grado Académico de  
Magister en Ciencias Agropecuarias  
Mención: Recursos Naturales

*Córdoba, 2017*

# LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN TIERRAS HIDROHALOMÓRFICAS

**Silvina P. Debelis**

## **Comisión Asesora de Tesis**

**Director:** Ms. Sc. (Ing. Agr.) Ana María Pereyra

**Asesores:** Ms. Sc. (Ing. Agr.) Antonio Aoki

Ing. Agr. Alfonso Buján

## **Tribunal Examinador de Tesis**

Dra. (Ing. Agr.) Mónica B. Barrios

-----

Ms. Sc. (Ing. Agr.) Antonio Aoki

-----

Dr. (Ing. Agr.) Omar A. Bachmeier

-----

**Presentación formal académica:** 21 de Marzo de 2017

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

## AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora y sus autoridades representada por su Decano Dr. Carlos A. Rossi, que permitió realizar mis estudios y me brindó ayuda, aliento y estímulo.

A los profesores Ing. Agr. Amado A. Bozzo (†) e Ing. Agr. Alfonso Buján, que guiaron mis primeros pasos en la especialidad, me brindaron sus conocimientos con generosidad y responsabilidad, y su cariño inmenso.

A mi directora Ing. Agr. Ms.Sc. Ana María Pereyra y asesores Ing. Agr. Ms.Sc. Antonio Aoki e Ing. Agr. Alfonso Buján por su acompañamiento y guía, dedicación y trabajo esmerado en este desafío.

A mis compañeros del área de Suelos por su compañerismo, colaboración y apoyo incondicional en todos los años que compartimos, entre ellos mi amiga Dra. Mónica Barrios, juntas desde nuestros inicios en la docencia universitaria.

A la Lic. María Cristina Gagey que facilitó las tareas de laboratorio y fue el pilar que permitió el éxito en las determinaciones analíticas de las muestras de suelo.

Al Dr. Marcelo Lovisolo por su ayuda en el área de vegetación, y salidas de campo.

A la Dra. Susana Sánchez, propietaria del Establecimiento Los Nogales, que ofreció su campo para la realización de esta investigación.

A mis colegas de labor en gestión institucional, especialmente a la Ing. Agr. Gabriela González, al Dr. Javier Vázquez y al Ing. Zoot. Enrique de Loof por el apoyo técnico-profesional, y por brindarme su amistad en este camino.

A las autoridades del área de posgrado de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba y su personal, por su acompañamiento y sugerencias.

A todos mis compañeros y amigos de la Facultad de Ciencias Agrarias, quienes de diferentes formas me han brindados su apoyo, ánimo y colaboración para poder realizar esta ardua tarea.

A mi familia, que siempre me apoyó, alentó y colaboró para este trabajo.

*¡Muchas Gracias!*

## **DEDICATORIA**

*A mis hijos Abril y Franco.*

*A mi esposo y compañero Javier.*

*A mis padres y hermana.*

## RESUMEN

Es frecuente en la Pampa Deprimida, la presencia de suelos con alta variabilidad en sus características y propiedades, debidas fundamentalmente a los factores formadores y al uso. La alcalinidad, la salinidad y el hidromorfismo, entre otras, determinan la productividad y otras características del pastizal natural. En esta tesis se explora la variabilidad espacial de los suelos y su vinculación con los patrones de vegetación, en especial en los ambientes planos e hidromórficos de la Pampa Deprimida. Los objetivos consistieron en caracterizar la distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) y los cationes de intercambio del horizonte A, mediante herramientas de la geoestadística y analizar la relación entre el patrón de variación espacial de las variables y la fisiografía de los ambientes a través de su vegetación. Los resultados mostraron que los semivariogramas poseen un carácter anisotrópico a excepción de  $K^+$ , con una fuerte dependencia espacial, mayor en las variables pH, CE,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ , PSI (rangos mayores a 50 m) y menor en  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y CIC (rangos menores a 50 m). Los modelos teóricos gaussiano y esférico presentaron el mejor ajuste, los valores bajos de *nugget* indican que el intervalo de muestreo es adecuado. La representación con *kriging* ordinario, en base a modelos geoestadísticos, permitió obtener un detallado gradiente de variación de las propiedades del suelo en el paisaje. Los mapas de las predicciones *kriging* de PSI, pH y CE muestran gran semejanza entre sí, y resultan inversos al  $Ca^{2+}$ . Los cationes  $Mg^{2+}$  y  $K^+$  tienen un patrón de variabilidad más independiente del resto de las variables estudiadas. El análisis factorial de correspondencias múltiples, determinó cuatro agrupamientos, que manifiestan relaciones entre las especies del pastizal y los suelos, e indirectamente con su fisiografía. En conclusión, el gradiente florístico del pastizal, se asocia a la influencia local de las propiedades edáficas sumadas a los efectos de la macro y microtopografía, en la redistribución del agua en el paisaje.

**Palabras clave:** alcalinidad, salinidad, geoestadística, análisis factorial, vegetación.

## ABSTRACT

It is common in the Flooding Pampa, the presence of soils with high variability in their characteristics, and properties, mainly due to action of forming factors and use. Alkalinity, salinity and hydromorphism, among other properties, determine the productivity and other characteristics of natural grassland. This thesis explores the spatial variability of soil and its relationship with vegetation patterns, especially in flat environments and hydromorphic of Flooding Pampa. The aims were to characterize the spatial distribution of electrical conductivity (EC), pH, cation exchange capacity (CEC) and exchangeable cations on the horizon A, using tools of geostatistics and analyze the relationship between the pattern of spatial variation of variables and physiography of environments through its vegetation. The results showed that the semivariograms have an anisotropic character except for  $K^+$ , with a strong spatial dependence, higher in the variables pH, EC,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ , ESP (ranges greater than 50 m) and lowest in  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  and CEC (ranges less than 50 m). Theoretical gaussian and spherical models presented the best fit, low nugget values indicated that the sampling interval is appropriate to reflect the variations. Representation using ordinary kriging interpolator, based on geostatistical models, provided a detailed gradient of variation of soil properties in the landscape. Maps of the kriging predictions ESP, pH and EC show great resemblance to each other, and are inverse to  $Ca^{2+}$ . Factorial analysis of multiple correspondences identified four clusters, which show relationships between species and grassland soils, and indirectly with its physiography. In conclusion, the floristic gradient grassland is associated with the local influence of soil properties combined with the effects of macro and micro-topography in the redistribution of water in the landscape.

**Keywords:** alkalinity, salinity, geostatistics, factorial analysis, vegetation.

## TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	II
HIPÓTESIS.....	3
OBJETIVOS .....	4
ANTECEDENTES.....	5
LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS SUELOS Y EL PAISAJE.....	5
LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE PARÁMETROS EDÁFICOS VINCULADOS AL HIDROHALOMORFISMO .....	8
CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS SUELOS DE LA “PAMPA DEPRIMIDA” .....	11
ALCALINIDAD .....	14
SALINIDAD .....	16
PATRONES DE VARIABILIDAD EDÁFICOS ASOCIADOS A LA VEGETACIÓN NATURAL.....	18
BASES TEÓRICAS EN EL ESTUDIO DE LA GEOESTADÍSTICA.....	21
DEPENDENCIA ESPACIAL.....	22
DEFINICIÓN DE GEOESTADÍSTICA.....	22
TEORÍA DE LAS VARIABLES REGIONALIZADAS.....	23
CONCEPTO DE VARIABLE REGIONALIZADA .....	24
GRÁFICOS EXPLORATORIOS .....	25
ANÁLISIS ESTRUCTURAL.....	25
VARIOGRAMA Y SEMIVARIOGRAMA .....	26
COVARIOGRAMA Y CORRELOGRAMA .....	27
ESTUDIO DEL SEMIVARIOGRAMA.....	28
ELEMENTOS CONSTITUYENTES.....	28
MODELOS TEÓRICOS DE SEMIVARIANZA .....	29
Modelo Esférico .....	30
Modelo Exponencial .....	30
Modelo Gaussiano.....	30
Modelo Lineal .....	31
Modelo Power o función potencia .....	32
Modelo Efecto Pepita.....	32
ANISOTROPÍA .....	33
Anisotropía Geométrica .....	33
Anisotropía Zonal.....	34
Anisotropía Híbrida.....	34
PREDICCIÓN ESPACIAL - <i>KRIGING</i> .....	35
Definición de <i>Kriging</i> .....	35
Fundamentos y métodos.....	35
<i>Kriging</i> Ordinario.....	36
<i>Kriging</i> Simple .....	36
<i>Kriging</i> de Punto .....	36
<i>Kriging</i> de Bloque .....	36
REPRESENTACIÓN DE LAS PREDICCIONES .....	37
VALIDACIÓN DEL <i>KRIGING</i> .....	38

MÉTODOS MULTIVARIADOS PARA EL TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE VEGETACIÓN .....	38
Métodos multivariados de ordenamiento .....	39
Análisis factorial de correspondencia múltiple .....	39
Análisis de Conglomerados .....	39
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS .....	41
CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	41
UBICACIÓN .....	41
CLIMA .....	42
GEOMORFOLOGÍA .....	43
SUELOS .....	44
VEGETACIÓN .....	48
METODOLOGÍA .....	51
DEFINICIÓN DEL SITIO Y MUESTREO .....	51
INFORMACIÓN PRELIMINAR .....	51
MUESTREO SISTEMÁTICO .....	52
PRESENTACIÓN DE LOS DATOS. MAPA DE VARIABLES .....	53
DETERMINACIONES ANALÍTICAS DE SUELOS .....	54
pH actual .....	54
Conductividad eléctrica (CE) .....	54
Determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables (CI) .....	54
Determinación de los cationes de intercambio (CI) .....	55
TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS .....	55
ANÁLISIS EXPLORATORIO .....	55
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES DE SUELO .....	55
ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO .....	56
Análisis Estructural .....	56
Utilización del Programa SAS .....	57
Interpolación <i>Kriging</i> .....	58
Interpolación <i>Kriging</i> con SAS .....	58
Validación del <i>Kriging</i> .....	58
ESTUDIOS DE VEGETACIÓN .....	59
TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE VEGETACIÓN .....	60
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	61
ESTUDIO DEL RELIEVE .....	61
CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES pH Y CE .....	62
CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> .....	67
CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES CIC Y PSI .....	75
KRIGING PARA pH y CE .....	81
<i>KRIGING</i> PARA Ca <sup>2+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> y K <sup>+</sup> .....	82
<i>KRIGING</i> PARA CIC Y PSI .....	85
<i>KRIGING</i> UTILIZANDO SAS .....	86
VALIDACIÓN DEL KRIGING .....	86
RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE SUELO .....	89
ESTUDIOS DE VEGETACIÓN .....	90
RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE SUELO Y LA VEGETACIÓN .....	93
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES .....	100



CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA CITADA..... 104

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Suelos hidromórficos e hidrohalomórficos de mayor representatividad en la subregión Pampa Deprimida. Datos promedio (Miaczynski, 1995 e INTA-CIRN, 1989).

Tabla 2. Características de suelos salinos y sódicos.

Tabla 3. Guía de Unidades Cartográficas de Suelo, correspondientes al área de estudio.

Tabla 4. Geoformas y suelos comúnmente asociados con los grandes tipos de comunidad del pastizal de la Pampa Deprimida (Batista *et al.*, 2005).

Tabla 5. Valores de los estadísticos descriptivos para pH y conductividad eléctrica (CE).

Tabla 6. Valores geoestadísticos más importantes para pH y conductividad eléctrica (CE).

Tabla 7. Valores de los estadísticos descriptivos para cationes intercambiables.

Tabla 8. Valores geoestadísticos más importantes para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

Tabla 9. Valores de los estadísticos descriptivos para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Tabla 10. Valores geoestadísticos más importantes para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Tabla 11. Resultados de la interpolación y validación cruzada para pH, conductividad eléctrica (C.E.),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Tabla 12. Valores de correlación de Pearson y significancia para las variables edáficas estudiadas.

Tabla 13. Lista de especies censadas.

## LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1. Estructura de un semivariograma.

Fig. 1.2. Comparación de los modelos exponencial, esférico y gaussiano. La línea punteada vertical es el Rango. Tiene un valor de 210, en esta escala de 0 a 300. El valor de la Meseta es 30 y el Efecto pepita 0.

Fig. 1.3. Representación del modelo lineal.

Fig. 1.4. Representación del modelo función potencia.

Fig. 1.5. Representación del modelo efecto pepita.

Fig. 1.6. Representación de Anisotropía geométrica.

Fig. 1.7. Representación de Anisotropía híbrida.

Fig. 1.8. Esquema de interpolación en el *kriging*.

Fig. 2.9. Sitio de estudio.

Fig. 2.10. Localización de áreas ecológicas homogéneas en la pradera pampeana: (1) pampa ondulada, (2) pampa subhúmeda central, (3) pampa semiárida central, (4) pampa austral, (5) pampa mesopotámica y (6) pampa deprimida. En azul: isohietas (en mm/año). En verde: isotermas (en grados centígrados). Revista Ciencia Hoy (2002) Volumen 12 - N° 68.

Fig. 2.11. Paisaje característico del área de estudio.

Fig. 2.12. Mapa de suelos. Hoja Monasterio - I.G.N. 3557- 32-1. Escala 1:50.000.

Fig. 2.13. Suelo representativo hidromórfico.

Fig. 2.14. A. Estepa de Halófitas, B. Praderas Húmedas de Mesófitas.

Fig. 2.15. Praderas de Hidrófitas, borde de cubeta.

Fig. 2.16. Muestreo Sistemático.

Fig. 2.17. Grilla de muestreo para suelos y vegetación.

Fig. 2.18. Modelos teóricos, A modelo esférico, B modelo potencial, C modelo gaussiano, D modelos exponencial, E modelo lineal, F modelo efecto pepita puro.

Fig. 3.19. Mapa de curvas de nivel.

Fig. 3.20. Gráfico de caja para pH y conductividad eléctrica (CE).

Fig. 3.21. Variogramas de superficie para pH (a) y conductividad eléctrica CE (b).

Fig. 3.22. Semivariogramas compuesto (omnidireccional) y en las direcciones 45°, 90° y 135° para pH (a) y conductividad eléctrica CE (b).

Fig. 3.23. Variogramas teóricos para pH (a) y conductividad eléctrica (CE) (b), según las direcciones 0°, 45°, 90° y 135°.

Fig. 3.24. Gráfico de caja para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

Fig. 3.25. Variogramas de superficie para  $\text{Ca}^{2+}$  (a),  $\text{Mg}^{2+}$  (b),  $\text{Na}^+$  (c) y  $\text{K}^+$  (d).

Fig. 3.26. Semivariogramas compuesto (omnidireccional) y en las direcciones 45°, 90° y 135° para  $\text{Ca}^{2+}$  (a),  $\text{Mg}^{2+}$  (b),  $\text{Na}^+$  (c) y  $\text{K}^+$  (d).

Fig. 3.27. Variogramas teóricos para  $\text{Ca}^{2+}$  (a),  $\text{Mg}^{2+}$  (b),  $\text{Na}^+$  (c) y  $\text{K}^+$  (d) según las direcciones 0°, 45°, 90° y 135°.

Fig. 3.28. Gráfico de caja para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Fig. 3.29. Variogramas de superficie para para capacidad de intercambio catiónico (CIC) (a) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (b).

Fig. 3.30. Semivariogramas compuesto (omnidireccional) y en las direcciones 45°, 90° y 135° para CIC (a) y PSI (b).

Fig. 3.31. Variogramas teóricos para capacidad de intercambio catiónico (CIC) (a) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (b) según las direcciones 0°, 45°, 90° y 135°.

Fig. 3.32. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para pH.

Fig. 3.33. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para conductividad eléctrica (CE).

Fig. 3.34. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para  $\text{Ca}^{2+}$ .

Fig. 3.35. Mapa de contorno, *kriging* y mapa de superficie 3D para  $Mg^{2+}$ .

Fig. 3.36. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para  $Na^+$ .

Fig. 3.37. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para  $K^+$ .

Fig. 3.38. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para capacidad de intercambio catiónico (CIC).

Fig. 3.39. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Fig. 3.40. Relación entre los valores reales y los valores estimados de pH (a) y conductividad eléctrica (CE) (b) utilizando validación cruzada.

Fig. 3.41. Relación entre los valores reales y los valores estimados de  $Ca^{2+}$  (a) y  $Mg^{2+}$  (b) utilizando validación cruzada.

Fig. 3.42. Relación entre los valores reales y los valores estimados de  $Na^+$  (a) y  $K^+$  (b) utilizando validación cruzada.

Fig. 3.43. Relación entre los valores reales y los valores estimados de CIC (a) y PSI (b) utilizando validación cruzada.

Fig. 3.44. Dendrograma del análisis de agrupamiento que muestra las relaciones jerárquicas entre los 30 sitios censales.

Fig. 3.45. Primer plano factorial del análisis de correspondencia de los 30 sitios censales.

Fig. 3.46. Mapa de contorno *kriging* para Grupos florísticos. Grupo 1 (a), grupo 2 (b), grupo 3 (c) y grupo 4 (c).

## LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

$\gamma(h)$ : semivarianza

$\mu\text{m}$  : micrómetro

$^{\circ}\text{C}$ : grado centígrado

A (m): amplitud o range

A: anual

$\alpha$ : Rango

AA- Argiudol ácuico

AAT Argialbol típico

B: bueno

C: ciclo

$C_0/(C_0+C_1)*100$ : porcentaje de varianza estructural

$C_0$ : Efecto Nugget o ruido

$C_0+C_1$ : Sill o umbral

$C_1$ : varianza explicada

C3: carbono 3

C4: carbono 4

CA: Cromudert ácuico

$\text{Ca}^{2+}$ : calcio

CE: conductividad eléctrica

CI: cationes de intercambio

CIC: capacidad de intercambio catiónico

$\text{Cl}^-$  : cloruro

cmol<sub>c</sub> : centimol carga

CV: coeficiente de variación

D: débil

DEM : digital elevation model (Modelo digital de terreno)

dS : decisiémen

E: Este

ECM: error cuadrático medio

EE: error estándar

EE: error estándar

ESRE: error estándar residual

Fam: familia

F: fuerte

Fe: hierro

g : gramo

GIS : Sistema de Información Geográfica

h: distancia (h)

ha: Hectárea

HTA: Hapludol tapto árgico

HTN: Hapludol tapto nátrico

I: imperfecto

ICOMAQ: Comité Internacional para Régimen de Humedad Ácuico

IGF: Índice de Bondad de Ajuste (Indicative goodness of fit)

IGN: Instituto Geográfico Nacional

INTA: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria

K<sup>+</sup>: potasio

kg : kilogramo

km/h: kilómetro por hora

L: leve

m: metros

M: moderado

MD: muy débil

MECM mínimo error cuadrático medio

Mg<sup>2+</sup>: magnesio

mm: milímetro

Mmhos : milimhos

Mn: manganeso

MP: muy pobre

MRE: Promedio de los residuos

N: Norte

Na<sup>+</sup>: sodio

NAT: Natracualf típico

NAT: Natralbol típico

NC: nombre científico

NCT: Natracuol típico

NE: Noreste

NO: Noroeste

NRCS: Natural Resources Conservation Service

NV: nombre vulgar

O: Oeste

OIP: otoño invierno primavera



P: perenne

PE: promedio estimado

PSI: porcentaje de sodio intercambiable

PT: Peludert típico

PVO: primavera verano otoño

r: coeficiente de correlación de Pearson

R: radio de anisotropía

R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación

S: Sur

SAGyP: Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca

SE: Sudeste

SNM: sobre el nivel del mar

SO: Sudoeste

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> : sulfato

Spp: conjunto de especies del género

VF: vía fotosintética

X : coordenada

Y : coordenada

Z : variable

## INTRODUCCIÓN

La heterogeneidad de los suelos se evidencia en la cartografía a través de unidades cartográficas de tipo complejos, caracterizadas por presentar dos o más componentes distintos que ocurren con un patrón regularmente repetido.

Esta presencia de suelos contrastantes, con alta variabilidad en sus características morfológicas, y en sus propiedades físicas, químicas y productivas, es frecuente en la unidad geomorfológica de la Pampa Deprimida. Las variaciones se deben, fundamentalmente, a la acción diferencial de los factores formadores. Sin ser la única forma de analizar la variabilidad en el espacio, ni desestimando la importancia de los otros enfoques, se intenta explorar la heterogeneidad de estos suelos mediante el abordaje de la geoestadística.

La alcalinidad, la salinidad y el hidromorfismo son características relevantes en los suelos planos de esta subregión, y determinan la productividad y otras características del pastizal natural. El conocimiento de la variabilidad espacial de estos atributos es importante para extrapolar a sitios similares. Incluso en paisajes muy suavemente ondulados a planicies extendidas, la presencia de micro relieves determina la formación de complejos de suelos contrastantes a pocos metros de distancia (Hein *et al.*, 1989).

La magnitud, ubicación y causas de la variabilidad espacial es un ingrediente esencial en los estudios de suelos, y un desafío mayor en la actualidad es la integración de esta información para el diagnóstico de la calidad de las tierras, riesgos y protección del medio ambiente. Por ello, estas herramientas se usan en forma complementaria con

los Sistemas de Información Geográfica (Peng *et al.*, 2013 y Li *et al.*, 2014) y en estudios de Agricultura de Precisión (Romero Fernández *et al.*, 2013).

A escala regional, el clima, los patrones de uso de la tierra, el tipo de vegetación y las características del relieve son los principales determinantes de la variación (Mallarino y Vittry, 2004). A escala de parcela, la topografía es uno de los principales factores que ocasiona variabilidad espacial a través del escurrimiento y la sedimentación (Ceddia *et al.*, 2009). En suelos cultivados, el manejo respecto del laboreo, técnicas de fertilización, grados de compactación, etc., pueden determinar las causas de variabilidad a escalas de detalle (Mallarino y Vittry, 2004), modificando atributos químicos, físicos, y biológicos del horizonte superficial.

Los métodos aplicados en investigación en suelos fueron criticados en el pasado por tener un carácter demasiado cualitativo. En respuesta a estas críticas, los modelos cuantitativos cobraron impulso en los últimos treinta años, y son frecuentemente utilizados para describir, clasificar y estudiar los patrones de distribución espacial de los suelos (Goovaerts, 1999).

La pedometría es una rama de la Ciencia del Suelo (Webster, 1994), fundamentalmente interesada en el empleo de herramientas matemáticas y estadísticas para interpretar los datos del suelo. Según McBratney *et al.* (2000) las técnicas pedométricas aplicadas en la investigación de suelos están agrupadas en tres grupos metodológicos, una es la geoestadística, otro responde a los métodos clásicos provenientes del modelo de Jenny (1941) y el tercero a los métodos híbridos que son la combinación de técnicas de los dos grupos para optimizar la predicción de las propiedades del suelo.

Los métodos geoestadísticos están basados en la teoría de variables regionalizadas (Matheron, 1965), que permite considerar la variabilidad espacial de una característica o propiedad del suelo como una realización de una función aleatoria que puede ser representada por un modelo estocástico. El método geoestadístico de

interpolación espacial es llamado *kriging*. Los primeros usos principales de *kriging* ordinario en estudios de suelo comenzaron con Burgess y Webster (1980).

Otros temas importantes dentro del estudio de información georreferenciada, que no son abordados en este trabajo, son el diseño de redes de muestreo (McBratney *et al.*, 1981), la geoestadística multivariada (Wackernagel, 1995) y la simulación por *kriging* (Deutsch y Journel, 1992).

En nuestro país se ha estudiado la variabilidad espacial de distintos atributos de suelo en variadas regiones utilizando herramientas propias de la geoestadística (Gili *et al.*, 2010; Bosch Mayol *et al.*, 2012; Frolla *et al.*, 2015), sin embargo, en la Pampa Deprimida la información es escasa (Lavado *et al.*, 1996) posiblemente porque estas técnicas se asocian principalmente a la agricultura de precisión en suelos con alto índice de productividad.

## **HIPÓTESIS**

El estudio de la variabilidad espacial a través de la geoestadística define patrones edáficos y de vegetación en paisajes planos con suelos hidrohalomórficos de la Pampa Deprimida (provincia de Buenos Aires). La variación sistemática de las propiedades de acuerdo a su situación en el paisaje permite predecir el valor de dichas propiedades a través de la observación de las diferencias topográficas y de los cambios en la vegetación.

La conductividad eléctrica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico y los cationes de intercambio ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) del horizonte A presentan variabilidad sistemática de corto rango.

El comportamiento espacial de las variables  $\text{Na}^+$ , pH y conductividad eléctrica del horizonte A se relacionan con la cota (relieve) y la cobertura en forma inversa.

## **OBJETIVOS**

Caracterizar la distribución espacial de la conductividad eléctrica, pH, capacidad de intercambio catiónico y los cationes de intercambio ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ ) del horizonte A en paisajes planos con suelos hidrohalomórficos.

Estudiar la relación entre el patrón de variación espacial de las variables y la fisiografía de los paisajes planos con suelos hidrohalomórficos.

Describir el rango de variabilidad de los parámetros estudiados y definir las variables basándose en parámetros geoestadísticos.

## ANTECEDENTES

### LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LOS SUELOS Y EL PAISAJE

El suelo es un cuerpo natural, cuyas características difieren de un lugar a otro. La variabilidad del suelo es el producto de la acción de diferentes factores y procesos de formación que operan e interactúan sobre un *continuum* a escala temporal y espacial.

La pendiente, como factor del relieve, es uno de los determinantes principales en la formación de los suelos. Las geoformas controlan la distribución de los suelos en el paisaje, permitiendo que pedones de morfología y propiedades contrastantes permanezcan en equilibrio bajo condiciones locales particulares.

La variabilidad de las características y cualidades de los suelos en ambientes hidromórficos de la provincia de Buenos Aires presenta un patrón complejo vinculado a los factores formadores de los suelos y a su uso.

Los suelos forman un continuo tridimensional, no en aislamiento, sino que están organizados dentro del paisaje (Hall y Olson, 1991). Cualquier estudio de génesis y distribución de suelos requiere una comprensión del origen del paisaje, de modo que para delinear límites de suelos es necesario interpretar y comprender los ambientes.

La conceptualización clásica del sistema suelo más ampliamente aceptada se remonta a la ecuación de los factores de Jenny (1941), donde el estado de desarrollo de un suelo es función del clima, litología, organismos, relieve y tiempo. De este modo, el relieve local o factor topográfico, es uno de los elementos determinantes en la génesis de los suelos. Los primeros investigadores en esta rama de la ciencia usaron las ideas clásicas de geología y fisiografía para explicar diferencias en suelos y su agrupamiento

sobre bases geográficas (Ruhe, 1956). Durante las décadas del '50 y '60, los estudios realizados enfatizaron la relación entre las superficies geomórficas y los suelos.

Las bases para la comprensión de la relación suelo-paisaje están fundamentadas en los conceptos de Davis (1899) y Penck (1924), y aquellos de Milne (1935, 1936), King (1942) y Ruhe (1956, 1960) a través de modelos donde los procesos juegan un rol muy importante (Hall y Olson, 1991). El modelo de catena de Milne (1936) es un fundamento excelente para integrar estos principios. La catena es un concepto esencial de la edafología que vincula la distribución de los suelos con importantes procesos pedo-geomórficos cuando están localizados en pendiente. Este concepto ha sido modificado (Bushnell, 1942) y actualmente se utiliza principalmente en EEUU como un sinónimo de toposecuencia. La diferencia radica en que *toposecuencia* tiene una connotación morfológica, mientras que catena se refiere a la respuesta de los procesos. Los suelos de una catena tienen diferencias morfológicas, vinculadas a procesos de erosión, transporte, sedimentación, o lixiviado y translocación de los constituyentes del suelo (Hall, 1983).

El concepto original de catena que involucra procesos que causan la diferenciación a lo largo de las pendientes, como la diferenciación vertical (perfil) ha sido muy utilizada en estudios de génesis (Dan y Yaalon, 1968; Huggett, 1975). Un modelo conceptual importante de la variabilidad del suelo es que los suelos y los procesos geomorfológicos son sinérgicos; como resultado, se asocian suelos a determinados rasgos geomorfológicos. Así, suelos específicos están asociados a geoformas específicas y los patrones del suelo son repetitivos y predecibles (Ruhe, 1956; Daniels y Hammer, 1992).

Históricamente, el uso de modelos de paisaje ha demostrado que los paisajes son predecibles, ellos tienen un importante componente no aleatorio en la variabilidad. Esta variabilidad sistemática puede ser utilizada para predecir los suelos en el paisaje si la metodología utilizada tanto para describir como para cuantificar los procesos que gobiernan el desarrollo del paisaje se comprende.

Muchos investigadores han aplicado este modelo a los paisajes locales y han investigado las relaciones entre los suelos y superficies geomórficas, contribuyendo a la comprensión de su desarrollo y de sus patrones de distribución (Daniels *et al.*, 1971; Young y Hammer, 2000; Kerry y Oliver, 2005), a diferentes escalas (Pennock y de Jong, 1990) y desde áreas llanas a zonas de marcada pendiente (Carter y Ciolkosz, 1991).

En las últimas décadas se ha otorgado mayor atención a la variación del suelo para cuantificar los conceptos pedogenéticos y mejorar la comprensión de los factores que actúan en los patrones de distribución del suelo y la evolución del paisaje (Wilding y Drees, 1983). Se generaliza la aplicación de modelos para el conocimiento y comprensión en los procesos de génesis del suelo (Levine y Knox, 1994). El análisis de la variabilidad de los suelos a través de métodos multivariados permitió estudiar ciertas propiedades del suelo entre y dentro de las distintas posiciones del paisaje (Ovalles y Collins, 1988).

Fueron muy significativos en la modelización y estudios de variabilidad de los recursos naturales, los aportes de Matheron (1965) quién describió las bases teóricas de la geoestadística y Campbell (1978), que aplicó la teoría de las variables regionalizadas, estudiando la variabilidad espacial de atributos del suelo en áreas con patrones de variación contrastantes. Otras contribuciones importantes en este aspecto son los aportes teóricos de Trangmar *et al.* (1985) y Webster (1985).

Se ha demostrado que la geoestadística se adapta al estudio de los suelos y su variabilidad de forma favorable. Estos métodos han sido usados para estimar variabilidad espacial de propiedades físicas del suelo (Mc Bratney *et al.*, 1991, Gaston *et al.*, 2001), químicas (Paz *et al.*, 1996, Wu *et al.*, 2003), clases de drenaje (Kravchenko *et al.*, 2002), distribución de metales pesados (Rawlins *et al.*, 2005) e hidráulicas (Moreno *et al.*, 2003). Inclusive, para conocer la influencia de la microtopografía en algunas características del suelo, y su importancia en la cartografía (Habecker *et al.*, 1990 y Kabrick *et al.*, 1997).



Estos análisis geoestadísticos han sido aplicados en estudios pedológicos en cortas distancias (Vieira *et al.*, 1982) y también para calcular la variabilidad sobre grandes áreas (Bruland *et al.*, 2006).

El método geoestadístico de interpolación espacial es llamado *kriging*. Los primeros usos principales de *kriging* ordinario en estudios de suelo comienzan con Burgess y Webster (1980). Numerosos trabajos se abocan a los métodos de interpolación espacial en suelos (Mueller *et al.*, 2004; Lauzon *et al.*, 2005), formas de *kriging* 2D y 3D (Gallichand *et al.*, 1992) abordando la problemática de salinidad y sodicidad. Se han estudiado patrones de variabilidad entre propiedades de los suelos, sitios y clases hidrogeomórficas en suelos húmedos (Bruland y Richardson, 2005).

## **LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE PARÁMETROS EDÁFICOS VINCULADOS AL HIDROHALOMORFISMO**

La Pampa Deprimida constituye un notable ejemplo de llanura de baja pendiente con una apariencia totalmente plana. Existen no obstante desniveles a escala local que condicionan diferencias en el escurrimiento de las aguas de lluvia, producen acumulaciones superficiales que, ya en las posiciones cóncavas como en las planas, dan lugar a características particulares en los perfiles hidromórficos que dominan en la región aludida (Debelis *et al.*, 2005). Predominan unidades cartográficas del tipo complejos con alto porcentaje de suelos alcalinos, algunos desde superficie y otros con elevado porcentaje de sodio de intercambio en los horizontes subsuperficiales (Natracuol típico y Natracualf típico). Hay pedones leve a moderadamente salinos.

La variación espacial de los suelos es gobernada por los procesos de formación, los cuales están interactivamente condicionados por la litología, el clima, la biología y el relieve a través del tiempo geológico.

En esta región, la dinámica del agua, tal como otros autores lo afirman para áreas de escasa pendiente (Richardson *et al.*, 1992), está condicionada por la topografía, la vegetación, el clima, y la hidrología considerada como el movimiento y distribución

del agua subterránea y superficial. El agua y sus movimientos son, en la mayoría de los paisajes, los principales agentes para la variabilidad del suelo (Hall y Olson, 1991).

Los suelos y otros recursos de la tierra son caracterizados por muchos atributos que pueden mostrar varios grados de covariación o correlación. En suma, las propiedades cuantitativas del suelo y recursos de la tierra no pueden ser tratadas como simples variables estocásticas, porque su variación es gobernada por interacciones de muchas escalas espaciales.

Las estadísticas clásicas no pueden captar la variación espacial, medida en términos de la diferencia entre valores a determinados intervalos de muestreo. Sin embargo, hay un grupo de herramientas estadísticas que son aplicables al análisis de datos espacialmente dependientes. Se trata de la geostatística, que incluye semivariogramas, *kriging*, covariogramas, *cokriging* y *block kriging*. El término geoestadística es usado para describir técnicas estadísticas que son derivadas de la estadística clásica, y son aplicables a la cuantificación del grado de dependencia de las muestras y luego a la estimación de parámetros de la población basados en la medida de esta dependencia. Este grupo de procedimientos está muy bien adaptado al estudio de los suelos y su variación (Burrough *et al.*, 1994).

Las variables sujetas al estudio geoestadístico no cumplen con el carácter de independencia entre muestras, por tal motivo no se habla de variables aleatorias, sino de variables regionalizadas, donde está implícito el carácter espacial del fenómeno que ellas representan. Las variables regionalizadas son aquellas que están distribuidas continuamente con una variación geográfica demasiado compleja para ser representada por cualquier función matemática manejable. A pesar de esto, la tasa promedio de cambio, en función de la varianza puede ser estimada por la semivarianza.

Generalmente, muestras recolectadas cerca unas de otras son más similares que muestras colectadas a grandes distancias. Por ello, las estadísticas paramétricas son inadecuadas para el análisis de variables dependientes espacialmente, porque ellas

asumen que las observaciones medidas son independientes pese a su distribución en el espacio (Hamlett *et al.*, 1986; Mc Bratney y Webster, 1983; Webster y Burgess, 1984).

La interpolación o estimación de valores en puntos dentro del dominio donde la variable no se midió, es un problema que debe ser resuelto para obtener un conocimiento más valioso del comportamiento de la variable y de los procesos dependientes de ella.

El esfuerzo de muestreo requerido para estimar valores medios con precisión especificada puede lograrse a través de estas herramientas y Webster y Nortclif (1984) afirman que en función de ejemplos publicados podría ser posible generalizar semivariogramas a partir de los cuales planear el muestreo de una región.

En ambientes hidromórficos se han estudiado gradientes en propiedades químicas de suelos y su variabilidad espacial (Reese y Moorhead, 1996), patrones espaciales de humedad y también de potencial de óxido-reducción (Fiedler y Sommer, 2004).

También, se han estudiado los patrones de variabilidad de pH con métodos geoestadísticos, en humedales naturales, analizando su relación con la microtopografía, vegetación y gradientes de escurrimiento (Bruland y Richardson, 2005).

Importantes estudios indican que el pH del suelo puede tener uno de los rangos más cortos de variabilidad espacial de las propiedades del suelo típicamente analizadas por los productores, indicando la conveniencia de una alta densidad de muestreo (McBratney y Pringle, 1999; Lauzon *et al.*, 2005).

Cambardella *et al.* (1994) estudió la distribución y tendencia espacial a escala de predio de parámetros del suelo, entre ellos pH, y clasificó las variables según el grado de dependencia espacial.

Otras aplicaciones de estas herramientas se da en la elaboración de mapas de drenaje (Kravchenko *et al.*, 2002) utilizando variables como la conductividad eléctrica (CE) y datos topográficos como información auxiliar.

La utilización en geoestadística de variables que se correlacionan, como variables secundarias, es razonable para inferir el comportamiento de ciertas variables que son costosas y dificultosas de cuantificar, a través de una variable de más fácil medición, es el caso del Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) que se ha utilizado como variable auxiliar con el cobre edáfico (Wu *et al.*, 2003). También, se utilizaron datos de conductividad eléctrica (Zhang *et al.*, 1992) para predecir concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , y por Vaughan *et al.* (1995) para predecir salinidad.

Por otra parte, el conocimiento de la distribución de las propiedades del suelo en el campo y a escala de cuenca es importante para definir prácticas de manejo y para comprender los efectos de la producción agropecuaria sobre la calidad del medio ambiente.

La magnitud, ubicación y causas de la variabilidad espacial es un ingrediente esencial en los estudios de suelos, y en la actualidad constituye un gran desafío la integración de esta información para el diagnóstico de la calidad de las tierras, riesgos y protección del medio ambiente.

## **CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS SUELOS DE LA “PAMPA DEPRIMIDA”**

Los suelos hidromórficos e hidrohalomórficos de distinta intensidad ocupan una superficie del 45 % del territorio bonaerense (Miaczynski, 1995). En la Pampa Deprimida estos suelos representan aproximadamente un 60 % de su superficie.

Los Subgrupos de suelos presentes en esta subregión se encuentran mayormente representados en tres Ordenes de suelos: Molisoles, Alfisoles y Vertisoles,

correspondiendo los suelos hidromórficos no salino-sódicos a los Molisoles y los suelos hidrohalomórficos a los tres órdenes. Los más difundidos son el Natracuol típico, el Hapludol taptó árgico y nátrico, Natracualf típico y el Argiudol ácuico. Estos suelos presentan diferencias en las condiciones de drenaje, así como en el grado de alcalinidad y salinidad (Tabla 1).

Tabla 1. Suelos hidromórficos e hidrohalomórficos de mayor representatividad en la subregión Pampa Deprimida. Datos promedio (Miaczynski, 1995 e INTA-CIRN, 1989).

<b>Ordenes</b>	<b>Subgrupo</b>	<b>Sodicidad</b>	<b>Salinidad</b>	<b>Drenaje</b>	<b>Cap Uso</b>
<b>Molisoles</b>	HTA	-	-	B a I	II/III
	AA	-	-	I	III
	NCT	F	MD a L	I	VI
	HTN	F	-	B a I	IV
<b>Alfisoles</b>	NAT	M	-	M	IV/VI
	AAT	No	-	I	II-IV
	NAT	F	D	P a MP	VII
<b>Vertisoles</b>	PT	M	M	I	VI
	CA	-	F	P	VII

HTA Hapludol taptó árgico - AA Argiudol ácuico - NCT Natracuol típico - HTN Hapludol taptó nátrico - NAT Natralbol típico - AAT Argialbol típico - NAT Natracualf típico - PT Peludert típico - CA Cromudert ácuico. B: bueno; I: imperfecto; P: pobre; M: moderado; MP: muy pobre; F: fuerte; D: débil; MD: muy débil y L: leve.

Los suelos hidromórficos no sódicos ni salinos aparecen en relieves planos o levemente deprimidos, microdepressiones, bajos anegables y cubetas. Estas características de los suelos se relacionan principalmente con las lluvias y sus escurrimientos superficiales, en una topografía tan llana con pendientes menores al 0.5% y escurrimientos subsuperficiales desde sectores más altos, agravado por la escasa permeabilidad de los horizontes B subyacentes con alto porcentaje de arcillas y por ascenso hasta la superficie (o cerca de ella) de la napa freática.

Los subgrupos de suelos puramente hidromórficos, tienen aptitud agrícola aunque limitada por sus imperfectas condiciones de drenaje (Clase II a IV).

El hidromorfismo es considerado como un estado permanente o temporario de exceso de agua en el suelo asociado con condiciones de reducción. El hidromorfismo tiene considerables efectos sobre el suelo, los cuales son reflejados en su composición, propiedades, génesis y evolución, así como en el manejo. Su importancia ha sido ampliamente reconocida y se ha creado una amplia terminología en los diferentes sistemas de descripción de suelos (Schoeneberger *et al.*, 1998) y de clasificaciones de suelos, para caracterizar correctamente a estos suelos particulares. En 1992, Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1999), introduce el término “aquic conditions” y, además, se introdujeron otros cambios relacionados, como resultado de las recomendaciones realizadas al NRCS (Natural Resources Conservation Service) por el Comité Internacional para Régimen de Humedad Ácuico (ICOMAQ), creado en 1982.

Cuando el exceso de agua se debe a lluvias y drenaje deficiente se crea una temporaria napa colgada que fluctúa cerca de la superficie. Esto ocurre principalmente en suelos con un cambio textural abrupto, donde un horizonte Bt con alto porcentaje de arcillas esta subyacente a un horizonte E con alto porcentaje de limo.

Debido a la alternancia de períodos de reducción y oxidación de compuestos de hierro y manganeso en el suelo resultan características redoximórficas asociadas con el exceso de humedad. Los procesos de reducción se llevan a cabo debido a la saturación con agua, y la oxidación ocurre cuando el suelo se encuentra bien aireado. Los iones de hierro y manganeso reducidos son algo más móviles y pueden ser transportados por el agua y trasladarse en el perfil del suelo.

Hay una posible secuencia de reacciones que se pueden producir en un suelo que se satura con agua. En primer lugar, la reducción del oxígeno, y luego los nitratos y el manganeso en suelos neutros (o primero manganeso y luego nitratos en suelos ácidos) y el hierro. Los procesos de oxidación siguen la secuencia inversa; por ejemplo, el Fe ferroso se oxida antes que los compuestos de Mn reducidos (Imbellone *et al.*, 2010). Los patrones característicos de color se deben a estos procesos. Los iones Fe y Mn reducidos pueden ser removidos de un suelo si hay transporte vertical o lateral de agua, en cuyo caso no habrá precipitación de Fe y Mn. Cuando el hierro y manganeso están

oxidados y precipitados, pueden formar leves moteados a nódulos y concreciones precisas.

Los movimientos de Fe y Mn como resultado de los procesos redox resultan en características redoximórficas como cambios en el color por pérdida o ganancia de pigmentos, en comparación con el color de la matriz, resultando en colores grises, amarillos, verdes o azules. Los procesos redoximórficos se caracterizan por la presencia de “masas” de color más rojo o más negro que la matriz adyacente; nódulos o concreciones que son cuerpos cementados de Fe-Mn; la intensidad de la matriz igual o menor que 2 por  $\text{Fe}^{2+}$ , o revestimientos superficiales muy finos color negro llamados manganes y películas de arcilla manchadas con  $\text{Fe}^{+3}$  como los ferriargilanes.

## **ALCALINIDAD**

“*Suelos halomórficos*” es el término general para referirse a los suelos formados bajo condiciones de exceso de sales neutras o muy alcalinas.

Las limitaciones de estos suelos presentes en la Pampa Deprimida (Tabla 1) son más graves que las de los suelos hidromórficos no sódicos ni salinos, pues presentan un drenaje pobre a imperfecto y una moderada a fuerte sodicidad y/o salinidad, por lo cual no tienen aptitud agrícola (clase de Capacidad de Uso VI y VII).

La sodicidad o alcalinización se desarrolla cuando en la solución del suelo existe una concentración elevada de sales sódicas capaces de sufrir hidrólisis alcalina, de tipo carbonato y bicarbonato de sodio, acompañan también sales sódicas neutras principalmente cloruros y sulfatos y sales de calcio y magnesio.

Un elevado contenido en  $\text{Na}^+$  en la solución del suelo, en relación con el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , da lugar al incremento de ese ión en el complejo de cambio, lo que provocaría, dada su baja densidad de carga (elevado radio hidratado y baja carga), el aumento del espesor de la doble capa difusa, los efectos de repulsión entre los coloides y, con ellos, la dispersión de la arcilla y de la materia orgánica.

Es generalmente admitido que para que el sodio juegue un importante papel en la evolución del suelo, es decir, para que se produzca la alcalinización, el porcentaje de  $\text{Na}^+$  respecto a los demás cationes adsorbidos, que se denomina porcentaje de sodio intercambiable (PSI), debe ser igual o mayor al 15 %.

La alcalinización produce una serie de consecuencias desfavorables para las propiedades fisicoquímicas del suelo. Se origina la dispersión de las arcillas sódicas y el humus, también los agregados estructurales se destruyen. Las arcillas y los ácidos húmicos se iluvian acumulándose en el horizonte B, formándose un horizonte de acumulación de arcillas sódicas, es decir, que se origina un horizonte nátrico Bn (si la intensidad de la iluviación es suficiente). Los cambios estacionales producen el hinchamiento y contracción de las arcillas sódicas formándose una estructura prismática fuertemente desarrollada. Finalmente, cuando el medio se torna fuertemente alcalino, la cristalinidad de las arcillas disminuye, se vuelven inestables, parte de ellas se descomponen, se destruyen los vértices y aristas superiores de los prismas originándose una estructura muy peculiar llamada columnar que presenta la cara superior de los prismas redondeada, conjuntamente con la acción del agua de infiltración que al fluir por las grietas del Bn impermeable permanece apoyada sobre las cabezas de los prismas, desgastándolos. En ocasiones, los humatos sódicos iluviados se acumulan en estas superficies revistiéndolas de colores muy oscuros.

Este proceso puede aparecer a continuación del proceso de salinización, cuando se produce el lavado de las sales más solubles y se acumulan los carbonatos y bicarbonatos sódicos.

En los suelos sódicos, la toxicidad que causa el sodio, se puede centrar en tres vías distintas: efecto nocivo del sodio activo para el metabolismo y nutrición de las plantas; toxicidad debida a los bicarbonatos y otros iones; elevación del pH a valores extremos por acción de carbonatos y bicarbonatos sódicos.

De las sales solubles son los sulfatos los que menos toxicidad presentan. Las sales cloruradas son altamente tóxicas. Las sales sódicas presentan una toxicidad muy



alta y además su efecto adverso se ve aumentado por el elevado pH que originan (9,5 a 10,5).

## **SALINIDAD**

La concentración de sales confiere al suelo unas propiedades muy particulares con efectos muy nocivos para los cultivos. Se puede deber a causas naturales o ser el resultado de acciones antrópicas.

Las sales proceden fundamentalmente de la meteorización de las rocas ígneas y se acumulan en rocas sedimentarias, suelos y aguas. Los nitratos, cloruros, sulfatos y carbonatos de iones alcalinos y alcalinotérreos, son las sales que con mayor facilidad se forman como consecuencia de la meteorización de la corteza terrestre. Los cloruros, junto con los sulfatos son las principales sales formadas en este proceso. El calcio, el magnesio y el sodio son los cationes que mayoritariamente se unen a los cloruros y a los sulfatos para formar las sales, con menor frecuencia se encuentra el potasio y los bicarbonatos, carbonatos y nitratos.

El origen de las sales debe vincularse a la presencia de sedimentos marinos en esta subregión, con las aguas del Atlántico y en menor medida, con procesos de hidrólisis de minerales primarios de los suelos.

El predominio de los aniones  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  y de los cationes  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  hace recordar la composición de las sales marinas. Las sales y el  $\text{Na}^+$  no son lixiviadas por efecto de la lluvia debido a la fina granulometría del Bt subyacente.

La solubilidad de las sales se trata de una propiedad muy importante, pues además de afectar a la movilidad y precipitación, regula su máxima concentración en la solución del suelo. Cuanto mayor sea ésta, más importante va a ser su efecto perjudicial para los cultivos. Las sales más tóxicas son, pues, las que presentan elevadas solubilidades, que darán soluciones muy concentradas. Por el contrario, las sales con

baja solubilidad no representarían ningún problema ya que precipitarían antes de alcanzar niveles perjudiciales.

El efecto de la salinidad sobre las plantas es diverso y variable. Existe una clasificación generalizada que agrupa las plantas en halófitas y no halófitas. Las primeras se refieren a aquellas plantas que poseen mecanismos de resistencia a la salinidad, aunque su grado de tolerancia es muy variable. La mayor parte de las plantas cultivadas, se consideran como no halófitas.

La conductividad eléctrica (CE) ha sido el parámetro más utilizado en la estimación de la salinidad. Se basa en la velocidad con que la corriente eléctrica atraviesa una solución salina, la cual es proporcional a la concentración de sales en solución. Se expresa en  $\text{dS m}^{-1}$  equivalentes a  $1 \text{ mmhos cm}^{-1}$ . La CE refleja la concentración de sales solubles en la disolución.

Para distinguir suelos salinos de no salinos, se han sugerido varios límites arbitrarios de salinidad. Se acepta que las plantas empiezan a ser afectadas de manera adversa cuando el contenido en sales excede el 1%. La clasificación americana de suelos, Soil Taxonomy, adopta el valor de  $2 \text{ dS m}^{-1}$  como límite para el carácter salino a nivel de gran grupo y subgrupo. Otra clasificación muy difundida es la del laboratorio de salinidad de Riverside (USDA, 1954), que establece los siguientes grados:

0 -  $2 \text{ dS m}^{-1}$  Suelos normales

2 -  $4 \text{ dS m}^{-1}$  Suelos ligeramente salinos.

4 -  $8 \text{ dS m}^{-1}$  Suelos salinos.

8 -  $16 \text{ dS m}^{-1}$  Suelos fuertemente salinos.

Mientras que otras clasificaciones consideran que hasta  $4 \text{ dS m}^{-1}$  el suelo es no salino.

Tabla 2. Características de suelos salinos y sódicos.

Suelo	pH	CE ( $\text{dS m}^{-1}$ )	PSI (%)
<b>Salino</b>	< 8,2	$\geq 4$	< 15
<b>Sódico</b>	> 8,2	<4	$\geq 15$
<b>Salino-sódico</b>	>8,2	$\geq 4$	$\geq 15$

Los suelos salinos y los suelos sódicos (Tabla 2) presentan diferencias morfológicas (USDA, 1954). Los primeros suelen estar adecuadamente floclados, y en general presentan costras o eflorescencias blanquecinas en superficie.

Los salino-sódicos se comportan en forma similar, pero si disminuye el exceso de sales, las arcillas tienden a dispersarse como ocurre en los sódicos. Suelen tener estructura masiva, extremadamente débil y pulverulenta en seco.

## **PATRONES DE VARIABILIDAD EDÁFICOS ASOCIADOS A LA VEGETACIÓN NATURAL**

El pastizal de la Pampa Deprimida puede describirse como un gran mosaico formado por estepas gramíneas y praderas con diferente cobertura y altura de pastos, hierbas y arbustos. Este mosaico sólo es interrumpido por los bañados con vegetación palustre alta dominada por *Scirpus* spp. y *Typha* spp. (Vervoort, 1967).

En la Pampa Deprimida estudios fitosociológicos han definido comunidades vegetales dominantes, relacionadas con los distintos factores ambientales (clima, suelo, uso) y con los estados sucesionales, en la caracterización de la vegetación (Berasategui *et al.*, 1982; Batista y León, 1992; Burkart *et al.*, 1990).

La heterogeneidad de la vegetación en esta subregión está fuertemente asociada a las variaciones topográficas y la salinidad y/o sodicidad de los suelos, los cuales en interacción con el pastoreo controlan la estructura de la vegetación (Perelman *et al.*, 2001).

Según los trabajos de Batista y León (1992) en esta área dominan cuatro comunidades llamadas A, B, C y D. Las lomas convexas, con buen drenaje, suelos no hidromórficos y no salinos, con comunidades comúnmente llamadas "A". Son suelos Hapludoles thaptoárgicos, suelos poligenéticos, profundos y neutros. En las posiciones intermedias en el paisaje dominan suelos ligeramente alcalinos (subsuperficialmente) e hidromórficos (Natracuoles típicos) vinculados a la comunidad "B". En las posiciones

más bajas del paisaje dominan dos tipos de ambientes: los bajos con suelos hidromórficos no salinos ni alcalinos (Argiacuales o Argialboles) ocupados por la comunidad llamada “C” y los bajos con suelos hidromórficos y nátricos (Natracualfes típicos) ocupados por la comunidad llamada “D”. Las comunidades B y C forman la matriz del paisaje en buena parte de la Depresión del Salado (Burkart *et al.*, 1990).

Estudios fitosociológicos posteriores sintetizaron en una clasificación general de las comunidades vegetales del pastizal en 5 grandes grupos: las Praderas de Mesófitas, las Praderas Húmedas de Mesófitas, las Praderas de Hidrófitas o Vegas de Ciperáceas, las Estepas de Halófitas y las Estepas Húmedas de Halófitas (Perelman *et al.*, 2001).

Las diferencias topográficas en esta región de baja pendiente, aunque leves, determinan cambios en el régimen hídrico y en la frecuencia de anegamiento que afectan las poblaciones vegetales (Batista *et al.*, 2005). Se destaca la heterogeneidad florística de escala regional que es simplemente una repetición sucesiva del patrón de heterogeneidad que aparece en distancias cortas (Perelman *et al.*, 2001). En la escala de paisaje, la heterogeneidad florística del pastizal de la Pampa Deprimida está asociada con la heterogeneidad geomorfológica y edafológica.

La heterogeneidad espacial a escala de ecosistema y de paisaje ha sido reconocida desde el comienzo del desarrollo de la ecología. Según el enfoque de esta ciencia, la fitosociología se desarrolló con la intención de simplificar, y convertir en unidades discretas la heterogeneidad espacial observada en las comunidades vegetales (Gallardo, 2006). La ecología en cambio, se basa en criterios de continuidad en las comunidades vegetales, sin olvidar la existencia de discontinuidades, y de todo ello ha surgido el estudio de los análisis de gradientes, fronteras, ecotonos, etc. Es decir, que aborda la descripción de la heterogeneidad espacial y temporal de la vegetación y de sus factores determinantes en distintos niveles de percepción (Whittaker, 1972, 1975; Kolasa y Pickett, 1991).

Como puede observarse, en el estudio de la vegetación hay dos enfoques predominantes que parecen contrapuestos, por un lado las comunidades como unidades

bien delimitadas, y en contraposición el análisis de gradiente, que parte de concebir a la vegetación como un continuo que no puede ser dividido en unidades discretas. En este caso se estudia la estructura y variación de la vegetación de un área en términos de gradientes de factores ambientales y de poblaciones de especies (Whittaker, 1967). A pesar de las discrepancias entre estos diferentes enfoques, *stand* vs. *continuum*, la clasificación y el ordenamiento son técnicas complementarias para el estudio de la vegetación (Perelman, *et al.*, 2005). Los “stands” bien definidos aparecen en situaciones en las cuales estos controles varían abruptamente en el espacio. En la Pampa Deprimida, la composición florística del pastizal puede cambiar casi completamente en distancias de unos pocos metros, en lugares donde hay cambios marcados en las características del suelo.

Perelman *et al.* (1982) mostraron la existencia de un gradiente de composición florística entre las comunidades del plano, asociado con diferencias en la posición topográfica (Burkart *et al.*, 1990).

De los trabajos mencionados surge la base para formular hipótesis acerca de factores y procesos del paisaje determinantes de la estructura y funcionamiento de los pastizales y el conocimiento necesario para utilizar a la vegetación como indicadora del ambiente.

Las características del ambiente relacionadas con el escurrimiento, clase de drenaje y con el halomorfismo de los suelos serían los principales controles de la heterogeneidad del pastizal de la Pampa Deprimida (Perelman *et al.*, 1982; Batista *et al.*, 1988; Perelman *et al.*, 2001; Debelis *et al.*, 2005). La correspondencia entre suelos y comunidades vegetales en este particular pastizal permite suponer que la heterogeneidad del ambiente edáfico controla en buena medida la distribución de las especies vegetales en el paisaje (Batista y León, 1992). Por esto, en ocasiones el control edáfico operaría de modo directo, seleccionando especies tolerantes, por ejemplo, a la deficiencia de fósforo, a la salinidad o a los regímenes de anegamiento y desecación que caracterizan al suelo en cada punto del paisaje (Rubio *et al.*, 1995). En estos gradientes,

varían la estructura, la composición florística, la diversidad y la productividad del pastizal.

Trabajos realizados en otros ambientes, revelan que la presencia de ciertos grupos de especies está más influenciada por el pH que por la CE y el contenido de humedad del suelo (Allen *et al.*, 1997).

Tres tipos de factores activos son determinantes de la heterogeneidad espacial: los procesos bióticos, los disturbios y las restricciones ambientales; en consecuencia, definen los patrones que presentan las comunidades vegetales (Urban *et al.*, 1987).

Cuando la asociación entre las características de la vegetación y estos factores activos es conocida, es posible utilizar a la vegetación como indicadora de las características del ambiente. En este sentido, la comunidad vegetal es típicamente un indicador mucho más preciso que las especies individuales, cuya distribución y abundancia está influida en mayor medida por procesos estocásticos (Batista, *et al.*, 2005).

## **BASES TEÓRICAS EN EL ESTUDIO DE LA GEOESTADÍSTICA**

En el estudio de las Ciencias del Suelo es común encontrar atributos que presentan variaciones espaciales con patrones característicos. Para el estudio de estas variables son usados diversos procedimientos geoestadísticos de estimación y/o simulación.

Es decir, partiendo de un conjunto de datos tomados en sitios del área de estudio, estas técnicas permiten la caracterización de las variables con dos fines diferentes, uno, es proporcionar valores estimados en ciertas localizaciones de interés y segundo, generar valores que en conjunto presenten iguales características de dispersión que los datos originales.

## **DEPENDENCIA ESPACIAL**

La mayoría de las propiedades del suelo varían continuamente en el espacio. En consecuencia, los valores en sitios que están cercanos en la superficie son más similares que aquellos que están alejados, ellos dependen uno del otro en sentido estadístico. Por ello, las observaciones no pueden ser consideradas como independientes y requieren un tratamiento estadístico más avanzado. Esta propiedad es conocida como dependencia espacial.

Considerada matemáticamente, el valor de una propiedad del suelo en algún lugar es una función de su posición. En la práctica, sin embargo, la variación es muy irregular, y toda ecuación que relacione los valores de una propiedad a su posición puede ser muy compleja. Por lo tanto, una descripción matemática compleja no es factible. Entonces, la única posibilidad es no considerarla como una variable aleatoria y tratar su variación estadísticamente en el espacio. Estas propiedades son conocidas como variables regionalizadas.

## **DEFINICIÓN DE GEOESTADÍSTICA**

La geoestadística es una rama de la estadística que trata fenómenos espaciales (Journel y Huijbregts, 1978). Su principal interés es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Myers, 1987). Esta herramienta permite describir la continuidad espacial, que es un rasgo distintivo esencial de muchos fenómenos naturales, y proporciona adaptaciones de las técnicas clásicas de regresión para tomar ventajas de esta continuidad (Isaaks y Srivastava, 1989). Definiciones alternativas: estadística espacial; estadística aplicada a datos geográficos; descripción cuantitativa de variables naturales que se distribuyen en el espacio y tiempo; gestión, tratamiento e interpretación de datos espaciales (Chilès y Delfiner, 1999).

El estudio de fenómenos con correlación espacial, por medio de métodos geoestadísticos se inicia en los años sesenta, especialmente con el propósito de predecir valores de las variables en sitios no muestreados.

Entre los inicios de la ciencia encontramos los trabajos de Sichel (1947; 1949) y Krige (1951). Estos científicos realizaron estudios relacionados con la distribución del contenido de oro en las minas sudafricanas.

Mayor rigurosidad y una respuesta al problema de predicción se inician con Matheron (1962) en la escuela de minas de París. Las herramientas de la geoestadística, a partir de la aplicación en minería, se traslada a muchos otros campos como hidrología, agronomía, ciencias de la tierra y más recientemente en estudios de medioambiente y sistemas de información geográfico.

Son innumerables los ejemplos en los que se ha utilizado esta técnica en estudios ambientales con el ánimo de predecir fenómenos espaciales (Robertson, 1987; Cressie y Majure, 1995; Diggle *et al.*, 1995). Las ciencias del suelo, agronomía, ingeniería forestal, astronomía, y cualquier disciplina que trabaja con datos colectados en diferentes sitios espaciales necesitan desarrollar modelos que indiquen cuando hay dependencia entre las medidas de los diferentes sitios. Usualmente, esta modelación se relaciona con la predicción espacial, pero hay otras áreas importantes como la simulación y el diseño muestral (Cressie, 1989).

El eje principal del análisis geoestadístico es la determinación de la estructura de autocorrelación entre los datos y su uso en la predicción a través de las técnicas conocidas como *kriging* y *cokriging*. Este es un proceso que calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. Los pesos asignados a los valores muestrales son apropiadamente determinados por la estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de muestreo (Petitgas, 1996).

## **TEORÍA DE LAS VARIABLES REGIONALIZADAS**

El desarrollo de la estadística espacial o geoestadística, como es conocida en las ciencias de la tierra, proviene de la minería y de dos hombres en particular: Matheron (1965) y sus colegas en la escuela de minería de Francia que son responsables por "la



teoría de las variables regionalizadas", mientras que Krige (1966) lo desarrolló y aplicó empíricamente.

## CONCEPTO DE VARIABLE REGIONALIZADA

Una variable medida en el espacio de forma que presente una estructura de correlación, se dice que es una variable regionalizada. Se puede definir como un proceso estocástico con dominio contenido en un espacio euclidiano  $d$ -dimensional  $\mathbb{R}^d$ ,  $\{Z(x): x \in D \subset \mathbb{R}^d\}$ . Si  $d = 2$ ,  $Z(x)$  puede asociarse a una variable medida en un punto  $x$  del plano (Díaz Francés, 1993).

En términos prácticos  $Z(x)$  puede verse como una medición de una variable aleatoria (p.ej. conductividad eléctrica) en un punto  $x$  de una región de estudio.

En el caso que las mediciones sean hechas en una superficie, entonces  $Z(x)$  puede interpretarse como la variable aleatoria asociada a ese punto del plano ( $x$  representa las coordenadas, planas o geográficas, y  $Z$  la variable en cada una de ellas). Estas variables aleatorias pueden representar la magnitud de una variable ambiental medida en un conjunto de coordenadas de la región de estudio.

En el campo espacial existen múltiples direcciones y por lo tanto se debe asumir que en todas, el fenómeno es estacionario. Cuando la esperanza de la variable no es la misma en todas las direcciones o cuando la covarianza o correlación dependan del sentido en que se determinan, no habrá estacionariedad.

Si la correlación entre los datos no depende de la dirección en la que esta se calcula, se dice que el fenómeno es *isotrópico*, en caso contrario se hablará de *anisotropía*.

Para identificar la estacionariedad se emplean gráficos de dispersión de la variable respecto a las coordenadas, de medias móviles y de valores clasificados según

puntos de referencia, con el propósito de identificar posibles tendencias de la variable en la región de estudio.

Finalmente, una variable regionalizada será no estacionaria si su esperanza matemática no es constante, esto es si  $E[Z(x)] = m(x)$ .

## **GRÁFICOS EXPLORATORIOS**

Cuando se analiza información georreferenciada se pueden emplear *histogramas*, *diagramas de tallos y hojas (stem-and-leaf diagram)* y *de cajas (box-and-whisker plot)* con el propósito de identificar variabilidad y observaciones extremas; tal como en un estudio exploratorio clásico.

Un supuesto fundamental en el análisis geoestadístico es que el fenómeno sea estacionario, para lo cual, entre otros aspectos, el nivel promedio de la variable debe ser constante en todos los puntos del área de estudio.

Una detección de tendencia en el gráfico de dispersión puede ser una muestra de que no se satisface dicho supuesto. El gráfico se construye tomando como eje de las abscisas la variable que representa la coordenada geográfica y en el eje de las ordenadas la variable cuantitativa de estudio. La observación de la nube de puntos resultante, incluso el ajuste de una línea de regresión, permite establecer de manera empírica si existe dicha tendencia. Un gráfico de dispersión entre valores de la variable separados por una distancia espacial dada es útil en la detección de autocorrelación espacial. Otro gráfico que tradicionalmente se emplea en la descripción de datos espaciales es el de *datos clasificados según puntos de referencia* (media, mediana, cuartiles). Este permite comparar zonas del sistema de estudio respecto a las magnitudes de las variables.

## **ANÁLISIS ESTRUCTURAL**

Después del análisis exploratorio, en el análisis geoestadístico se continúa con la determinación de la dependencia espacial entre los datos medidos de una variable. Esta

fase es también conocida como correlación espacial. Para llevarla a cabo, con base en la información muestral, se usan tres funciones: el semivariograma, el covariograma y el correlograma.

## VARIOGRAMA Y SEMIVARIOGRAMA

El variograma es un estimador de la varianza poblacional. Por lo tanto, la población debe tener una tendencia de estacionariedad. El variograma está relacionado con una dirección y distancia ( $h$ ), y es la principal herramienta básica, que da soporte a las técnicas de *kriging*, permite representar cuantitativamente la variación de un fenómeno regionalizado en el espacio.

A la función  $2\gamma(h)$  se la denomina variograma. Utilizando la definición teórica de la varianza en términos del valor esperado de una variable aleatoria, entonces:

$$2\gamma(h) = V(Z(x+h) - Z(x))$$

$$= E\left((Z(x+h) - Z(x))^2\right) - \underbrace{(E(Z(x+h) - Z(x)))^2}_0$$

$$= E\left((Z(x+h) - Z(x))^2\right)$$

La mitad del variograma  $\gamma(h)$ , se conoce como la función de semivarianza y caracteriza las propiedades de dependencia espacial del proceso y es estimada, por el método de momentos, a través del semivariograma experimental, que se calcula mediante (Wackernagel, 1995):

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

donde  $Z(x)$  es el valor de la variable en un sitio  $x$ ,  $Z(x+h)$  es otro valor muestral separado del anterior por una distancia  $h$  y  $n$  es el número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia. La función de semivarianza se calcula para varias distancias  $h$ .

## COVARIOGRAMA Y CORRELOGRAMA

La función de covarianza muestral entre parejas de observaciones que se encuentran a una distancia  $h$  se calcula, empleando la fórmula clásica de la covarianza muestral, por:

$$\begin{aligned} C(h) = COV(Z(x+h), Z(x)) &= \frac{\sum_i^n (Z(x+h) - m)(Z(x) - m)}{n} \\ &= \frac{\sum_i^n (Z(x+h) \cdot Z(x))}{n} - m^2 = C(h) \end{aligned}$$

donde  $m$  representa el valor promedio en todo punto de la región de estudio y  $n$  es el número de parejas de puntos que se encuentran a una distancia  $h$ .

Asumiendo que el fenómeno es estacionario y estimando la varianza de la variable regionalizada a través de la varianza muestral, se tiene que el correlograma muestral está dado por:

$$r(h) = \frac{COV(Z(x+h), Z(x))}{S_{x+h} \cdot S_x} = \frac{C(h)}{S_x^2} = \frac{C(h)}{C(0)}$$

Bajo el supuesto de estacionariedad cualquiera de las tres funciones de dependencia espacial enumeradas, es decir semivariograma, covariograma o correlograma, puede ser usada en la determinación de la relación espacial entre los datos. Sin embargo, la única que no requiere hacer estimación de parámetros es la función de semivarianza. Por esta razón, fundamentalmente, en la práctica se emplea el semivariograma y no las otras dos funciones.

## ESTUDIO DEL SEMIVARIOGRAMA

El semivariograma representa un índice de cambio que muestra una variable con la distancia. Su forma describe el patrón de variación espacial en términos de su magnitud y forma general.

La pendiente del semivariograma indica la intensidad de cambio del atributo (variable) analizado con la distancia, al mismo tiempo que el porcentaje de disminución en la dependencia espacial.

## ELEMENTOS CONSTITUYENTES

El máximo valor que alcanza un semivariograma se llama *meseta* (*sill*) o varianza a priori, e indica la escala bajo la cual los datos definen un proceso estacionario de segundo orden. Meseta o umbral ( $sill = C_1 + C_0$ ): es el valor alcanzado por el variograma en el Rango o alcance (Fig. 1.1). La meseta puede ser o no finita. Los semivariogramas que tienen meseta finita cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte; mientras que cuando ocurre lo contrario, el semivariograma define un fenómeno natural que cumple sólo con la hipótesis intrínseca.

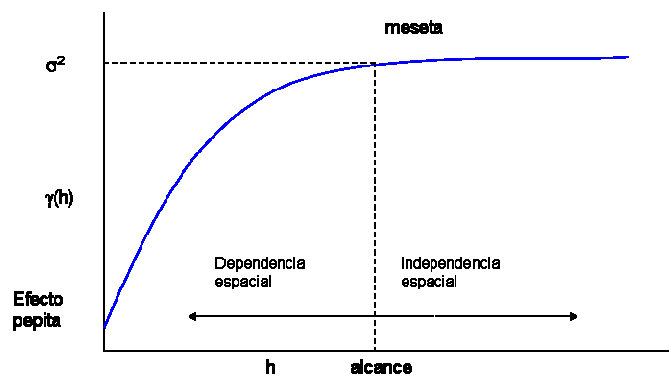


Fig. 1.1. Estructura de un semivariograma

El *lag* o *distancia* para la que el *sill* es alcanzado se llama *Rango* o *alcance* y define el límite de la dependencia espacial. Alcance o Rango ( $a$ ): es la distancia dentro de la cual las muestras están correlacionadas espacialmente (Fig. 1.1). El Rango se interpreta como la zona de influencia. Existen algunos modelos de semivariograma en los que no existe una distancia finita para la cual dos observaciones sean independientes; por ello se llama Rango efectivo a la distancia para la cual el semivariograma alcanza el 95% de la meseta. Cuanto más pequeño sea el Rango, más cerca se está del modelo de independencia espacial. El Rango no siempre aparece de manera explícita en la fórmula del semivariograma.

Finalmente, un semivariograma con término independiente define la varianza llamada *Efecto pepita* o *nugget* ( $C_0$ ), la cual define la variabilidad intrínseca en los datos y que no ha sido captada por el rango de distancia analizadas, así como cualquier variación puramente aleatoria. Representa una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen. Puede ser debido a errores de medición en la variable o a la escala de la misma. En algunas ocasiones puede ser indicativo de que parte de la estructura espacial se concentra a distancias inferiores a las observadas.

## **MODELOS TEÓRICOS DE SEMIVARIANZA**

Existen varios modelos teóricos de semivarianza que pueden ajustarse al semivariograma experimental. En líneas generales se pueden dividir en no acotados (lineal, logarítmico, potencial) y acotados (esférico, exponencial, gaussiano) (Warrick *et al.*, 1986). Los del segundo grupo garantizan que la covarianza de los incrementos es finita, y son los más frecuentemente utilizados cuando hay evidencia de que presentan buen ajuste. Todos estos modelos tienen tres parámetros comunes: Efecto pepita, Meseta y Rango.

### Modelo Esférico

Tiene un crecimiento rápido cerca al origen (Fig. 1.2), pero los incrementos marginales van decreciendo para distancias grandes, hasta que para distancias superiores al Rango los incrementos son nulos. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left( \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right) & h \leq a \\ C_0 + C_1 & h > a \end{cases}$$

donde  $C_1$  representa la meseta,  $a$  el rango y  $h$  la distancia.

### Modelo Exponencial

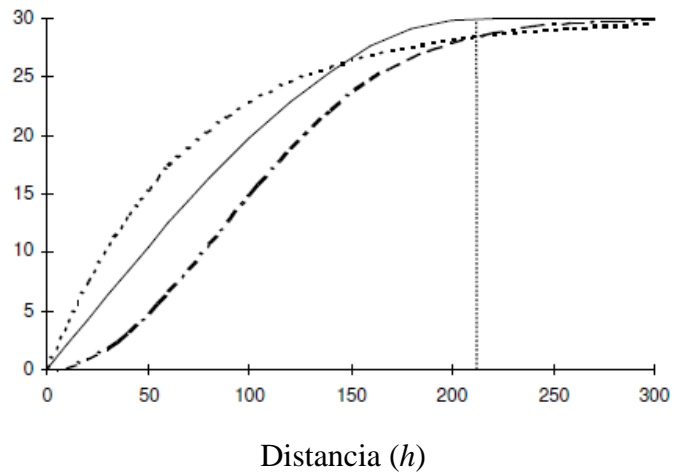
Este modelo se aplica cuando la dependencia espacial tiene un crecimiento exponencial respecto a la distancia entre las observaciones. El valor del Rango es igual a la distancia para la cual el semivariograma toma un valor igual al 95% de la Meseta (Fig. 1.2). Este modelo es ampliamente usado. Su expresión matemática es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left( 1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right)$$

### Modelo Gaussiano

Al igual que en el modelo exponencial, la dependencia espacial se desvanece solo en una distancia que tiende a infinito. El principal distintivo de este modelo es su forma parabólica cerca al origen (Fig. 1.2). Su expresión matemática es:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left( 1 - \exp\left(\frac{-h^2}{a^2}\right) \right)$$



Esférico — Exponencial - - - - Gaussiano - . - . - .

Fig. 1.2. Comparación de los modelos exponencial, esférico y gaussiano. La línea punteada vertical es el Rango. Tiene un valor de 210, en esta escala de 0 a 300. El valor de la Meseta es 30 y el Efecto pepita 0.

### Modelo Lineal

Está representado por la ecuación siguiente:

$$\gamma(h) = A(h) + B$$

No posee valor *sill*, continua aumentando mientras la *distancia (h)* aumenta, es utilizado para modelar fenómenos que presentan capacidad infinita de dispersión (Fig. 1.3).

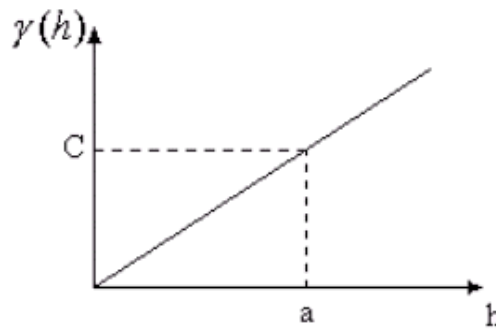


Fig. 1.3. Representación del modelo lineal.



## Modelo Power o función potencia

Modelo con función potencia: este es un modelo sin meseta, su forma se presenta en la Fig. 1.4, para valores de  $\alpha$  igual, mayores y menores que 1.

$$\gamma(h) = |h|^\alpha \quad \text{con } \alpha \in [0, 2]$$

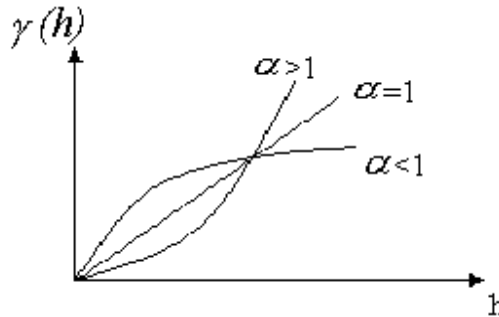


Fig. 1.4. Representación del modelo función potencia.

Para el valor de  $\alpha=1$  en el modelo anterior se obtiene el modelo lineal, el cual no tiene ni Meseta ni Alcance. Ahora por efectos prácticos, sin embargo, muchos programas informáticos denotan la pendiente del modelo lineal con la relación  $C/\alpha$ , siendo:

$$\gamma(h) = (C/\alpha) |h|$$

## Modelo Efecto Pepita

Corresponde a un fenómeno puramente aleatorio (ruido blanco), sin correlación entre las muestras, cualquiera sea la distancia que las separe (Fig. 1.5), donde  $C_0$  representa el valor de la meseta.

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 & |h| > 0 \end{cases} \quad \text{donde } C_0 > 0$$

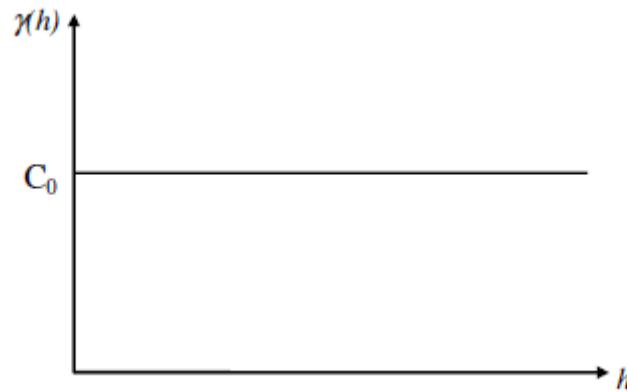


Fig. 1.5. Representación del modelo efecto pepita.

## ANISOTROPÍA

El semivariograma describe las características de continuidad espacial de la variable regionalizada en una dirección, pero este comportamiento puede variar según la dirección que se analice (Journel y Huijbregts, 1978). Se exige, por este motivo, un análisis del comportamiento de la continuidad en distintas direcciones, el análisis de Anisotropía. Cuando el semivariograma calculado en diferentes direcciones (norte-sur, este-oeste, y en direcciones intermedias, por ejemplo de 45°) muestra similar comportamiento, se dice que el fenómeno es Isotrópico.

Anisotropía se presenta generalmente cuando el variograma experimental es calculado en diferentes direcciones y muestra distintos comportamientos con la variación de la distancia (Krajewski y Gibbs, 1993). Existen 3 tipos de anisotropía geométrica, zonal e híbrida.

### Anisotropía Geométrica

Es aquella en la que el variograma en distintas direcciones presenta el mismo *sill* pero Rangos distintos. Presenta mayor continuidad espacial en la dirección de mayor Rango y menor continuidad espacial en la dirección de menor Rango (Fig. 1.6).

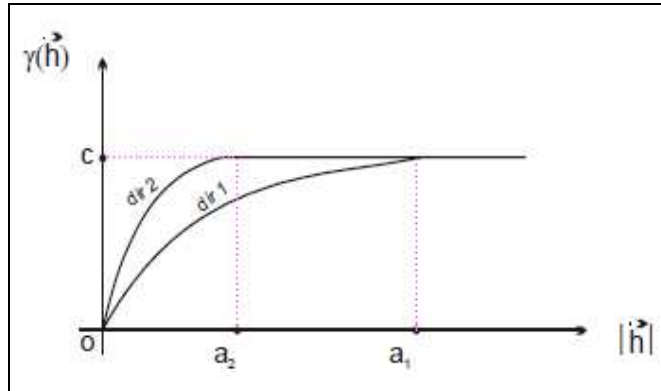


Fig. 1.6. Representación de Anisotropía geométrica.

### Anisotropía Zonal

Es aquella en la que el variograma en distintas direcciones presenta el mismo Rango pero diferente *sill*.

### Anisotropía Híbrida

Es aquella en la que el variograma en distintas direcciones presenta Rangos diferentes y distintos *sill* (Fig. 1.7).

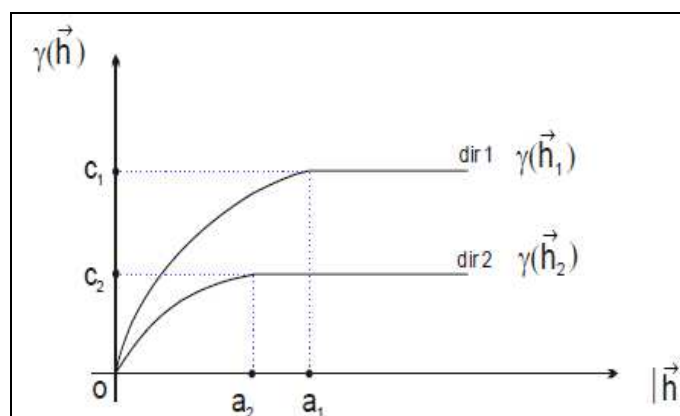


Fig. 1.7. Representación de Anisotropía híbrida.

## PREDICCIÓN ESPACIAL - KRIGING

### Definición de *Kriging*

La palabra *kriging* (expresión anglosajona) procede del nombre del geólogo sudafricano D. G. Krige, cuyos trabajos en la predicción de reservas de oro, realizados en la década de 1950, suelen considerarse como pioneros en los métodos de interpolación espacial. *Kriging* encierra un conjunto de métodos de predicción espacial que se fundamentan en la minimización del error cuadrático medio de predicción.

### Fundamentos y métodos

El *kriging* tiene como objetivo encontrar la mejor predicción posible a partir de la información disponible, donde el valor  $Z^*(x)$  de un valor real y desconocido  $Z(x)$ , consiste en una combinación lineal de pesos asociados a cada sitio donde fue muestreado un valor  $Z(x_i)$  ( $i = 1, \dots, n$ ) del problema a investigar, teniendo en cuenta dos condiciones:

- Estimador insesgado:  $E[Z^* - Z] = 0$ ,
- Varianza  $Var[Z^* - Z]$  sea mínima, para minimizar la varianza de error de predicción.

$$\begin{aligned} Z^*(x_0) &= \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \lambda_4 Z(x_4) + \lambda_5 Z(x_5) + \dots + \lambda_n Z(x_n) \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \end{aligned}$$

donde los  $\lambda_i$  son los pesos o ponderaciones de las variables originales. Dichos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la correspondiente predicción. La suma de los pesos debe ser igual a uno para que el predictor sea insesgado.

Existen otros métodos de interpolación como el de distancias inversas o el poligonal, que no garantizan varianza mínima de predicción (Samper y Carrera, 1990). La diferencia con estos métodos de interpolación, está en que el *kriging* utiliza en la

predicción las características de variabilidad y correlación espacial del fenómeno en estudio. Por ello, necesita un análisis previo de la información con el objetivo de obtener de esta información inicial un modelo que represente su continuidad espacial. A partir de allí, se puede obtener el mejor valor posible en cada localización a predecir a partir de las medidas de las variables, junto a la varianza de *kriging* como medida del error de la predicción realizada (Armstrong y Carignan, 1997), lo que distingue al *kriging* de otros métodos de interpolación (Abasov *et al.*, 1990; de Fouquet, 1996; Carr, 1995).

Existen varios métodos de *kriging* para realizar las predicciones:

### ***Kriging* Ordinario**

Es el método más apropiado para situaciones medioambientales. Asume que las medias locales no están necesariamente relacionadas lo más cercanamente a la media poblacional, por lo cual solo usa las muestras en la vecindad local para la predicción.

### ***Kriging* Simple**

Asume que las medias locales son relativamente constantes e iguales a la media poblacional, la cual es conocida. La media poblacional es usada como un factor en cada predicción local.

### ***Kriging* de Punto**

Estima los valores de los puntos en los nodos de las cuadrículas.

### ***Kriging* de Bloque**

Estima el valor promedio de los bloques rectangulares, que están centrados en los nodos de las cuadrículas, los bloques son del tamaño y forma de las celdas de las

cuadrículas, este tipo de *kriging* no resulta ser un buen interpolador, ya que no estima el valor de un punto.

En los métodos *kriging* hasta ahora descritos el objetivo ha estado centrado en la predicción puntual. A menudo, se requiere estimar un bloque, o más precisamente, estimar el valor promedio de la variable dentro de un área local, (Fig. 1.8).

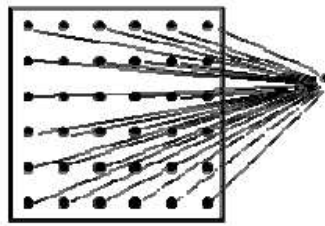


Fig. 1.8. Esquema de interpolación en el *kriging*.

## REPRESENTACIÓN DE LAS PREDICCIONES

Una vez que se ha hecho la predicción en un conjunto de puntos diferentes de los muestrales vía *kriging*, se debe elaborar un mapa que de una representación global del comportamiento de la variable de interés en la zona estudiada. Los más empleados son los mapas de contornos, los mapas de residuos y los gráficos tridimensionales. En el caso de los mapas de contornos, en primer lugar se divide el área de estudio en un enmallado y se hace la predicción en cada uno de sus nodos. Posteriormente, se unen los valores predichos con igual valor, generando así las líneas de contorno (isolíneas de distribución). Este gráfico permite identificar la magnitud de la variable en toda el área de estudio. Es conveniente acompañar el mapa de interpolaciones de la variable con los correspondientes mapas de isolíneas de los errores y de las varianzas de predicción (posiblemente estimados a través de métodos matemáticos), con el propósito de identificar zonas de mayor incertidumbre respecto a las predicciones (Ginzo Villamayor, 2014).

## **VALIDACIÓN DEL *KRIGING***

Existen varios métodos para evaluar la bondad de ajuste del modelo de semivariograma elegido con respecto a los datos muestrales y por ende de las predicciones hechas con el *kriging*. El más empleado es el de validación cruzada, que consiste en excluir la observación de uno de los  $n$  puntos muestrales y con los  $n-1$  valores restantes y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía *kriging* el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó (Giraldo Henao, 1997).

Cuando el modelo de semivarianza elegido describe bien la estructura de autocorrelación espacial, la diferencia entre el valor observado y el valor predicho será pequeña. Este procedimiento se realiza en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtiene un conjunto de  $n$  “errores de predicción”. Lo usual es calcular medidas que involucren a estos errores de predicción para diferentes modelos de semivarianza y seleccionar aquel que optimice algún criterio como por ejemplo el del mínimo error cuadrático medio (MECM). Este procedimiento es similar a la conocida técnica de remuestreo Jackknife empleada en diversos contextos estadísticos para calcular varianzas de estimación, entre otros aspectos. Una forma descriptiva de hacer la validación cruzada es mediante un gráfico de dispersión de los valores observados contra los valores predichos. En la medida en que la nube de puntos se ajuste más a una línea recta que pase por el origen, mejor será el modelo de semivariograma utilizado para realizar el *kriging*.

## **MÉTODOS MULTIVARIADOS PARA EL TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE VEGETACIÓN**

El análisis multivariado descriptivo provee de herramientas complementarias a la Fitosociología. En este sentido, las técnicas de clasificación y ordenamiento permiten identificar patrones de variación en grandes conjuntos de datos mediante procedimientos algebraicos pasibles de ser traducidos a algoritmos matemáticos. En

consecuencia, estas técnicas facilitan el trabajo de comparación de grandes conjuntos de censos con la ayuda de programas de computación (Perelman *et al.*, 2005).

### **Métodos multivariados de ordenamiento**

Los métodos de ordenamiento más ampliamente usados en Ecología son los de la familia del Análisis de Correspondencia. Se trata de una serie de técnicas de ordenamiento también denominadas métodos de Promedios Ponderados, que derivan simultáneamente puntajes para las observaciones y para las variables de un conjunto de datos multivariados. Estas técnicas buscan la mejor representación simultánea para las filas y las columnas de una matriz. La familia del Análisis de Correspondencia comprende técnicas de análisis directo de gradiente: Promedios Ponderados, Análisis de Correspondencia Canónica y técnicas de análisis indirecto de gradiente: Análisis de Correspondencia y Análisis de Correspondencia Corregido (Perelman *et al.*, 2005).

### **Análisis factorial de correspondencia múltiple**

El análisis factorial de correspondencia múltiple es un método factorial adaptado al tratamiento de tablas de datos en las que un mismo conjunto de individuos se describe a través de varios grupos de variables. No se limita a la obtención de una tipología de los individuos definida a través del conjunto de variables, sino que se amplía a la búsqueda de posibles relaciones entre las estructuras obtenidas en el seno de cada uno de los grupos (Fernández Aguirre *et al.*, 2013). Su mayor ventaja es la de equilibrar la influencia de los grupos en el análisis global, ofreciendo además resultados típicos de la estructura en grupos del conjunto de variables.

### **Análisis de Conglomerados**

El Análisis Cluster, conocido como Análisis de Conglomerados, es una técnica estadística multivariada que busca agrupar elementos (o variables) tratando de lograr la máxima homogeneidad en cada grupo y la mayor diferencia entre los grupos.



El Análisis Cluster tiene una importante tradición de aplicación en muchas áreas de investigación. Este análisis permite descubrir agrupamientos naturales de observaciones, o buscar grupos similares, lo más homogéneos posibles, en los que se clasificará a los elementos a analizar. Este tipo de clasificación tiene su origen en la sistemática, aunque ha sido aplicada a gran variedad de ramas científicas.

Las clases de individuos son subconjuntos en el espacio de representación ( $p$  dimensiones) que son identificables porque en ciertas zonas existe una gran densidad de individuos y en las zonas que separan esos subconjuntos existe una baja densidad de ellos.

### MATERIALES Y MÉTODOS

#### CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

##### UBICACIÓN

El estudio se realizó en un establecimiento agropecuario de 1.600 hectáreas, situado en el Partido de Chascomús, Hoja Monasterio IGN 3557- 32-1, (35° 39' 56'' latitud S y 57° 47' 68'' longitud O) destinado fundamentalmente a cría bajo pastizal natural, donde se seleccionó un área de 9.450 m<sup>2</sup> para el desarrollo del plan (Fig. 2.9). Se encuentra en la Subregión Pampa Deprimida, que se caracteriza por su gran extensión (9,5 millones de hectáreas), un relieve extremadamente plano (0,01% de pendiente promedio) donde, salvo escasas excepciones, no se advierten formas definidas y un acentuado problema de hidrohalomorfismo generalizado en toda el área (Tricart, 1973).

La actividad productiva de cría de ganado, regulada por la propia dinámica estacional, productividad y calidad de los pastizales naturales, se encuentra actualmente amenazada por cambios productivos y de uso de tierra.



Fig. 2.9. Sitio de estudio.

## CLIMA

Es templado húmedo con escasa amplitud diaria y anual de temperatura. La temperatura media es de 13 a 16 ° C. La estación con mayores precipitaciones es en términos generales la primavera, perteneciendo a la región hídrica subhúmeda húmeda (León y Burkart, 1998; Batista *et al.*, 2005). La precipitación media anual es de 900 mm y los vientos predominan del este con velocidad media de 14 km h<sup>-1</sup> (Fig. 2.10). En la época invernal como consecuencia de la baja evapotranspiración hay exceso de agua en el suelo, registrándose excedentes de 200 a 250 mm según los años. En verano, por el contrario, son habituales las sequías estivales. Más del 70% de las grandes inundaciones se han observado con eventos extraordinarios de otoño-invierno, con una duración media del período anegado de cinco meses (Vázquez *et al.*, 2011).

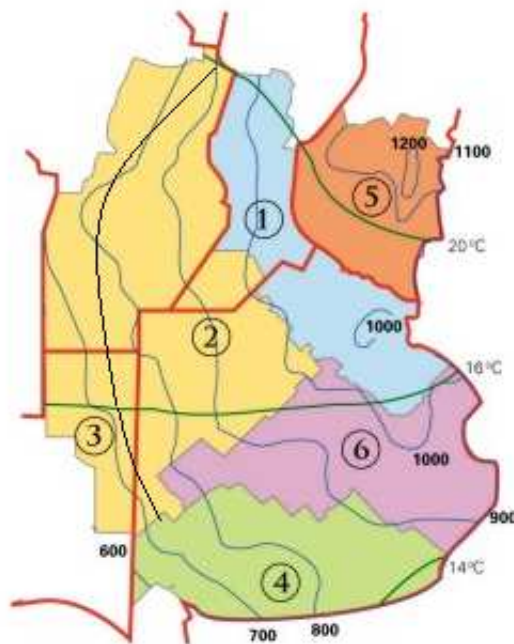


Fig. 2.10. Localización de áreas ecológicas homogéneas en la pradera pampeana: (1) pampa ondulada, (2) pampa subhúmeda central, (3) pampa semiárida central, (4) pampa austral, (5) pampa mesopotámica y (6) pampa deprimida. En azul: isohietas (en mm/año). En verde: isotermas (en grados centígrados). *Revista Ciencia Hoy* (2002) *Volumen 12 - N° 68*

## GEOMORFOLOGÍA

Geomorfológicamente coincide con el sector definido por Tricart (1973) como superficie de abrasión marina del mar querandinense. El paisaje se caracteriza por presentar superficies tendidas dominantes (Fig. 2.11), interrumpidas por depresiones de variada extensión acompañadas de zonas de acumulación situadas periféricamente.

Según Tricart (1973), la debilidad del potencial morfogenético de la Pampa Deprimida favorece la presencia de suelos muy antiguos, total o parcialmente conservados, alternando con suelos más recientes y desarrollados dentro de los anteriores. La alta sodicidad de esta zona es heredada del material originario, correspondiente a sedimentos finos debidos al último ingreso marino importante,

localizado en el Holoceno medio y a la alteración de los materiales cineríticos componentes del loess pampeano.

Es un paisaje sin relieve marcado, caracterizado por la presencia de suelos con distintos grados de alcalinidad, salinidad e hidromorfismo distribuidos en forma de mosaico por toda el área, sin haber una clara correlación entre el paisaje y las unidades taxonómicas (Miaczynski, 1995).



Fig. 2.11. Paisaje característico del área de estudio.

## SUELOS

Los suelos de la subregión Pampa Deprimida poseen características estrechamente vinculada a las características fisiográficas del área, su baja pendiente, materiales originarios finos, situaciones de anegamiento e inundación, resultando un neto predominio de unidades cartográficas del tipo de asociaciones y complejos con severas limitaciones. Del análisis del “Atlas de Suelos de la República Argentina” (SAGyP-INTA, 1990) y el “Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires” (SAGyP-INTA, 1989), se desprende que el 45 % del territorio bonaerense se halla ocupado por suelos con hidromorfismo o hidrohalomorfismo de distinta intensidad (Miaczynski, 1995).

En la Pampa Deprimida el proceso de argiluvación que comprende un conjunto de subprocesos complejos y dinámicos, entre los que se destacan la movilización y la acumulación de arcilla tiene amplia difusión, favorecido por los altos contenidos de sodio intercambiable. Domina así el horizonte nátrico, en muchos casos sepultado por sedimentos de reacción neutra (Natracuoles, Hapludoles taptonátricos, Natracualfes, Natralboles). En menor proporción se encuentran suelos con horizonte argílico, especialmente hacia el N y S de la subregión (Argiudoles, Argiacuoles, Argialboles, Hapludoles tapto-árgicos). El contenido de arcilla en los horizontes Bt en la mayoría de los casos está entre 40 y 50%, con espesores de 25 a 40 cm. La relación de arcilla B/A es muy alta (1,8-2,4) en los suelos con horizonte nátrico, y es algo menor con los horizontes argílicos (1,2-1,8). Los rasgos de iluviación de arcilla están bien expresados (barnices arcillo-húmicos abundantes y muy abundantes) en la mayoría de los suelos (Imbellone *et al.*, 2010).

Es decir que dentro de la Provincia de Buenos Aires, la subregión Pampa Deprimida que abarca 9.500.000 ha, el 50 % está ocupada por suelos sódicos y salino-sódicos (Scoppa y Di Giácomo, 1985), distribuidos en forma de mosaico por todo el área. Estos factores, sumados a la escasa pendiente e intensas precipitaciones, son responsables de las frecuentes inundaciones y anegamientos de variable magnitud a la que está sujeta la región. La situación de esta área se ve agravada por el diseño de la red vial, frecuentemente en dirección transversal al flujo de agua y la construcción de numerosos canales clandestinos, sin un criterio integral sobre el funcionamiento hidrológico regional, como aseguran Rang *et al.* (1999) para otra región del país.

Los suelos estudiados a escala de semidetalle presentan en el Mapa de Suelos (1:50.000) unidades cartográficas dominadas por Asociaciones y Consociaciones (Fig. 2.12). Las Series que conforman estas unidades tienen en líneas generales diferente grado de hidromorfismo y alcalinidad correspondiendo a sus diferencias taxonómicas. En correspondencia, presentan diversa aptitud para el uso en función del grado de estas limitaciones mencionadas (Tabla 3).



Fig. 2.12. Mapa de suelos. Hoja Monasterio - I.G.N. 3557- 32-1. Escala 1:50.000

La ubicación de los suelos en las distintas posiciones del paisaje es la característica diferencial más importante, ya que determina su comportamiento en condiciones de anegamiento y exceso de agua. Al efectuar un estudio a nivel de detalle, se distinguen en esta región unidades cartográficas correspondientes a las siguientes geoformas: loma, bajo encharcable alcalino-hidromórfico y bajo anegable.

Tabla 3. Guía de Unidades Cartográficas de Suelo, correspondientes al área de estudio.

<b>Símbolo</b>	<b>Composición de la Unidad</b>	<b>Capacidad de uso*</b>	<b>Índice de Productividad</b>
<b>L</b>	Lagunas permanentes y/o temporarias	VIII	4
<b>LL</b>	Asociación series La Libertad (50%), El Carmen (35%) y La Limpia (15%)	VIws	12,3
<b>LL1</b>	Asociación series La Libertad (60%), La Limpia (25%) y El Carmen (15%)	VIIws	7,6
<b>Ud</b>	Consociación series Udaondo (100%)	IIs	80,0
<b>Ud2</b>	Consociación series Udaondo (70%) y El Carmen (30%)	IIIws	65,2

\*Capacidad de Uso – Clases indicadas en números romanos, y subclases w: exceso de agua y s: limitaciones del suelo dentro de la zona radical.

En el área delimitada para el estudio geoestadístico domina la forma plana con presencia de microdepressiones. Los suelos se entremezclan conformando una unidad cartográfica del tipo asociaciones constituido por suelos alcalinos y por suelos hidromórficos no alcalinos.

Los suelos en general presentan un *solum* somero, con horizontes Bt fuertemente expresados, ya que el porcentaje de arcilla es próximo al 50% (Fig. 2.13). El epipedón es predominantemente mólico con un espesor cercano a los 0,20 m junto a otros perfiles de la asociación que aparecen con epipedón ócrico. Tiene un alto porcentaje de carbono orgánico. La presencia de la napa es constante a lo largo de casi todo el año en los períodos húmedos, encontrándose a los 0,65 m de profundidad. El intenso hidromorfismo se manifiesta desde superficie a través de moteados y concreciones ferromangánicas abundantes y precisas, la coloración gley puede presentarse en los Bt. Hay en el complejo un alto porcentaje de suelos alcalinos, algunos desde superficie y otros con elevado contenido de PSI en los horizontes subsuperficiales (Natracuol típico y Natracualf típico). Hay pedones levemente salinos. En años secos la napa desciende fuera del espesor del *solum*.

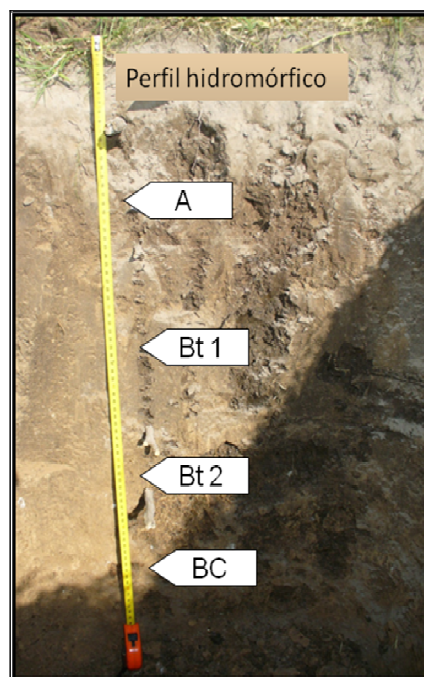


Fig. 2.13. Suelo hidromórfico representativo.



## VEGETACIÓN

La vegetación predominante en la Pampa Deprimida es el pastizal natural, base forrajera de la actividad ganadera de cría, subdividido por alambrados y sometido a un intenso pastoreo por ganado vacuno predominantemente, que mantiene desde fines del siglo XIX su fisonomía notablemente homogénea a través del paisaje. Esto conforma un mosaico formado por estepas gramíneas y praderas con diferente cobertura y altura de pastos, hierbas y arbustos, donde se observan relictos de árboles nativos (*Celtis tala* o *Jodina rhombifolia*) y exóticos (*Gleditsia triacanthos* y *Phoenix canariensis*) restringidos a sitios de suelos profundos a lo largo de los alambrados (Batista *et al.*, 2005). Este mosaico sólo es interrumpido por los bañados con vegetación palustre alta dominada por *Scirpus spp.* y *Typha spp.* (Vervoorst, 1967). Sin embargo, a pesar de su aspecto monótono, el pastizal tiene una notable heterogeneidad en la composición florística que ha permitido reconocer diferentes comunidades vegetales.

Los diferentes estudios fitosociológicos fueron sintetizados en una clasificación general de las comunidades vegetales del pastizal en 5 grandes grupos: las Praderas de Mesófitas, las Praderas Húmedas de Mesófitas, las Praderas de Hidrófitas o Vegas de Ciperáceas, las Estepas de Halófitas y las Estepas Húmedas de Halófitas (Perelman *et al.*, 2001).

En el área de estudio, las comunidades vegetales presentes se asocian a las posiciones topográficas descritas. En el bajo encharcable, donde los suelos resultan predominantemente alcalinos, se encuentran *Distichlis spicata* que alterna con superficies considerables de suelo desnudo, acompañado por *Juncus imbricatus*, *Polypogon monspeliensis*, *Sporobolus poiretii* y *Hordeum stenostachis*. Corresponde al grupo mencionado anteriormente como Estepas de Halófitas (Fig. 2.14 A).

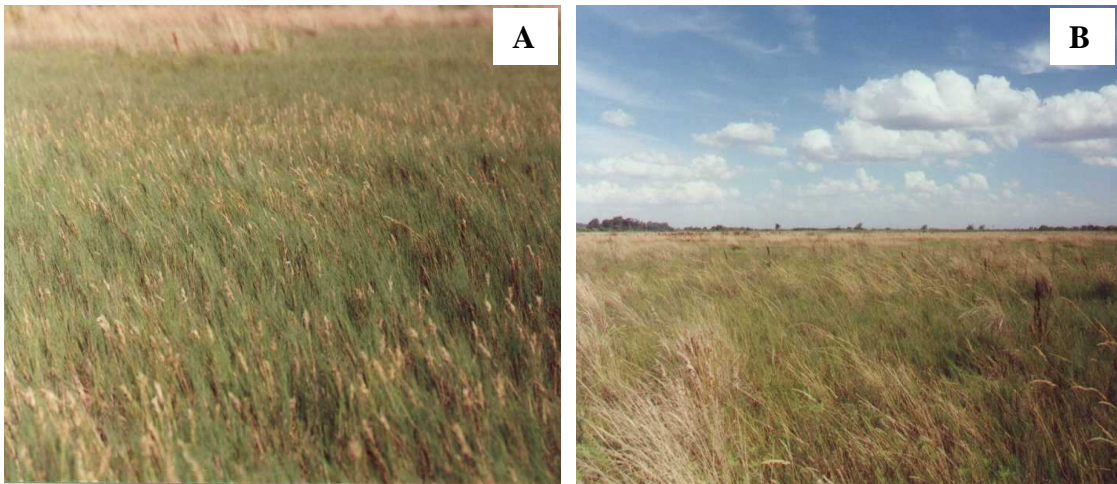


Fig. 2.14. A. Estepa de Halófitas, B. Praderas Húmedas de Mesófitas.

En igual posición topográfica, pero en suelos cuya alcalinidad se manifiesta solo en profundidad o no aparece, se presenta una cobertura gramínea de bajo porte (0,35-0,40 m) predominantemente representada por *Cynodon dactylon*, *Stenotaphrum secundatum*, *Panicum milioides*, *Paspalum paludivagum*, *Lolium multiflorum*, *Paspalum vaginatum*, *Leersia hexandra*, *Paspalum dilatatum*, *Sporobolus poiretii*, *Polypogon elongatus*, junto con gramíneas y hierbas tales como *Heleocharis viridans*, *Jussiaea repens*, *Hidrocótile bonariensis*, *Juncus imbricatus*, *Juncus microcephalus*, *Poligonum aviculare*, *Carex sororia*, *Mentha pulegium*, *Centaureum pulchellum*. Entre las leguminosas se destaca el *Lotus tenuis*. Esta vegetación se corresponde al denominado por Perelman *et al.* (2001) como Praderas Húmedas de Mesófitas (Fig. 2.14 B).

En los suelos correspondientes al bajo inundable se presenta como especie dominante el *Juncus imbricatus* que tiene una altura promedio de 50 cm y que comparte el estrato inferior con el *Cynodon dactylon* principalmente, acompañado por *Distichlis spicata*, *Polypogon elongatus*, *Hordeum stenostachis*, y las siguientes hierbas *Heleocharis viridans*, *Jussiaea repens* y *Myriophyllum brasiliense*, coincidiendo con la clasificación como Praderas de Hidrófitas (Fig. 2.15).



Fig. 2.15. Praderas de Hidrófitas, borde de cubeta.

En la escala de paisaje, la heterogeneidad florística del pastizal de la Pampa Deprimida está asociada con la heterogeneidad geomorfológica y edafológica. El pastizal está típicamente constituido por un mosaico de *stands* de superficie variable que oscila entre decenas de metros cuadrados y hectáreas. Estos *stands* con límites demarcados tienen una composición florística relativamente homogénea, ocupan posiciones características en el paisaje y se corresponden con tipos de suelo definidos, según Tabla 4 (Batista *et al.*, 2005).

Tabla 4. Geoformas y suelos comúnmente asociados con los grandes tipos de comunidad del pastizal de la Pampa Deprimida (Batista *et al.*, 2005).

<b>TIPO DE COMUNIDADES</b>	<b>GEOFORMAS</b>	<b>GRANDES GRUPOS DE SUELOS</b>
<i>Praderas de Mesófitas</i>	Áreas convexas o con relieve positivo, comúnmente originadas en antiguos depósitos eólicos	Argiudoles Hapludoles Natracuoles
<i>Praderas Húmedas de Mesófitas</i>	Planicies ligeramente sobreelevadas	Natracuoles Natrálboles
<i>Praderas de Hidrófitas o Vegas de Ciperaceas</i>	Áreas bajas con relieve plano o plano cóncavo frecuentemente anegadas	Argialboles Argiacuoles
<i>Estepas de Halófitas</i>	Planicies deprimidas bordes de depósitos eólicos o de lagunas	Natracualfes
<i>Estepas Húmedas de Halófitas</i>	Planicies aluviales	Natracualfes

## **METODOLOGÍA**

### **DEFINICIÓN DEL SITIO Y MUESTREO**

#### **INFORMACIÓN PRELIMINAR**

Se delimitaron los distintos ambientes presentes a partir del estudio de la información cartográfica y fotográfica disponible.

- Imágenes satelitales Google Earth.
- Mosaico fotográfico escala 1:50.000 del INTA.
- Fotogramas del Ministerio de Economía de la Provincia de Buenos Aires escala 1:20.000, aplicado específicamente al estudio de áreas muestra.
- Carta topográfica, Hoja Monasterio (IGN 3557- 32-1), escala 1:50.000.

El estudio de los suelos presentes fue efectuado a través del análisis de la cartografía a nivel de semidetalle (INTA, 1989) y de la revisión de trabajos de detalle anteriormente efectuados en el establecimiento (Debelis *et al.*, 2008, 2010 y 2012).

El relieve se estudió mediante transectas levantadas con nivel de anteojo, conformando una grilla de 5 m de lado entre puntos de lectura. Con los datos se trazó un mapa de curvas de nivel mediante el programa Surfer versión 9 (*Golden Software*, 2010), que permite estudiar la pendiente y escurrimiento de la parcela.

## MUESTREO SISTEMÁTICO

Se realizó para la obtención de las muestras de suelos un muestreo sistemático en grilla rectangular de 105 m x 90 m (Fig. 2.16). Este método se consideró como el más adecuado, debido a que a través de su aplicación puede obtenerse un área completamente cubierta, y presenta potencialmente mejor eficiencia. Los puntos se localizan a intervalos regulares sobre una grilla.

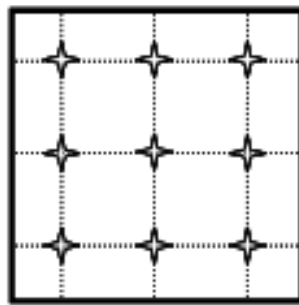


Fig. 2.16. Muestreo Sistemático.

Este diseño permitió la preparación de mapas de modo más sencillo que en métodos irregulares. Hay mucha evidencia empírica que muestra que el muestreo sistemático es a menudo considerablemente más preciso que el muestreo al azar y el muestreo al azar estratificado. El muestreo sistemático regular ha demostrado ser mejor que el aleatorio, debido a que minimiza el error estándar del *kriging* (Burrough, 1991; Webster y Oliver, 2001) y las grillas de forma cuadrada son preferidas, principalmente, por cuestiones prácticas (Burrough, 1991). La forma rectangular es óptima en el caso de existencia de anisotropía.

Se definió un sitio de muestreo en función del paisaje, la heterogeneidad y distribución de los suelos y la vegetación. Se delimitó un área representativa que presenta diferencias topográficas, visualizándose un microrrelieve típico de áreas

planas. En el área definida se realizó un muestreo sistemático regular, a un intervalo de 5 m. Los puntos se señalaron con estacas, mediante el empleo de jalones y cinta métrica. Se extrajeron las muestras de suelo correspondientes al horizonte A. Las muestras de aproximadamente 1 kg, se rotularon y llevaron al laboratorio para su procesamiento. En las muestras secas y tamizadas por malla de 2 mm se realizaron determinaciones de pH, conductividad eléctrica en extracto de saturación (CE), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes de intercambio (CI) y se calculó el porcentaje de sodio de intercambio (PSI):  $\text{Na intercambiable (cmol}_c \text{ kg}^{-1}) / \text{CIC (cmol}_c \text{ kg}^{-1})$ .

## PRESENTACIÓN DE LOS DATOS. MAPA DE VARIABLES

Los datos se tomaron mediante un muestreo sistemático en grilla rectangular cada 5 m para las variables de suelo estudiadas que determinó 418 datos para cada propiedad. Las observaciones de vegetación se tomaron cada 20 m, definiendo 30 puntos censales que se representan esquemáticamente en la Fig. 2.17.

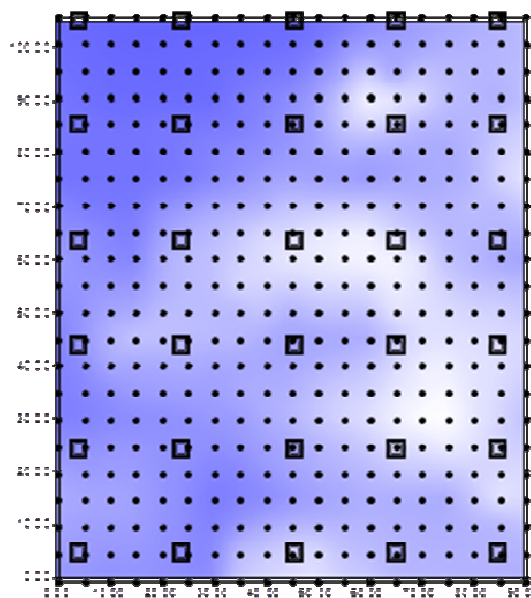


Fig. 2.17. Grilla de muestreo para suelos y vegetación.

● Muestreo de Suelo      ■ Punto censal vegetación

# **DETERMINACIONES ANALÍTICAS DE SUELOS**

## **pH actual**

Se determinó el valor de pH relación suelo-agua 1:2,5 con potenciómetro, utilizando agua destilada como solución extractante (SAMLA, 2004).

## **Conductividad eléctrica (CE)**

La CE del suelo en el extracto de saturación se obtuvo a partir de la pasta saturada, colocando 50 g de suelo en tamices de 500  $\mu\text{m}$  tapado con papel de filtro, que se colocó en contacto con agua, aproximadamente por cuatro horas, hasta que el agua mojó el filtro de papel que la cubría y se hubo convertido en una pasta. Ésta se llevó a centrífuga de alta velocidad refrigerada. El extracto obtenido se leyó directamente en el conductivímetro, ajustando la temperatura, la constante de Celda y la escala de lectura. El resultado se expresó en  $\text{dS m}^{-1}$ .

## **Determinación de capacidad de intercambio catiónico (CIC) y cationes intercambiables (CI)**

En estas determinaciones hay dos etapas:

### **A.- Extracción**

1.- Saturación del complejo de intercambio con un solo tipo de catión 2.- Extracción de cationes intercambiables (CI) 3.- Eliminación de electrolitos 4.- Desplazamiento del catión saturante.

### **B.- Cuantificación**

1.- Determinación del catión saturante. 2.- Determinación de cationes intercambiables (CI).

En la técnica aplicada, la extracción se realizó con acetato de amonio 1 N pH 7. A continuación se centrifugó y filtró, recogiendo el filtrado, donde se efectuó la lectura de los CI por espectrofotometría de absorción atómica.

Posteriormente, se realizó el lavado con etanol 70%, se recogió el filtrado y se destiló para la recuperación del alcohol. Finalmente, se utilizó NaCl 10 % como solución desplazante para determinar la CIC (SAMPLA; 2004).

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se expresa como  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  de suelo.

### **Determinación de los cationes de intercambio (CI)**

A partir de la extracción mencionada, se efectuó la cuantificación mediante espectroscopía de absorción atómica, de las bases: sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ), y magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Sus valores se expresan en  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ .

## **TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS**

### **ANÁLISIS EXPLORATORIO**

Se realizó el análisis exploratorio, que permitió representar los datos en figuras y diagramas, identificar observaciones sospechosas, calcular los estadísticos descriptivos y caracterizar la función de distribución para proponer alguna transformación si fuese necesario. Se utilizó para esta parte del estudio el programa estadístico Statistix 8.

Se estudió la distribución de los datos en el espacio con ayuda del programa Surfer versión 9 (*Golden Software*, 2010) y se generaron mapas de contorno, con isolíneas para los datos de las variables estudiadas.

### **ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE LAS VARIABLES DE SUELO**

Las medidas de tendencia central son la media aritmética y la mediana. Las medidas de variabilidad indican la representatividad de las medidas de tendencia central



de la totalidad de los valores observados de una variable, es decir permiten estudiar cómo se desvían en su conjunto, los valores observados de una variable.

La desviación estándar expresa la dispersión en las mismas unidades de las variables. El coeficiente de variación (CV) es utilizado para comparar variaciones en diferentes conjuntos de observaciones. Si el CV es igual o menor de 10% se puede considerar datos homogéneos y consecuentemente la media es representativa.

Los estadísticos básicos del análisis univariado calculados para cada variable estudiada fueron: media aritmética, varianza, desvío estándar, coeficiente de variación, valor mínimo, percentil del 25%, mediana, percentil del 75%, valor máximo, asimetría y curtosis.

## **ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO**

### **Análisis Estructural**

Para el estudio de las variables se realizó el análisis estructural, a fin de estimar la dependencia espacial entre observaciones vecinas, que es definida por medio de la semivarianza estadística ( $h$ ) estimada para cada intervalo específico de distancia. La curva resultante entre semivarianza y el vector de desplazamiento obtenido se denomina “semivariograma”. Su comportamiento describe el patrón de variación espacial. La ecuación generalizada es:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2$$

donde:

$\gamma(h)$  = semivarianza

$m$  = pares separados por el vector  $h$

$Z(x_i)$  = valor del atributo en el lugar  $x$ .

$Z(x_i + h)$  = valor del atributo a una distancia  $h$  del lugar  $x$ .

Con los valores de los atributos de suelo seleccionados y sus respectivas coordenadas  $x$ ,  $y$ , se realizó el análisis geoestadístico.

Se realizaron cinco semivariogramas para cada variable estudiada, uno compuesto o independiente de la dirección y cuatro dependientes de la dirección. El análisis de la variabilidad espacial se realizó mediante el empleo de herramientas de geoestadística, utilizando el programa Variowin (Pannatier, 1996). Existen numerosos modelos que se utilizan en geostatística, siendo los más comúnmente usados el modelo esférico, el modelo exponencial, el modelo gaussiano, el modelo lineal, el modelo potencial y modelo efecto pepita puro, tal como se observa en la Fig. 2.18.

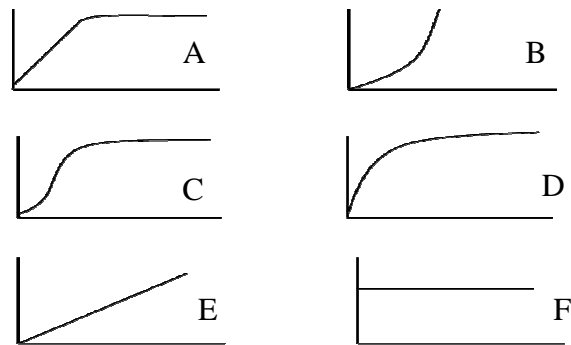


Fig 2.18. Modelos teóricos: A) modelo esférico, B) modelo potencial, C) modelo gaussiano, D) modelo exponencial, E) modelo lineal, F) modelo efecto pepita puro.

Las variables estudiadas se ajustaron a modelos teóricos, principalmente esféricos y gaussianos y con la información derivada de ellos (amplitud, umbral, efecto nugget) se analizaron los patrones de variabilidad.

### Utilización del Programa SAS

También se utilizó el programa SAS, para cotejar cual era el mejor paquete estadístico en el estudio geoestadístico de las variables (Debelis *et al.*, 2009). En el software SAS/STAT 9.1 y versiones anteriores, existen dos procedimientos: PROC VARIOGRAM y PROC KRIGE2D, que permiten el modelado y estimación

geoestadística en dos dimensiones. PROC VARIOGRAM es un procedimiento que permite calcular la distancia entre puntos de coordenadas en  $x$  e  $y$ , y el semivariograma.

Para calcular el semivariograma es necesario especificar un lag (intervalo de distancia) y un número máximo de lags. Para ajustar un modelo gráficamente se utilizó PROC VARIOGRAM, y para ajustar varios modelos de semivariograma se utilizó PROC MIXED y se compararon los modelos ajustados.

### **Interpolación *Kriging***

Para el *kriging*, la función semivariograma debe poseer ciertas propiedades matemáticas, y los datos experimentales deben ser ajustados a modelos teóricos. Con esa información se realizó la interpolación, utilizando el software Surfer versión 9 (*Golden Software, 2010*), y obteniendo mapas de contorno, y mapas de superficie 3 D, para cada variable estudiada. El *kriging* utilizado por este programa es ordinario y de punto. Permite indicar la anisotropía y la tendencia si el modelo así lo exige. El *kriging* ordinario es el método más robusto y uno de los más empleados, ya que asume que no se conoce el valor promedio de la variable regionalizada, lo cual permite generalizar el *kriging* a situaciones donde esta media no es constante en el espacio.

### **Interpolación *Kriging* con SAS**

En dos de las variables, CE y pH, se utilizó a modo comparativo el PROC KRIGE2D de SAS, que permite ajustar cinco modelos de semivariograma: esférico, gaussiano, exponencial, potencia y efecto de pepita puro. En CE y pH se realizó el procedimiento *kriging* a partir del variograma gaussiano.

### **Validación del *Kriging***

Para evaluar la bondad de ajuste del modelo de semivariograma elegido con respecto a los datos muestrales y por ende de las predicciones hechas con el *kriging*, se realizó para cada modelo la validación cruzada, que consiste en excluir la observación

de uno de los  $n$  puntos muestrales y con los  $n-1$  valores restantes y el modelo de semivariograma escogido, predecir vía *kriging* el valor de la variable en estudio en la ubicación del punto que se excluyó.

Se efectuó la validación cruzada en cada modelo elegido para la interpolación y se estudió la diferencia entre el valor observado y el valor predicho. Este procedimiento se realizó en forma secuencial con cada uno de los puntos muestrales y así se obtuvo un conjunto de  $n$  “errores de predicción”. Después de hacer la validación cruzada se presentaron, en forma descriptiva mediante gráficos de dispersión, los valores observados contra los valores predichos.

## **ESTUDIOS DE VEGETACIÓN**

La vegetación se ha caracterizado según lo que define Long (1968) como quinto nivel de percepción que corresponde a la parcela ecológica (estación, sitio o *stand*). En ella son examinadas las características de la vegetación relacionada con su entorno en una escala muy detallada (1:1.000).

De acuerdo con la biodiversidad del pastizal se estableció otra grilla para la vegetación, con un intervalo de 20 m entre observaciones, superpuesta a la de suelos, se realizaron cuadrados de inventario, donde se registraron las especies presentes. Se censó la vegetación en descanso previo al pastoreo. Así también, se estudió la cobertura, que permite expresar el grado de dominancia de la especie y se considera un buen criterio para establecer tendencias en el cambio de la composición de la vegetación.

Se realizó una lista de especies de plantas presentes acompañada de la estimación de sus valores de abundancia-cobertura de acuerdo a la escala de Braun-Blanquet (1979) con 5 modalidades, más el agregado de 0 para indicar ausencia en el punto censal:

5. Cualquier número de individuos, con cobertura mayor del 75% del área estudiada.

4. Cualquier número de individuos, con cobertura del 50% al 75% del área estudiada.
3. Cualquier número de individuos, con cobertura del 25% al 50% del área estudiada.
2. Cualquier número de individuos, con cobertura del 5% al 25% del área estudiada.
1. Cubren menos del 5% del área o dispersos con cobertura superior al 5%.

## **TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS DATOS DE VEGETACIÓN**

Se realizó una evaluación estadística multivariada, a través de análisis factorial de correspondencias múltiples para estudiar la relación entre variables de suelo y las especies en función de la escala citada por su abundancia-cobertura. Mediante el empleo de SPAD- Système Pour L'Analyse des Données (Coheris Spad, 2007).

A continuación del análisis factorial de correspondencias múltiples se realizó un análisis de agrupamiento o conglomerado (clúster análisis) a fin de observar estadísticamente qué especies predominantes forman los grupos, a través de sus cinco modalidades y ausencia, y su relación con las variables edáficas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESTUDIO DEL RELIEVE

Con la nivelación realizada mediante el empleo de nivel de anteojo, se efectuó un mapa de curvas de nivel (Fig. 3.19), siendo la cota mayor de 10 m y la menor 8,50 m snm. La equidistancia elegida para la representación es 0,04 m dado el nivel de detalle. La pendiente general del área de estudio es del 1,4 % y el sentido del escurrimiento N-S (Fig. 3.19 a). El mayor gradiente es de 2,16 % y se encuentra en el sector NO (Fig. 3.19 b). La menor pendiente se sitúa en la zona central Sur del área y es de 0,37 % (Fig. 3.19 c).

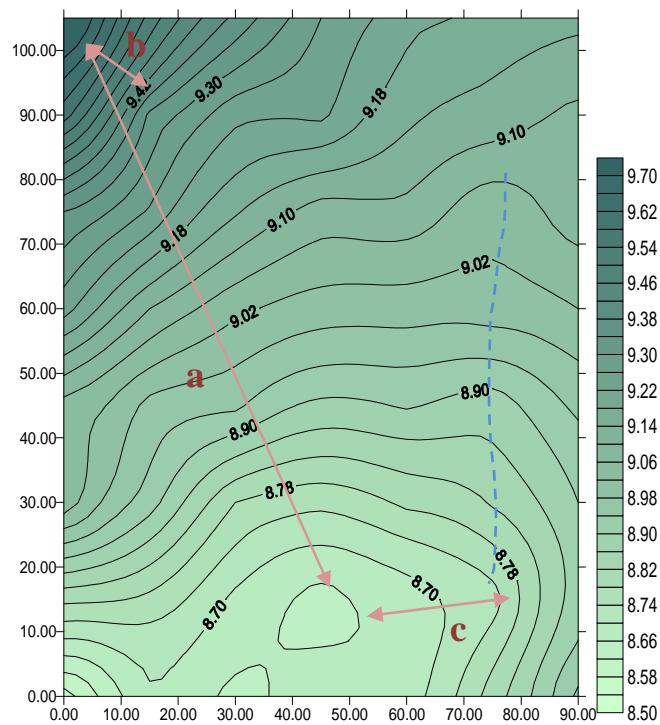


Fig. 3.19. Mapa de curvas de nivel del área en estudio.

Transectas a, b y c, con distinto gradiente. Concentración de escurrimiento - - - -

## CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES pH Y CE

Por los valores de los estadísticos descriptivos (Tabla 5) encontrados se puede considerar que las variables estudiadas tienen distribución normal, ya que los grados de asimetría y curtosis son leves, con valores cercanos a 0. Los coeficientes de variación (C.V.) son relativamente altos, posiblemente debido al microrrelieve del área, registrándose el mayor valor para CE. No hay valores anómalos u *outliers* (Fig. 3.20).

Tabla 5. Valores de los estadísticos descriptivos para pH y conductividad eléctrica (CE).

	pH	CE
<b>Media</b>	<b>7,60</b>	<b>1,76</b>
<b>Desvío estandar</b>	<b>1,15</b>	<b>0,61</b>
<b>C.V.</b>	<b>15,17</b>	<b>35,0</b>
<b>Mediana</b>	<b>7,55</b>	<b>1,80</b>
<b>Asimetría</b>	<b>0,27</b>	<b>1,09 E-03</b>
<b>Curtosis</b>	<b>-0,85</b>	<b>-0,75</b>

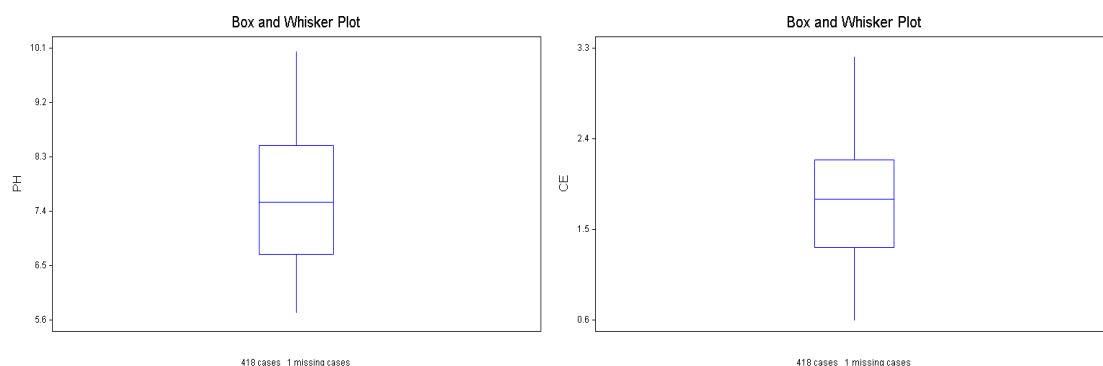


Fig. 3.20. Gráfico de caja para pH y conductividad eléctrica (CE).

Se calcularon las semivarianzas observadas a partir de incrementos de 5 m, en el área mencionada. Los semivariogramas observados demostraron un carácter transitivo (Fig. 3.22), es decir, la semivarianza aumentó con los incrementos de la distancia hasta llegar a un máximo; esto fue observado tanto para los semivariogramas compuestos, independientes de la dirección (omnidireccional), como para los dependientes de la dirección. Las direcciones para estudiar la variabilidad se seleccionaron a partir del

análisis del variograma de superficie, llamado también mapa de variogramas (Fig. 3.21), que permite de una forma rápida y práctica visualizar la existencia de anisotropía (Homand-Etienne *et al.*, 1995; Isaaks, 1999). La menor variabilidad está señalada en la dirección de la elipse. Es decir en la dirección NE-SO para ambas propiedades. Se escogieron las direcciones  $0^\circ$  (N-S),  $45^\circ$  (NE-SO),  $90^\circ$  (E-O) y  $135^\circ$  (NO-SO) para estudiar los semivariogramas en función de la dirección, en pH y CE y obtener el modelo ajustado a pesar de la anisotropía.

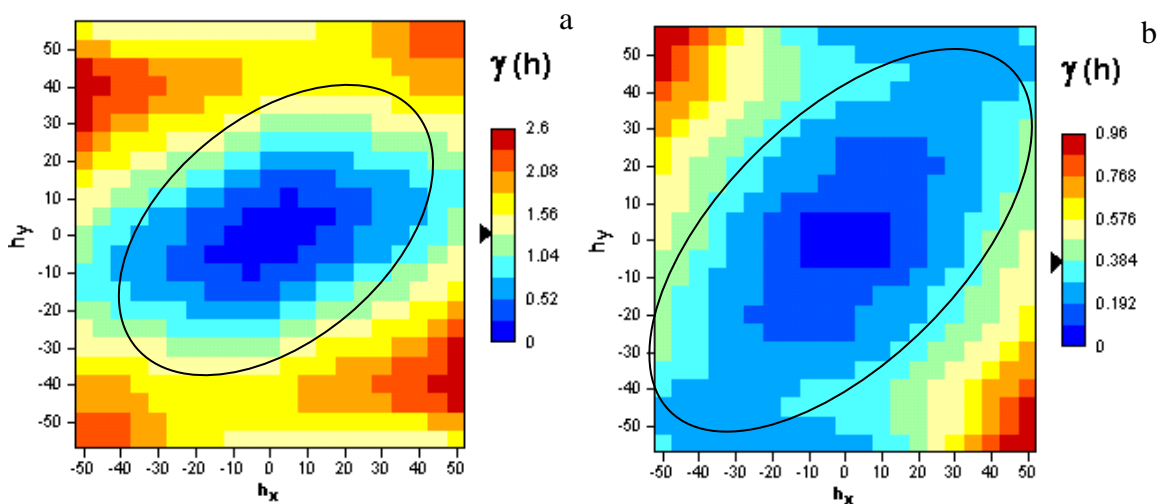


Fig. 3.21. Variogramas de superficie para pH (a) y conductividad eléctrica (CE) (b).

Al analizar los semivariogramas dependientes de la dirección y el variograma de superficie, se observó un comportamiento diferente entre sí (Fig. 3.22); ellos mostraron un carácter anisotrópico leve en pH y moderado en CE. Esta anisotropía es zonal debido a variaciones en el *sill*.

Posteriormente se ajustaron los semivariogramas a modelos teóricos, el modelo gaussiano fue el que logró el mejor ajuste en pH y el modelo esférico en CE, coincidiendo con otros autores (Juan *et al.*, 2011) representado por el Índice de Bondad de Ajuste (*Indicative goodness of fit - IGF*) que indica la calidad del ajuste del variograma (Pannatier, 1996). El ajuste será mejor cuando este índice IGF, que es un



número adimensional, sea más próximo a cero. El mejor ajuste lo presenta CE (Tabla 6).

Los estimadores de los parámetros más importantes del modelo de las curvas ajustadas figuran en la Tabla 6.

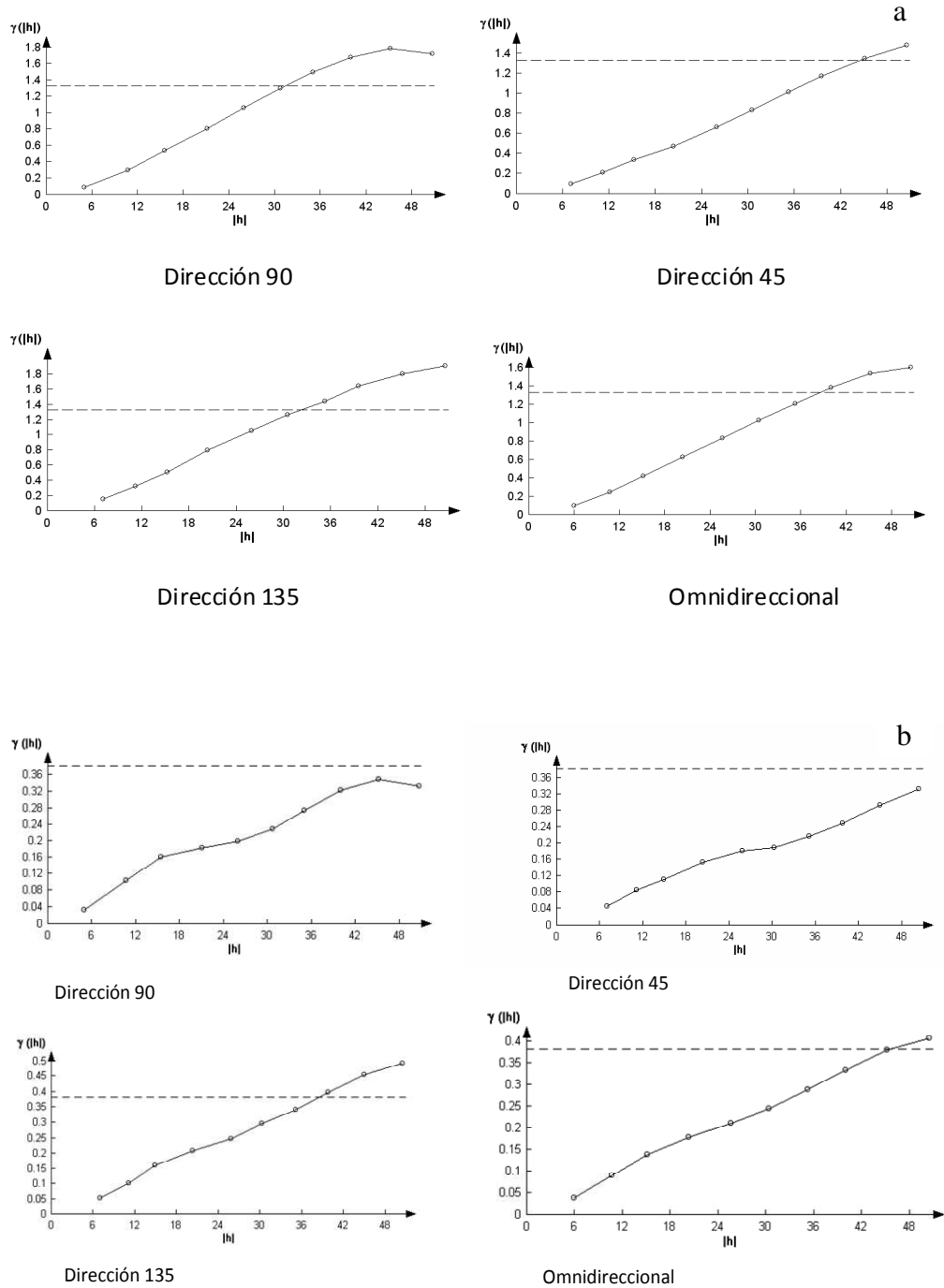
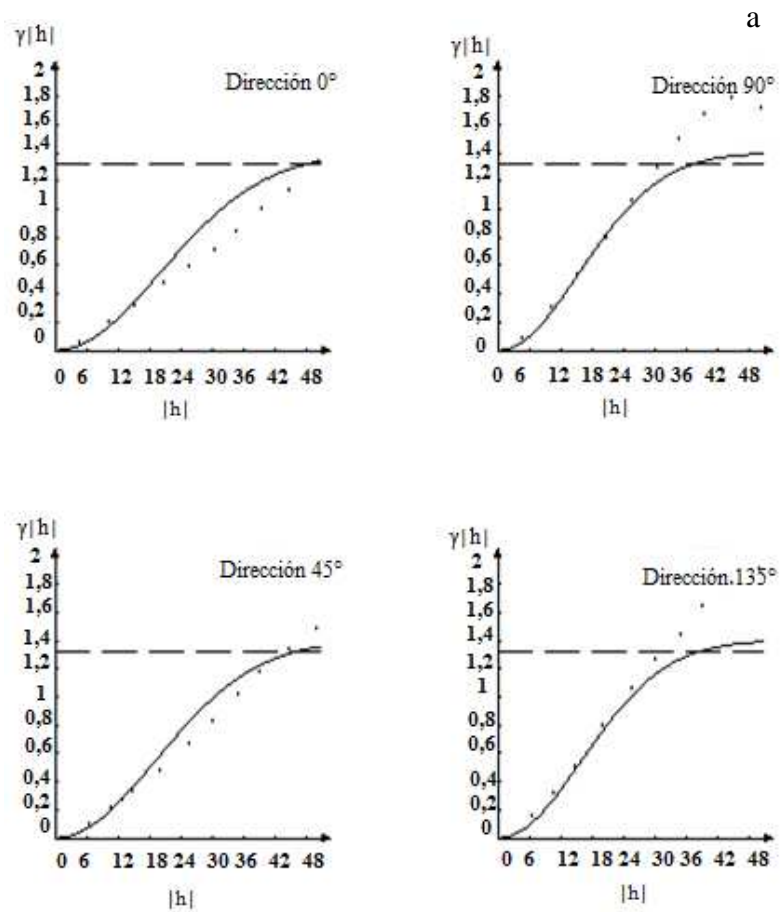


Fig. 3.22. Semivariogramas compuesto (omnidireccional) y en las direcciones 45°, 90° y 135° para pH (a) y conductividad eléctrica (CE) (b).

El modelo calculado considera las distintas direcciones de los variogramas experimentales para lograr el mejor ajuste posible (Fig. 3.23).

En los variogramas teóricos para pH y CE (Fig. 3.23 a y b) los estimadores de las variables analizadas mostraron dependencia espacial en la escala de muestreo utilizada. Los incrementos de la varianza con los incrementos del lag-distancia corresponden a una fuerte correlación o dependencia espacial. El rango o amplitud de dependencia espacial para pH y CE para el modelo teórico que considera las diferentes direcciones es de 51 m, es decir que hasta allí presentan dependencia espacial.

La variabilidad de una propiedad depende de la pendiente de la recta en el origen (Díaz Viera, 2002), siendo el pH el que muestra mayor pendiente y, por lo tanto, mayor variabilidad que la CE.



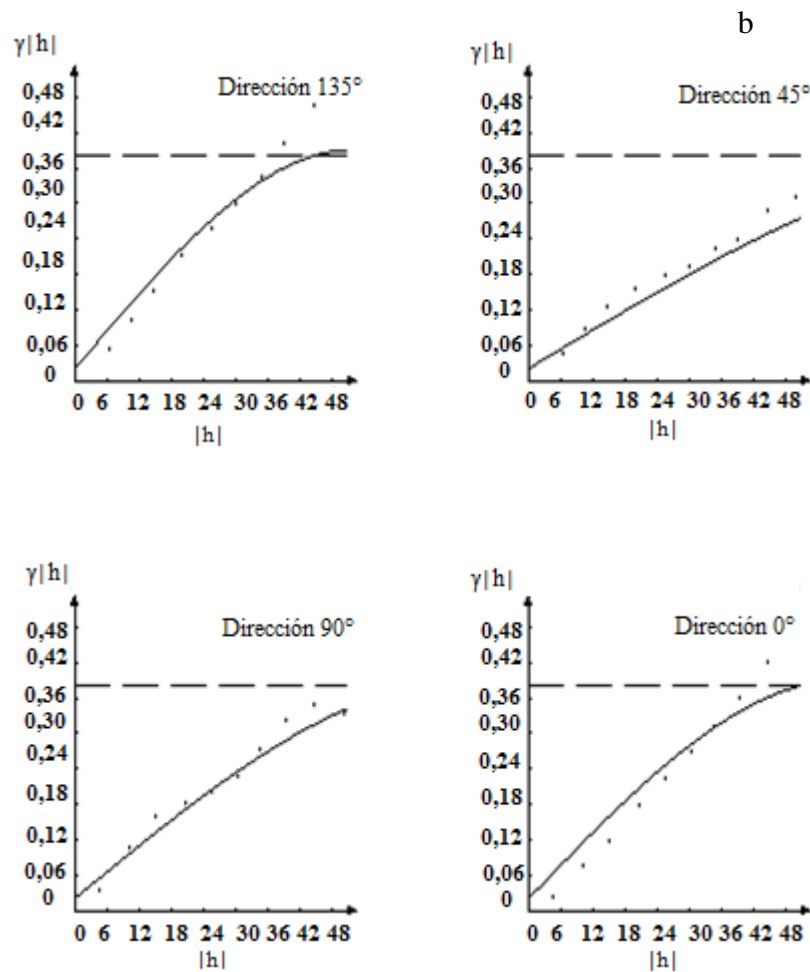


Fig. 3.23. Variogramas teóricos para pH (a) y conductividad eléctrica (CE) (b), según las direcciones 0°, 45°, 90° y 135°.

La semivarianza  $C_0$  expresada como un porcentaje de la semivarianza total, permite ver el efecto *nugget* en las propiedades del suelo (Trangmar, 1985). Se utilizó esta relación para definir tres clases de dependencia espacial (Cambardella et al., 1994), <25% fuerte dependencia espacial, 25-75 % moderada dependencia espacial y >75% débil dependencia espacial (Tabla 6). El análisis geoestadístico de los datos evidencia una fuerte dependencia espacial.

Los variogramas de ambas variables presentan meseta o *sill* (*semivarianza máxima*) finito, hasta allí hay correlación espacial. Según Webster y Oliver (2001) la falta de *sill* indica tendencia en la estructura espacial o la falta de estacionariedad de segundo orden. Los valores bajos de *nugget* indican que el intervalo de muestreo es adecuado para reflejar la varianza (Nielsen, 1998).

Tabla 6. Valores geoestadísticos más importantes para pH y conductividad eléctrica (CE).

Atributo	M	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> )*100	A (m)	IGF	R
pH	Gaussiano	0,125	1,40	8,90	51,00	0,0318	1,0
CE	Esférico	0,024	0,37	6,48	51,00	0,0177	2,1

**M:** modelo - **A:** amplitud o *range* - **C<sub>1</sub>:** Varianza explicada – **C<sub>0</sub>:** Efecto *Nugget* o ruido – **C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>:** *Sill* o umbral – **C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>)\*100:** porcentaje de varianza estructural - **IGF:** Índice de bondad de ajuste - **R:** Radio de anisotropía.

## CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>

Por los valores de los estadísticos descriptivos (Tabla 7) encontrados se puede considerar que las variables estudiadas tienen distribución normal, ya que los grados de asimetría y curtosis son leves, valores cercanos a 0, como en pH y CE. Los coeficientes de variación (C.V.) son relativamente altos para Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>. Es muy alto para Na<sup>+</sup>, posiblemente debido al microrrelieve del área y la dinámica del agua en el complejo de suelos. No hay valores anómalos u *outliers* (Fig. 3.24).

Tabla 7. Valores de los estadísticos descriptivos para cationes intercambiables.

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
<b>Media</b>	9,22	3,48	3,24	2,75
<b>Desvío estandar</b>	3,02	0,88	1,99	0,50
<b>C.V.</b>	32,82	25,28	61,69	18,17
<b>Mediana</b>	9,03	1,12	3,11	2,80
<b>Asimetría</b>	0,46	-0,19	0,36	-0,29
<b>Curtosis</b>	-0,48	-0,43	-0,97	-0,53

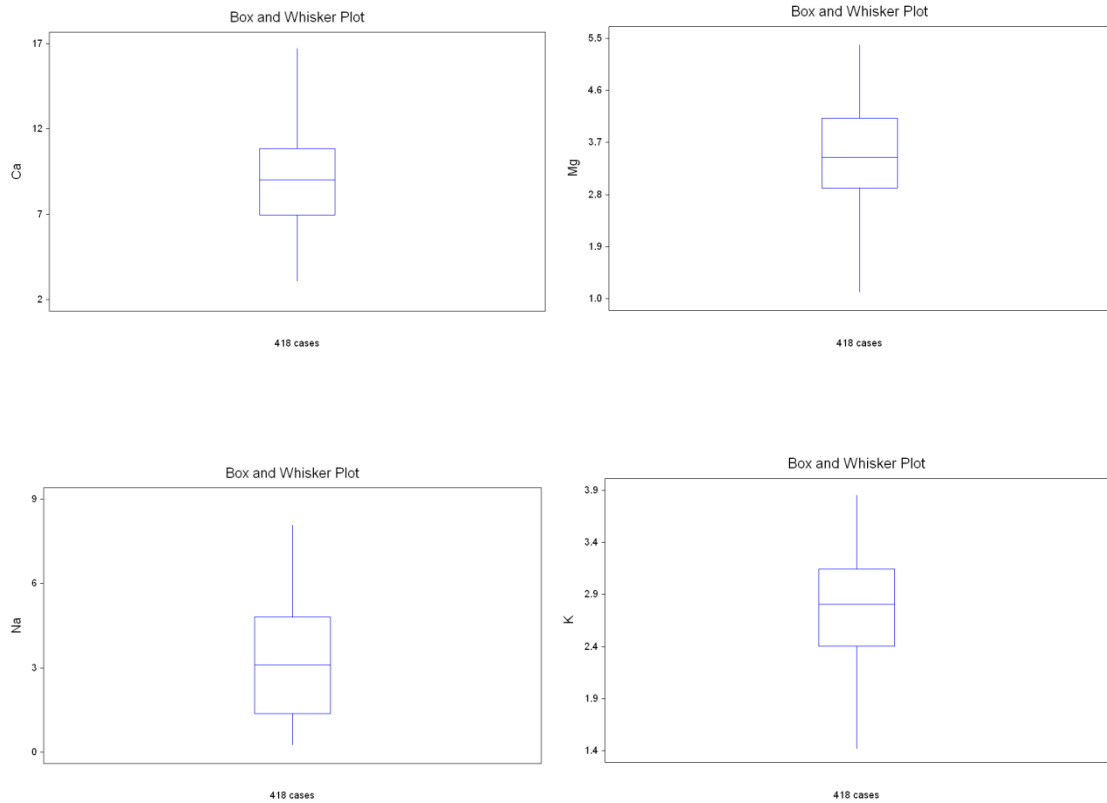


Fig. 3.24. Gráficos de caja para  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ .

Se calcularon las semivarianzas observadas a partir de incrementos de 5 m, en el área mencionada. Los semivariogramas observados demostraron un carácter transitivo (Fig. 3.26), es decir, la semivarianza aumentó con los incrementos de la distancia hasta llegar a un máximo; esto fue observado tanto para los semivariogramas compuestos, independientes de la dirección (omnidireccional), como para los dependientes de la dirección.

Para analizar el patrón de variabilidad e identificar las posibles anisotropías se realizaron los variogramas de superficie para los cationes estudiados (Fig. 3.25). Este mapa permite visualizar la tendencia a anisotropía. La variabilidad no es igual en todas las direcciones. La elipse en cada mapa de variogramas representa la zona de menor variabilidad. La distribución de  $\text{Ca}^{2+}$  demuestra menos variabilidad en sentido NO-SE,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$  en dirección NE-SO y la elipse en  $\text{K}^+$  tiene sentido E-O. Se escogieron las

direcciones 0°, 45°, 90° y 135° para estudiar los semivariogramas y obtener el modelo ajustado a pesar de la anisotropía.

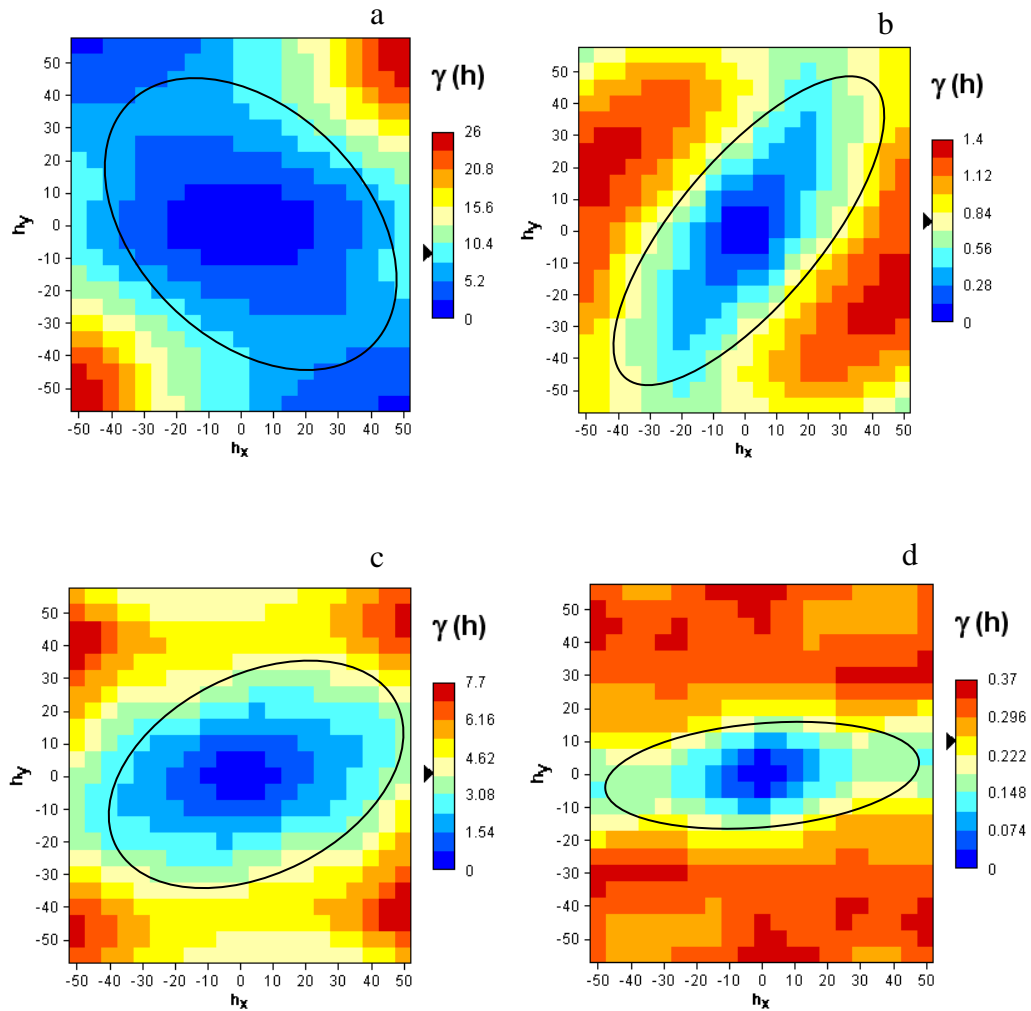
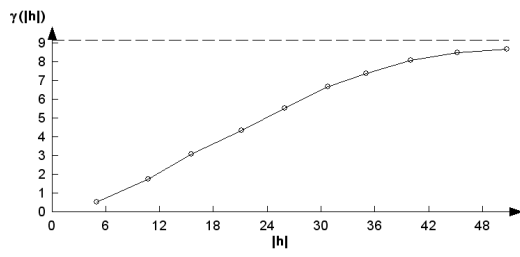
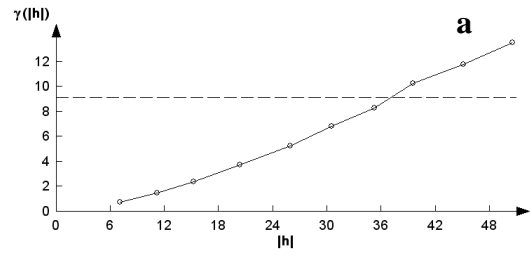


Fig. 3.25. Variogramas de superficie para Ca<sup>2+</sup> (a), Mg<sup>2+</sup> (b), Na<sup>+</sup> (c) y K<sup>+</sup> (d).

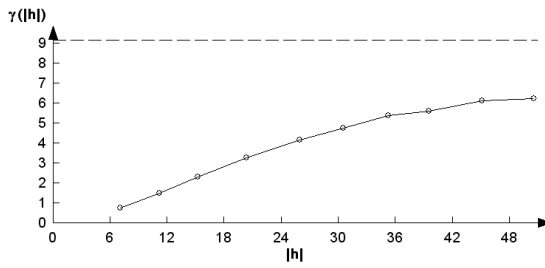
Los mapas de variogramas de Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup> demostraron la existencia de anisotropía. Los diferentes *sill* en los semivariogramas obtenidos para un mismo catión en las diferentes direcciones, reflejaron la existencia de leve anisotropía zonal. Una anisotropía zonal marcada se visualizaría en los mapas de variogramas como zonas paralelas, y no como una elipse.



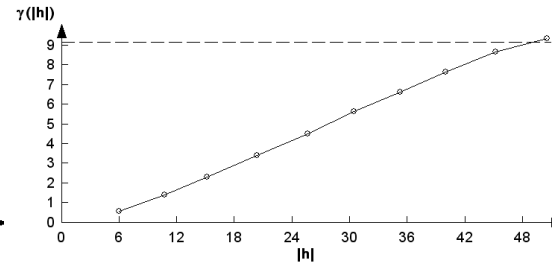
Dirección 90°



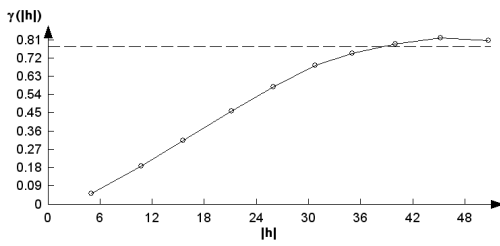
Dirección 45°



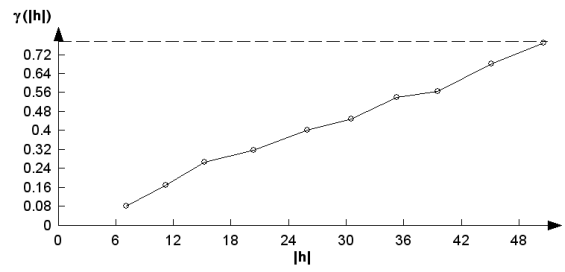
Dirección 135°



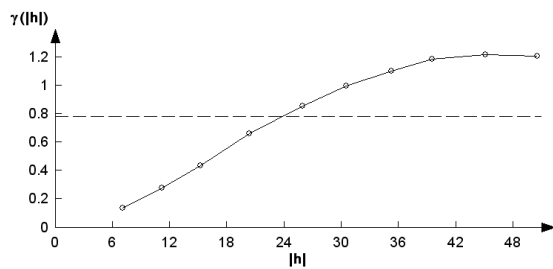
Omnidireccional



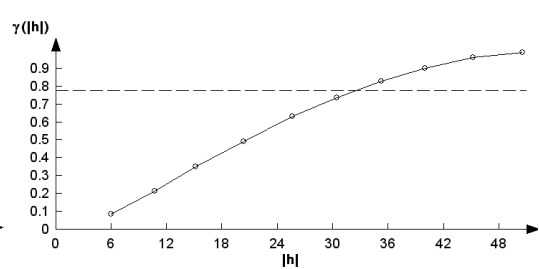
Dirección 90°



Dirección 45°



Dirección 135°



Omnidireccional

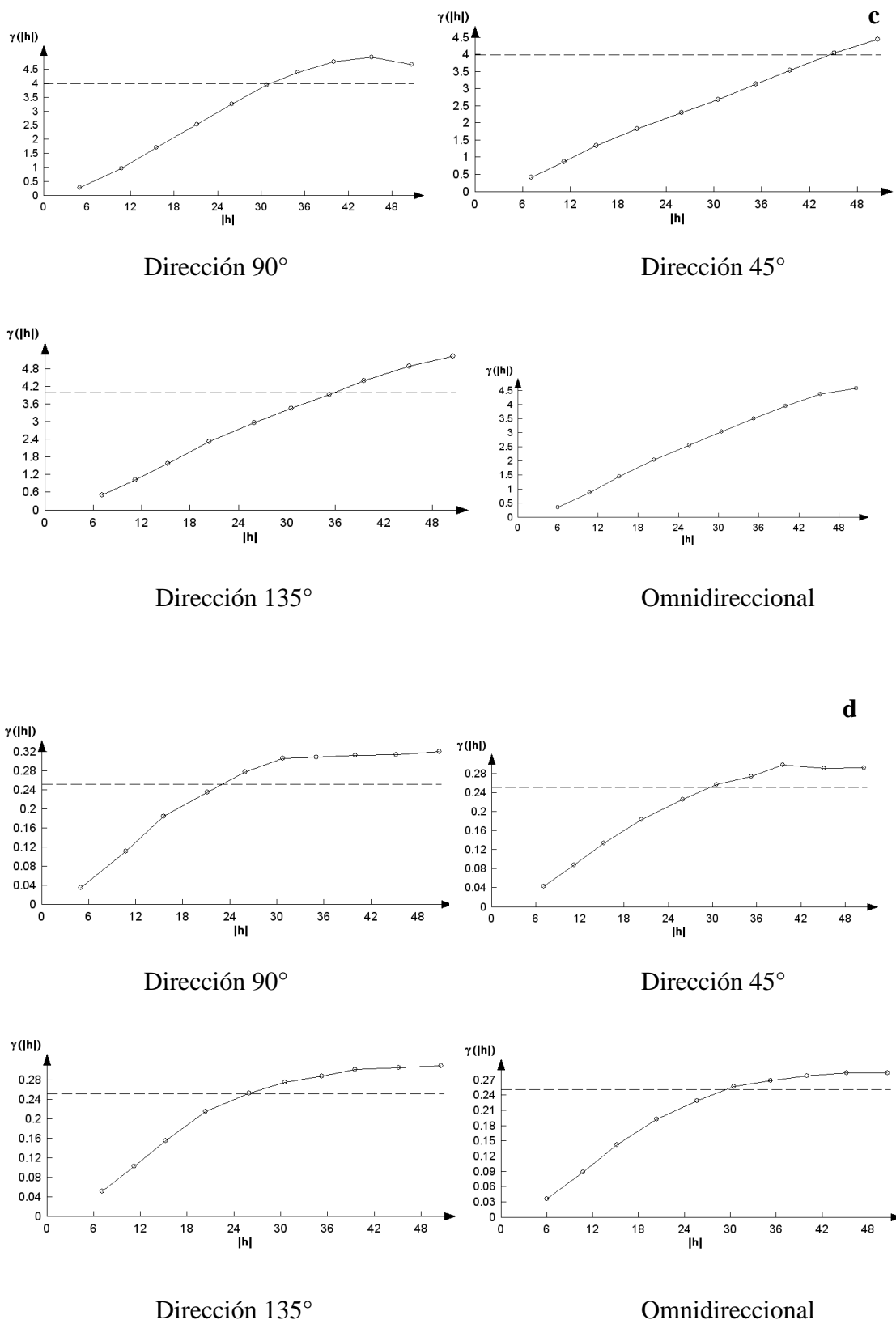
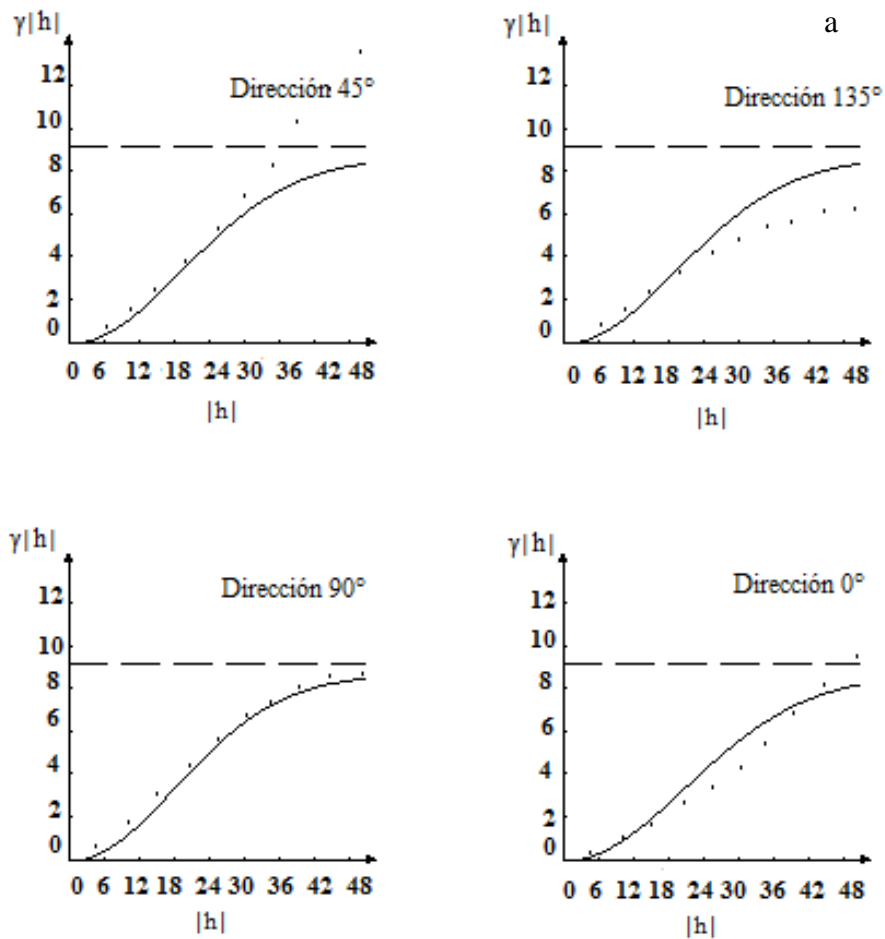
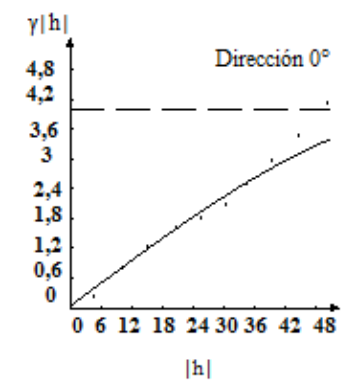
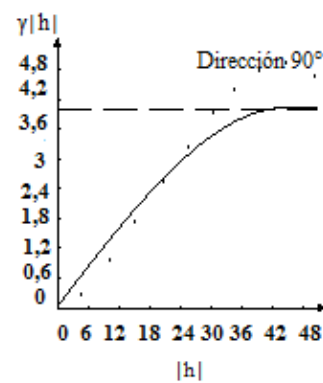
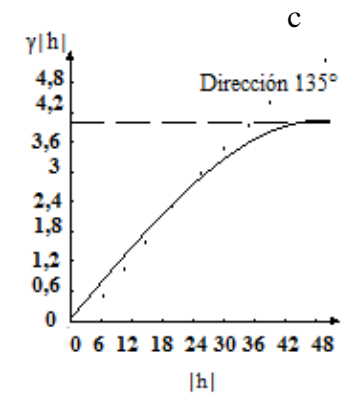
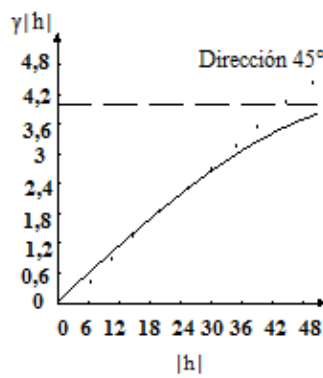
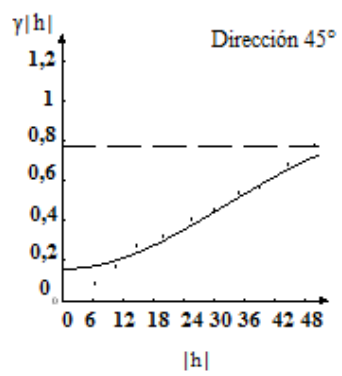
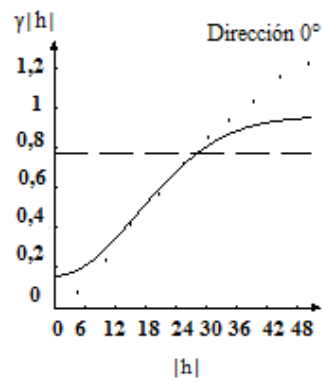
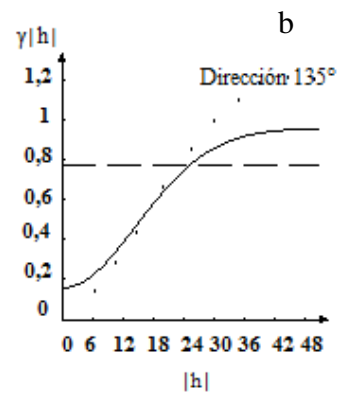
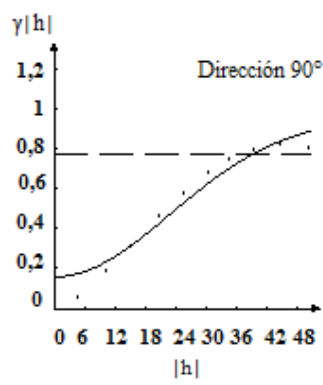


Fig. 3.26. Semivariogramas: compuesto (omnidireccional) y en las direcciones 45°, 90° y 135° para  $\text{Ca}^{2+}$  (a),  $\text{Mg}^{2+}$  (b),  $\text{Na}^+$  (c) y  $\text{K}^+$  (d).



El modelo calculado para describir a cada catión intercambiable considera las distintas direcciones de los variogramas experimentales para lograr el mejor ajuste posible (Fig. 3.26). Para  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  el modelo que logró el mejor ajuste fue el gaussiano, mientras que para  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  resultó el modelo esférico, como en otros trabajos que analizan la variabilidad en suelos salino-alcálinos (Juan *et al.*, 2011). Dado que el ajuste será mejor cuando el IGF sea más próximo a cero, de los cuatro cationes el mejor modelo resultó el de  $\text{K}^+$  y muy similar al ajuste que mostró  $\text{Na}^+$  (Tabla 8).





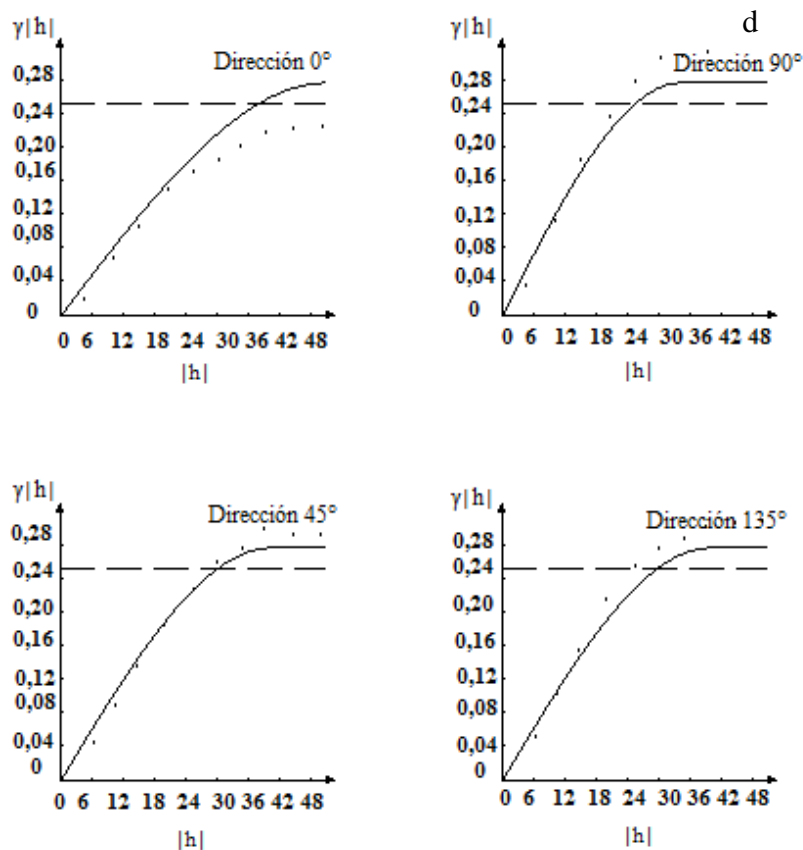


Fig. 3.27. Variogramas teóricos para  $\text{Ca}^{2+}$  (a),  $\text{Mg}^{2+}$  (b),  $\text{Na}^+$  (c) y  $\text{K}^+$  (d) según las direcciones  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ .

Las variables analizadas mostraron dependencia espacial en la escala de muestreo utilizada. Los incrementos de la varianza con los incrementos del lag-distancia corresponden a una fuerte correlación o dependencia espacial. El rango o amplitud de dependencia espacial fue diferente en algunos cationes (Fig. 3.27), pero es importante considerar al comparar los parámetros de los semivariogramas obtenidos, que no es aplicable cuando los modelos teóricos son diferentes (Córdoba *et al.*, 2014). El rango de  $\text{K}^+$  fue mayor que para  $\text{Na}^+$ , ambos de modelo esférico, mientras que el alcance de  $\text{Ca}^{2+}$  es mayor que  $\text{Mg}^{2+}$ , de 35 m de rango. Los mayores valores de rango expresan menor variabilidad y que mantienen su autocorrelación en mayores distancias, comparando con los otros cationes.

En  $\text{Mg}^{2+}$  el modelo presenta un valor de *nugget* elevado, en la práctica su existencia se debe a la variación espacial que no puede explicar el variograma debido a

la escala del muestreo. El efecto *nugget* se produce a partir de la contribución de los errores de medición y la variación a distancias mucho menores que el intervalo de muestreo más pequeño. Es decir que  $Mg^{2+}$  tiene efectos dominantes de procesos de corto rango.

Tabla 8. Valores geoestadísticos más importantes para  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ .

Atributo	M	$C_0$	$C_0+C_1$	$C_0/(C_0+C_1)*100$	A (m)	IGF	R
$Ca^{2+}$	Gaussiano	0	8,72	0	51,00	0,0347	0,87
$Mg^{2+}$	Gaussiano	0,160	0,96	16,66	35,26	0,0329	2,50
$Na^+$	Esférico	0,079	4,07	1,94	43,76	0,0196	1,90
$K^+$	Esférico	0	0,27	0	51,00	0,0191	0,67

**M:** modelo - **A:** amplitud o *range* -  **$C_1$ :** Varianza explicada -  **$C_0$ :** Efecto *Nugget* o ruido -  **$C_0+C_1$ :** *Sill* o umbral -  **$C_0/(C_0+C_1)*100$ :** porcentaje de varianza estructural - **IGF:** Índice de bondad de ajuste - **R:** Radio anisotropía.

La semivarianza  $C_0$  expresada como un porcentaje de la semivarianza total, permite ver el efecto *nugget* en las propiedades del suelo (Trangmar, 1985). Se utilizó esta relación para definir tres clases de dependencia espacial (Cambardella et al, 1994), (Tabla 8). El análisis geoestadístico de los datos evidencia una fuerte dependencia espacial.

## CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES CIC Y PSI

Por los valores de los estadísticos descriptivos encontrados (Tabla 9) podemos considerar a las variables estudiadas con distribución normal, ya que los grados de asimetría son leves, con valores cercanos a 0. Los coeficientes de variación (C.V.) son moderados para CIC y alto para PSI, tal como es el comportamiento del catión  $Na^+$ , posiblemente debido al microrrelieve del área y la dinámica del agua en el complejo de suelos. No hay valores anómalos u *outliers* (Fig. 3.28).

Tabla 9. Valores de los estadísticos descriptivos para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

	<b>CIC</b>	<b>PSI</b>
<b>Media</b>	22,87	15,12
<b>Desvío estandar</b>	4,58	10,39
<b>C.V.</b>	20,04	68,74
<b>Mediana</b>	22,70	14,50
<b>Asimetría</b>	0,80	0,68
<b>Curtosis</b>	0,47	-0,26

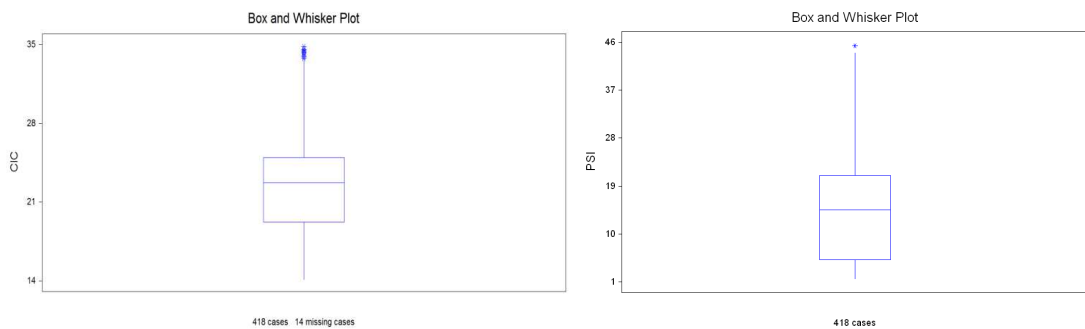


Fig. 3.28. Gráfico de caja para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Se calcularon las semivarianzas observadas a partir de incrementos de 5 m en el área mencionada. Los semivariogramas observados demostraron un carácter transitivo (Fig. 3.30), es decir, la semivarianza aumentó con los incrementos de la distancia hasta llegar a un máximo; esto fue observado tanto para los semivariogramas compuestos, independientes de la dirección (omnidireccional), como para los dependientes de la dirección. Las direcciones para estudiar la variabilidad se seleccionaron a partir del análisis del variograma de superficie (Fig. 3.29). La menor variabilidad está señalada en la dirección de la elipse, indicando en CIC menor variabilidad en sentido NO-SE y en PSI en sentido inverso. El sentido de la elipse en este caso, puede deberse a que el CIC es el denominador en el cálculo del PSI. Se escogieron 4 direcciones 0°, 45°, 90° y 135° para estudiar los semivariogramas en función de la dirección y calcular el modelo asumiendo esta anisotropía.

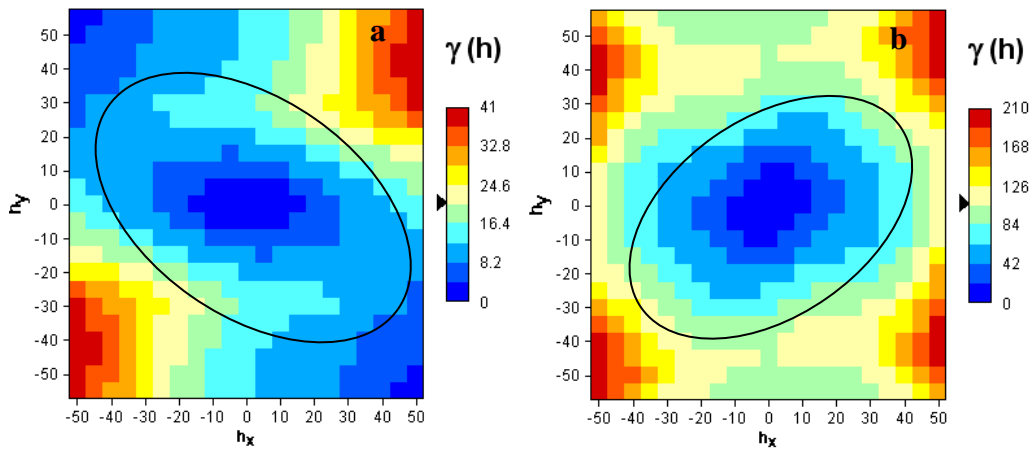
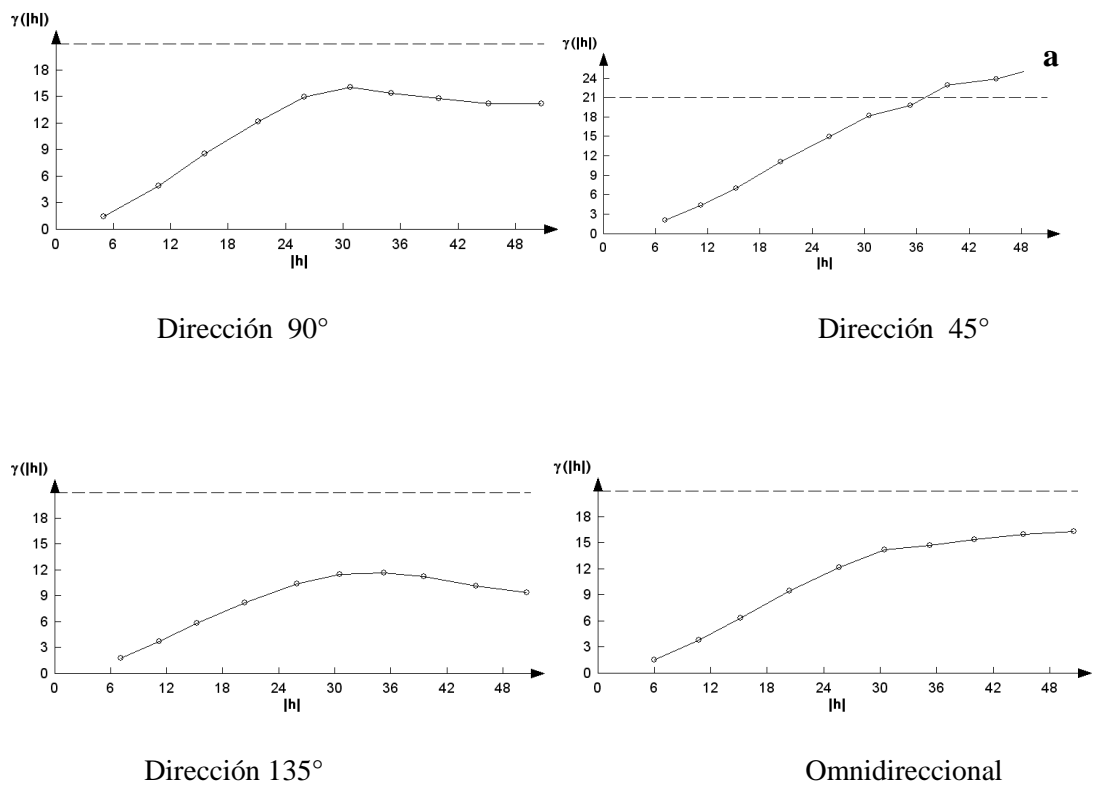


Fig. 3.29. Variogramas de superficie para para capacidad de intercambio catiónico (CIC) (a) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (b).

Los semivariogramas experimentales construidos en las diferentes direcciones para una misma variable, presentaron valores de rango y *sill* diferentes indicando presencia de anisotropía híbrida para CIC y PSI.



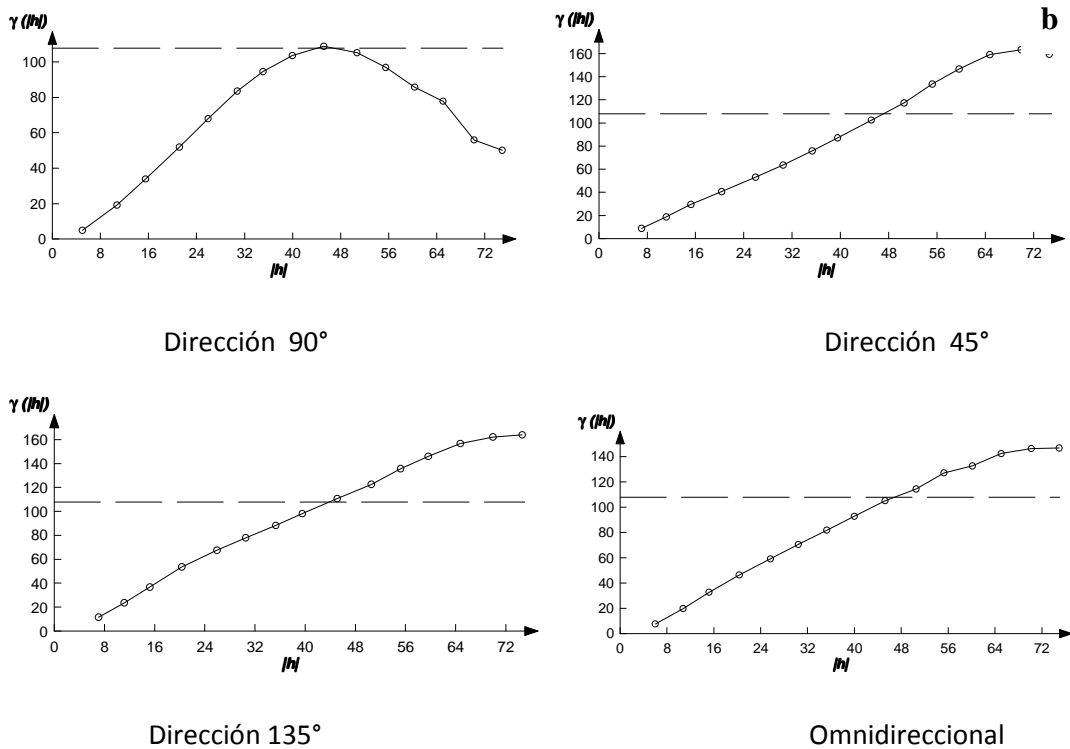
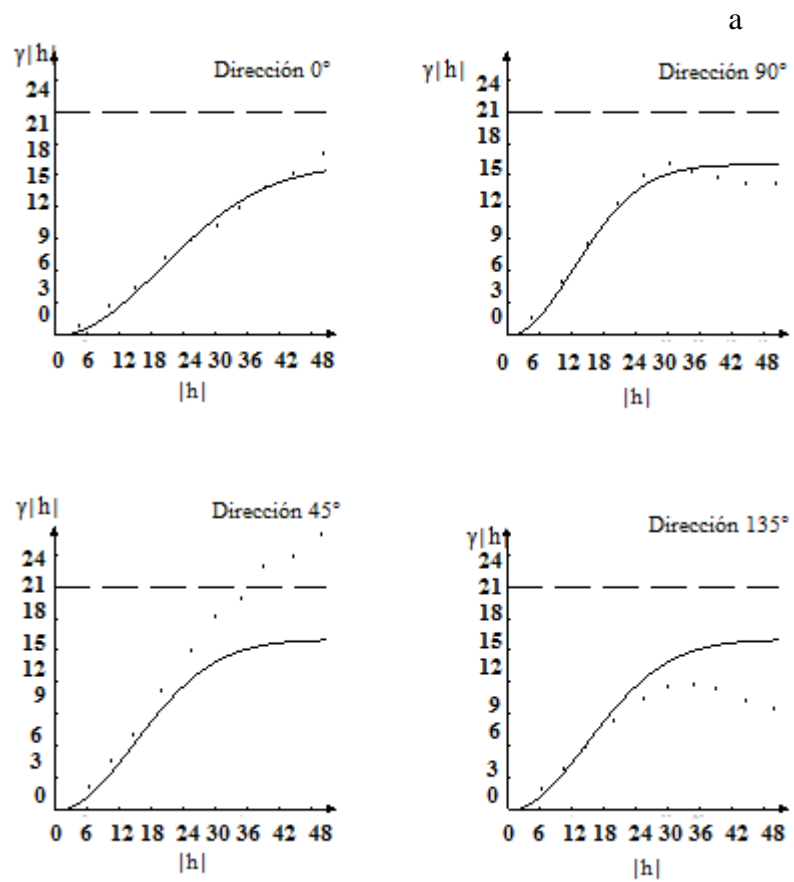


Fig. 3.30. Semivariogramas compuesto (omnidireccional) y en las direcciones 45°, 90° y 135° para CIC (a) y PSI (b).

En todos los casos fue posible encontrar el valor del rango, con el que se obtiene el punto de máximo valor en la covarianza (*sill*) condición obligatoria para obtener un adecuado semivariograma (Demmers, 1999). El modelo calculado para describir a cada variable considera las distintas direcciones de los variogramas experimentales para lograr el mejor ajuste posible (Fig. 3.31). Estas variables presentaron valores altos de IGF, siendo el peor ajuste el de CIC.

Las propiedades analizadas mostraron dependencia espacial en la escala de muestreo utilizada. Los incrementos de la varianza con los incrementos del lag-distancia corresponden a una fuerte correlación o dependencia espacial. El rango de dependencia espacial para el modelo teórico que considera las diferentes direcciones es para CIC de 48 m y para PSI de 51 m, es decir que hasta allí presentan dependencia espacial.

La semivarianza  $C_0$  expresada como un porcentaje de la semivarianza total, permite ver el efecto *nugget* en las propiedades del suelo (Trangmar, 1985). Se utilizó esta relación para definir tres clases de dependencia espacial (Cambardella et al., 1994), <25% fuerte dependencia espacial, 25-75% moderada dependencia espacial y >75% débil dependencia espacial (Tabla 10). El análisis geoestadístico de los datos evidencia una fuerte dependencia espacial.





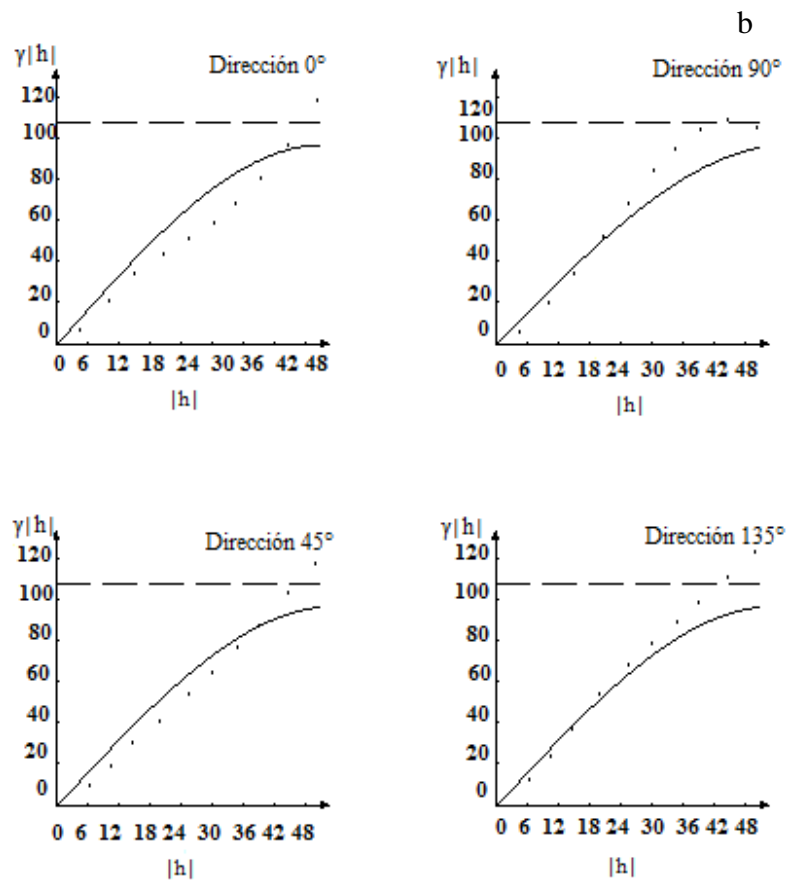


Fig. 3.31. Variogramas teóricos para capacidad de intercambio catiónico (CIC) (a) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (b) según las direcciones 0°, 45°, 90° y 135°.

La variabilidad de las dos propiedades, demostradas por la pendiente de la recta en el origen (Díaz Viera, 2002) de los variogramas, evidencian una alta variabilidad, la que fue mayor en CIC que en PSI.

Tabla 10. Valores geoestadísticos mas importantes para capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Atributo	M	C <sub>0</sub>	C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub>	C <sub>0</sub> /(C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> )*100	A (m)	IGF	R
CIC	Gaussiano	0	16,19	0	48,43	0,0423	0,63
PSI	Esférico	0	97,59	0	51,00	0,0352	1,10

M: Modelo - A: amplitud o *range* - C<sub>1</sub>: Varianza explicada - C<sub>0</sub>: Efecto *Nugget* o ruido - C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>: *Sill* o umbral - C<sub>0</sub>/(C<sub>0</sub>+C<sub>1</sub>)\*100: porcentaje de varianza estructural - IGF: Índice de bondad de ajuste - R: Radio de anisotropía

## KRIGING PARA pH y CE

En los mapas de isolíneas elaborados en base a los valores estimados por *kriging* se aprecia que la variable pH presentó valores entre 5,6 y 10 y la CE entre 3,6 y 3,2 dS m<sup>-1</sup>, destacándose los valores más altos de pH en el centro del lote y al E (Fig. 3.32). Similar comportamiento se ve en los valores de CE (Fig. 3.33), si bien en el S hay una franja que posee bajos valores de pH (alrededor de 6,5) y valores de CE mayores a 2 dS m<sup>-1</sup>.

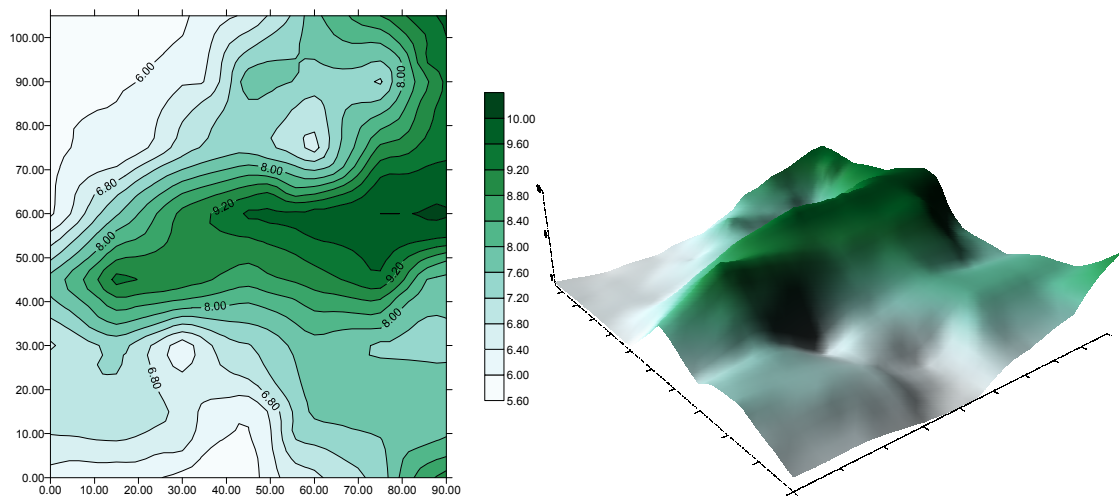


Fig. 3.32. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para pH.

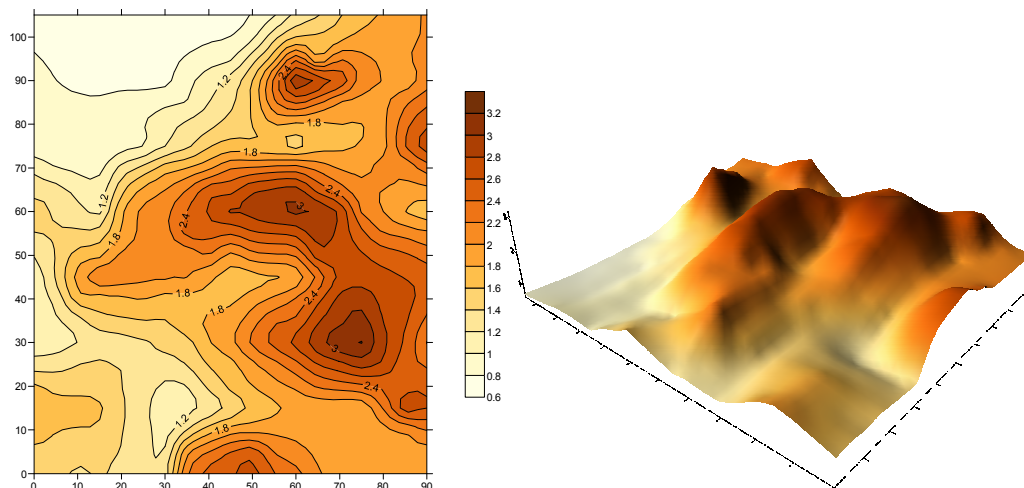


Fig. 3.33. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para conductividad eléctrica (CE).

Los mayores valores de pH y CE coinciden con una vaguada situada al este del lote, y en pH los valores más bajos coinciden con la media loma situada al NE, y la parte del lote correspondiente al bajo plano.

Se observa que la topografía y los movimientos de escurrimiento y retención del agua superficial inciden en el patrón de variabilidad que siguen estos parámetros (Ceddia *et al.*, 2009, Hall y Olson, 1991).

Estos resultados vinculados a la microtopografía, tal como los encontrados por Bruland y Richardson (2005) quienes sugieren que la naturaleza de la variabilidad espacial de cada sitio, con características geológicas, hidrológicas y vegetativas específicas, interactúan para crear patrones únicos de variabilidad espacial.

### ***KRIGING PARA $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Na}^+$ y $\text{K}^+$***

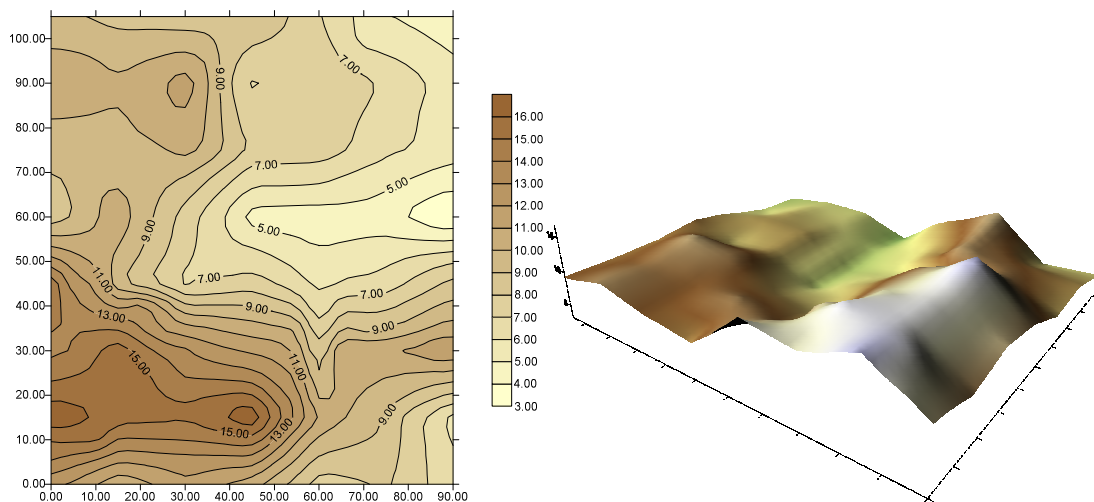


Fig. 3.34. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para  $\text{Ca}^{2+}$ .

Al analizar el mapa de isolíneas de *kriging* para  $\text{Ca}^{2+}$  (Fig. 3.34) se observa que los valores se encuentran entre 3 y 16  $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  y aumentan desde el E hacia el O del

lote. Los valores más bajos coinciden con los valores más altos de CE y se encuentran en el área de la vaguada.

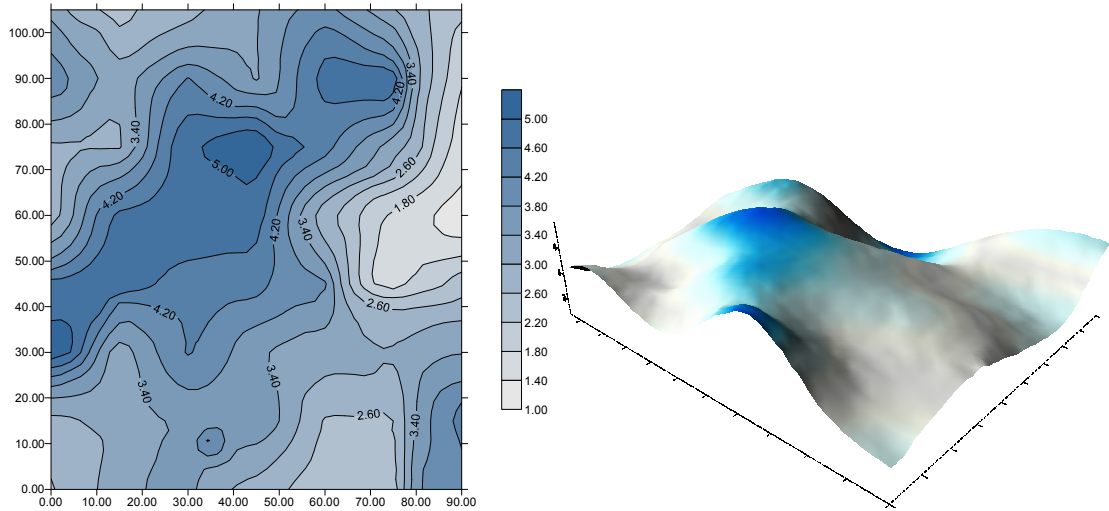


Fig. 3.35. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para Mg<sup>2+</sup>.

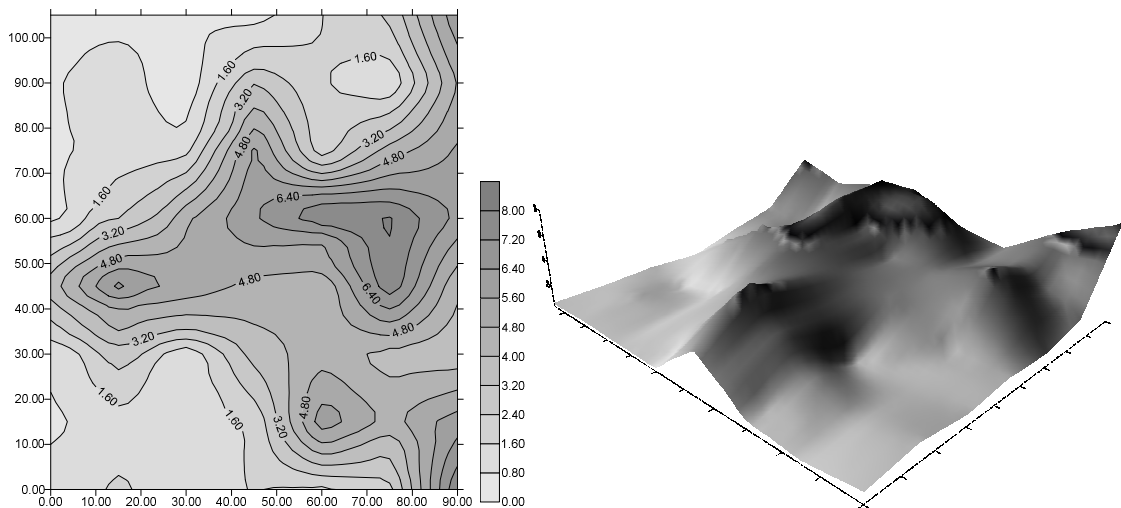


Fig. 3.36. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para Na<sup>+</sup>.

Los valores del catión Na<sup>+</sup> se encuentran entre 0,8 y 8 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup> (Fig. 3.36), su patrón de distribución espacial se asemeja mucho al descrito por el pH, los suelos sódicos (estos últimos también denominados alcalinos) con un elevado porcentaje de

sodio intercambiable (PSI), a menudo poseen altos valores de pH. Elevados valores de pH ( $> 8,5$ ) indican presencia de altas concentraciones de sodio intercambiable pero puede haber también suelos sódicos con valores de pH entre 7,5 y 8,5. Los valores muy altos de pH (superiores a 9,0-9,5) están asociados con la presencia de carbonato de sodio ( $\text{CO}_3 \text{Na}_2$ ) (Taboada y Lavado, 2008).

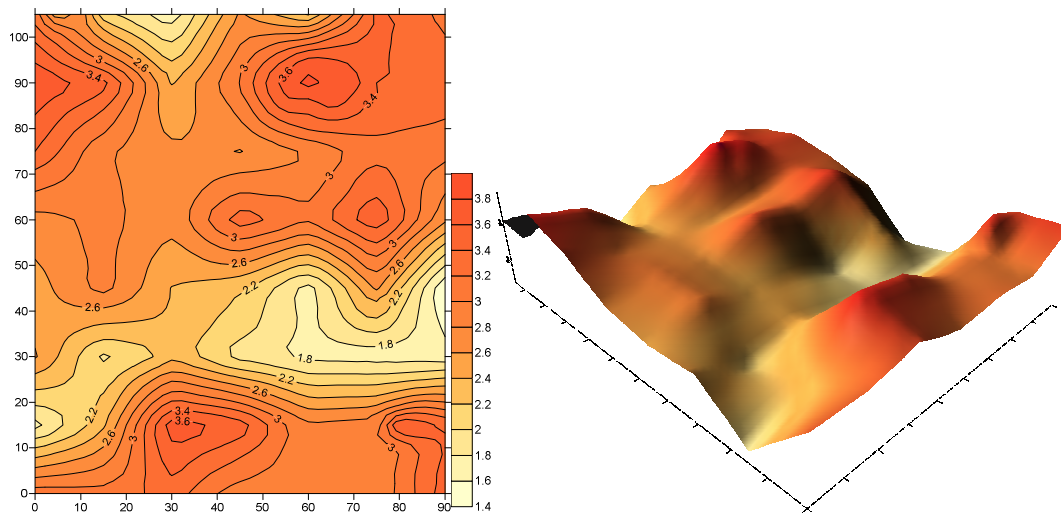


Fig. 3.37. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para  $\text{K}^+$ .

$\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  tienen un patrón de variabilidad independiente del resto de las variables estudiadas. Los valores de  $\text{Mg}^{2+}$  se presentan entre 1 y 5  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , sus valores más bajos coinciden con la concentración del agua en la zona E del lote (Fig. 3.35); mientras que  $\text{K}^+$  muestra valores entre 1,8 y 3,8  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  y un patrón más independiente y anárquico que las demás variables analizadas (Fig. 3.37).

## KRIGING PARA CIC Y PSI

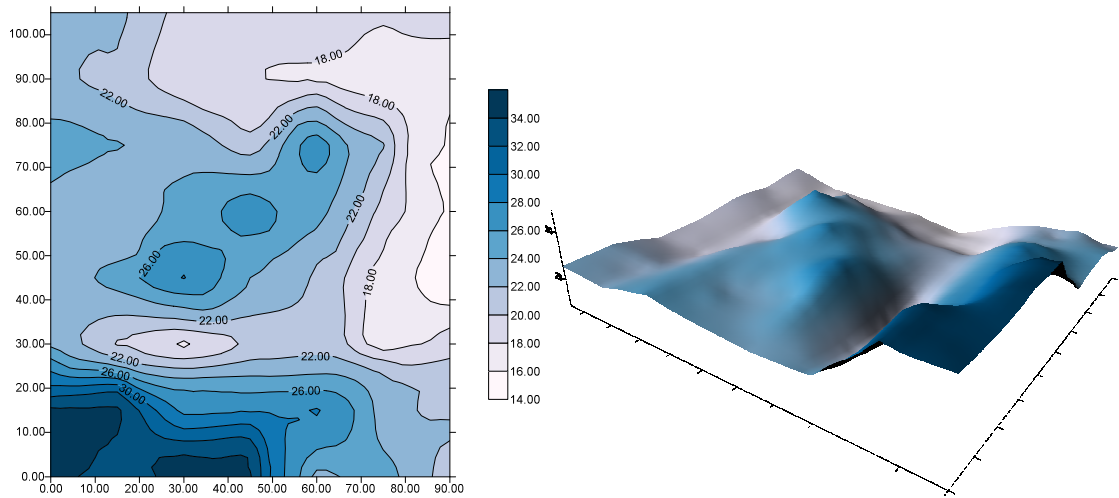


Fig 3.38. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para capacidad de intercambio catiónico (CIC).

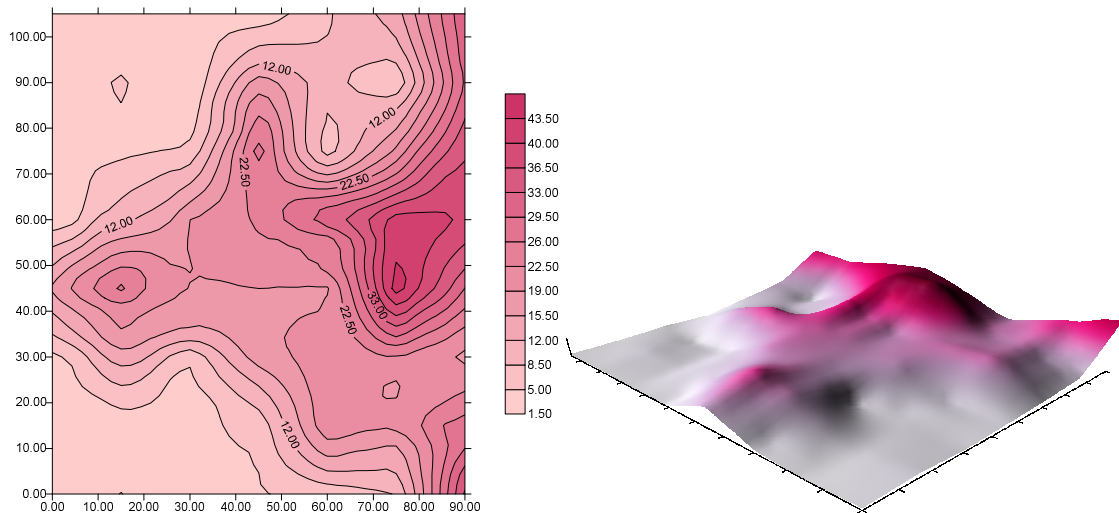


Fig. 3.39. Mapa de contorno *kriging* y mapa de superficie 3D para porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

Los valores del CIC en el área de estudio se encuentran entre 14 y 34  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$  (Fig. 3.38). Al analizar su distribución observamos que los datos más bajos están en la zona de escurrimiento ubicada al E, y los valores medios coinciden con los pH ácidos, agrupándose los valores más altos en el punto topográfico más bajo, al S de la parcela.

Esto se debe a que en el S se localizan las cotas más bajas, y en estos ambientes húmedos se encuentran altos valores de carbono orgánico (Batista *et al.*, 2005), según Stevenson (1994) éste contribuye con 25 al 90% de la CIC en los horizontes superficiales de suelos minerales y prácticamente la totalidad en turbas y otros horizontes orgánicos. Existiendo variaciones según los Subórdenes: Udoles: 21,4 (18,1-23,1); Alboles 15,8 (9,6-24,8); Acuoles: 22,0 (17,2-32,1 cmol kg<sup>-1</sup>) (Mendía, 1980).

Los valores de PSI tienen un C.V. muy alto y se refleja en la dispersión de sus valores en el área, que varían de 1,5 a 43,5 % (Fig. 3.39). El PSI tiene una distribución que se asemeja al catión Na<sup>+</sup>, pH y CE, por lo cual, valores altos de PSI corresponden a valores elevados de Na<sup>+</sup>, pH y CE.

## ***KRIGING UTILIZANDO SAS***

Para realizar el *kriging*, mediante el programa SAS, la función semivariograma debe poseer ciertas propiedades matemáticas, y los datos experimentales deben ser ajustados a modelos teóricos. Con PROC KRIGE2D se pueden ajustar cuatro modelos de semivariograma: esférico, Gaussiano, exponencial, y potencia. Si bien los procedimientos citados, en combinación con otras herramientas de SAS, permiten un entorno versátil de modelado aplicable a datos espacialmente dependientes en dos dimensiones, no es la especialidad de este paquete estadístico. La calidad de sus gráficos y otras particularidades determinaron que, finalmente, este no fuera el elegido para trabajar con el resto de las variables.

## **VALIDACIÓN DEL KRIGING**

La validación cruzada realizada para el método *kriging* permitió representar los valores interpolados (estimados) frente a sus valores reales u observados para todas las variables estudiadas. El ajuste lineal en los gráficos de pH y CE (Fig. 3.40) es altamente significativo ( $P < 0,01$ ), siendo el valor de  $R^2$  mayor para el pH que para CE.

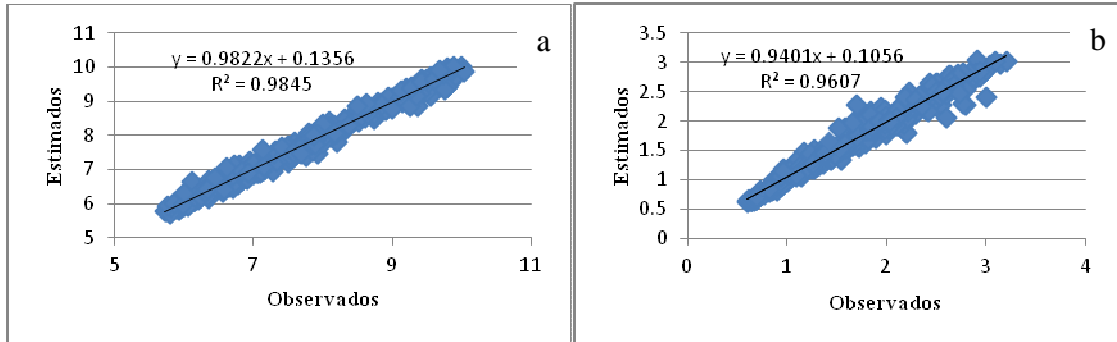


Fig. 3.40. Relación entre los valores reales y los valores estimados de pH (a) y conductividad eléctrica (CE) (b) utilizando validación cruzada.

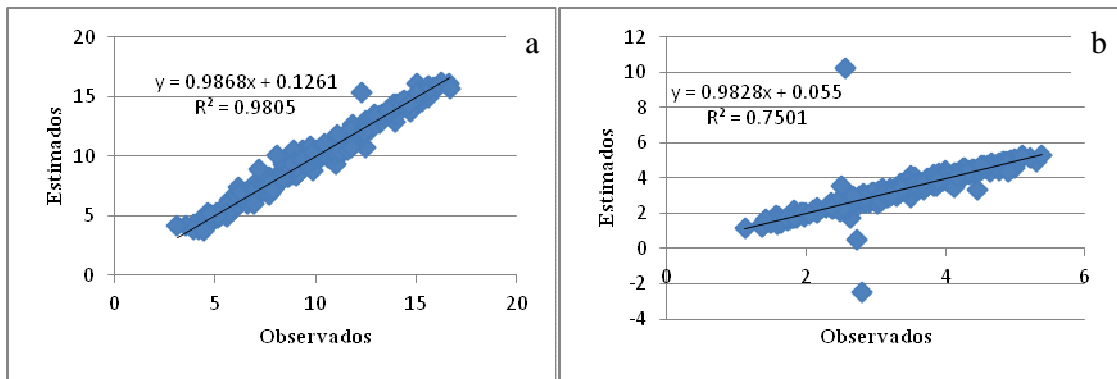


Fig. 3.41. Relación entre los valores reales y los valores estimados de  $Ca^{2+}$  (a) y  $Mg^{2+}$  (b) utilizando validación cruzada.

La validación cruzada realizada para la interpolación *kriging* para estos cationes, muestra en  $Mg^{2+}$  el ajuste más bajo (Fig. 3.41), posiblemente debido a que el modelo presentó un ajuste bajo (Tabla 8).

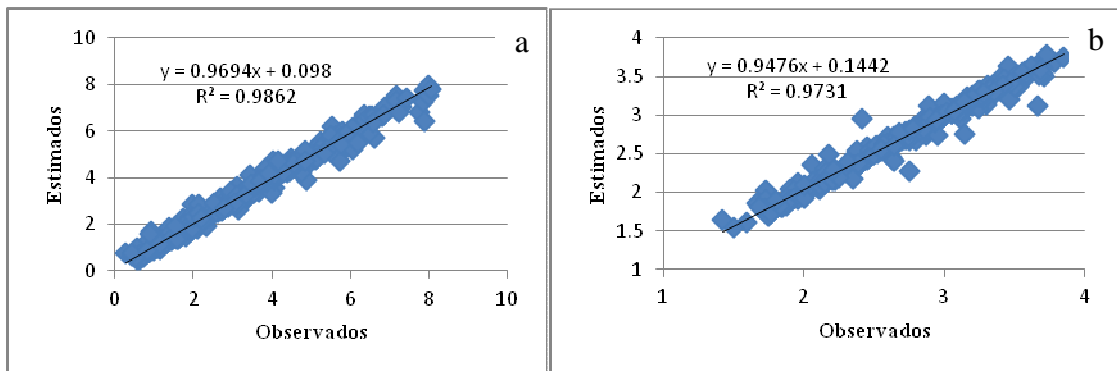


Fig. 3.42. Relación entre los valores reales y los valores estimados de  $Na^+$  (a) y  $K^+$  (b) utilizando validación cruzada.



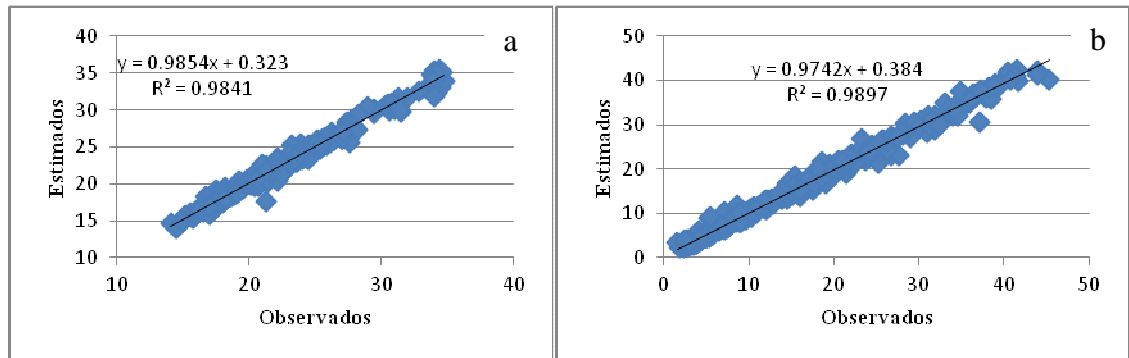


Fig. 3.43. Relación entre los valores reales y los valores estimados de capacidad de intercambio catiónico (CIC) (a) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (b) utilizando validación cruzada.

La validación cruzada realizada para el método *kriging* con el resto de las variables muestra que el ajuste lineal de todos los gráficos es altamente significativo ( $P < 0,01$ ), y, como se puede observar, el valor más bajo que se obtuvo del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) corresponde a la variable  $Mg^{2+}$  con un valor de 0,75; mientras que el resto presentaron muy buen ajuste.

La Tabla 11 resume el resultado de la interpolación *kriging*. Los promedios estimados son similares a los observados en las Tabla 5, 7 y 9, y los desvíos estándares son algo mayores, en general. Por otra parte, el promedio de los residuos es cercano a cero para ambos casos y el error estándar residual tiene los valores más altos en CIC y  $Mg^{2+}$ .

Tabla 11. Resultados de la interpolación y validación cruzada para pH, conductividad eléctrica (C.E.),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , capacidad de intercambio catiónico (CIC) y porcentaje de sodio intercambiable (PSI).

	<b>pH</b>	<b>CE</b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>Na<sup>+</sup></b>	<b>K<sup>+</sup></b>	<b>CIC</b>	<b>PSI</b>
<b>PE</b>	7,6046	1,7666	9,2256	3,4836	3,2438	2,7586	22,8600	15,1160
<b>EE</b>	1,1399	0,5926	3,0132	0,9998	1,9489	0,4812	4,5487	10,1670
<b>MRE</b>	0,0005	-0,0001	0,0047	-0,0048	-0,0012	-0,0003	-0,0117	-0,0058
<b>ESRE</b>	0,1435	0,1231	0,4229	0,5001	0,2368	0,0831	0,5779	1,0670
<b>R<sup>2</sup></b>	0,98	0,96	0,98	0,75	0,98	0,97	0,98	0,98

**PE:** Promedio estimado - **EE:** Error estándar - **MRE:** Promedio de los residuos – **ESRE:** Error estándar residual - **R<sup>2</sup>:** Coeficiente de determinación

## RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE SUELO

Se calcularon los coeficientes de Correlación de Pearson para explicar el grado de asociación entre las variables estudiadas (Tabla 12).

Para pH, respecto de PSI y  $\text{Na}^+$  se observa una correlación positiva y significativa, con un valor de 0,87 y 0,95 respectivamente, la asociación entre estas variables también puede observarse en los mapas de contorno de las predicciones *kriging* (Fig. 3.32, 3.36 y 3.39). Esto puede explicarse porque en estos suelos la alta alcalinidad se debe a la alta saturación con Na en el complejo de intercambio. Por otra parte, los mapas de CE con pH y PSI son algo más disímiles, siendo su coeficiente de correlación de 0,66 y 0,69, respectivamente.

El  $\text{Ca}^{2+}$  presenta una correlación inversa con pH y con  $\text{Na}^+$ , con valores de -0,65 -0,577, respectivamente y correlación positiva con  $\text{Mg}^{2+}$  de 0,19, explicando su influencia en la reacción del suelo, aunque su valor no es significativo.

Los resultados revelan alta variabilidad espacial en las propiedades del suelo coincidiendo con otros estudios espaciales realizados en los humedales naturales y áreas hidromórficas (Lyons *et al.*, 1998; Bruland *et al.* 2006).

Tabla 12. Valores de correlación de Pearson y significancia para las variables edáficas estudiadas.

	CE	PSI	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	CIC
<b>CE</b>		<u>0,6982</u> <,0001	<u>0,6674</u> <,0001	-0,4139 <,0001	-0,1686 0,0005	-0,0972 0,0468	<u>0,7288</u> <,0001	-0,1174 0,0163
<b>PSI</b>	0,6982 <,0001	1,0000	<u>0,8781</u> <,0001	<u>-0,6186</u> <,0001	-0,3271 <,0001	-0,0895 0,0673	<u>0,9524</u> <,0001	-0,4603 <,0001
<b>pH</b>	0,6674 <,0001	0,8781 <,0001	1,0000	<u>-0,6509</u> <,0001	-0,1458 0,0028	-0,0312 0,5239	<u>0,8834</u> <,0001	-0,3545 <,0001
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	-0,4139 <,0001	-0,6186 <,0001	-0,6509 <,0001	1,0000	0,1948 <,0001	-0,2318 <,0001	-0,5771 <,0001	0,5225 <,0001
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	-0,1686 0,0005	-0,3271 <,0001	-0,1458 0,0028	0,1948 <,0001	1,00000	0,0392 0,4235	-0,1819 0,0002	0,1581 0,0012
<b>K<sup>+</sup></b>	-0,0972 0,0468	-0,0895 0,0673	-0,0312 0,5239	-0,2318 <,0001	0,0392 0,4235	1,0000	-0,0690 0,1587	0,1037 0,0339
<b>Na<sup>+</sup></b>	0,7288 <,0001	0,9524 <,0001	0,8834 <,0001	<u>-0,5771</u> <,0001	-0,1819 0,0002	-0,0690 0,1587	1,0000	-0,260 <,0001
<b>CIC</b>	-0,1174 0,0163	-0,4603 <,0001	-0,3545 <,0001	0,5225 <,0001	0,1581 0,0012	0,1037 0,0339	-0,2608 <,0001	1,0000

## ESTUDIOS DE VEGETACIÓN

Los censos realizados en el lugar de estudio permitieron caracterizar la vegetación asociada a los parámetros de suelos, cuyo patrón de variabilidad espacial se estudió. Las especies totales presentes en el inventario son 37, agrupadas en 9 familias. Las familias más numerosas fueron Poaceae con 20 especies, seguida por Asteraceae y Apiaceae. En la lista de especies están representados diferentes Tipos Funcionales de Planta (TFPs); las gramíneas perennes constituyen el grupo más numeroso (54 %), seguido por las hierbas perennes (29,7 %), las hierbas anuales (8 %) junto a los graminoides (8 %), y por último las gramíneas anuales (2,7 %). En cuanto al ciclo de vida, el 89,1 % de las especies fueron perennes y el 10,9 % restante fueron anuales. De

las gramíneas y gramínoideas el 69,56 % utiliza la ruta fotosintética C4, y son perennes casi en su totalidad. Las dicotiledóneas, llamadas también hierbas, son C3 y predominantemente perennes. Para su agrupación y caracterización (Rossi *et al.*, 2014; Roitman y Preliasco, 2012) se confeccionó un cuadro de inventario (Tabla 13).

Tabla 13. Lista de especies censadas.

Especie		Fam	D	C	VF
NC	NV				
<i>Amphibromus scabrivalvis</i>	Cebadilla de agua	Poáceas	P	OIP	C3
<i>Bothriocloa laguroides</i>	Pastito de plata	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Polypogon elongatus</i>	Pasto cheto	Poáceas	P	OIP	C4
<i>Polypogon s monPELLIENSIS</i>	Cola de zorro	Poáceas	P	OIP	C4
<i>Cynodon dactylon</i>	Gramón	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Distichlis scoparia</i>	Pasto salado	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Distichlis spicata</i>	Pelo de chancho	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Leersia hexandra</i>	Pastito de agua	Poáceas	P	OIP	C3
<i>Lolium multiflorum</i>	Raigras anual	Poáceas	A	OIP	C3
<i>Panicum gouinii</i>	Sorguillo	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Paspalidium paludivagum</i>	Pasto de cañada	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Paspalum dilatatum</i>	Pasto miel	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Paspalum distichum</i>	Pasto dulce	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Paspalum vaginatum</i>	Gramma alcalina	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Setaria geniculata</i>	Cola de zorro	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Setaria parviflora</i>	Cola de zorro	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Sporobolus indicus</i>	Pasto baqueta	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Stenotaphrum secundatum</i>	Gramillón	Poáceas	P	PVO	C4
<i>Stipa neesiana</i>	Flechilla	Poáceas	P	OIP	C3
<i>Stipa hialina</i>	Flechilla mansa	Poáceas	P	OIP	C3

## Graminoides

Especie		Fam	D	C	CF
NC	NV				
<i>Carex sp</i>	Pajilla	Ciperáceas	P	PVO	C3
<i>Cyperus sp.</i>	Cípero	Ciperáceas	P	PVO	C4
<i>Juncus sp</i>	Junco	Juncáceas	A	PVO	C3

## Dicotiledóneas

Especie		Fam	D	C	CF
NC	NV				
<i>Ambrosia tenuifolia</i>	Altamisa	Asteráceas	P	PVO	C3
<i>Apium leptophyllum</i>	Apio de hoja fina	Apiáceas	A	OIP	C3
<i>Aster squamatus</i>	Rama negra	Asteráceas	P	PVO	C3
<i>Dichondra repens</i>	Oreja de ratón	Convolvuláceas	P	PVO	C3
<i>Eclipta bellidiodes</i>	Margarita enana	Asteráceas	P	PVO	C3
<i>Eryngium ebracteatum</i>	Caraguatá	Apiáceas	P	PVO	C3
<i>Hydrocotyle bonariensis</i>	Redondita de agua	Apiáceas	P	PVO	C3
<i>Hypochoeris microcephala</i>	Achicoria salvaje	Asteráceas	P	PVO	C3
<i>Leontodom nudicaulis</i>	Chinilla	Asteráceas	P	PVO	C3
<i>Lepidium spicatum</i>	Mastuerzo	Brassicáceas	A	PVO	C3
<i>Lotus tenuis</i>	Trébol pié de pájaro	Leguminosas	P	OIP	C3
<i>Melilotus indicus</i>	Trébol de olor	Leguminosas	A	OIP	C3
<i>Phyla canescens</i>	Yerba del mosquito	Verbenáceas	P	PVO	C3
<i>Spilanthes stolonifera</i>	Zuma	Asteráceas	P	PVO	C3

NC nombre científico, NV nombre vulgar, Fam familia, D duración, A anual, P perenne, C ciclo, OIP Otoño invierno primavera, PVO primavera verano otoño VF vía fotosintética, C3 carbono 3, C4 carbono 4

## RELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES DE SUELO Y LA VEGETACIÓN

Se realizó un análisis factorial de correspondencias múltiples, en el que se consideró a las 32 especies censadas (se agruparon algunas especies, que se describen en el inventario Tabla 13) como variables activas, relevadas sobre los 30 puntos censales, y las determinaciones de suelos (pH, CE, CIC,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ , CIC y PSI) y los ejes de coordenadas (X, Y) como variables suplementarias. A partir de este análisis, considerando los primeros 10 ejes factoriales, se realizó una clasificación jerárquica de Ward, obteniéndose cuatro agrupamientos o “clusters” como puede observarse en el dendrograma (Fig. 3.44) y en el primer plano factorial (Fig. 3.45).

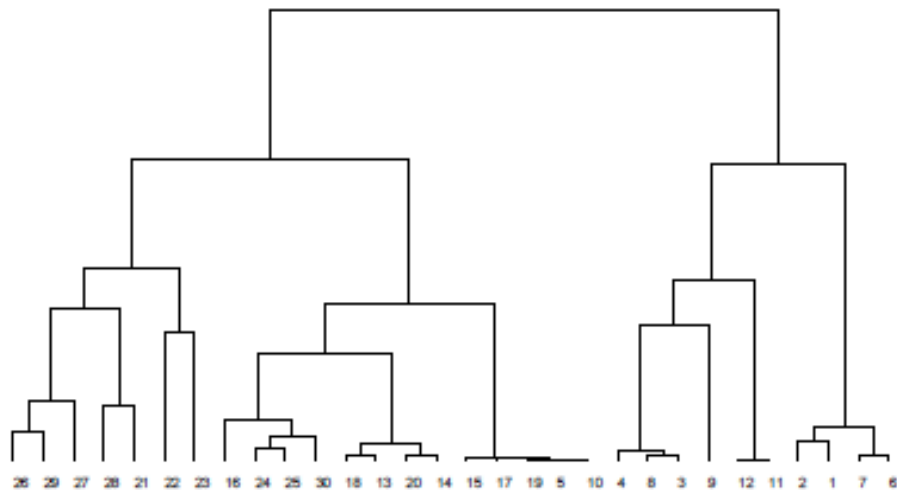


Fig. 3.44. Dendrograma del análisis de agrupamiento que muestra las relaciones jerárquicas entre los 30 sitios censales.

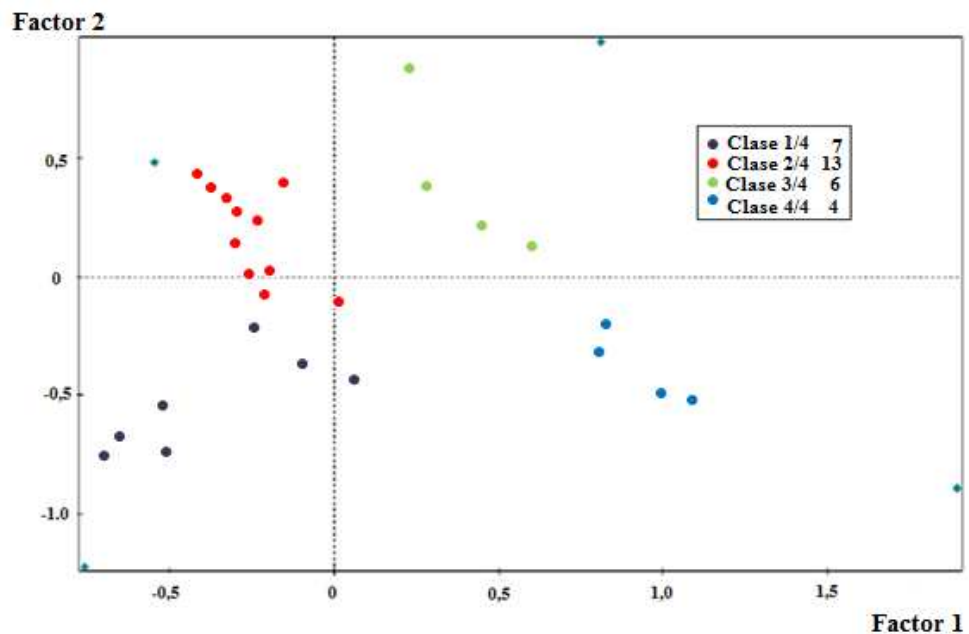


Fig. 3.45. Primer plano factorial del análisis de correspondencia de los 30 sitios censales.

A partir del análisis factorial de correspondencias múltiples, y con los valores de abundancia y la localización (coordenadas X, Y) de las especies que caracterizan cada uno de los “clusters”, se realizó un mapa de contorno (Surfer v. 9, *Golden Software*, 2010) para analizar su representación espacial (Fig. 3.46).

Las modalidades significativas ( $p < 0,05$ ) que caracterizaron a cada uno de los grupos, se indican a continuación:

**Grupo 1:** lo integran 7 puntos censales (23,33 %), que se caracterizan por presentar una abundancia de *Amphibromus scabrivalvis* y *Leersia hexandra* menor al 5% y que representan el 100% de la recolección de estas especies; mientras que de *Panicum gouinii*, las *Graminoides* y *Paspalidium palidivagatum* la abundancia está entre 5 y 25 %, las dos primeras representan el 100 % de esta modalidad, y la última, el 80 %; los valores de  $\text{Ca}^{2+}$  se encuentran entre  $12,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  y  $15,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$

correspondiendo al 80 % y la CIC entre  $30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  y  $35 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ ; el 100 % de los valores registrados se observan para un valor de coordenada Y=5.

El grupo florístico 1 (Fig. 3.46 a), está presente en la parte Sur del área de estudio, la más baja topográficamente, con cotas menores a 9 m. Las partes más cóncavas del relieve en consecuencia serán las más húmedas, concordando con la afinidad de las especies indicadoras del grupo, como *Leersia hexandra*, *Paspalidium paludivagum*, *Panicum gouinii*, especies características de ambientes muy húmedos (Burkart *et al.*, 2005). Este agrupamiento corresponde a la comunidad C de suelos hidromórficos no salinos (Batista y León, 1992) o Pradera húmeda de mesófitas (Burkart *et al.*, 2005).

En esta fracción se encuentran los más altos valores de  $\text{Ca}^{2+}$ , mayores a  $12,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , (Fig. 3.34) y los valores más altos de CIC (Fig. 3.38). Se observa que los valores de abundancia aumentan de 1 a 5 en sentido N-S. Si bien no se han efectuado evaluaciones del contenido de materia orgánica del suelo (MOS), puesto que la CIC, es una propiedad química del suelo estrechamente vinculada a su fertilidad, dado que depende de los coloides inorgánicos (arcillas cristalinas, geles amorfos, óxidos y sesquióxidos de hierro y aluminio) y del contenido de MOS (Martínez *et al.*, 2008), podemos deducir que mayores valores de CIC se asocian a mayores valores de MOS. Un suelo con alto CIC indica alta habilidad de retener nutrientes, alta fertilidad asociado a textura fina y abundante MOS.

Además, el hecho que en esta área el catión  $\text{Ca}^{2+}$  domine el complejo de intercambio, va a determinar que predominen los valores de pH neutros, tal cual se refleja en la Fig. 3.32.

**Grupo 2:** es el más numeroso, está integrado por 13 puntos censales (43,33 %). Las *Graminoides*, con una abundancia menor al 5 % son una característica de la clase 2. Las especies *Hipochaeris microcephala*, *Polypogon monPELLIENSIS*, *Ambrosia tenuifolia* y *Lepidium spicatum* también tienen una abundancia menor al 5 %, pero representan el 100% de la recolección total de estas especies; mientras que *Distichlis spicata* que tiene



una abundancia de entre el 50 al 75 %, se presenta solo en esta clase. Por otra parte, se observa la ausencia de las especies: *Cynodon dactylon*, *Paspalum dilatatum*, *Bothriocloa laguroides*, *Stenotaphrum secundatum* y *Apium sp*, la mayoría de estas especies corresponden a la Pradera de Mesófitas.

Corresponde a los valores más elevados de pH (entre 8,54 y 9,85), de Na (entre 5,27 y 6,7) y representan el 100 % de los valores más altos; Se detectaron valores de PSI entre 19,0 y 24,3; para las coordenadas X=85 e Y=45, observadas en la grilla.

La distribución del grupo florístico 2 (Fig. 3.46 b) corresponde a los valores más elevados de pH, mayores a 8,5 (Fig. 3.32), de Na<sup>+</sup> y por lo tanto de PSI, mayores a 19 % (Fig. 3.39), representado en la zona central y Este del área de estudio, siguiendo el mismo gradiente los valores de estas características del suelo que la abundancia del grupo, es decir en sentido NE-SO.

La presencia de *Distichlis spicata* y *Distichlis scoparia* coincide con las descripciones de la estepa halófila de la subregión, así como la de *Ambrosia tenuifolia*, y *Lepidium spicatum*, y corresponde al agrupamiento de la comunidad D de suelos hidromórficos salino-alcálinos (Burkart *et al.*, 1990), o Estepa de halófitas (Burkart *et al.*, 2005), por conformar una comunidad que tolera altos índices de Na<sup>+</sup>, presente en suelos alcalinos, con alto PSI incluso en el horizonte superficial.

**Grupo 3:** 6 puntos muestrales (20 %) integran este agrupamiento (Fig. 3.46 c). Se caracteriza por presentar *Paspalum dilatatum* y *Apium leptophyllum* con porcentajes de abundancia menores al 5%, encontrándose el 100% de los individuos de *Paspalum dilatatum* de este porcentaje de abundancia, en esta clase. Por otra parte, *Cynodon dactylon* se observa con una abundancia de entre 5 y 25 %.

Estas especies se relacionan con las comunidades de especies de pradera de Mesófitas (Burkart *et al.*, 2005), si bien también pueden presentarse en otras comunidades. La bibliografía indica además que el *Paspalum dilatatum* es una especie

muy numerosa en los pastizales de la Pampa Deprimida con una alta tolerancia al pastoreo y la inundación (Loreti *et al.*, 1994).

**Grupo 4:** está integrado por 4 puntos censales (13,33 %), siendo el grupo menos numeroso. Se observa la presencia de las siguientes especies: *Leontodom nudicaulis* (los 4 individuos son de abundancia 1); *Lolium multiflorum* y *Polypogon elongatus* (todos los de abundancia 1 -menos del 5%- están en esta clase); *Cynodon dactylon* y *Stenotaphrum secundatum* (todos los individuos de esta clase son de abundancia 1); y *Bothriocloa laguroides* con una abundancia menor al 5 %. En esta clase no se observan *Graminoides*, los que siguen la distribución espacial de los valores de pH, encontrando la mayor abundancia donde se encuentran pH ácidos (de 5,82 a 6,34) y valores de CE de 0,62 a 0,9 dS m<sup>-1</sup> (Fig. 3.33), pero en relieve positivo a diferencia del patrón y especies del grupo 1, relacionados con las posiciones más bajas.

Este grupo (Fig. 3.46 d) se corresponde con los suelos sin alcalinidad ni salinidad, de relieve positivo donde no hay exceso de agua, situado en el sector NO, en coincidencia con las cotas más altas, que también son los que ocupan la menor superficie del área de estudio, no presenta especies características de las comunidades C y D (Batista y León, 1992) representativas de suelos hidromórficos. El grupo florístico 4 se asocia a la Pradera de Mesófitas descrita por Burkart *et al.* (2005), y coincide con las especies descritas en la Comunidad A (Batista y León, 1992) su distribución en abundancia tiene un gradiente NO-SE.

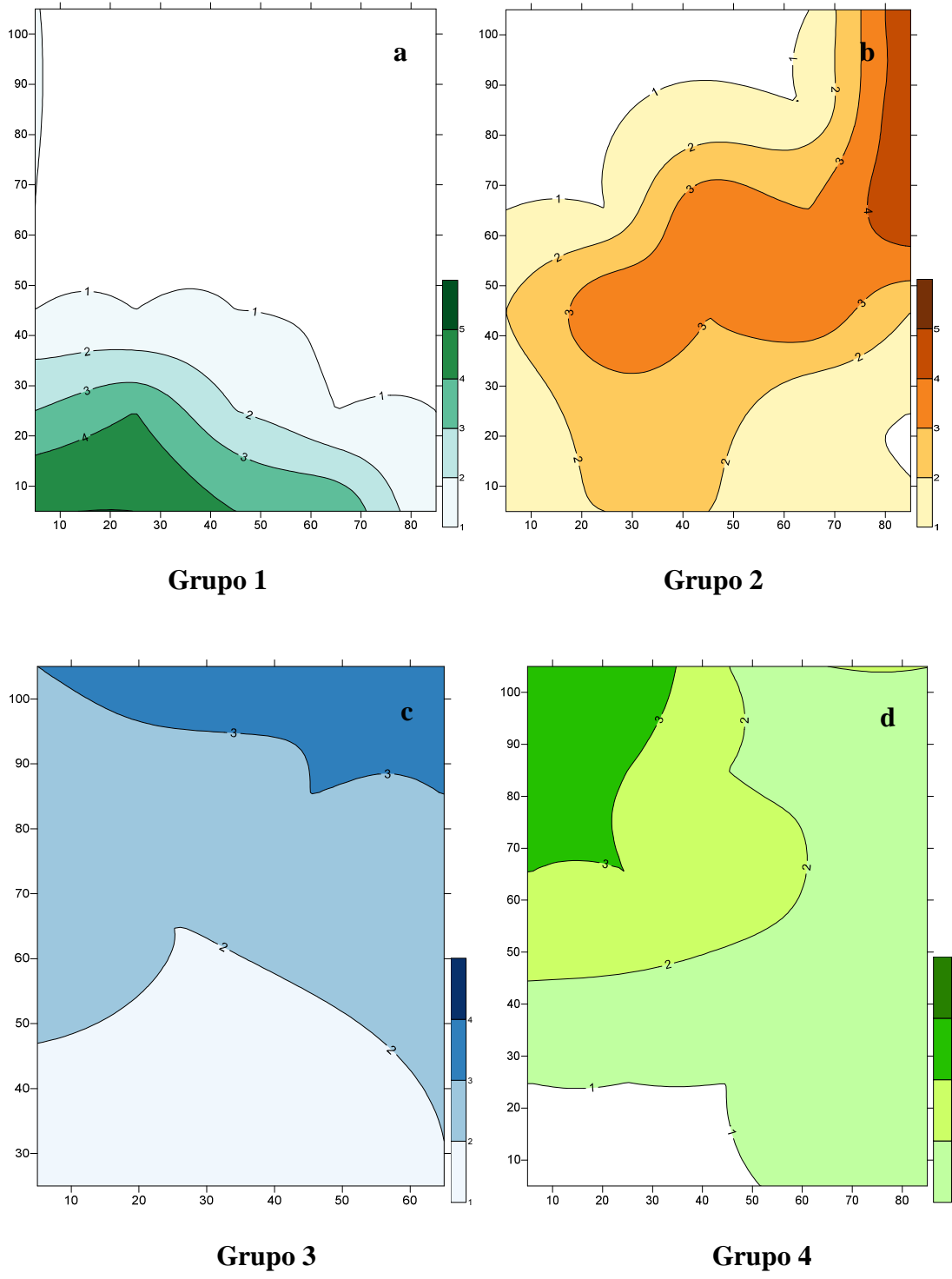


Fig. 3.46. Mapa de contorno *kriging* para Grupos florísticos. Grupo 1 (a), grupo 2 (b), grupo 3 (c) y grupo 4 (c).

El aporte de la clasificación realizada permite obtener un ordenamiento para comprender mejor las relaciones entre las variables del suelo analizadas y los grupos florísticos encontrados.

Si bien el área que abarca el estudio es reducida, y fue realizado a escala de detalle, los numerosos trabajos fitosociológicos en la subregión afirman que en buena medida la heterogeneidad florística de escala regional es simplemente una repetición sucesiva del patrón de heterogeneidad que aparece en distancias cortas (Perelman *et al.*, 2001). De este modo, este tipo de caracterizaciones son un aporte para utilizar a la vegetación como indicadora del ambiente.

Se observa que las características del ambiente relacionadas con la humedad y con la salinidad de los suelos son los principales controles de la heterogeneidad del pastizal de la Pampa Deprimida (Perelman *et al.*, 1982; Batista *et al.*, 1988; Perelman *et al.*, 2001). A lo largo de esos gradientes, varían la estructura, la composición florística, la diversidad y la productividad del pastizal.

Coincidiendo con Lezama *et al.* (2006) el gradiente florístico y funcional de la vegetación de pastizal, se asocia a la influencia local de las propiedades edáficas a las que se agregan los efectos de la macro y microtopografía en la redistribución del agua en el paisaje.

### CONCLUSIONES

El conocimiento de la variabilidad espacial de los suelos y su vinculación con los patrones de vegetación, resultan una herramienta para caracterizar los recursos y realizar su manejo adecuado. Esto es así en especial en los ambientes planos e hidromórficos de la Pampa Deprimida, dominados por complejos de suelos donde la producción básicamente se basa en el pastizal natural.

El presente trabajo permitió caracterizar y conocer la variabilidad de atributos del suelo ligados a la salinidad y alcalinidad, propiedades determinantes del rendimiento y de las características de las comunidades vegetales que soporta.

La aplicación de herramientas geoestadísticas es adecuada para analizar la variación espacial de los atributos estudiados y el programa Variowin resulta versátil, en combinación con el Surfer, a fin de obtener mapas de isolíneas, de gran utilidad para la representación cartográfica.

Los semivariogramas dependientes de la dirección poseen un carácter anisotrópico en todas las variables, a excepción de  $K^+$ . Esta anisotropía leve es zonal en pH, CE,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Na^+$  debido a variaciones en el umbral, al estudiar las diferentes direcciones. Las variables CIC y PSI tienen anisotropía híbrida. Las variables analizadas manifiestan dependencia espacial en la escala de muestreo utilizada. Los modelos teóricos, gaussiano y esférico brindan el mejor ajuste en las variables estudiadas.

De acuerdo con los valores de rango o amplitud de los modelos de semivarianza ajustados, existe mayor dependencia espacial en las variables pH, CE,  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ , PSI (rangos mayores a 50 m) que en  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  y CIC (rangos menores a 50 m). Estas últimas se pueden considerar de rango corto.

El análisis geoestadístico de los datos evidencia una fuerte correlación o dependencia espacial. Los ajustes muestran que los semivariogramas tienen un *nugget* 0 para PSI, CIC, Ca<sup>2+</sup> y K<sup>+</sup>, la relación *nugget/sill* en Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, CE y pH es muy baja, menor al 25 % indicando fuerte dependencia espacial.

Los valores bajos de *nugget* indican que el intervalo de muestreo es adecuado para reflejar la variación y que las predicciones obtenidas por el método *kriging* son confiables.

Los resultados obtenidos en este estudio permiten afirmar que, en suelos con unidades cartográficas de tipo complejo, la representación en mapas con empleo de interpolador *kriging* ordinario, en base a modelos geoestadísticos, permite obtener una visión detallada del gradiente de variación de las propiedades del suelo en el paisaje.

Los mapas de contorno de las predicciones *kriging* de PSI, pH y CE muestran mayor semejanza, lo que también puede observarse en el valor de correlación entre estas variables. Ello se manifiesta en forma inversa entre dichas variables y Ca<sup>2+</sup>.

El análisis factorial de correspondencias múltiples, realizó una clasificación jerárquica obteniéndose cuatro agrupamientos o “clusters”. Los agrupamientos obtenidos manifiestan relaciones entre las especies del pastizal y los suelos a través de las variables estudiadas, e indirectamente con su fisiografía.

Uno de los agrupamientos posee especies características de ambientes muy húmedos, no salinos ni alcalinos (Pradera húmeda de mesófitas), coincidiendo con los valores más altos de CIC y Ca<sup>2+</sup>, en suelos situados en las cotas más bajas. Especies indicadoras del grupo son *Leersia hexandra*, *Paspalidium paludivagum* y *Panicum gouinii*.

El agrupamiento de especies más numeroso posee abundancia de *Distichlis spicata* y *Distichlis scoparia* (Estepa de halófitas) y ausencia de especies características

de la Pradera de Mesófitas. Corresponde a valores de pH mayores a 8,5, altos valores de  $\text{Na}^+$  y PSI mayor a 19 %, abarca la zona central y E del área de estudio, siguiendo el mismo gradiente los valores de estas características del suelo que la abundancia del grupo, es decir en sentido NE-SO.

Los suelos sin alcalinidad ni salinidad de relieve positivo donde no hay exceso de agua se sitúan en el sector NO, coincidiendo con las cotas más altas; son los menos representativos del área de estudio ya que no presentan especies características de las comunidades C y D propias de suelos hidromórficos. El grupo florístico correspondiente se asocia a la Pradera de Mesófitas y su distribución en abundancia tiene un gradiente NO-SE.

Para finalizar, en base a los resultados obtenidos en este trabajo cabe destacar que es interesante orientar futuras líneas de investigación al análisis de la variabilidad espacial de otros atributos edáficos determinantes en la producción y calidad de los pastizales naturales y también analizar su variación temporal, que expresen los distintos grados de hidromorfismo, como presencia y abundancia de moteados, concreciones, color del horizonte, altura de la napa freática, etc., abarcando inclusive horizontes subsuperficiales.

También será factible aplicar estos conocimientos para recomendaciones de muestreo, o al empleo de agricultura de precisión en suelos con aptitud agrícola, mediante el empleo de las herramientas geoestadísticas estudiadas.

Así, continuar con los estudios en esta área mediante el auxilio de técnicas propias de la geoestadística multivariada, puede ser una línea que complemente los estudios realizados.

Las nuevas tecnologías SIG, teledetección y DEM, así como el desarrollo de novedosas herramientas geoestadísticas han incrementado en gran medida nuestra capacidad para analizar gran número de datos y, de esta forma, analizar la variabilidad de los suelos, e incluso cartografiarla con gran detalle y versatilidad.

La vinculación de esta información con las propiedades del suelo y los procesos formadores, el microrrelieve y el manejo, es aún un desafío y se necesitan modelos complejos y un análisis más interdisciplinario y profundo.



### BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abasov M.T., Djafarov I.S. y Askerov G.I. 1990. Computer Based System for Exploration, Optimization, and Reserve Estimation at the Bakhar Field, South Apsheron, Azerbaijan, SSR, Computers & Geosciences, Vol. 16, No. 2, pp. 245-249.
- Allen R.B., Mcintosh P.D. y Wilson, J.B. 1997. The distribution of plants in relation to pH and salinity on inland saline/alkaline soils in Central Otago, New Zealand. *New Zealand Journal of Botany*, 35, 517-523.
- Armstrong M. y Carignan J. 1997. Géostatistique Linéaire, Application au Domaine Minier. École de Mines de Paris, 112 p.
- Batista W.B. y León R.J.C. 1992. Asociación entre comunidades vegetales y algunas propiedades del suelo en el centro de la Depresión del Salado. *Ecología Austral* 2: (4), 41- 55.
- Batista W.B., León R.J.C. y Perelman S.B. 1988. Las comunidades vegetales de un pastizal natural de la Región de Laprida, Prov. de Buenos Aires, Argentina. *Phytocoenologia* 16: 465-480.
- Batista W.B., Taboada M.A., Lavado R.S., Perelman S. B. y León R. J. C. 2005. Asociación entre comunidades vegetales y suelos en el pastizal de la Pampa Deprimida. pp. 113-129. En: M. Oesterheld, M. Aguiar, C. Ghersa y J. Paruelo, editores. La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando J. C. León. Editorial Facultad de Agronomía, UBA, Buenos Aires, Argentina.
- Berasategui L.A. y Barberis L.A. 1982. Los suelos de las comunidades vegetales de la región de Castelli- Pila, Depresión del Salado. *Rev. Facultad de Agronomía*, 3 (1), 13-25.
- Bosch Mayol M., Costa J.L., Cabria F.N. y Aparicio V.C. 2012. Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del suelo*, 30(2), 95-105.
- Braun-Blanquet J. 1979. Fitosociología. Bases para el estudio de las comunidades vegetales [ed. 3]. H. Blume Ediciones, Barcelona. 820p.
- Bruland G.L. y Richardson C.J. 2005. Spatial Variability of Soil Properties in Created, Restored, and Paired Natural Wetlands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:273–284.
- Bruland G.L., Grunwald S., Osborne T.Z., Reddy K.R. y Newman S. 2006. Spatial Distribution of Soil Properties in Water Conservation Area 3 of the Everglades. *Soil Sci Soc Am J* 70:1662-1676.
- Burgess T.M. y Webster R. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. *J. Soil Sci.* 31: 315-331.
- Burkart S.E., León R.J.C. y Movia C.P. 1990. Inventario Fitosociológico del Pastizal de la Depresión del Salado (Prov. Bs. As.) en un área representativa de sus principales ambientes. *Darwiniana* 30: 27-69.
- Burkart S.R.E., Garbulsky M.F., Ghersa C.M., Guerschman J.P., León R.J.C., Oesterheld M., Paruelo J.M. y Perelman S.B. (ex aequo) 2005. Las comunidades potenciales del pastizal pampeano bonaerense. In: M. Oesterheld, M. Aguiar, C. Ghersa y J. Paruelo

- (eds.). La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando León. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 472 pp.
- Burrough P.A. 1991. Sampling designs for quantifying map unit composition. In: *Spatial Variabilities of Soils and Landforms*, SSSA Special Publication Number 28, Madison, Wisconsin: Soil Science Society of America, Inc. pp. 89-125.
- Burrough P.A., Bouma J. y Yates S.R. 1994. The state of the art in pedometrics. *Geoderma*, 62, Elsevier Science B.V., Amsterdam. pp.311-326.
- Bushnell T.M. 1942. Some aspects of the soil catena concept. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 7:466–476.
- Cambardella C.A., Moorman T.B., Novak J.M., Parkin T.B., Karlen D.L., Turco R.F. y Konopka A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1501-1511. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Campbell J.B. 1978. Spatial variation of sand content and pH within single contiguous delineations of two soil mapping units. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 42:460-464.
- Carr J.R. 1995. *Numerical Analysis for the Geological Sciences*, Prentice Hall Inc, 592 p.
- Carter B.J. y Ciolkosz E.J. 1991. Slope gradient and aspect effects on soils developed from sandstone in Pennsylvania. *Geoderma*, 49:199-213.
- Ceddia M.B., Vieira S.R., Villela A.L.O., Mota L.S., Anjos L.H.C. y Carvalho D.F. 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Sci. Agr.* 66(3): 338-352.
- Chilès J.P. y Delfiner P. 1999. *Geoestadistics. Modeling Spatial Uncertainty*. John Wiley & Sons. New York.
- Coheris Spad. 2007. SPAD [programa informático]. URL: <http://spadsoft.com/>
- Córdoba M.A. 2014. Herramientas estadísticas para el monitoreo y uso de la variabilidad espacial del rendimiento y propiedades de suelo intralote. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina, 184 pp.
- Cressie N. 1989. *Geostatistics. The American Statistician.* 43(4): 611(23).
- Cressie N. y Majure M.M. 1995. Non-Point Source Pollution of Surface Waters over a Watershed. Programme Abstracts of the third SPRUCE International Conference. Merida, Mexico.
- Dan J. y Yaalon D.H. 1968. Pedomorphic forms and pedomorphic surfaces. In 9th Int. Congress Soil Science Trans., IV. J.W. Holmes (ed.), Adelaide, Australia. Halstead Press, Sidney, Australia. pp. 577–584.
- Daniels R.B. y Hammer R.D. 1992. *Soil geomorphology*. John Wiley & Sons, New York. pp. 236.
- Daniels R.B., Gamble E.E. y Cady J.G. 1971. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. *Adv Agron.* 23:51-88.
- Davis W.M. 1899. The Geographical Cycle Source. *The Geographical Journal*, Vol. 14, No. 5 p. 481-504. <http://www.jstor.org/stable/1774538>
- de Fouquet C. 1996. Quelques Rappels Sur les Méthodes Géostatistiques, Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, France, 4 p.
- Debelis S.P., Aulicino M.B., Gagey M.C., Bozzo A.A., Barrios M.B. y Buján A. 2008. Asociación espacial entre atributos del suelo y paisaje en ambientes plano cóncavos. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Potrero de los Funes, San Luis. CD. ISBN: 978-987-21419-9-8.
- Debelis S.P., Bozzo A.A., Barrios M.B. y Buján A. 2005. The relationship between soil characteristics and vegetation as a function of landform position in an area of the Flooding Pampa. *Span J Agric Res* 3(2), 232-242.

- Debelis S.P., Pereyra A.M., Barrios M.B., Gagey M.C. y Buján A. 2012. Comportamiento del interpolador kriging en el patrón de variación de materia orgánica. XIX Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- Debelis S.P., Pereyra A.M., Gagey M.C., Barrios M.B., Buján A., y Bozzo A.A. 2010. Análisis geoestadístico en el estudio de suelos situados en paisajes plano-cóncavos. III SEEMI – Simpósio em Estatística Espacial e Modelagem de Imagens. Foz de Iguazú. CD, Brasil.
- Debelis S.P., Pereyra A.M., Gagey M.C., Buján A. y Barrios M.B. 2009. Utilización del programa SAS en geoestadística”. XIV Reunión Científica del Grupo Argentino de Biometría. Trelew, Chubut. Resumen de trabajo editado en CD.
- Demmers, M.N. 1999. Fundamentals of geographic information systems. 2ed. Wiley. 498 p.
- Deutsch C.V. y Journel A. G. 1992. GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, New York.
- Díaz Francés E. 1993. Introducción a Conceptos Básicos de Geoestadística. Memorias Seminario Estadística y Medio Ambiente. Centro de Investigación en Matemáticas, CIMAT. Guanajuato, México.
- Díaz Viera M.A. 2002. Geoestadística aplicada. Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba, La Habana, Cuba.
- Diggle P., Harper L. y Simon S. 1995. Geoestatistical Analysis of Residual Contamination from Nuclear Weapons Testing. Programme Abstracts of the third SPRUCE International Conference. Merida, Mexico.
- Fernández Aguirre K., Landaluce, Calvo M.I. y Modroño Herrán J.I. 2013. Nuevo procedimiento metodológico para el análisis exploratorio de una tabla estructurada en diversos conjuntos de individuos. Estadística Española. Volumen 55 número 182, pp. 305-322.
- Fiedler S. y Sommer M. 2004. Water and Redox Conditions in Wetland Soils—Their Influence on Pedogenic Oxides and Morphology. Soil Sci. Soc. Am. J. 68:326–335.
- Frolla F.D., Zilio, J.P. y Kruger, H. 2015. Variabilidad espacial de la profundidad del suelo. Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense. RIA / Vol. 41 / N.º 3, pp 309-316.
- Gallardo A. 2006. Geoestadística. Ecosistemas 15 (3): 48-58.
- Gallichand J., Buckland G.D., Marcotte D. y Hendry M.J. 1992. Spatial interpolation of soil salinity and sodicity for a saline soil in Southern Alberta. Can. J. Soil Sci. 72:503-516.
- Gaston L.A., Locke M.A., Zablutowicz R.M., y Reddy K.N. 2001. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi delta. Soil Sci. Soc. Am. J. 65:449–459.
- Gili A., Balzarini M. y Buschiazzi D. 2010. Variabilidad espacial de parámetros edáficos en distintos sistemas de labranza. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario, Argentina.
- Ginzo Villamayor M.J. 2014. Análisis Geoestadístico de datos funcionales. Proyecto Fin de Máster - Máster en Técnicas Estadística. Universidad de Santiago de Compostela-España. 114 p.
- Giraldo Henao R. 1997. Introducción a la geoestadística. Teoría y aplicación. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Departamento de Estadística. 94 p
- Golden Software. 2010. Surfer version 9. Surface Mapping System. Golden Software Inc., Colorado, EE.UU.

- Goovaerts P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89 1–45.
- Habecker M., AMcSweeney K. y Meyers N.L. 1990. Variability of a fragiochreot with windthrow microtopography in North Central Wisconsin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:483-488.
- Hall G. 1983. Pedology and geomorphology In L.P. Wilding, N.E. Smeck, G.F. Hall. *Pedogenesis and Soil Taxonomy: Concepts and interactions*. Vol 1. Elsevier, Amsterdam. 303 páginas
- Hall G.F. y Olson C.G. 1991. Predicting variability of soils from landscape models. SSSA. Special publication Number 28. pp 9 -24.
- Hamlett J.M., Horton R. y Cressie A.C. 1986. Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50:868-875.
- Hein N.E., Hein W.I.H. y Quaino O.R. 1989. Características de los complejos de suelos de la parte central de Santa Fe. *Ciencia del Suelo* 7(1-2): 97-102.
- Homand-Etienne F., Belen T., Sabbadini S., Shtuka A. y Royer J.J. 1995. Analysis of the evolution of Rock Joints Morphology with 2-D autocorrelation (Variomaps), Application of Statistics and Probability, Lemaire, Favre and Mébarki (eds.), Balkema Rotterdam, pp. 1229-1236.
- Huggett R. J. 1975. Soil landscape systems: a model of soil genesis. *Geoderma*, 13: 1-22.
- Imbellone P.A., Giménez J.E., Panigatti J.L. 2010. Suelos de la Región Pampeana: Procesos de Formación. Ed. INTA. Buenos Aires. 320 pp.
- INTA. 1989. Carta de Suelos. Hoja 3557- 32. Monasterio. República Argentina. [http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/3557/M\\_J\\_Cobo/3557-32-1.htm](http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/3557/M_J_Cobo/3557-32-1.htm).
- Isaaks E. y Srivastava R.M. 1989. *Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Isaaks E.H. 1999. SAGE2001. A Spatial and Geostatistical Environment for Variography, San Mateo, California, <http://www.isaaks.com>, 67 pp.
- Jenny H. 1941. Factors of soil formation. A system of quantitative pedology. McGraw Hill Book Company, New York, USA, 281pp.
- Journel A.G. y Huijbregts C.J. 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Oress, London.
- Juan P., Mateu J., Jordan M.M., Mataix-Solera J., Meléndez-Pastor I. y Navarro Pedreño J. 2011. Geostatistical methods to identify and map spatial variations of soil salinity. *Journal of Geochemical Exploration* 108 (2011) 62–72.
- Kabrick J.M., Clayton M.K y McSweeney K. 1997. Spatial patterns of Carbon and Texture on Drumlins in Northeastern Wisconsin. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:541-548.
- Kerry R. y M.A. Oliver. 2005 The Effect of Parent Material and Topography on the Scale of Variation in Soil Properties. *Pedometrics* 2005. September 12-14. Naples, FL, USA. pp. 39-40.
- King L.C. 1942. *South African Scenery*. Edinburgh: Oliver & Boyd.
- Kolasa J. y Pickett S.T.A. 1991. *Ecological heterogeneity*. Springer Verlag. New York.
- Krajewski S.A. y Gibbs B.L. 1993. A Variogram primer, Tutorial on the basics of using variograms. Industrial Ergonomics, Inc. and Gibbs Associates, Special publication, No. 8, p. 20.
- Kravchenko A.N., Bollero G.A., Omonode R.A. y Bullock D.G. 2002. Quantitative Mapping of Soil Drainage Classes Using Topographical Data and Soil Electrical Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:235–243.
- Krige D.G. 1951. A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, 52: 119-139.

- Krige D.G. 1966. Two-dimensional weighted average trend surfaces for ore evaluation. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy* 66:13-38.
- Lauzon J.D., O'Halloran I.P., Fallow D.J., Von Bertoldi A.P. y Aspinall D. 2005. Spatial Variability of Soil Test Phosphorus, Potassium, and pH of Ontario Soils. *Agron. J.* 97:524-532.
- Lavado R.S., Sierra J.O. y Hashimoto P. 1996. Impact of grazing on soil nutrients in a Pampean grassland. *J. Range Manage.* 49~452-467.
- León R.J.C. y Burkart S.E. 1998. El pastizal de la Pampa Deprimida: estados alternativos. *Ecotropicos*, 11(2): p. 121-130.
- Levine E.R. y Knox R.G. 1994. A comprehensive framework for modeling soil genesis. pp 77-91. *Quantitative Modeling of soil Forming Processes*. SSSA Special Publication. Number 39. Soil Science Society of America, Inc. Madison USA.
- Lezama F., Altesor A., León R.J. y Paruelo J.M. 2006. Heterogeneidad de la vegetación en pastizales naturales de la región basáltica de Uruguay. *Ecol. austral* v.16 n.2
- Li J., Min Q. y Li W. 2014. Spatial Variability Analysis of Soil Nutrients Based on GIS and Geostatistics: A Case Study of Yisa Township, Yunnan, China [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 5(4): 348-355.
- Long G. 1968. Conceptions générales sur la cartographie biogéographique intégrée de la végétation et de son écologie. CNRS doc. 46. Centre d'études phytosociologiques et écologiques, Montpellier, France.
- Loreti J., Osterheld M. y León R.J.C. 1994. Efectos de la interacción del pastoreo y la inundación sobre *Paspalum dilatatum*, un pasto nativo de la Pampa Deprimida. *Ecología Austral* 4:49-58.
- Lyons J.B., Gorres J. H. y Amador J.A. 1998. Spatial and temporal variability of phosphorus retention in a riparian forest soil. *J. Environ Qual.* 27:895-903.
- Mallarino A.P. y Wittry D.J. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precis. Agric.* 5(2): 131-144.
- Martínez E.H, Fuentes J.P. y Acevedo E.H. 2008. Carbono Orgánico y Propiedades del Suelo. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 8(1), 68-96. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-27912008000100006>.
- Matheron G. 1962. *Traite de Geostatistique Appliquee*, Tome I. *Memoires bureau de Recherches Geologiques et Minieres*, N 24. Editions Bureau de Recherche et Minieres, Paris.
- Matheron G. 1965. *Les variable régionaliseés et leur estimation*. Masson et Cie., Paris, 305pp.
- Mc Bratney A.B. y Pringle M.J. 1999. Estimating average and proportional variogram of soil properties and their potential use in Precision Agriculture. *Precision Agric.* 1, 219-236.
- McBratney A.B. y Webster R. 1983. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *J. Soil Sci.* 135 (3): 177-183.
- McBratney A.B., Hart G.A. y McGarry D. 1991. The use of region partitioning to improve the representation of geostatistically mapped soil attributes. *Soil Sci.*, 42: 513-532.
- McBratney A.B., Odeh I. O.A., Bishop T.F., Dunbar M.S. y Shatar T.M. 2000. An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, pp 293-327.
- McBratney A.B., Webster R. y Burgess, T.M. 1981. The Design of Optimal Sampling Schemes for Local Estimation and Mapping of Regionalized Variables I. *Computers and Geosciences.* 7(4): 331-334.
- Mendía J.M. 1980. Contribución relativa de la fracción mineral y orgánica a la capacidad de intercambio catiónico en suelos de la Pampa Deprimida. *Actas 9a. Reunión Argentina de la Ciencia del Suelo, Paraná.* 1, 199-204.

- Miaczynski C.R.O. 1995. Los suelos hidromórficos e hidrohalomórficos de la Provincia de Buenos Aires. *Rev. Facultad de Agronomía*, 15(1):23-36.
- Milne G. 1935. Some suggested units of classification and mapping for East African soils. *Soil Res.* 4:183-198.
- Milne G. 1936. Normal erosion as a factor in soil profile development. *Nature*, 138: 548-549.
- Moreno F., Girón I.F. y Cabrera F. 2003. Variabilidad Espacial de Propiedades Hidráulicas y Elementos Traza en Suelos Afectados por el Vertido de Aznalcollar Sometidos a Recuperación. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo Vol. VI. J. Álvarez-Benedí y P. Marinero.*
- Mueller T.G., Pusuluri N.B., Mathias K.K., Cornelius P.L., Barnhisel R.I. y Shearer S.A. 2004. Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:2042-2047.
- Myers D.E. 1987. Optimization of Sampling Locations for Variogram Calculations. *Water Resources Research.* 23(3): 283(93).
- Nielsen D.R. 1998. *College on soil physics: Applied time series analysis and geostatistical methods*, International Center for Theoretical Physics, Italy.
- Ovalles F.A. y Collins M.E. 1988. Variability of Northeast Florida soils by principal component analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1430-1435.
- Pannatier Y. 1996. *Variowin. Software for Spatial data analysis in 2D.* Springer-Verlag New York.
- Paz A., Taboada M.T. y Gómez M.J. 1996. Spatial Variability in topsoil micronutrient contents in a one-hectare cropland plot. *Communications in soil science and plant analysis*, 27(3-4): 479-503.
- Penck W. 1924. *Die Morphologische Analyse: Ein kapitel der physikalischer geologie, Geographische Abhandlungen, 2 Reihe, Heft 2, Stuttgart.* Trad by H. Czech and K. Boswell: *Morphological Analysis of Landforms*, Macmillan, London.
- Peng G., Bing W, Guangpo G.y Guangcan Z. 2013. Spatial Distribution of Soil Organic Carbon and Total Nitrogen Based on GIS and Geostatistics in a Small Watershed in a Hilly Area of Northern China. *PLoS ONE* 8(12): e83592. doi:10.1371/journal.pone.0083592.
- Pennock D.J. y de Jong E. 1990. Regional and catenary variations in properties of Borolls of Southern Saskatchewan, Canada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54:1697-1701.
- Perelman S., León R.J.C. y Deregibus V.A. 1982. Aplicación de un método objetivo al estudio de las comunidades de pastizal de la Depresión del Salado (Provincia de Buenos Aires). *Revista Facultad de Agronomía de Buenos Aires* 3: 27-40.
- Perelman S.B., Batista W.B. y León R.J.C. 2005. El estudio de la heterogeneidad de la vegetación. *Fitosociología y técnicas relacionadas.* pp 321-350 en Oosterheld, M; Aguiar, MR; Ghersa, CM; Paruelo, JM, editores. *La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas. Un homenaje a Rolando León.* Editorial Facultad de Agronomía, Buenos Aires.
- Perelman S.B., León R.J.C. y Oosterheld M. 2001. Cross-scale vegetation patterns of Flooding Pampa grasslands. *Journal of Ecology* 89: 562-577.
- Petitgas P. 1996. Geostatistics and Their Applications to Fisheries Survey Data 5: 114-142. In: B. A. Megrey & E. Mosknes, (E). *Computers and Fisheries Research.* Chapman-Hall, Londres.
- Rang S., Cisneros J., Milanesio A., Gil H. y Degioanni A. 1999. Propuesta de Creación del Distrito de Ordenamiento Ambiental para el área sur de Laboulaye-Rosales-Leguizamón. Documento Técnico. CONICOR-ADESUR-UNRC. 60 pp.

- Rawlins B.G., Lark M R., O'Donnell K. E., Tye A.M. y Lister T.B. 2005. The Assessment of Point and Diffuse Soil Pollution from an Urban Geochemical Survey of Sheffield, England. *Pedometrics* 2005. September 12-14. Naples, FL, USA. Pp 72.
- Reese, R.E. y Moorhead K.K. 1996. Spatial characteristics of soil properties along an elevational gradient in a Carolina Bay Wetland. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1273-1277.
- Richardson J.L., Wilding L.P. y Daniels R.B. 1992. Recharge and discharge of groundwater in aquic conditions illustrated with flownet analysis. *Geoderma* 53, 67-78.
- Robertson G.P. 1987. Geostatistics in Ecology: Interpolating with Known Variance. *Ecology* 68(3): 744-748.
- Roitman G. y Preliasco P. 2012. Guía de reconocimiento de herbáceas de la Pampa deprimida: características para su manejo: buenas prácticas para una ganadería sustentable de pastizal: kit de extensión para las pampas y campos. Coordinado por F.O. Miñarro. - 1a ed. - Buenos Aires: Fund. Vida Silvestre Argentina; Aves Argentinas Aop. 128 p. ISBN 978-950-9427-28-0.
- Romero Fernández, M., Pita López, M.F. y Montesinos Aranda, S. 2013. “Aplicación de técnicas de teledetección y geostadística para la estimación del LAI en el ámbito de la agricultura de precisión en olivicultura”, *GeoFocus (Artículos)*, nº 13-1, p. 177-194. ISSN: 1578-5157.
- Rossi C.A., De Magistris A.A., González G.L., Carou N.E. y De Loof E.P. 2014. Plantas de interés ganadero de la región del bajo Delta del Paraná, Argentina. 1a ed. - Editorial UNLZ. Facultad de Ciencias Agrarias. E-Book. ISBN 978-987-45490-2-0
- Rubio G., Casasola G. y Lavado R.S. 1995. Adaptations and biomass production of two grasses in response to water logging and soil nutrient enrichment. *Oecologia* 102: 102-105.
- Ruhe R. V. 1956. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Sci.* 82:441-455
- Ruhe R. V. 1960. Elements of the soil landscape. *Trans. 7th Int. Congr. Soil Sci.* (Madison, WI) 4:165-169.
- SAGyP – INTA. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. 545 p., Buenos Aires.
- SAGyP – INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina. UNPD project. Arg-85/019, Buenos Aires. II Vol., 1.600 pp. 39 maps.
- SAMLA. 2004. Sistema de apoyo metodológico a los laboratorios de suelo, agua, vegetales y enmiendas orgánicas. 1ª ed. Bs As. Dirección de Agricultura. CD Rom. ISBN 987-9184-40-8.
- Samper F.J. y Carrera J. 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Schoeneberger P.J.; Wysocki D.A.; Benham E.C., y Broderson W.D. 1998. Field book for describing and sampling soils. Natural Resources Conservation Service, USDA, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Scoppa C.O y Di Giacomo R.M.S. 1985. Distribución y características de los suelos salinos y/o alcalinos en la Argentina. *IDIA- Mayo-Agosto*:49-60.
- Sichel H.S. 1947. An experimental and theoretical investigation of bias error in mine sampling with special reference to narrow gold reefs, *Trans. Inst. Min. Metall.*, 56, 103-443.
- Sichel H.S. 1949. Mine Valuation and Maximum Likelihood. Unpublished Master's Thesis, Univ. Witwatersrand.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys. Second Edition, United States Department of Agriculture Agriculture Handbook. Natural Resources Conservation Service Number 436.

- Taboada M.A. y Lavado R.S. 2008. Funcionamiento de suelos salino-sódicos. Actas XVI Congreso de Aapresid. Rosario, 12 al 15 de agosto de 2008
- Trangmar B.B., Yost R.S. y Uehara G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, 38:45-94.
- Tricart L.F. 1973. Geomorfología de la Pampa deprimida: Base de los estudios esdafológicos y agronómicos. INTA. Colección N° XII. Bs. As.
- Urban D.L., O'Neill R.V. y Shugart H.H.J. 1987. Landscape Ecology. A hierarchical perspective can help scientists understand spatial patterns. *Bioscience* 37: 119-127.
- USDA. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Agriculture Handbook No. 60 L.A. Richards, Ed. 160 p.
- Vaughan P.J., Lesch S.M., Corwin D.L. y Cone D.G. 1995. Water content effect on soil salinity prediction: a geostatistical study using cokriging. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59:1146–1156.
- Vázquez P., Masuelli S., Platzeck G. y Boolsen O. 2011. Recurrencia de anegamiento en la pampa deprimida, Provincia de Buenos Aires. Capítulo 2. En: R. Rivas; F. Carmona y D. Ocampo. 2011. Teledetección: Recientes aplicaciones en la Región Pampeana. Ed. Martín. 112 p.
- Vervoorst F.B. 1967. Las comunidades vegetales de la Depresión del Salado. La Vegetación de la República Argentina, Serie Fitogeográfica N° 7. Buenos Aires INTA. 259 p.
- Vieira S.R., Nielsen D.R. y Biggar J.W. 1982. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:1040-1048.
- Wackernagel H. 1995. *Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications.* Springer-Verlag, Berlín.
- Warrick A.W., Myers D.E. y Nielsen D.R. 1986. Geostatistical Methods Applied to Soil Science. *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods-Agronomy Monograph* 9: 53 - 81.
- Webster R. 1985. Quantitative Spatial Analysis of Soil in the field. *Adv. Soil Sci.*, 3: 1-70.
- Webster R. 1994. The development of pedometrics. *Geoderma* 62, 1–15 p.
- Webster R. y Nortcliff S. 1984. Improved estimation of micro nutrientes in hectare plots of the Sonning Series. *J. Soil Sci.*, 35: 667-672.
- Webster R., y Oliver M.A. 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*, 271 pp. Chichester: John Wiley & Sons.
- Webster, R. y Burgess T.M. 1984. Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions. *J. Soil Sci.*, 35: 127-140.
- Whittaker R.H. 1967. Gradient analysis of vegetation. *Biological Reviews* 42: 207-264.
- Whittaker R.H. 1972. Evolution and measurement of species diversity. *Taxon* 21: 213-251.
- Whittaker R.H. 1975. *Communities and ecosystems.* Mac Millan, New York. 383pp.
- Wilding L.P. 1994. Factors of soil formation: contributions to pedology. *Factors of Soil Formation: A Fiftieth Anniversary Retrospective.* SSSA Special Publication 33. Soil Science Society of America, Madison, WI, pp. 15–30.
- Wilding L.P. y Drees L.R. 1983. Spatial variability and pedology. p 83-116. *Pedogenesis and Soil Taxonomy: I. Concepts and interactions.* Elsevier Publ. Co. Amsterdam.
- Wu J., Norvell W.A., Hopkins D.G., Smith D.B., Ulmer M.G., y Welch R.M. 2003. Improved Prediction and Mapping of Soil Copper by Kriging with Auxiliary Data for Cation-Exchange Capacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67:919–927.
- Young F.J. y Hammer R.D. 2000. Soil–Landform Relationships on a Loess-Mantled Upland Landscape in Missouri. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1443–1454.
- Zhang R., Myers D.E. y Warrick A.W. 1992. Estimation of the spatial distribution of soil chemicals using pseudo-cross-variograms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56:1444–1452.