



Universidad Nacional de Córdoba
Facultad de Ciencias Agropecuarias
Escuela para Graduados



**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE
RENDIMIENTOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) Y SOJA
[*Glycine max* (L.) Merr.] Y DE LAS PROPIEDADES
DEL SUELO EN LAS CONDICIONES
EDAFOCLIMÁTICAS DE LA PAMPALLANA
SANTAFESINA**

Ing. Agr. Carlos Agustín Alesso

Tesis

Para optar al Grado Académico de
Doctor en Ciencias Agropecuarias

Córdoba, 2014

**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE
RENDIMIENTOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) Y SOJA [*Glycine
max* (L.) Merr.] Y DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN
LAS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS DE LA PAMPA
LLANA SANTAFESINA**

Ing. Agr. Carlos Agustín Alesso

Comisión Asesora de Tesis

Director: Ing. Agr. (MSc.) Miguel Á. Pilatti

Co-director: Dr. Mariano P. Grilli

Asesor: Dra. Silvia Imhoff

Tribunal Examinador

Dra. Silvia Imhoff

Dra. Susana Hang

Dr. Armando Brizuela

Presentación formal académica:

20 de Marzo 2014

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Universidad Nacional de Córdoba

AGRADECIMIENTOS

A los integrantes de la Comisión Asesora de Tesis quienes me orientaron en el desarrollo de este proyecto.

A mi director Miguel, por brindarme la posibilidad de volver como ex alumno a trabajar en mi Facultad incorporándome a su equipo de trabajo.

A mis compañeros de trabajo de la cátedra de Edafología y grupo Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias quienes colaboraron de una u otra forma con los trabajos de campo y procesamiento de muestras.

A mis compañeros y amigos de trabajo Maru, Celeste e Ignacio, con quienes transitamos esta etapa como becarios y estudiantes de posgrado, compartiendo nuestras inquietudes y colaborando mutuamente en nuestros trabajos de tesis.

Al Dr. Germán Bollero y su grupo de trabajo por brindarme la posibilidad de realizar una pasantía en el Departamento de Ciencia de Cultivos de la Universidad de Illinois (Urbana-Champaign, USA), así como también por constante predisposición para atender consultas y brindar consejos sobre distintos aspectos académicos.

A la Estancia La Pelada, por brindarme gentilmente la posibilidad de realizar este trabajo de tesis en su establecimiento así como su predisposición a brindar cualquier tipo de información.

A la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Litoral por darme la posibilidad de trabajar como docente continuando mi formación académica y crecimiento profesional.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas por otorgarme la beca de posgrado que hizo posible la realización de este doctorado.

DEDICATORIA

A Julia y Virginia

A mis padres María Elisa y Juan Carlos

A mi hermano Juan Martín y su esposa Natalia

A mis sobrinos Felipe, Federica y Francisco

A Cristi y Chuchú

RESUMEN

El conocimiento de la variabilidad espacial (VE) y temporal (VT) de los atributos de suelo (AS) y rendimiento (R) del cultivo dentro del lote son necesarios para la Agricultura de Precisión. En el centro de Santa Fe la información sobre estos aspectos es escasa, por ello el presente trabajo tuvo como objetivo generar información cuantitativa sobre la VE y VT de R y AS en un lote dominado por Argiudoles con secuencia de maíz-soja de cinco años y evaluar la delimitación de zonas homogéneas (ZH) en función de la información de los mapas de rendimiento (MR). Se observó variabilidad moderada en los R con un estructura espacial de corta distancia (20 a 30 m) consistente entre campañas y otra de mayor distancia pero variable a través del tiempo. La VT de cada sitio estuvo por debajo del umbral de inestabilidad temporal, no obstante, las correlaciones entre MR fueron inconsistentes y MR de una campaña no necesariamente permite predecir el comportamiento del cultivo siguiente. Por su parte, la variabilidad del carbono orgánico total (COT), Arena, Limo, Arcilla, densidad de suelo (Ds) y pH fue baja y moderada para fósforo (P), nitrógeno total (Nt), N de nitratos (N-NO₃), conductividad eléctrica (CE) e inicio del horizonte B. Aunque todos presentaron estructura espacial débil o nula a la escala observada. La CE aparente mostró fuerte estructura espacial a corta distancia (entre 20 y 30 m) con correlación débil a moderada con los AS. Se delinearon ZH mediante análisis de conglomerados y nivel y estabilidad de R resultando en ZH con distintos R medio y menor variación interna. Los patrones espaciales y el nivel de fragmentación de la ZH resultantes fueron diferentes según el método de zonificación. No se encontraron diferencias entre los AS de cada zona o fueron de escasa magnitud para sugerir estrategias de manejo diferenciadas. Se concluye que la aplicación del enfoque de ZH podría no ser efectiva debido a la fuerte estructura espacial de corta distancia observada tanto en los R como en los AS. Es necesario ampliar los estudios para abarcar otras condiciones experimentales incluyendo diferentes rotaciones de cultivos, relieve y heterogeneidad edáfica.

PALABRAS CLAVE: agricultura de precisión, geoestadística, zonas homogéneas, mapas de rendimiento

ABSTRACT

Precision Agriculture requires the quantification of within field spatial and temporal variability of soil properties and crop yields. For the edaphoclimatic conditions of the center of Santa Fe province this information is still somewhat limited. Therefore, the aim of this work was to obtain quantitative information about within field spatial and temporal variability of soil properties and crop yields of a field with Argiudolls being major soil type as well as to assess the delineation of yield based zones from a 5 years maize-soybean yield map sequence. Yield data showed moderate variability characterized by a short range spatial structure (about 20 and 30 m) which was consistent between seasons, and a mid-range structure variable between seasons. Temporal variation for each site within field was under temporal instability threshold. However, correlations between yield maps were inconsistent showing that a yield map for a particular year is not necessarily a good predictor of the yield of the next crop. With respect of soil properties, low variability was observed for total organic carbon (COT), sand, silt, clay, soil bulk density and pH whereas phosphorus, total nitrogen, nitrates, electrical conductivity and depth to B horizon showed moreate variability. However, all properties showed weak or null spatial structure at the sample scale used. Apparent soil electrical conductivity data showed strong spatial structure of short range (about 20 to 30 m) but correlations with soil properties were weak to moderate. Areas with different mean yields and less within variation were identified cluster analysis and spatial-temporal yield analysis from yield monitor data. The spatial patterns and level of fragmentation of these zones were variables between methods of delineation. No differences were detected between zones for the most of soil properties used to characterize those zones. Some properties exhibited differences between zones but their magnitude was negligible for management. In conclusion, regarding the short range spatial structure observed in yield maps and soil properties, the application of management zones approach under this conditions could be not effective. However, in order to generalize these conclusions, further research is needed including different crop rotations, landscape and degree of soil variability.

KEYWORDS: precision agriculture, geostatistics, management zones, yield maps

TABLA DE CONTENIDOS

LISTA DE TABLAS.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	XIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y SUSTENTABILIDAD.....	1
COMPONENTES E IMPLEMENTACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN	3
CONDICIONES NECESARIAS PARA EL MANEJO SITIO-ESPECÍFICO.....	9
AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA.....	10
HIPÓTESIS.....	17
OBJETIVOS.....	18
CAPÍTULO 2: DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS.....	19
DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	21
CAPÍTULO 3: ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS.....	24
INTRODUCCIÓN.....	24
MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
Procesamiento de los mapas de rendimiento.....	27
Variabilidad espacial de los rendimientos.....	28
Variabilidad temporal de los rendimientos.....	30
Variabilidad espacio-temporal de los rendimientos.....	31
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	33
Variabilidad espacial de los rendimientos.....	36
Variabilidad temporal de los rendimientos.....	39
Variabilidad espacio-temporal de los rendimientos.....	43
CONCLUSIONES.....	46
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE ATRIBUTOS EDÁFICOS.....	47
INTRODUCCIÓN.....	47
MATERIALES Y MÉTODOS.....	50
Muestreo en grilla.....	50
Relevamiento conductividad eléctrica aparente.....	51
Análisis geoestadístico.....	53
Relación entre la conductividad eléctrica aparente y atributos de suelo.....	55
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
Variabilidad Y estructura espacial de atributos de suelo.....	56
Variabilidad Y estructura espacial de la conductividad eléctrica aparente del suelo.....	62
Relación entre la conductividad eléctrica aparente y propiedades del suelo.....	68
CONCLUSIONES.....	72

CAPÍTULO 5: DELIMITACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS MEDIANTE MAPAS DE RENDIMIENTO.....	73
INTRODUCCIÓN.....	73
MATERIALES Y MÉTODOS.....	77
Clasificación según nivel y estabilidad temporal de los rendimientos.....	77
Análisis de conglomerados sobre mapas de rendimiento y componentes principales espaciales.....	78
Comparaciones entre métodos de clasificación.....	81
Caracterización propiedades edáficas por zona.....	81
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	82
Clasificación según nivel y estabilidad temporal de LOS rendimientos.....	82
Análisis de componentes principales de mapas de rendimiento.....	86
Análisis de conglomerados sobre mapas de rendimiento y componentes principales.....	87
Comparación entre métodos de clasificación.....	94
Caracterización de las propiedades edáficas por zona.....	97
CONCLUSIONES.....	101
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES GENERALES.....	102
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA CITADA.....	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1. Estudios relacionados con manejo sitio-específico de cultivos realizados en la Región Pampeana (Argentina).....	13
Tabla 2.1. Historial de cultivos y rendimientos correspondientes al Lote 12 E (107 ha).....	22
Tabla 3.1. Detalle de los monitores de rendimiento utilizados en cada campaña, parámetros de configuración y características de la operación de cosecha.....	27
Tabla 3.2. Cantidad de datos de los mapas de rendimiento de maíz y soja del Lote 12 E antes y después del procesamiento para remoción de errores y detalle porcentual de los tipos de errores detectados según los filtros implementados en el programa YieldEditor.....	33
Tabla 3.3. Estadísticas de descriptivas de los rendimientos de maíz y soja correspondientes al área de estudio luego del procesamiento mediante YieldEditor.....	34
Tabla 3.4. Modelos espaciales ajustados a los datos de rendimiento de la secuencia maíz-soja.....	38
Tabla 3.5. Matriz de correlación Spearman correspondiente a los mapas de rendimiento de la secuencia soja-maíz analizada.....	42
Tabla 4.1. Estadísticas descriptivas de los atributos del horizonte superficial (0-20 cm) de un Argiudol típico del centro de Santa Fe.....	56
Tabla 4.2. Estadísticas descriptivas de los atributos del horizonte superficial (0-30 cm) de un suelo Argiudol típico obtenidos a partir del muestreo dirigido en función de la distribución espacial de la CEa.....	57
Tabla 4.3. Parámetros y validación cruzada de los modelos espaciales ajustados por REML de los atributos de suelo del horizonte superficial (espesor 0-20 cm) en un lote del centro de Santa Fe....	61
Tabla 4.4. Estadísticas descriptivas de los valores de CEa (mS m ⁻¹) de los espesores 0-30 y 0-90 cm de un Argiudol típico obtenidos mediante un sensor de resistividad eléctrica en un lote del centro de Santa Fe.....	63
Tabla 4.5. Parámetros y validación cruzada de los modelos espaciales ajustados por REML para la CEa de los espesores 0-30 y 0-90 cm obtenidos mediante un sensor de resistividad eléctrica en un lote del centro de Santa Fe.....	64
Tabla 4.6. Correlaciones significativas entre mediciones de CEa 0-30 y 0-90 cm y atributos de suelo del horizonte superficial 0-30 cm.....	69
Tabla 4.7. Modelos de regresión para la estimación de propiedades de suelo en función de la conductividad eléctrica aparente.....	69
Tabla 5.1. Rendimientos medios, coeficiente de variación (valores entre paréntesis) y superficie total de las zonas delimitadas en el área de estudio a partir de los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja 2007/12.....	85
Tabla 5.2. Estadísticas descriptivas y autovectores de los componentes principales no espaciales (PC) y espaciales (sPC) obtenidos mediante el algoritmo multispati a partir de los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja 2007/12 del sitio de estudio.....	86
Tabla 5.3. Rendimientos medios, coeficiente de variación (valores entre paréntesis) y superficie	

total de las zonas delimitadas en el área de estudio a partir de los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja 2007/12.....	95
Tabla 5.4. Complemento de la varianza relativa (RV) de cada método de clasificación para los distintos años de la serie analizada.....	96
Tabla 5.5. Valores medios y error estándar obtenidos para los atributos edáficos del espesor 0-20 cm de un Argiudol típico según las zonas delimitadas por nivel y estabilidad de rendimientos (método Cox-Gerard), análisis de conglomerados sobre mapas de rendimientos (FKM-YM), componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC).....	98

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1: Evolución de la venta de equipos de Agricultura de Precisión en Argentina. Fuente: Bragachini et al. (2011).....	11
Fig. 1.2. Distribución geográfica de los estudios relacionados con manejo sitio-específico de cultivos realizados en la Región Pampeana.....	12
Fig. 2.1. Imagen satelital con la ubicación geográfica de la zona de estudio en el departamento Las Colonias (Santa Fe).....	19
Fig. 2.2. Imagen satelital del lote (polígono rojo) perteneciente a la Estancia La Pelada dentro del cual se seleccionó el área de estudio (polígono amarillo).....	21
Fig. 3.1. Distribución mensual de las precipitaciones registradas en el sitio de estudio durante las campañas 2007/08 a 2011/12.....	36
Fig. 3.2. Mapas de rendimiento de los cultivos de la secuencia maíz-soja durante el período 2007-2012. Las escalas de grises representan el rendimiento en kg ha-1.....	37
Fig. 3.3. Distribución de densidad de probabilidad de los rendimientos de las campañas 2007/08 a 2011/12 en relación al rendimiento medio histórico del lote.....	40
Fig. 3.4. Mapa del coeficiente de variación temporal (CVT) de los rendimientos de la secuencia soja-maíz del área estudiada. La escala de grises representa corresponde a los valores de CVT.....	41
Fig. 3.5. Variogramas espacio-temporales de los mapas de rendimiento de los cultivos de la secuencia maíz-soja durante el período 2007-2012.....	44
Fig. 4.1. Diseño de muestreo en grilla (círculos) con puntos al azar (triángulos).....	50
Fig. 4.2. Sitios de muestreo seleccionados en función de la distribución de los valores de CEa 0-30 cm.....	52
Fig. 4.3. Variogramas empíricos (círculos) y límites (línea cortada) de los atributos del horizonte superficial (profundidad 0-20 cm) obtenidos a partir del muestreo en grilla (n = 60).....	59
Fig. 4.4. Variogramas empíricos (círculos) y límites (línea cortada) de los atributos del horizonte superficial (profundidad 0-20 cm) obtenidos a partir del muestreo en grilla y muestras adicionales al azar (n = 68).....	60
Fig. 4.5. Variogramas empíricos y modelos teóricos ajustados a los datos de CEa de los espesores 0-30 y 0-90 cm obtenidos mediante un sensor de resistividad en un lote del Centro de Santa Fe....	64
Fig. 4.6. Mapa de predicción de la CEa superficial (0-30 cm) de un Argiudol típico del Centro de Santa Fe obtenido por interpolación kriging en bloque a partir de los modelos de la Tabla 4.5. La escala de de grises indica valos valores de CEa en mS m-1.....	65
Fig. 4.7. Mapa de predicción de la CEa superficial (0-90 cm) de un Argiudol típico del Centro de Santa Fe obtenido por interpolación kriging en bloque a partir de los modelos de la Tabla 4.5. La escala de de grises indica valos valores de CEa en mS m-1.....	67
Fig. 5.1. Zonas delimitadas en función del nivel de productividad y estabilidad temporal de los cultivos de la secuencia maíz-soja 2007/12 dentro del área de estudio. Los círculos negros indican la ubicación de los puntos del muestreo en grilla utilizados para caracterizar las diferencias de	

propiedades de suelo.....	82
Fig. 5.2. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja agrupados por zonas delimitadas en función de su nivel y estabilidad temporal de rendimientos.....	84
Fig. 5.3. Índice de borrosidad (FPI) y entropía normalizado (NCE) de la clasificación mediante el algoritmo fuzzy k-means a partir de los mapas de rendimiento originales (FKM-YM) y sus componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC).....	88
Fig. 5.4. Complemento de la varianza relativa de los rendimientos en función del número de zonas.	89
Fig. 5.5. Zonas delimitadas mediante análisis de conglomerados fuzzy k-means de los mapas de rendimiento originales (FKM-MR) y componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC) de la secuencia maíz-soja 2007/12 dentro del área de estudio. Los círculos negros indican la ubicación de los puntos del muestreo en grilla utilizados para caracterizar las diferencias de propiedades de suelo.....	90
Fig. 5.6. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja en zonas delimitadas por el método FKM-YM. Líneas discontinuas indican rendimiento relativo 0,8 y 1,2.....	92
Fig. 5.7. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja en zonas delimitadas por el método FKM-PC. Líneas discontinuas indican rendimiento relativo 0,8 y 1,2.....	93
Fig. 5.8. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja en zonas delimitadas por el método FKM-sPC. Líneas discontinuas indican rendimiento relativo 0,8 y 1,2.....	94

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

$\bar{Z}_T(s_i)$: media interanual en el punto s_i	FKM-sPC: análisis de conglomerados <i>fuzzy k-means</i> sobre componentes principales espaciales de los mapas de rendimiento
α : nivel de significancia	
$S_T^2(s_i)$: varianza interanual en el punto s_i	FKM-YM: análisis de conglomerados <i>fuzzy k-means</i> sobre mapas de rendimiento originales
a_0, a_1 : rango o alcance de dependencia espacial	
AIC: criterio de información de Akaike (del inglés: <i>Akaike's information criterion</i>)	FPI: índice de borrosidad de la clasificación <i>fuzzy k-means</i> (del inglés: <i>fuzziness performance index</i>)
AICns: criterio de información de Akaike (del inglés: <i>Akaike's information criterion</i>) del modelo no espacial.	GLS: mínimos cuadrados generalizados (del inglés: <i>generalized least squares</i>)
AP: Agricultura de Precisión	GPS: sistema de posicionamiento global
Asim.: asimetría	I: coeficiente de autocorrelación espacial de Moran
c_0 : varianza no estructurada	IniB: profundidad de inicio del horizonte B
c_1 y c_2 : varianza espacialmente estructurada	L: tendencia lineal
CE: conductividad eléctrica	LRT: prueba de razón de máxima verosimilitud (del inglés: <i>log-likelihood ratio test</i>)
CEa: conductividad eléctrica aparente del suelo	Máx: máximo
COT: carbono orgánico total	Med: media
Curt.: curtosis	Mín: mínimo
CV_T : coeficiente de variación temporal	Mna: mediana
DGPS: sistema de posicionamiento global con señal de corrección diferencial	MSDR: coeficiente medio de desviación estándar (del inglés: <i>mean standardized deviation ratio</i>)
Ds: densidad de suelo N-NO ₃	MSEC: Manejo sitio-específico de cultivos
FKM-PC: análisis de conglomerados <i>fuzzy k-means</i> sobre componentes principales de los mapas de rendimiento.	NCE: entropía normalizada de la clasificación <i>fuzzy k-means</i> (del inglés: <i>fuzzy k-means entropy</i>)

normalized classification entropy)

Nt: nitrógeno total

P: fósforo extractable

PC: componentes principales

pH: reacción del suelo

Pr: probabilidad

Q1: primer cuartil

Q3: tercer cuartil

r: coeficiente de correlación Pearson

R²: coeficiente de determinación

REML: máxima verosimilitud restringida
(del inglés: *restricted maximum likelihood*)

RMSE: raíz cuadrada del error cuadrático
medio (del inglés: *root mean squared error*)

RV: complemento de la varianza relativa

sPC: componentes principales espaciales

ZM: zonas de manejo

INTRODUCCIÓN

AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y SUSTENTABILIDAD

Las actividades agropecuarias son el sustento de la seguridad alimentaria. Se estima que para el año 2050 la producción global de alimentos deberá incrementarse entre un 70 y 100 % del nivel actual para satisfacer la demanda alimenticia de más de 9.000 millones de habitantes (United Nations, 2011). Cerca del 35% de la superficie terrestre libre de hielo¹ está destinada a actividades agropecuarias (Ramankutty *et al.*, 2008) las cuales utilizan el 70% del agua dulce (Millennium Ecosystem Assessment, 2005) y producen el 14% de emisiones de gases invernadero (United Nations, 2011). Si a esto se le suman los procesos de contaminación no puntual y degradación de recursos derivadas de la aplicación inapropiada de prácticas agronómicas actuales (Gebbers y Adamchuk, 2010), la humanidad se encuentra ante el gran desafío de producir más alimentos de manera económica y amigable con el medio ambiente por lo que la búsqueda de sistemas de producción sustentables es clave (Srinivasan, 2006a).

Es sabido que el rendimiento de un cultivo es el resultado de la interacción entre éste y aquellos factores bióticos y abióticos que determinan, limitan o reducen su crecimiento y desarrollo (van Ittersum *et al.*, 2003). Más aún, de acuerdo a la escala de observación, estos factores pueden variar en el espacio y en el tiempo y originar así la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos dentro del lote (Mulla y Schepers, 1997).

Por mucho tiempo los agricultores han observado este fenómeno y, dada la pequeña dimensión de sus parcelas, han adaptado, de manera consciente o no, algunas prácticas de manejo en función de dicha variabilidad (Plant, 2001). Posteriormente, los avances en la

¹ La cifra elaborada por los autores de este trabajo corresponde a estimaciones realizadas para el año 2000. El continuo avance de la agricultura sobre áreas deforestadas presupone que dicha cifra es mayor en la actualidad.

mecanización de la agricultura dieron lugar al aumento de las unidades de manejo gracias al aumento de la capacidad operativa y reducción de los costos de mano de obra (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004). Como resultado, se redujo la eficiencia de utilización de insumos e incrementó los riesgos para el ambiente debido a la ocurrencia de sub o sobre-dosificación dentro de la unidad de manejo (Mulla y Schepers, 1997). A fines de siglo XX, la creciente preocupación por los problemas ambientales y los cambios en las relaciones de precios insumo-producto hicieron visibles estas desventajas.

La **Agricultura de Precisión** (AP) es uno de los sistemas de producción sustentables propuestos para abordar esta problemática (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004). Ésta consiste en la aplicación de tecnologías de la información y principios agronómicos al manejo de la variabilidad espacial y temporal asociada con todos los aspectos de la producción agrícola (Pierce y Nowak, 1999). En otras palabras, se busca aplicar la vieja idea de “hacer lo correcto, en el sitio correcto y el momento indicado” (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004).

En la literatura abundan las definiciones y sinónimos de AP aunque la idea subyacente siempre es común a todas: el manejo de la variabilidad que ocurre dentro del lote (Pierce y Nowak, 1999; Srinivasan, 2006a). Uno de estos sinónimos es el **manejo sitio-específico de cultivos** (MSEC), definido por Whelan y McBratney (2000) como el ajuste de la aplicación de prácticas agronómicas² a los requerimientos del suelo y cultivo en función de su variación en el espacio y tiempo dentro de la unidad de manejo tradicional. Estos autores resaltan cierta relación jerárquica entre ambos conceptos: mientras la AP implica un enfoque de gestión de la empresa agropecuaria en sentido amplio, el MSEC es una forma de aplicación de aquella específica a la producción agrícola^{3,4}.

Los conceptos de AP y sustentabilidad están intrínsecamente relacionados ya que aquella presupone una serie de beneficios potenciales tales como: (i) reducción de costos,

² Ejemplos de prácticas agronómicas que pueden adaptarse al MSEC son: aplicación diferencial de insumos o enmiendas, riego, control localizado de malezas, densidad y espaciamiento de siembra variables, entre otras.

³ Comúnmente, cuando el MSEC es aplicado a una sola operación dentro de la producción agrícola puede tomar diversos nombres: manejo sitio-específico de nutrientes, de malezas, de riego, de enfermedades, etc. (Srinivasan, 2006b)

⁴ En el presente trabajo se adoptará esta definición distinguiendo en lo sucesivo ambos términos.

(ii) optimización de rendimientos y calidad en relación a la capacidad productiva de cada sitio, (iii) protección del ambiente los cuales son necesarios para lograr sistemas sustentables (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2004; Srinivasan, 2006a). No obstante, la importancia relativa de estos beneficios varía entre las distintas regiones del mundo y por lo tanto las formas de aplicación del concepto de AP (Dobermann *et al.*, 2004; McBratney *et al.*, 2005). Por ejemplo, en Europa la reducción de la carga ambiental derivada de la contaminación por aplicación ineficiente de insumos es el principal problema, mientras que los aspectos económicos predominan en Norteamérica y Australia. Whelan y McBratney (2000) sostienen que, hasta tanto no se consideren los costos ambientales del desperdicio de fertilizantes, las decisiones de manejo estarán orientadas hacia la optimización de rendimientos.

Existen diversos estudios que abordan el impacto económico y ambiental de la AP. Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2004) compilaron las metodologías y resultados de estudios económicos y ambientales sobre manejo de nutrientes, manejo de plagas, y calidad de agua y tierra. Los autores concluyen que la mayoría de los estudios, aunque no cuantifican directamente el impacto ambiental de la AP, soportan la idea de que la AP contribuiría a la reducción de la carga ambiental mediante la aplicación de fertilizantes y pesticidas solamente donde son necesarios. De este modo, el impacto de esta tecnología será proporcional a las diferencias que existan en los factores que determinan los requerimientos de insumos dentro de las unidades de manejo tradicionales así como de la posibilidad de adaptar las prácticas de manejo de manera sitio-específica (Pringle *et al.*, 2003; Robertson *et al.*, 2008; Roudier *et al.*, 2010).

COMPONENTES E IMPLEMENTACIÓN DE LA AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La idea precursora de la AP fue introducida por Jonhson *et al.* (1983) pero recién a principios de los años noventa el desarrollo y madurez de las tecnologías facilitadoras (*i.e.* informática, sistemas de información geográfica, sistemas de posicionamiento, sensores y controladores de aplicación) hicieron posible su implementación a campo (National Research Council, 1997). De manera esquemática, ésta puede representarse como un

proceso cíclico que comprende: adquisición de datos geo-referenciados, diagnóstico, planificación y aplicación de prescripciones, y evaluación de resultados los cuales sirven de entrada para el siguiente ciclo (Pierce y Nowak, 1999; Plant, 2001; Srinivasan, 2006a).

La adquisición de datos geo-referenciados ha sido objeto de intenso desarrollo en el contexto de la AP. Las primeras aproximaciones al MSEC se basaban en muestreos de suelo intensivos y técnicas de interpolación para obtener mapas de atributos y derivar prácticas de manejo sitio-específicas (Plant, 2001). Sin embargo, los altos requerimientos de tiempo y dinero para obtener mapas de calidad impulsaron el desarrollo de sensores remotos y cercanos para adquirir de manera económica información sobre atributos de suelo y cultivo de interés con alta resolución espacial (Adamchuk *et al.*, 2011; Mueller *et al.*, 2001).

Los sensores remotos capturan la radiación reflejada o emitida desde la superficie terrestre. Las características espectrales únicas de las distintas coberturas permiten utilizar esta información para inferir algunas de sus propiedades (Pinter *et al.*, 2003). Por ejemplo, la cantidad de radiación reflejada por la superficie del suelo desnudo se relaciona con el contenido de humedad, materia orgánica y mineralogía (Barnes *et al.*, 2003). Este principio ha sido aplicada a la estimación de rendimiento y biomasa de cultivos (Casa *et al.*, 2010; Doraiswamy *et al.*, 2003; Shanahan *et al.*, 2001); detección de estrés hídrico o causado por deficiencias de nutrientes (Bausch y Khosla, 2010; Larsolle y Hamid Muhammed, 2007); detección de malezas, insectos y enfermedades (Thorpe y Tian, 2004); estimación de propiedades de suelo tales como materia orgánica, humedad, contenido de arcilla o salinidad (Barnes *et al.*, 2003; Chang y Islam, 2000; Leon *et al.*, 2003). La reducción de costos y la mayor disponibilidad de imágenes con alta resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral favorecen su aplicación para el monitoreo de suelo y cultivo a escalas compatibles con la AP (Mulla, 2012).

Al contrario que los sensores remotos, los cercanos son operados a corta distancia o incluso en contacto con el suelo y permiten determinar propiedades edáficas a nivel o debajo de la superficie utilizando otros principios además de la radiación reflejada (Viscarra Rossel *et al.*, 2011). Cuando son montados sobre plataformas terrestres móviles

equipadas con dispositivos de posicionamiento, la información recolectada *on-the-go* (*i.e.* en la marcha) por estos sensores es útil para la generación de mapas temáticos con alta resolución espacial o bien para conducir manejos diferenciales en tiempo real (Adamchuk *et al.*, 2004, 2011).

Viscarra Rossel *et al.* (2011) clasificaron los sensores cercanos en función de la fuente de energía y el principio físico utilizado en la medición, así como las principales propiedades edáficas que pueden ser sensadas. Aquellos que miden la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) son los más utilizados en aplicaciones comerciales (Adamchuk *et al.*, 2011). La CEa es una medida de la conductancia a través del suelo, no sólo la solución del suelo si no las partículas sólidas y los iones intercambiables que existen en la interfase sólido-líquido de los minerales de arcilla (Corwin y Lesch, 2003). Dicha propiedad puede medirse sin contacto directo con el suelo mediante equipos de inducción electromagnética (*e.g.* EM38) o bien mediante dispositivos de contacto con electrodos que introducen corriente eléctrica en la masa del suelo y miden la pérdida de voltaje debida a la resistencia del mismo (*e.g.* Veris 3100). Detalles de los principios subyacentes a la medición de CEa así como sus potenciales usos se pueden encontrar en (Corwin y Lesch, 2005a).

Dada la facilidad y bajo costo de la adquisición de información con alta resolución espacial sobre variabilidad edáfica, la CEa ha sido ampliamente utilizada para estimar diversas propiedades de suelo tales como salinidad (Corwin y Lesch, 2005b), contenido hídrico (Bourennane *et al.*, 2012; Brevik *et al.*, 2006), textura y profundidad a horizonte arcilloso (Corwin y Plant, 2005; Kitchen *et al.*, 2005); así como para predecir rendimiento (Kravchenko *et al.*, 2003; Li *et al.*, 2008) o delinear zonas de manejo (Johnson *et al.*, 2003; Molin y Castro, 2008).

Un caso especial de sensores cercanos lo constituyen los monitores de rendimiento. Éstos son un componente clave de la AP debido a su doble utilidad: orientar el diagnóstico y evaluación de alternativas de manejo sitio-específicas (Sudduth y Drummond, 2007). Mediante la combinación de la información de sensores de flujo y humedad de grano, velocidad de avance, ancho de corte y posición, estos dispositivos permiten estimar la

cantidad de grano seco cosechada por unidad de superficie en cada sitio del lote (Arslan y Colvin, 2002). Reyns *et al.* (2002) resumen los diferentes principios y dispositivos utilizados en los monitores de rendimiento.

Típicamente, los mapas de rendimiento se caracterizan por su alta densidad de observaciones, *e.g.* 600 a 800 puntos ha⁻¹, según el intervalo de registro, ancho de cabezal y velocidad de avance. No obstante, existen limitantes en su resolución espacial y calidad de la información. Según Lark *et al.* (1997), la máxima resolución perpendicular a la dirección de avance está determinada por el ancho del cabezal mientras la naturaleza difusa del proceso de trilla y separación determina la resolución en el sentido de avance. Por otro lado, errores asociados a la respuesta y calibración de los sensores, así como condiciones propias del cultivo, operador y procesamiento posterior de la información reducen el número de observaciones confiables (Arslan y Colvin, 2002; Ping y Dobermann, 2005; Sudduth y Drummond, 2007). Sudduth y Drummond (2007) concluyen que los errores más frecuentes en los mapas de rendimiento sin procesar son la demora de flujo y los inicios y fin de pasada. Si bien no existe un método estándar para eliminar o corregir estos errores de los mapas de rendimiento, se han propuesto diversos algoritmos y técnicas de filtrado para mejorar la calidad de los mapas de rendimiento (Arslan y Colvin, 2002; Beal y Tian, 2001; Blackmore, 1999; Chung *et al.*, 2002; Simbahan *et al.*, 2004; Sudduth y Drummond, 2007).

Los cultivos pueden considerarse como bioindicadores de las condiciones en las cuales se desarrollan, y por lo tanto los mapas de rendimiento resumen el impacto global de las condiciones naturales y prácticas de manejo sobre aquellos (Adamchuk *et al.*, 2011). Si bien la información contenida en cada mapa de rendimiento es de utilidad para identificar las condiciones particulares de cada campaña, el análisis de series multi-temporales permite discriminar patrones espaciales de rendimiento y remover aquellas variaciones de rendimiento aleatorias inducidas por el manejo o errores de medición (Blackmore *et al.*, 2003; Ping y Dobermann, 2005). Según Dobermann *et al.* (2003), la variabilidad de las condiciones ambientales, principalmente las fluctuaciones de precipitaciones, determinan la longitud de la serie de mapas de rendimientos requerida. Así, en sistemas bajo riego al menos 5 años son suficientes, mientras que en secano la serie

debe ser significativamente mayor. Boydell y McBratney (2002), usando estimaciones de rendimiento de algodón obtenidas a partir de sensores remotos concluyen que 3 a 7 años podrían ser suficientes.

Según Mulla (2012), la AP tiende hacia un manejo continuo de la variabilidad espacial basado en sensores donde el manejo podrá realizarse planta por planta. En este escenario, la recolección de datos, diagnóstico, prescripción y aplicación serán realizadas en una sola operación y en tiempo real a partir de la información recolectada por sensores. Actualmente, esta estrategia es utilizada para el manejo de insumos cuyos requerimientos varían a corta distancia o bien son muy dinámicos, tales como el manejo de malezas o ajuste de fertilización nitrogenada en función del estado del cultivo.

El enfoque de **zonas de manejo** (ZM) permite simplificar la representación espacial de la variabilidad dentro del lote (Roudier *et al.*, 2010). Así, la unidad de manejo tradicional se divide en sub-regiones definidas por su relativa homogeneidad en los factores de suelo y cultivo, y para la cual es necesaria una única dosis de insumos (Doerge, 1999). Dado que el término ZM puede ser interpretado de diversas maneras, Kitchen *et al.* (2005) sugieren la necesidad de incluir información adicional sobre el objetivo buscado en la subdivisión del lote.

No obstante, la delimitación de zonas dentro de un lote no es una tarea sencilla ya que en cada caso se requiere conocer el tipo de información a utilizar (*i.e.* datos de entrada), cómo debe ser procesada (*i.e.* algoritmo) y el número de zonas en que debe ser dividido el lote (Fridgen *et al.*, 2004). En la literatura se han propuesto numerosos métodos para delimitar potenciales zonas de manejo. Según la información utilizada Jaynes *et al.* (2005) los dividen en tres grandes grupos: (i) propiedades de suelo directamente relacionadas con los rendimientos de los cultivos, (ii) atributos secundarios relacionados con los factores limitantes del cultivo y (iii) estimaciones de productividad mediante mapas de rendimiento o imágenes satelitales. Mientras que en los dos primeros enfoques se asume una relación directa o indirecta entre los atributos de suelo y rendimientos, el tercero se basa en el supuesto de que la identificación de patrones de rendimiento estables en el tiempo se corresponde con áreas de similares atributos de suelo, y por lo tanto, necesidades

de manejo comunes (Jaynes *et al.*, 2005).

Numerosos autores han propuesto la utilización de información secundaria relacionada con aquellas propiedades que influyen sobre los rendimientos en la delimitación de zonas (Kitchen *et al.*, 2005). Entre las alternativas más comunes se citan mapas de conductividad eléctrica, altimetría y atributos topográficos extraídos de modelos digitales de terreno los cuales son de fácil adquisición y alta resolución espacial (Fraisie *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 2003; Kaspar *et al.*, 2003; Khosla *et al.*, 2008; Kitchen *et al.*, 2005; Kravchenko y Donald, 2000). Por su parte, la información contenida en los *ensayos de uniformidad*⁵ es de gran utilidad para estimar directamente la variación espacial y temporal de los cultivos a bajo costo (Whelan y McBratney, 2000). Es por ello que se han propuesto diversos métodos para delimitar zonas en función de series multi-temporales de mapas de rendimientos. (Brock *et al.*, 2005; Cox y Gerard, 2007; Dobermann *et al.*, 2003; Lark y Stafford, 1997).

⁵ Mapas de rendimiento de lotes con manejo uniforme.

CONDICIONES NECESARIAS PARA EL MANEJO SITIO-ESPECÍFICO

Decidir si la variación espacial observada en un lote permite o no la aplicación diferencial de insumos es un punto crítico para el MSEC (Roudier *et al.*, 2010). De acuerdo con Miller *et al.* (1999), para justificar el MSEC se deben cumplir tres condiciones: (1) la existencia de variabilidad espacial significativa de los factores que influyen sobre el rendimiento del cultivo; (2) que las causas de dicha variabilidad puedan ser identificadas y cuantificadas; y (3) que la información resultante pueda ser utilizada para modificar las prácticas de manejo del cultivo para incrementar los beneficios o disminuir el impacto ambiental. Al incorporar la variabilidad temporal en el análisis, las chances de manejar los sistemas de producción en el continuo espacio-tiempo dependen del grado en el que la variabilidad espacial es temporalmente estable (Pierce y Nowak, 1999). Así, atributos con dependencia espacial a una escala compatible con la disponibilidad de maquinaria y alta correlación temporal son ideales para este tipo de manejo. Por el contrario, atributos cuya estructura espacial es débil o nula a la escala de manejo y/o cuya variabilidad temporal es elevada no serían dables para un manejo sitio-específico.

En este sentido, Whelan y McBratney (2000) formularon la hipótesis nula de la AP: “dada la gran variabilidad temporal de los rendimientos de los cultivos en relación a la escala de la unidad de manejo tradicional (*i.e.* el lote), la estrategia óptima de aversión al riesgo es el manejo uniforme”. Según estos autores, la adopción de prácticas de manejo sitio-específicas sin una razonable evaluación de estos supuestos puede conducir a una menor rentabilidad o resultados adversos para el ambiente.

Florin *et al.* (2009) propusieron un enfoque espacio-temporal para interpretar la relación entre la varianza temporal y espacial de rendimientos en el marco de la hipótesis nula propuesta por Whelan y McBratney (2000). Ellos proponen que la relación entre la escala espacial (y , en metros) y temporal (z , en años) a la que ocurre una determinada cantidad de varianza en los rendimientos podría ayudar a determinar la viabilidad del MSEC. En este sentido, si $y > z$ las dificultades para llevar a cabo un MSEC son mayores mientras que si la relación se invierte, el MSEC podría ser apropiado.

Pringle *et al.* (2003) han propuesto un índice de oportunidad para el manejo sitio específico a partir de ensayos de uniformidad, *i.e.* mapas de rendimiento de lotes manejados de manera uniforme. Estos autores, asumiendo que la variación observada en el rendimiento del cultivo es indicador de la necesidad de un manejo diferencial, postulan que la oportunidad para el manejo sitio-específico se incrementa con magnitud y la estructura espacial de los rendimientos. A partir del índice propuesto por Pringle *et al.* (2003), Tisseyre y McBratney (2008) determinan el área mínima que puede ser manejada de manera diferencial dentro del lote utilizando un enfoque basado en filtros morfológicos⁶ para analizar los patrones de variabilidad. Paoli *et al.* (2010) empleando la teoría de lógica difusa⁷ incorporaron las inexactitudes propias del sistema de navegación de la maquinaria para caracterizar el área mínima de manejo diferencial en función de la “huella” de aplicación. Roudier *et al.* (2010) lo extendieron estos conceptos al manejo por zonas.

AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN ARGENTINA

En Argentina, la AP se inició en 1995 con el lanzamiento del proyecto “Agricultura de Precisión” por parte del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) con sede en la Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. Según Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer (2006), el potencial de esta nueva tecnología en nuestro país reside en la reducción de los costos, incremento de productividad y eficiencia de la utilización de insumos en la producción de granos.

Desde su introducción al país, la adopción de herramientas de AP ha sido significativa. En la Fig. 1.1 se muestra la evolución de las ventas de componentes de máquinas precisas. Se destaca la mayor adopción de las tecnologías de banderillero satelital, monitores de siembra y rendimiento, con una marcada aceleración a partir del año 2003, mientras que la incorporación de equipos de dosificación variable (sólida o líquida) ha sido más lenta.

⁶ Los filtros morfológicos son operadores matemáticos aplicados al procesamiento digital de imágenes los cuales se utilizan para extraer patrones de las mismas mediante la información topológica de los objetos presentes (*e.g.* zonas o *clusters* dentro de la imagen).

⁷ Al contrario de la lógica binaria donde los conjuntos son excluyentes, la lógica difusa o *fuzzy logic* permite definir un elemento a múltiples grupos asignando distintos grados de membresía.

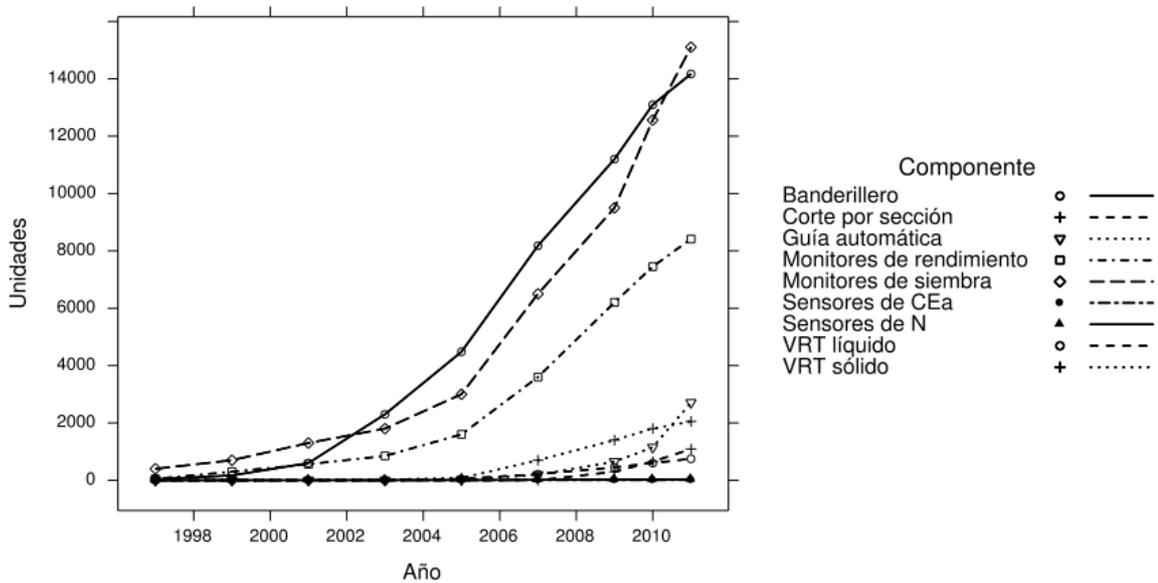


Fig. 1.1: Evolución de la venta de equipos de Agricultura de Precisión en Argentina.
Fuente: Bragachini *et al.* (2011)

Este patrón de adopción puede asociarse a la facilidad de uso y obtención de beneficios inmediatos de cada tecnología (Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006). Mientras que la utilización de banderilleros satelitales y monitores de siembra tiene resultados concretos, la falta de información sobre suelos limita la adopción de la tecnología de dosificación variable. En el caso de los monitores de rendimiento, la mayoría de las cosechadoras vienen equipadas con esta tecnología lo cual incide en el número de unidades vendidas, no obstante esto, la utilización de la información recolectada por dichos dispositivos es limitada.

A nivel nacional los esfuerzos de investigación sobre AP se han concentrado mayormente en los principales cultivos agrícolas de la región pampeana. En la Fig. 1.2 se presenta un mapa con la distribución geográfica de las experiencias cuyos resultados han sido presentados en reuniones y revistas científicas nacionales e internacionales. En la Tabla 1.1 se listan las referencias haciendo mención a algunos aspectos de las condiciones experimentales. Según sus objetivos, las investigaciones sobre AP pueden agruparse en: (1) caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades de suelo y/o rendimientos, (2)

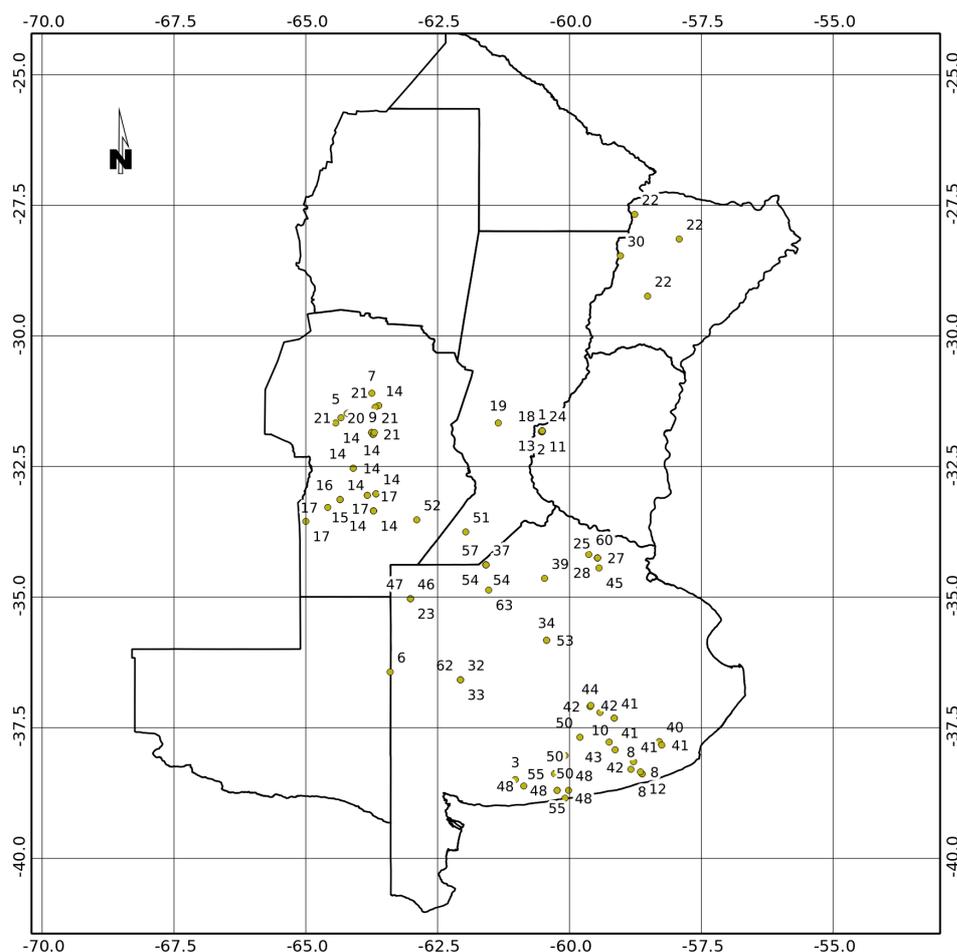


Fig. 1.2. Distribución geográfica de los estudios relacionados con manejo sitio-específico de cultivos realizados en la Región Pampeana.

relación entre rendimientos y propiedades de suelo y/o paisaje, (3) delimitación y caracterización de zonas de manejo, (4) relación entre propiedades de suelo y CEa; y (5) evaluación respuesta sitio-específica a la aplicación variable de insumos; (6) sensores remotos y cercanos para predecir distribución de propiedades suelo o productividad de los cultivos.

Tabla 1.1. Estudios relacionados con manejo sitio-específico de cultivos realizados en la Región Pampeana (Argentina).

Id	Cita	Tipo	Suelos	Relieve	Cultivo	Insumo o Atributo
1	Albarenque <i>et al.</i> (2009)	5	Peludertes y Argiudoles	O	M	N
2	Albarenque <i>et al.</i> (2012)	5	Argiudoles	O	M	N
3	Amiotti <i>et al.</i> (2008)	2	Paleudoles	P	C	
4	Anselin <i>et al.</i> (2004)	5	Haplustoles	O	M	N
5	Ateca <i>et al.</i> (2012)	2	Haplustoles	O	S	
6	Barraco <i>et al.</i> (2008)	2	Haplustoles y Updisaments	O	S	
7	Bongiovanni <i>et al.</i> (2007)	5	Haplustoles	O	T	N
8	Bosch Mayol <i>et al.</i> (2012)	4	Argiudoles y Paleudoles	O		
9	Bragachini <i>et al.</i> (2009)	5	Haplustoles	O	M	N, semilla
10	Castro Franco <i>et al.</i> (2012)	2	Argiudoles y Paleudoles	O	S	
11	Charadia <i>et al.</i> (2009)	6	sd		M, T	N
12	Córdoba <i>et al.</i> (2012)	3	Argiudoles y Paleudoles	O		
13	Cruzate y Rivero (2010)	1	Argiudoles	O		
14	Espósito <i>et al.</i> (2010)	5	Haplustoles	O	M	N
15	Espósito <i>et al.</i> (2012a)	5	Haplustoles	O	M	N
16	Espósito <i>et al.</i> (2012b)	5	Haplustoles	O	M	N
17	Espósito <i>et al.</i> (2012c)	5	Haplustoles	O	M	N
18	Gabioud <i>et al.</i> (2012)	1	Argiudoles	O		PF
19	Gambaudo <i>et al.</i> (2012)	3	Natralboles, Natracualfes	sd		Y
20	Gregoret <i>et al.</i> (2006)	5	Haplustoles	O	M	N
21	Gregoret <i>et al.</i> (2011)	5	Haplustoles	O	M	N
22	Herber (2011)	4	Argiudoles, Alfisoles	O		
23	Justo <i>et al.</i> (2012)	5	Haplustoles	O	M	N, semilla
24	Kemerer y Melchiori (2012)	1	Argiudoles	O		PQ
25	López de Sabando <i>et al.</i> (2008a)	3	Argiudoles	O		
26	López de Sabando <i>et al.</i> (2008b)	3	Argiudoles	O		
27	López de Sabando <i>et al.</i> (2008c)	3	Argiudoles	O		
28	López de Sabando <i>et al.</i> (2008d)	5	Argiudoles	O	T	N
29	López de Sabando <i>et al.</i> (2010)	5	Argiudoles	O	T	N

Tabla 1.1. Estudios relacionados con manejo sitio-específico de cultivos realizados en la Región Pampeana (Argentina). (continuación).

Id	Cita	Tipo	Suelos	Relieve	Cultivo	Insumo o Atributo
30	Melchiori <i>et al.</i> (2009a)	6	sd	sd	Ca	N
31	Melchiori (2000)	2	Argiudoles	O	T	
32	Mosso y Zubillaga (2010)	6	Hapludoles	O	M	N
33	Mosso y Zubillaga (2012)	6	Hapludoles	O	M	N
34	Muschetti Piana <i>et al.</i> (2008)	2	Hapludoles	O	M	
35	Muschetti Piana <i>et al.</i> (2010a)	5	Hapludoles	O	M	N
36	Muschetti Piana <i>et al.</i> (2010b)	5	Hapludoles	O	M	N
37	Muschetti Piana <i>et al.</i> (2012)	1	Hapludoles	O		
38	Muschetti Piana y Urricariet (2009)	5	Hapludoles	O	M	N
39	Nanni <i>et al.</i> (2012)	5	Hapludoles	O	M	N
40	Paggi <i>et al.</i> , (2012)	4	Argiudoles y Paleudoles	O		
41	Peralta <i>et al.</i> (2010a)	4	Argiudoles y Paleudoles	O		
42	Peralta <i>et al.</i> (2010b)	4	Argiudoles y Paleudoles	O		
43	Peralta <i>et al.</i> (2012a)	3	Argiudoles y Paleudoles	O	T, S, Cb	
44	Peralta <i>et al.</i> (2012b)	3	Argiudoles y Paleudoles	O		
45	Rivero <i>et al.</i> (2010)	1	Argiudoles	O		
46	Rivero <i>et al.</i> (2012a)	1	Sd			
47	Rivero <i>et al.</i> (2012b)	1	sd			
48	Ross <i>et al.</i> (2011)	5	Paleudoles	O	Cb	N
49	Ross (2012a)	5	Hapludoles	O	M	S
50	Ross (2012b)	2	Argiudoles y Paleudoles	O	M, T, G	
51	Silva Rossi (2008)	2	Hapludoles	O	M	
52	Simon <i>et al.</i> (2012)	4	Hapludoles	O		
53	Urricariet <i>et al.</i> (2008)	6	Hapludoles	O	M	N
54	Urricariet <i>et al.</i> (2011)	2	Hapludoles	O	M	
55	Zamora y Costa (2010)	5	Hapludoles y Paleudoles	O	T	N
56	Zen <i>et al.</i> (2009)	3	sd	P		
57	Zubillaga <i>et al.</i> (2006a)	1	Hapludoles	O		PQ

Tabla 1.1. Estudios relacionados con manejo sitio-específico de cultivos realizados en la Región Pampeana (Argentina). (continuación).

Id	Cita	Tipo	Suelos	Relieve	Cultivo	Insumo o Atributo
58	Zubillaga <i>et al.</i> (2006b)	1	Hapludoles	O		PQ
59	Zubillaga <i>et al.</i> (2008)	6	Argiudoles	O	T	N
60	Zubillaga <i>et al.</i> (2009)	5	Argiudoles	O	T	N
61	Zubillaga <i>et al.</i> (2012a)	6	Argiudoles	O	T	N
62	Zubillaga <i>et al.</i> (2012b)	1	Hapludoles	O		
63	Zúñiga <i>et al.</i> (2012)	3	Hapludoles	O	M	

Tipos de trabajos: (1) caracterización variabilidad espacial propiedades de suelo y/o rendimientos, (2) relación entre propiedades de suelo y paisaje y rendimientos, (3) delimitación y caracterización de zonas de manejo, (4) relación propiedades de suelo y CEa; y (5) evaluación respuesta sitio-específica a la aplicación variable de insumos; (6) sensores remotos y proximales.

Relieve: O = ondulado; P = plano.

Cultivo: T = trigo; M = Maíz; S = Soja; Ca = caña; Cb = Cebada; G = Girasol.

Insumo o Atributo: N = Nitrógeno; Y = yeso; PQ = Prop. Químicas; PF = Prop. Físicas;

En total de artículos revisados, el objetivo más recurrente es la evaluación de respuesta sitio-específica a la aplicación variable de insumos, principalmente fertilizantes nitrogenados en cultivos de maíz y trigo, y en menor medida la caracterización de la variabilidad espacial de atributos edáficos, el estudio de las relaciones entre éstos y los rendimientos o la delimitación y caracterización de zonas de manejo. Independientemente del objetivo perseguido, la gran mayoría de estas experiencias han sido llevadas a cabo en sitios con relieve ondulado y en suelos de diferente grado de desarrollo y régimen hídrico, principalmente Argiudoles, Hapludoles, Haplustoles y Paleudoles. Entre los atributos edáficos identificados en estos estudios como limitantes del rendimiento se incluyen la profundidad efectiva del suelo y la capacidad de retención hídrica asociadas a la variación topográfica y textural.

Por otro lado, en la Fig. 1.2 se observa que las experiencias sobre AP se concentran principalmente en cuatro regiones: (1) centro sur de Córdoba y noroeste de Buenos Aires, (2) sudeste de Buenos Aires, (3) sur de Santa Fe y noreste de Buenos Aires y (4) centro este de Entre Ríos. Si bien existen algunos antecedentes en el centro de Santa Fe relacionados con esta tecnología, la información sobre la variabilidad espacial y temporal

de los rendimientos de cultivos agrícolas y de los principales factores que causan dicha variabilidad en las condiciones edafoclimáticas de la Pampa Llana Santafesina son escasos. Desde el punto de vista edáfico, esta región se caracteriza su relieve predominantemente subnormal-normal con planos extendidos muy suavemente ondulados, de largas pendientes y gradientes menores al 1%, a excepción de los sectores vinculados al río Salado donde el relieve ondulado presenta mayores gradientes. El microrrelieve con sus pequeñas ondulaciones modifica en cortas distancias las condiciones de drenaje, constituyendo un factor de diferenciación edáfica importante lo cual presupone mayores niveles de heterogeneidad a distancias cortas en comparación con las regiones mencionadas anteriormente.

Es por ello que el avance en el conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos dentro de las unidades de manejo tradicionales, así como la estructura espacial de las propiedades de suelo y su relación con los patrones de rendimiento son aspectos claves para evaluar la factibilidad de la aplicación y posible adaptación de esta tecnología a las condiciones la Pampa Llana Santafesina.

HIPÓTESIS

La implementación efectiva de la AP en las condiciones edafoclimáticas del centro de la provincia de Santa Fe requiere del conocimiento de la variabilidad espacial y temporal intra-lote de los rendimientos de cultivos agrícolas así como de los principales factores que causan dicha variabilidad. Para contribuir al avance en el conocimiento sobre esta problemática se plantean las siguientes hipótesis:

1. Los rendimientos de la secuencia maíz-soja se caracterizan por su variabilidad a corta distancia la cual es comparable con la variación interanual por lo que la aplicación del MSEC sería dificultosa.
2. La magnitud y estructura espacial de la variabilidad del carbono orgánico, nitrógeno total, pH, fósforo disponible, granulometría, densidad de suelo en los primeros 20 cm del perfil y profundidad de inicio del horizonte B no es suficiente para la aplicación del MSEC.
3. Las zonas homogéneas delineadas en función de los patrones espaciales de rendimiento de los cultivos de la secuencia maíz-soja se corresponden con diferencias en el carbono orgánico, nitrógeno total, granulometría, pH, conductividad eléctrica, densidad de suelo y profundidad del inicio del horizonte B.

OBJETIVOS

A partir de las hipótesis planteadas anteriormente, los objetivos de la presente tesis son:

1. Caracterizar la variabilidad espacial, temporal y espacio-temporal de los rendimientos de la rotación maíz-soja en un lote agrícola del centro de la provincia de Santa Fe.
2. Caracterizar la variabilidad espacial del carbono orgánico, nitrógeno total, pH, fósforo disponible, granulometría, densidad de suelo en los primeros 20 cm del perfil y profundidad de inicio del horizonte B en un lote agrícola del centro de la provincia de Santa Fe.
3. Identificar y delimitar zonas homogéneas en función de productividad de los cultivos y determinar si existen diferencias en el carbono orgánico, nitrógeno total, granulometría, pH, conductividad eléctrica, densidad de suelo y profundidad del inicio del horizonte B.

En el Capítulo 2 se describirá de manera general las condiciones edafoclimáticas de la zona de estudio y los aspectos más relevantes del sitio elegido para realizar la investigación que serán comunes al resto de los capítulos. En el Capítulo 3 se analizará la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos de la rotación en función de la factibilidad de la aplicación del MSEC. De manera similar, en el Capítulo 4 se abordará la variabilidad espacial de las propiedades de suelo. El Capítulo 5 comprenderá la delimitación de zonas homogéneas a partir de la información de rendimientos y la cuantificación de las diferencias en las propiedades de suelo entre zonas. Por último, en el Capítulo 6 se realizan consideraciones generales sobre lo expuesto en este trabajo y se plantean posibles líneas de investigación.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

CARACTERÍSTICAS EDAFOCLIMÁTICAS

El presente trabajo de tesis se llevó a cabo en un establecimiento del distrito La Pelada ubicado en el departamento Las Colonias (Santa Fe) a 130 km al noreste de la capital provincial (Fig. 2.1).

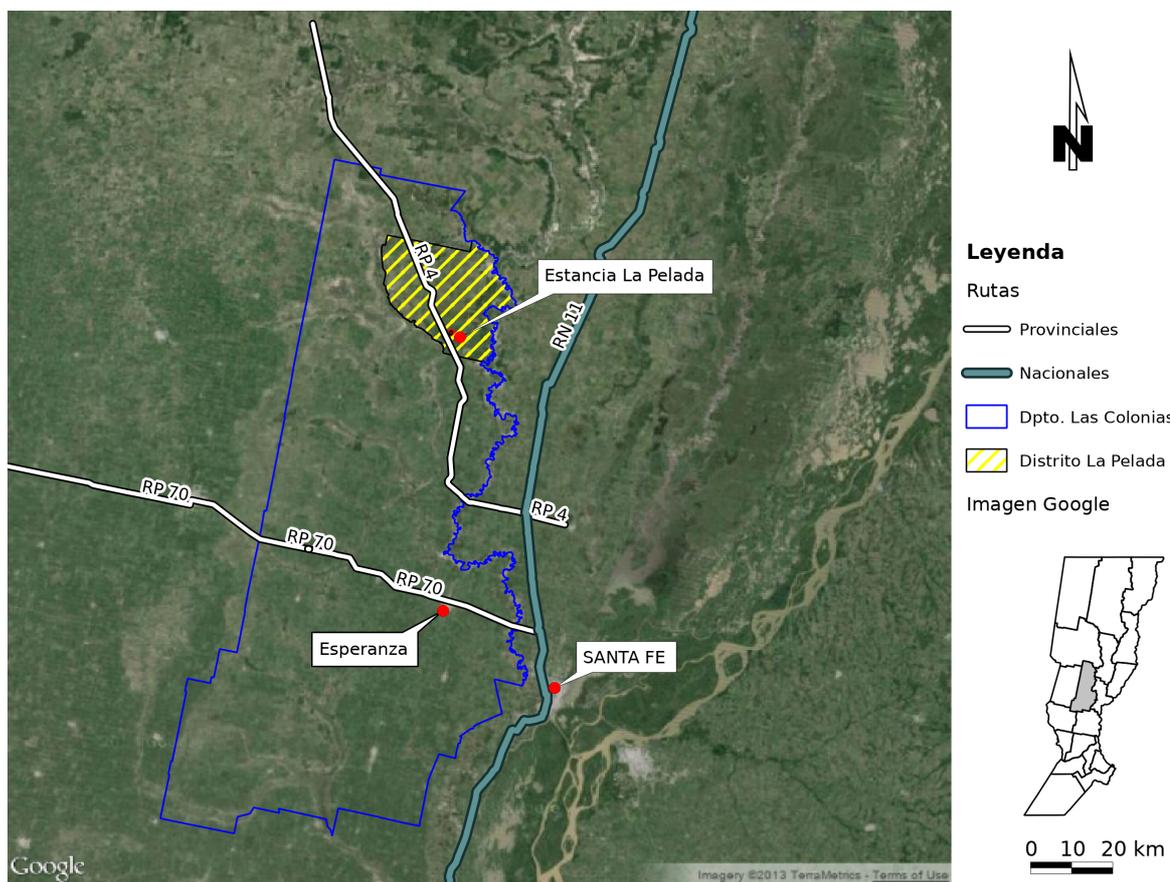


Fig. 2.1. Imagen satelital con la ubicación geográfica de la zona de estudio en el departamento Las Colonias (Santa Fe).

La zona pertenece al complejo ecosistémico denominada “Pampas Llanas Húmedas”

dentro de la ecorregión del Espinal (Matteucci, 2012). Posee clima templado húmedo de llanura con temperatura anual promedio de 18 °C y un período libre de heladas entre Septiembre a Mayo. Se encuentra comprendida entre las isohietas 900 y 1200 mm año⁻¹. Las lluvias se distribuyen en los meses de otoño y verano, siendo el invierno la estación seca. En los meses de otoño las precipitaciones superan ampliamente la demanda atmosférica, estimada por la evapotranspiración total, mientras que en los meses de Diciembre y Enero el balance hídrico mensual se torna negativo generando marcados déficits hídricos (INTA, 1992).

La porción santafesina de este complejo se caracteriza por un paisaje con relieve predominantemente subnormal-normal con planos extendidos muy suavemente ondulados, de largas pendientes y gradientes menores al 1%, a excepción de los sectores vinculados al río Salado donde el relieve ondulado presenta mayores gradientes. La presencia de un gran número de cubetas está asociado a este relieve característico (Matteucci, 2012). La distribución de los suelos está asociada a las características del relieve y condiciones de drenaje. En el sector cercano a la localidad de La Pelada y Jacinto Arauz se presentan las siguientes geofomas: crestas, planos medios y fajas deprimidas con cubetas. En las primeras dominan los Argiudoles típicos asociados a Argialboles y Natracualfes. Los planos medios presentan Argiudoles ácuicos y en menor medida Argialboles, Natralboles, Argiudoles típicos y Natracualfes. Las depresiones se caracterizan por la presencia dominante de Natracualfes, y Natralboles y Argiudoles ácuicos y típicos subordinados (INTA, 1992).

El microrrelieve con sus pequeñas ondulaciones (en el orden de centímetros) modifica en cortas distancias las condiciones de drenaje, constituyendo un factor de diferenciación edáfica importante, lo cual genera gran heterogeneidad edáfica en pocos metros de distancia. Hein *et al.* (1989) estudiaron este fenómeno concluyendo que en el área central de Santa Fe es posible encontrar pedones con propiedades físicas y químicas muy diferentes a pocos metros de distancia, *e.g.* dentro de un radio de 15 a 20 m de distancia. Asimismo, los autores asociaron esta heterogeneidad edáfica con los rendimientos de diversos cultivos obtenidos sobre las series estudiadas.

DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

El sitio seleccionado para el presente trabajo de tesis se encuentra ubicado 20 km al sur de La Pelada (Fig. 2.2). El mismo corresponde a un sector dentro de un lote de producción comercial (“Lote 12E”) perteneciente al Establecimiento “La Pelada”.



Fig. 2.2. Imagen satelital del lote (polígono rojo) perteneciente a la Estancia La Pelada dentro del cual se seleccionó el área de estudio (polígono amarillo).

La selección de dicho sitio se realizó en función de los siguientes criterios:

1. Disponibilidad de una serie multi-temporal de mapas de rendimiento: al momento del inicio del trabajo de tesis (2009), el acceso a este tipo de información era limitado debido al menor nivel de adopción de esta tecnología respecto a otras zonas del país. A partir de la campaña 2007/08 la empresa adoptó la política de adquisición de datos de rendimiento geo-referenciados seleccionando prestadores

de servicios de cosecha con máquinas equipadas con monitores de rendimiento y sistema de navegación satelital. En la Tabla 2.1 se presenta el historial de cultivos y rendimiento obtenidos para el Lote 12 E.

Tabla 2.1. Historial de cultivos y rendimientos correspondientes al Lote 12 E (107 ha).

Campaña	Cultivo	Híbrido/ Variedad	Rendimiento (Mg ha⁻¹)
2000/01	Soja	TJ-2070	2,88
2001/02	Soja	A5901	1,80
2002/03	Soja	TJ-2070	2,98
2003/04	Maíz	Pioneer 32R-76	7,49
2004/05	Soja	A5901	3,41
2005/06	Maíz	AX890MG	4,66
2006/07	Soja	A6040	3,36
2007/08	Maíz	Mass 494MG	6,78
2008/09	Soja	A6040	1,27

2. Representatividad de las condiciones edafoclimáticas: el lote presenta relieve plano extendido y con pendientes largas menores al 1%. Previo a su incorporación a la agricultura, la vegetación dominante estaba constituida por praderas de gramíneas y especies arbustivas. Los suelos presentes en el área de estudio son representativas de los suelos agrícolas de la región. Según el Mapa de suelos de la Provincia de Santa Fe (INTA, 2009), las unidades cartográficas representadas se componen de Argiudoles típicos y ácuicos y en menor medida Natralboles y Natracualfes en los sectores más deprimidos.
3. Manejo uniforme representativo: el lote es destinado a la agricultura continua para la producción de soja y maíz. La misma se realiza con el sistema de siembra directa durante los últimos 10 años y los cultivos son fertilizados aplicando dosis uniformes de fertilizantes nitrogenados y fosforados (aproximadamente 75 kgN ha⁻¹ y 50 kg P₂O₅ ha⁻¹). Las prácticas de manejo y protección de cultivos son las

habituales para la zona. De la Tabla 2.1 se desprende que a partir de 2003 el lote ha sido destinado a la secuencia de cultivos maíz-soja. Cabe mencionar que ésta no es la secuencia modal de la zona (la cual incluye con mayor participación el doble cultivo trigo/soja) y que su elección responde a la disponibilidad de datos de rendimiento georreferenciados y la importancia que tienen los cultivos desde el punto de vista agronómico, sobre todo la gramínea.

Dentro de dicho lote se delimitó un sector de 37 ha aproximadamente (polígono amarillo en Fig. 2.1), el cual fue seleccionado en función de los patrones de variabilidad observados en los mapas de rendimiento disponibles al momento de iniciar el estudio a los efectos de incluir sectores con rendimientos altos, medios y bajos, así como también distintas posiciones en la topografía del lote. De este modo, para el procesamiento (análisis geoestadístico e interpolación) y muestreo sólo se consideraron los datos de rendimiento y CEa colectados dentro de este sector.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

INTRODUCCIÓN

Los cultivos pueden ser considerados como bioindicadores de la variabilidad en las condiciones ambientales a las que estuvieron expuestos (Adamchuk *et al.*, 2011). Su rendimiento es el resultado del conjunto de factores bióticos y abióticos que determinan, limitan o reducen su crecimiento y desarrollo. Estos factores actúan a distintas escalas en el espacio y tiempo originando así la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos dentro del lote (Mulla y Schepers, 1997; Pierce y Nowak, 1999).

El manejo sitio-específico de los cultivos (MSEC) tiene como objetivo el ajuste de la aplicación de prácticas agronómicas acordes a la variabilidad espacial y temporal de los factores que inciden en el rendimiento (Whelan y McBratney, 2000). Para ello es necesario que la magnitud de dicha variabilidad sea suficiente para justificar un manejo diferenciado y que a su vez tenga una estructura espacial acorde a las posibilidades de manejo (Pringle *et al.*, 2003). Más aún, Pierce y Nowak (1999) postulan que así como la dependencia espacial es necesaria para el MSEC, la variabilidad espacial dificulta su implementación.

La creciente utilización de cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento y sistema de posicionamiento global (GPS) ha facilitado la adquisición de mapas de rendimiento con alta resolución espacial y bajo costo (Bakhsh *et al.*, 2000; Dobermann *et al.*, 2003). Estos mapas brindan información sobre la variabilidad espacial de los rendimientos resultante de los efectos acumulados de un conjunto de factores que influyeron sobre el cultivo pero no permiten establecer directamente sus causas (Lark y Stafford, 1997; Pierce y Nowak, 1999).

La variabilidad espacial y temporal de los rendimientos dentro del lote puede ser modelada a partir de series multi-temporales (Florin *et al.*, 2009). La identificación de patrones espaciales consistentes entre años podrían indicar el efecto de factores temporalmente estables y espacialmente estructurados que permitan el manejo diferenciado (Lark y Stafford, 1997). Es por esto que el estudio de la estructura espacial y temporal de los rendimientos puede ser de utilidad como paso previo a la aplicación del MSEC (Bakhsh *et al.*, 2000).

En la bibliografía se han propuesto diversas aproximaciones para el análisis de los patrones de rendimiento en el tiempo y espacio. Por ejemplo, Lamb *et al.* (1997) documentaron bajos niveles de estabilidad temporal de rendimiento de maíz sobre suelos arenosos mediante análisis de correlación de una serie de 5 años. Joernsgaard y Halmoe (2003), en un estudio realizado en 82 lotes distribuidos en Reino Unido y Dinamarca, determinaron que la información contenida en los mapas de cultivos anteriores sólo permitió explicar en promedio el 27% de la variación del cultivo siguiente producto de alta variabilidad temporal. Porter *et al.* (1998) estimaron que la variabilidad interanual es 3 a 4 veces mayor que la espacial comparando el efecto de las diferencias entre parcelas y entre años en una serie de 10 años de rendimiento de maíz y soja. Schepers *et al.* (2004) evaluaron zonas de manejo de nitrógeno delimitadas por atributos de suelo y paisaje y encontraron que dichas zonas caracterizaron la variabilidad de los rendimientos de maíz bajo riego solamente en 3 de los 5 años estudiados.

La mayoría de estos resultados sugieren que la falta de estabilidad temporal observada en los mapas de rendimiento es una limitante para identificar patrones de rendimiento dentro del lote (Lauzon *et al.*, 2005). En este sentido, Blackmore *et al.* (2003) propusieron el análisis espacial y temporal de los rendimientos mediante la construcción de mapas de tendencia espacial y varianza temporal. Así, utilizando umbrales arbitrarios los autores identificaron zonas dentro del lote en función de su nivel de rendimiento y estabilidad temporal. De manera similar, Cox y Gerard (2007) delimitaron zonas de distinto potencial y estabilidad de rendimiento y examinaron las diferencias de propiedades de suelo entre zonas. Para evitar la utilización de umbrales arbitrarios de estabilidad de rendimientos, Lauzon *et al.* (2005) proponen un enfoque basado en funciones de densidad

de probabilidad para obtener mapas de probabilidad de estabilidad de rendimiento.

En otros trabajos, la estructura espacial de los rendimientos ha sido cuantificada mediante técnicas geoestadísticas. Jaynes y Colvin (1997) examinaron la variación temporal de la estructura espacial local y global de los rendimientos de la secuencia soja-maíz durante 6 años. En dicho estudio, el rango de dependencia espacial estuvo relacionado a las precipitaciones. Similares resultados fueron obtenidos por Bakhsh *et al.* (2000). Florin *et al.* (2009) examinaron la variabilidad espacio-temporal de los rendimientos de trigo mediante pseudo variogramas cruzados. Dado que este procedimiento aborda la estructura de los rendimientos en el continuo espacio-tiempo, los autores establecieron equivalencias entre la variabilidad espacial e interanual interpretando sus implicancias para el MSEC.

En Argentina, los estudios sobre la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos a escala de lote son escasos (Ateca *et al.*, 2012; Castro Franco *et al.*, 2011; Melchiori, 2000; Melchiori *et al.*, 2009b; Urricariet *et al.*, 2011). Más aún, en la región de estudio, no existen antecedentes que documenten la estructura espacial y estabilidad temporal de los rendimientos de soja y maíz. Es por ello que el objetivo del presente capítulo es caracterizar la variabilidad espacial, temporal y espacio-temporal de los rendimientos de la rotación soja-maíz en un lote agrícola del centro de la provincia de Santa Fe.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo con los datos de rendimiento del Lote 12E para una secuencia soja-maíz registrados durante 5 campañas (maíz-2007/8 a maíz-2011/12). Mediante cosechadoras comerciales equipadas con monitores de rendimiento y sistemas de posicionamiento global con señal de corrección diferencial (DGPS) se obtuvieron estimaciones de rendimiento geo-referenciadas. En la Tabla 3.1 se detallan los monitores de rendimiento utilizados en cada campaña así como también algunos parámetros de su configuración y características de la operación de cosecha.

Tabla 3.1. Detalle de los monitores de rendimiento utilizados en cada campaña, parámetros de configuración y características de la operación de cosecha.

Campaña	Cultivo	Monitor	Frecuencia (seg)	Ancho cabezal (m)	Velocidad promedio (km h ⁻¹)	Superficie (m ²)
2007/08	Maíz	Ag Leader PF3000	3	5,48	7,9	36,1
2008/09	Soja	CaseIH	1	9,10	6,4	18,1
2009/10	Maíz	GreenStar II	1	6,96	8,1	15,7
2010/11	Soja	CaseIH	1	10,49	7,2	22,9
2011/12	Maíz	CaseIH	1	6,82	7,5	14,1

PROCESAMIENTO DE LOS MAPAS DE RENDIMIENTO

Los datos originales obtenidos por las cosechadoras fueron procesados para remover artefactos y errores sistemáticos propios del sistema de estimación de rendimientos. Se utilizó el programa gratuito FOViewer (MapShots Inc., 2009), y los complementos correspondientes según marca y modelo de monitor de rendimiento, para abrir los archivos binarios y exportarlos al programa Yield Editor (Sudduth y Drummond, 2007) para su procesamiento. Se verificó la correcta especificación del retardo de flujo de granos implementando el procedimiento descrito en Chung *et al.* (2002). Para ello se generaron subconjuntos de datos alterando retardo de flujo en torno al valor original del set de datos y se estimó la varianza a corta distancia mediante semivariogramas. El valor de retardo de flujo óptimo que minimizó dicha varianza fue considerado óptimo y se utilizó para corregir

los mapas de rendimiento. Se eliminaron errores debido al retardo de inicio y fin de pasada, velocidades avance extremas, ancho de cabezal así como también rendimientos extremadamente bajos o elevados aplicando los procedimientos y filtros delineados en Sudduth y Drummond (2007).

Una vez depurados, los datos de rendimiento de todo el lote y sus coordenadas geográficas se importaron como mapa de puntos al sistema de información geográfica Quantum GIS (QGIS Development Team, 2012). Se seleccionaron los puntos incluidos en el área de estudio de 37 ha los cuales fueron exportados al programa estadístico R (R Development Core Team, 2013) para el cálculo de estadísticas de resumen y análisis geoestadístico e interpolación *kriging* mediante el paquete *gstat* (Pebesma, 2004).

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS RENDIMIENTOS

La estructura espacial de los rendimientos de cada campaña se examinó utilizando la teoría de variables regionalizadas (Isaaks y Srivastava, 1989) y el cálculo de variogramas empíricos:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(s_i) - z(s_i + h)]^2 \quad (3.1)$$

donde: h es la distancia de separación o *lag*, $\gamma(h)$ es la semivarianza entre los rendimientos separados a una distancia h , $N(h)$ es el número de pares de puntos separados a una distancia h , $z(s_i)$ es el rendimiento en el sitio i cuyas coordenadas son $\{x_i, y_i\}$.

Mediante un análisis exploratorio de datos se verificaron los supuestos de normalidad y estacionariedad del proceso y se evaluaron medidas correctivas según lo propuesto por Webster y Oliver (2007). La falta de normalidad se corrigió mediante transformaciones y/o la utilización del estimador robusto de la varianza propuesto por Cressie (1993). En el caso de observarse tendencia, la misma fue modelada mediante

funciones polinómicas y los variogramas se calcularon a partir de los residuos. Se calcularon variogramas omnidireccionales y direccionales para evaluar la presencia de anisotropía. La distancia de separación utilizada fue de 10 m y un alcance total de 300 m. Se ajustaron modelos teóricos simples y anidados mediante el procedimiento de mínimos cuadrados ponderados a partir de las siguientes estructuras básicas:

- Pepita: $\gamma(h) = c_0 \{1 - \delta(h)\}$
- Esférico: $\gamma(h) = \begin{cases} c \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{h^3}{2a^3} \right\} & h \leq a \\ c & h > a \end{cases}$
- Exponencial: $\gamma(h) = c \{1 - e^{-h/r}\}$
- Gaussiano: $\gamma(h) = c \left\{1 - e^{-(h/r)^2}\right\}$

La selección del modelo se realizó en función de la bondad de ajuste, estimada mediante la suma de cuadrados del error de regresión y los resultados del procedimiento de validación cruzada a partir de los cuales se calcularon los siguientes índices (Webster y Oliver, 2007): la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE, ecuación 3.2), coeficiente medio de desviación estándar (MSDR, ecuación 3.3) y coeficiente de correlación entre observados y predichos.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n [z(x_i) - \hat{Z}(x_i)]^2} \quad (3.2)$$

$$\text{MSDR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \frac{[z(x_i) - \hat{Z}(x_i)]^2}{\hat{\sigma}_{OK}^2(x_i)} \quad (3.3)$$

donde: N es el número observaciones utilizadas en la validación cruzada, $z(x_i)$ es el valor

observado de z en la i -ésima posición, $\hat{Z}(x_i)$ es el valor estimado por el modelo para la i -ésima posición, $\hat{\sigma}_{OK}^2$ varianza kriging de la predicción para el punto x_i .

Con el mejor modelo seleccionado, los datos de rendimientos se interpolaron a una grilla común de 10 x 10 m utilizando *kriging* en bloque ordinario o universal, dependiendo de la presencia o no de tendencia (Isaaks y Srivastava, 1989).

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

El análisis de estabilidad temporal implica la comparación entre campañas de los rendimientos en lugares predefinidos. No obstante, la ubicación geográfica de las estimaciones de rendimiento obtenidas por las cosechadoras no son consistentes entre campañas. Es por ello que este análisis se realizó sobre la matriz resultante de la interpolación de los datos a una grilla común obtenida en el apartado anterior. A su vez, la rotación analizada se compone de diferentes especies (*i.e.* soja y maíz) con magnitudes de rendimiento contrastantes, por lo tanto, el análisis se realizó sobre los datos expresados en términos relativos al rendimiento medio de cada año (Ecuación 3.4).

$$Z(s_i)_j = \frac{Y(s_i)_j}{\bar{Y}_j} \quad (3.4)$$

donde: $Z(s_i)_j$ es el rendimiento estandarizado o relativo en la posición s_i y para la campaña j , $Y(s_i)_j$ es el rendimiento original en la posición s_i y para la campaña j y \bar{Y}_j el rendimiento medio de la campaña j .

Para examinar efecto global de las condiciones ambientales de cada campaña, los rendimientos de cada cultivo se estandarizaron en relación al promedio histórico del lote para cada cultivo respectivamente (Tabla 2.1). Mediante el algoritmo no paramétrico propuesto por Silverman (1998) se aproximaron funciones de densidad de probabilidad de los rendimientos y se construyó un gráfico comparativo de las mismas.

La variación interanual de cada sitio dentro del lote se cuantificó mediante el cálculo del coeficiente de variación interanual a partir de la media y varianza interanual de los rendimientos estandarizados de acuerdo a Blackmore (2000):

$$\bar{Z}_T(s_i) = \frac{\sum_{j=1}^t Z(s_i)_j}{t} \quad (3.5)$$

$$S_T^2(s_i) = \frac{\sum_{j=1}^t [Z(s_i)_j - \bar{Z}_T(s_i)]^2}{t - 1}$$

$$CV_T(s_i) = \frac{\sqrt{S_T^2(s_i)}}{\bar{Z}_T(s_i)} \quad (3.6)$$

donde: $\bar{Z}_T(s_i)$ y $S_T^2(s_i)$ son la media y varianza interanual del punto s_i , $Z(s_i)_j$ es el rendimiento del punto s_i en el año j y t el número total de años considerado en la serie. Finalmente, a partir de los valores de CV_T calculados para cada punto se construyó un mapa de estabilidad temporal.

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

La variación espacio-temporal de los rendimientos se cuantificó mediante variografía espacio-temporal (Florin *et al.*, 2009). Este procedimiento permite explorar la variación conjunta de dos procesos aleatorios separados en función de su distancia en el espacio y en el tiempo. En situaciones donde la resolución espacial es mayor a la temporal ya que el número de instancias temporales consideradas es significativamente reducido, la variabilidad espacio-temporal se exploró a través del cálculo de pseudo-variograma cruzado:

$$\gamma^{kl}(h) = \frac{1}{2N_{kl}(h)} \sum_{i=1}^{N_{kl}(h)} [z_k(s_i(h)) - z_l(s_i + h)]^2 \quad (3.7)$$

donde: $\gamma(h)^{kl}$ es la semivarianza cruzada de los rendimientos de las campanas k y l separadas en el espacio por una distancia h ; $N_{kl}(h)$ el número de pares; $z_k(s_i)$ el rendimiento del sitio s_i en la campaña k y $z_l(s_i + h)$ el rendimiento del sitio $s_i + h$ en la campaña l . Dado que el pseudo-variograma cruzado no requiere que las observaciones de las variables se encuentren co-posicionadas se utilizaron los datos sin interpolar.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los mapas de rendimiento son un componente clave de la AP ya que brindan información sobre la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos como resultado del conjunto de factores que inciden sobre el cultivo (Pierce y Nowak, 1999). No obstante, éstos pueden tener errores propios del proceso de adquisición de la información necesaria para estimar el rendimiento los cuales pueden dificultar su interpretación (Arslan y Colvin, 2002; Sudduth y Drummond, 2007).

Tabla 3.2. Cantidad de datos de los mapas de rendimiento de maíz y soja del Lote 12 E antes y después del procesamiento para remoción de errores y detalle porcentual de los tipos de errores detectados según los filtros implementados en el programa YieldEditor.

	Cultivo/Campaña				
	Maíz 07/08	Soja 08/09	Maíz 09/10	Soja 10/11	Maíz 11/12
Total previo al procesamiento	16769	47321	62336	38164	72966
Total luego del procesamiento	12869	25733	48739	33707	54453
Filtro	% datos removidos por cada filtros ^a				
Demora de flujo	0	1	0	4	0
Demora de humedad	0	0	0	0	0
Demora inicio pasada	2	3	4	4	3
Demora fin de pasada	2	9	5	0	2
Velocidad máxima	0	10	3	0	5
Velocidad mínima	1	5	4	2	4
Suavizado velocidad	3	4	5	4	3
Ancho mínimo	2	2	5	3	3
Rendimiento máximo	0	0	0	2	0
Rendimiento mínimo	0	19	5	6	14
Desviación estándar	0	0	0	1	0
Cabezal arriba	0	20	11	0	16
Posición	0	28	2	0	0
Manual	17	4	3	0	2

^a Dado que algunos errores pueden ser detectados por más de un filtro, el porcentaje total de errores removidos es inferior a la sumatoria de los filtros.

En la Tabla 3.2 se presentan los resultados del proceso de filtrado de los mapas de rendimiento originales del Lote 12E. Entre el 12 y 46 %, de los datos originales fueron identificados como erróneos y por lo tanto descartados para posteriores análisis. Al igual que lo observado por (Sudduth y Drummond, 2007), se observó que los filtros automáticos de mayor importancia son los relacionados con las demora de flujo de granos dentro del cosechadora (*i.e.* los primeros cuatro filtros de la lista).

Tanto la proporción total de datos erróneos así como la importancia de los filtros utilizados fue variable entre campañas (Tabla 3.2) y estuvo dentro de los valores informados en otros trabajos donde se utilizaron diferentes algoritmos (Simbahan *et al.*, 2004).

Aunque algunos de estos filtros pueden representar pocos puntos removidos, su efecto sobre la calidad sobre el mapa resultante es importante ya que remueve la proporción de efecto pepita en los variogramas. Entre ellos, el parámetro que corrige la demora de flujo controla la relación espacial entre el flujo de granos sentido por el monitor de rendimiento y la superficie realmente cosechada correspondiente a ese flujo (Arslan y Colvin, 2002) y por lo tanto tiene efecto sobre la calidad del mapa ya que disminuye la proporción de efecto pepita en los variogramas (Chung *et al.*, 2002). En los mapas 2008/09 y 2010/11 se detectó que el tiempo de demora de flujo especificado era incorrecto y por lo tanto fue corregido.

Tabla 3.3. Estadísticas de descriptivas de los rendimientos de maíz y soja correspondientes al área de estudio luego del procesamiento mediante YieldEditor.

Cultivo/Campaña	n	Media	DE	Mín.	Mna.	Máx.	Asim.	Curt.
Maíz 2007/08	4.477	7.263	1.121	1131	7.438	11.910	-1,01	4,81
Soja 2008/09	7.520	1.297	568	102	1.253	3.446	0,47	3,03
Maíz 2009/10	15.044	9.092	1.324	0	9.240	14.680	-1,04	6,32
Soja 2010/11	11.306	2.605	622	142	2.665	4.493	-0,44	3,07
Maíz 2011/12	19.519	5.329	1.424	103	5.570	10.420	-0,60	2,93

DE = desvío estándar, Mín = mínimo, Mna = mediana, Máx = máximo, Asim. = asimetría y Curt. = curtosis.

Las estadísticas de resumen de los rendimientos de la secuencia soja-maíz correspondiente al área de estudio (*i.e.* 37 ha) luego de la depuración de errores se presentan en la Tabla 3.3. La variabilidad observada en los rendimientos medida por los CV fue moderada y variable entre años con valores entre 0,15 y 0,44 los cuales se ubican dentro de los CV encontrados por otros autores (Bakhsh *et al.*, 2000; Cox y Gerard, 2007; Jaynes y Colvin, 1997; Whelan y McBratney, 2000). Para un mismo cultivo se observaron diferencias interanuales en los rendimientos medios así como también en su grado de dispersión. La campaña 2008/09 presentó los rendimientos más bajos y con mayor dispersión de la serie (CV \approx 0,44). En contraste, la menor variabilidad fue registrada en las campañas 2007/08 y 2009/10 (CV \approx 0,15) con distribuciones marcadamente leptocúrticas y sesgadas hacia a los rendimientos altos.

Según Kravchenko *et al.* (2005), uno de los factores que afectan el CV de los rendimientos dentro del lote son las condiciones meteorológicas reinantes de cada campaña. Esto se observa al analizar las campañas 2008/09 y 2009/10 las cuales fueron contrastantes en términos de precipitaciones. La primera presentó el mayor CV de la serie mostrando un patrón de variación de los rendimientos más marcado, mientras que en la campaña húmeda la distribución de los rendimientos fue más homogénea (Fig. 3.2).

Las diferencias en el total de precipitaciones registradas en cada campaña así como su distribución en relación a los períodos críticos de los cultivos explicarían en parte la variabilidad registrada en cada campaña (Fig. 3.1). Durante 2008/09 las precipitaciones totales fueron las más bajas de la serie analizada (*i.e.* 498 mm) mientras que la campaña 2009/10 se caracterizó por sus abundantes precipitaciones (*i.e.* 1.413 mm). Asimismo, los totales registrados en 2007/08 y 2011/12 fueron similares, no obstante en esta última la distribución en relación al período crítico del cultivo fue desfavorable.

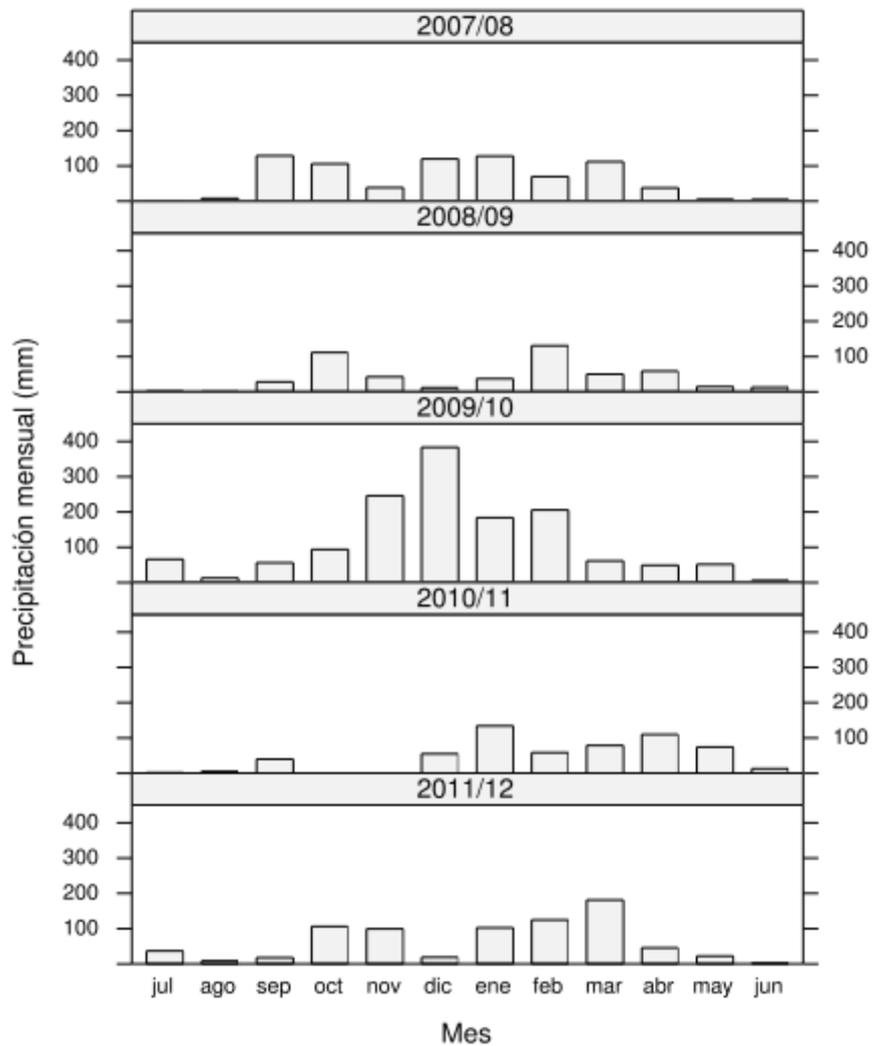


Fig. 3.1. Distribución mensual de las precipitaciones registradas en el sitio de estudio durante las campañas 2007/08 a 2011/12.

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LOS RENDIMIENTOS

En la Fig. 3.2 se presentan mapas de rendimiento obtenidos por interpolación *kriging*. Los parámetros de los variogramas teóricos ajustados por mínimos cuadrados así como los resultados de validación cruzada se detallan en la Tabla 3.4.

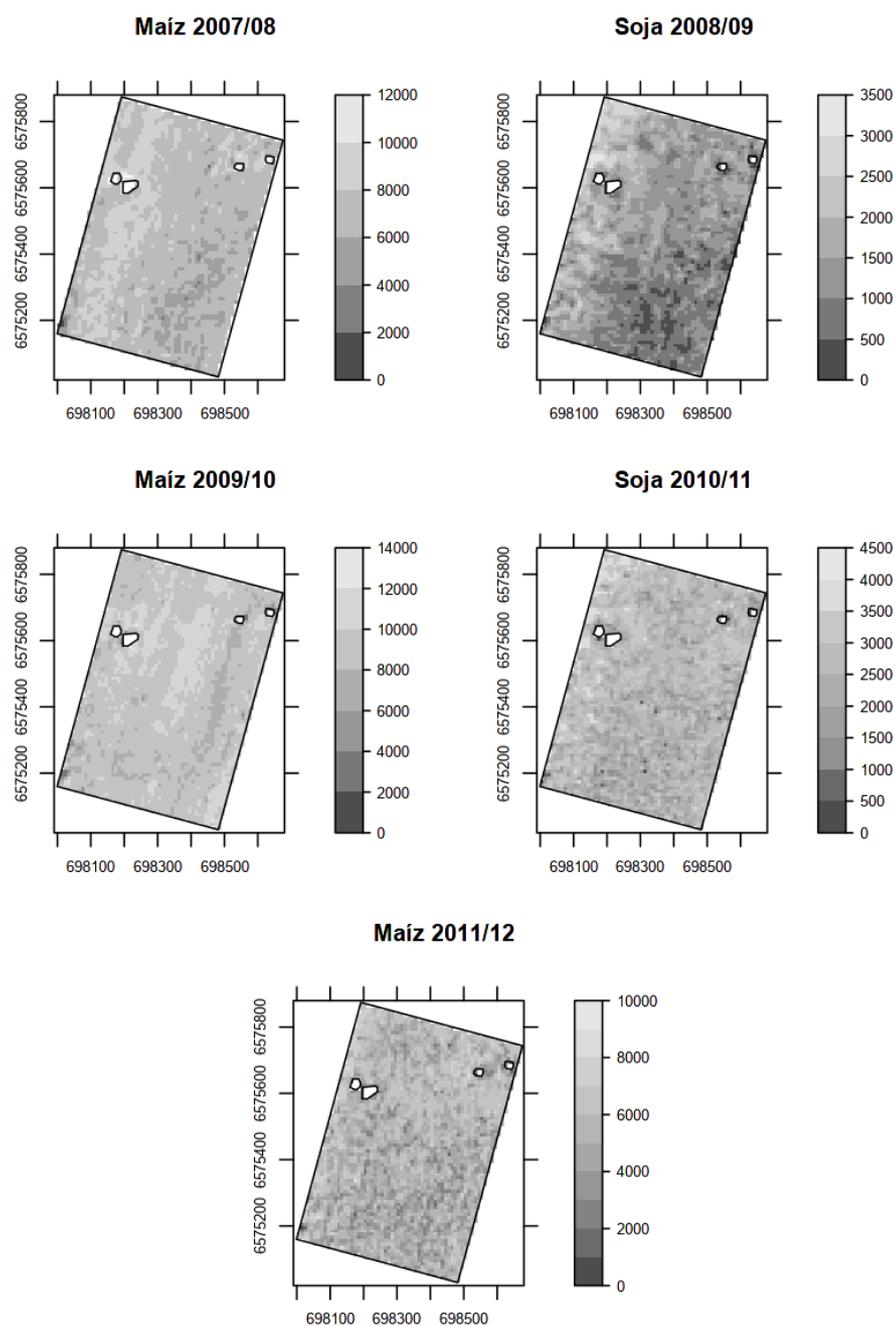


Fig. 3.2. Mapas de rendimiento de los cultivos de la secuencia maíz-soja durante el período 2007-2012. Las escalas de grises representan el rendimiento en kg ha⁻¹.

En todos los casos, los mejores ajustes se obtuvieron con modelos isotrópicos de tipo esférico con dos estructuras anidadas. Los resultados de validación cruzada muestran

exactitud aceptable de las estimaciones con una fuerte correlación entre los valores observados y predichos. Asimismo, los valores de MSDR cercanos a la unidad indican que los modelos obtenidos fueron adecuados y los errores fueron correctamente estimados por la varianza kriging. En las campañas 2007/8, 2008/09 y 2010/11 se observó relación entre los rendimientos y la posición en el área de estudio. Esta tendencia determinística fue modelada mediante el ajuste de una función lineal sobre las coordenadas la cual explicó entre el 9 y 38% de la variación total observada.

Tabla 3.4. Modelos espaciales ajustados a los datos de rendimiento de la secuencia maíz-soja

Cultivo/ Campaña	Modelo	Tend. ^a	c ₀	c ₁	c ₂	a ₁ (m)	a ₂ (m)	r	RMSE	MSDR
Maíz 2007/08	esférico doble	L (22%)	0	1,7	1,2	25	165	0,86	575	1,15
Soja 2008/09	esférico doble	L (38%)	0	13,9	7,1	29	312	0,96	154	0,98
Maíz 2009/10	esférico doble	no	1,2	2,0	2,4	21	106	0,82	755	0,99
Soja 2010/11	esférico doble	L (9%)	0	27,3	6,2	21	169	0,92	244	0,95
Maíz 2011/12	esférico doble	no	11,1	144	29,4	21	167	0,88	666	1,00

^a Tipo y porcentaje de variación explicada por la tendencia (L = lineal); c₀ = varianza no estructurada espacialmente (*i.e.* pepita); c₁ y c₂ = varianza de la primera y segunda estructura espacial; a₁ y a₂ = rango o alcance de dependencia espacial de la primera y segunda estructura espacial. r = coeficiente de correlación de Pearson; RMSE = raíz cuadrada del error cuadrático medio; MSDR = coeficiente medio de desviación estándar.

En cuanto a la estructura espacial de los rendimientos, los mapas analizados se caracterizaron por la presencia de dos estructuras espaciales. La primera de corta distancia (entre 21 y 29 m) fue consistente entre años y representó entre el 60 y 80% de la variabilidad de los rendimientos mientras que la segunda estructura presentó mayor rango de alcance el cual fue variable entre campañas (Tabla 3.4). Jaynes y Colvin (1997) trabajando con 6 años de rendimientos de una rotación soja-maíz encontraron que la estructura de variación a gran escala fue variable entre campañas y representó el 25% de la varianza total de los rendimientos. Similares resultados fueron reportados por Bakhsh *et al.* (2000). Urricariet *et al.* (2011) para cultivo de maíz en Hapludoles del noreste de Buenos Aires, obtuvieron rangos de dependencia espacial de alrededor de 120 m con proporciones variables de varianza no explicada. Lauzón *et al.* (2005), analizando secuencias mapas de

rendimiento de soja y maíz en lotes con suelos de textura y drenaje contrastante informaron estructuras espaciales de corta distancia (entre 4,7 y 28,3 m) consistentes entre campañas.

Según Mulla y Schepers (1997), la estructura espacial de los rendimientos está fuertemente afectada por la interacción de las propiedades hidráulicas del suelo y paisaje que interaccionan con la variación de los patrones de precipitación de la campaña. Bakhsh *et al.* (2000) encontraron relación negativa entre los rangos de dependencia espacial con las precipitaciones del ciclo del cultivo para soja y maíz. En este estudio, la estructura de variación a corta distancia fue consistente entre las distintas campañas mientras que se verificó fuerte correlación entre el alcance de la segunda estructura espacial y las precipitaciones del ciclo ($r = -0,79$; $Pr < 0,10$). Esto podría indicar una relación indirecta entre los factores a distancias intermedias y la dinámica hídrica en la campaña, en cambio a corta distancia, otros factores relativamente estables en el tiempo gobernarían la variabilidad de los rendimientos. De acuerdo a la enfoque de jerarquía de factores limitantes propuesto por van Ittersum y Rabbinge (1997), las condiciones hídricas y la fertilidad química actúan limitando el rendimiento de los cultivos. Posiblemente la estructura de autocorrelación en campañas secas se deba a las áreas con mejor infiltración mientras que en años normales a húmedos, otros factores como fertilidad podrían determinar la estructura espacial de los rendimientos.

VARIABILIDAD TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

En la Fig. 3.3 se presenta la comparación de la distribución de densidad de probabilidad de los rendimientos de cada campaña expresados en términos relativos al rendimiento histórico del lote para cada cultivo respectivamente. La serie analizada incluye campañas de maíz con rendimientos ligeramente inferiores y superiores al promedio del lote, mientras que para soja, los rendimientos observados son similares o inferiores al promedio del lote. Estas diferencias de niveles de producción de cada campaña así como también su grado de dispersión presentados en la Fig. 3.3 se corresponden con las variaciones de las condiciones generales experimentadas por el cultivo.

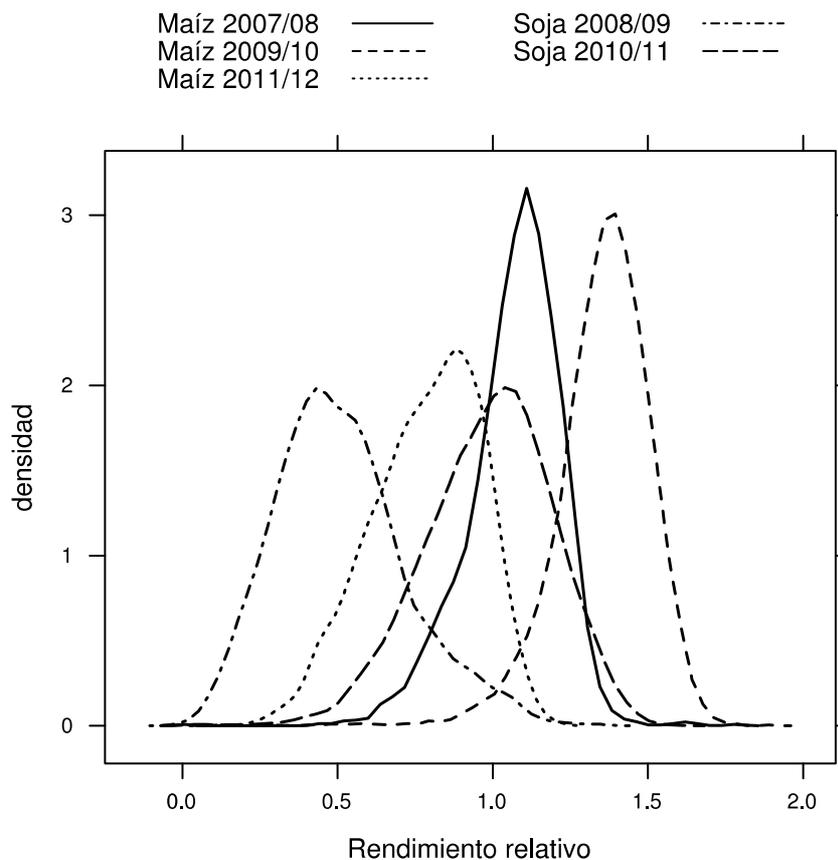


Fig. 3.3. Distribución de densidad de probabilidad de los rendimientos de las campañas 2007/08 a 2011/12 en relación al rendimiento medio histórico del lote.

La Fig. 3.4 muestra la distribución espacial del coeficiente de variación temporal (CV_T) de los rendimientos relativos dentro del sitio en estudio. El 75% de la superficie presentó CV_T inferiores a 0,23 y los sitios con mayores niveles de variabilidad temporal se distribuyeron espacialmente en pequeños parches de tamaño variable los cuales se concentraron mayormente en el sector NO y SE.

La cuantificación de la variación interanual de los rendimientos en distintos sectores del lote es de interés para el MSEC ya que puede ser de utilidad en la toma de decisiones (Blackmore *et al.*, 2003). La clasificación de un sitio en función de su estabilidad temporal requiere de la determinación de umbrales arbitrarios (Lauzon *et al.*, 2005). La distribución

espacial del variación temporal de los rendimientos (Fig. 3.4) muestra que la mayor parte del área de estudio tiene $CV_T < 0,3$ por lo que podría considerarse como estable en según el criterio propuesto por Blackmore (2000). Considerando la variabilidad espacial observada en Fig. 3.2 para las distintas campañas, los bajos valores de CV_T en la mayoría de los sitios indicaría una compensación entre los rendimientos relativos de cada año.

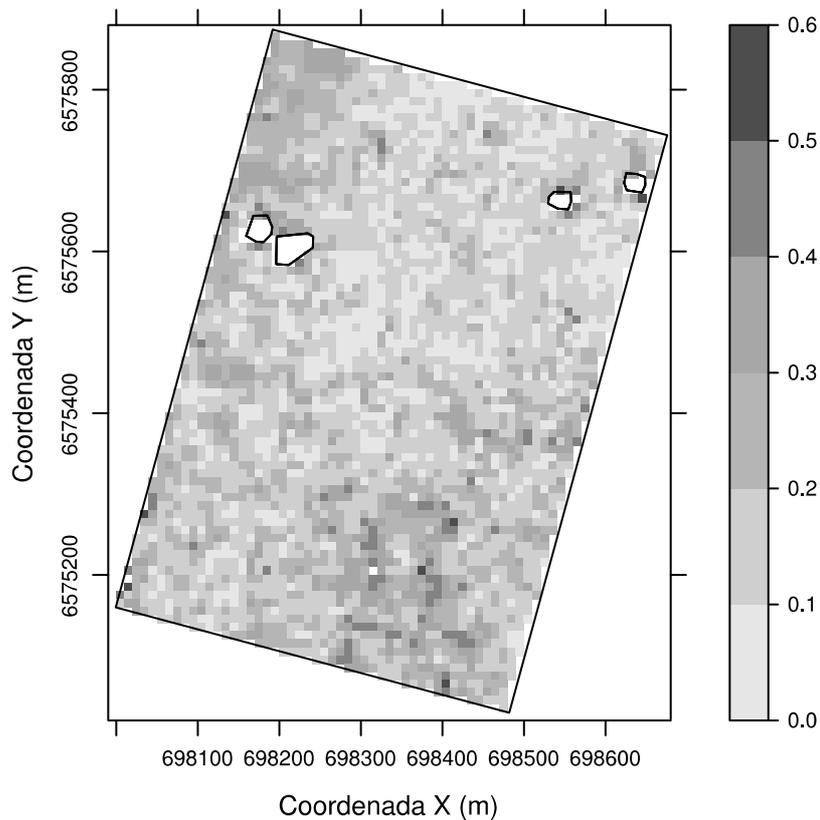


Fig. 3.4. Mapa del coeficiente de variación temporal (CV_T) de los rendimientos de la secuencia soja-maíz del área estudiada. La escala de grises representa corresponde a los valores de CV_T .

Resultados similares fueron encontrados por Blackmore (2000) y Cox y Gerard (2007) utilizando el mismo umbral de estabilidad temporal para cultivos de invierno y verano. Blackmore *et al.* (2003) sugieren que los umbrales de estabilidad temporal deben ser adaptados a los niveles de inestabilidad que pueden ser manejados por el productor. En cambio, Lauzon *et al.* (2005) propusieron un enfoque utilizando funciones de densidad de

probabilidades para relacionar la variabilidad temporal con la exactitud de los monitores de rendimiento a fin de determinar la probabilidad de estabilidad temporal de cada sitio, y de este modo evitar la utilización de umbrales empíricos. Al contrario que lo observado en este estudio, estos autores reportaron solo el 23% de la superficie con 80% de probabilidad de ser estable cuando se considera un monitor de rendimiento con exactitud del 10%.

La estabilidad temporal de los rendimientos en términos de predictibilidad puede ser cuantificada mediante la correlación entre mapas sucesivos. En la secuencia analizada las relaciones entre mapas de rendimiento sucesivos no es consistente entre campañas aunque no se observó inversión de los patrones de rendimientos, *i.e.* coeficientes de correlación negativos (Tabla 3.5). Por un lado, se observan correlaciones moderadas a fuertes entre las campañas 2010/11-2011/12, y en menor medida 2007/08-2008/09, mientras que la campaña 2009/2010 presentó baja correlación con los de su antecesor o sucesor..

Tabla 3.5. Matriz de correlación Spearman correspondiente a los mapas de rendimiento de la secuencia soja-maíz analizada.

	Maíz 2007/08	Soja 2008/09	Maíz 2009/10	Soja 2010/11	Maíz 2011/12
Maíz 2007/08	1,00	0,57	0,22	0,36	0,27
Soja 2008/09		1,00	0,24	0,62	0,49
Maíz 2009/10			1,00	0,28	0,35
Soja 2010/11				1,00	0,70
Maíz 2011/12					1,00

Los niveles de correlación interanual aquí presentados se corresponden con aquellos reportados en la bibliografía para secano. Timlin *et al.* (1998) informaron bajos niveles de correlación en un monocultivo de maíz de tres años ($r = 0,06$ a $0,29$). Resultados similares fueron informados por Bakhsh *et al.* (2000) quienes analizaron tres años de una secuencia soja-maíz e informaron correlaciones pobres a nulas entre mapas ($r = -0,07$ a $0,39$). Por su parte, Lamb *et al.* (1997) concluyeron que sólo 4 a 42% de la variabilidad de un mapa rendimiento pudo ser explicado por el mapa obtenido en la campaña anterior. En cambio, Taylor *et al.* (2001) trabajando con maíz bajo riego hallaron niveles de correlación

interanual fuerte ($r > 0,8$) sólo para uno de los sitios estudiados, mientras que el resto de los lotes presentaron correlaciones similares a las observadas en este estudio ($r = 0,15$ a $0,77$). En general, la mayoría de los estudios concluye que la predictibilidad de los rendimientos de una campaña a partir de los mapas de rendimientos anteriores es limitada por la variabilidad temporal de los mismos. Por otro lado, si se consideran las correlaciones por especie integrante de la rotación se observa que en todos los casos éstas son débiles ($r < 0,5$) y por lo tanto los patrones observados para una especie no necesariamente se mantienen en el tiempo. Por lo tanto la extrapolación de patrones de productividad a partir de los mapas de rendimientos previos puede ser riesgosa (Blackmore *et al.*, 2003).

Florin *et al.* (2009) afirman que cuando existen altos niveles de correlación, *i.e.* consistencia temporal de los patrones de rendimiento, la variabilidad temporal no necesariamente limita la implementación del MSEC dado que el riesgo se reduce a la determinación del rendimiento objetivo en cada campaña. En este estudio, la Fig. 3.4 muestra niveles de variación temporal relativamente bajos lo cual facilitaría la determinación del rendimiento objetivo mientras que la inconsistencia de los patrones espaciales de rendimiento de Tabla 3.5 limitaría su predicción dentro del lote.

VARIABILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

La Fig. 3.5 muestra los variogramas espacio-temporales de la secuencia de cultivos estudiada. En dicha figura se puede observar el cambio de la magnitud y estructura de la variabilidad en ambas dimensiones. Cuando $t = 0$ (*i.e.* $lag0$), el variograma resultante es el promedio de los variogramas de cada campaña. Al igual que los auto-variogramas presentados en la Tabla 3.4 se observan dos estructuras de la varianza de los rendimientos en función de la distancia lo cual es evidenciado por el cambio de pendiente. A medida que el intervalo de tiempo considerado es mayor, la estructura de varianza es menos evidente. Cuando se fijando $h = 0$ puede examinarse para un mismo sitio, la evolución de la varianza temporal en función de los intervalos de tiempo entre campañas. En esta dimensión el patrón es menos evidente posiblemente por escasez de datos, *i.e.* longitud de la serie.

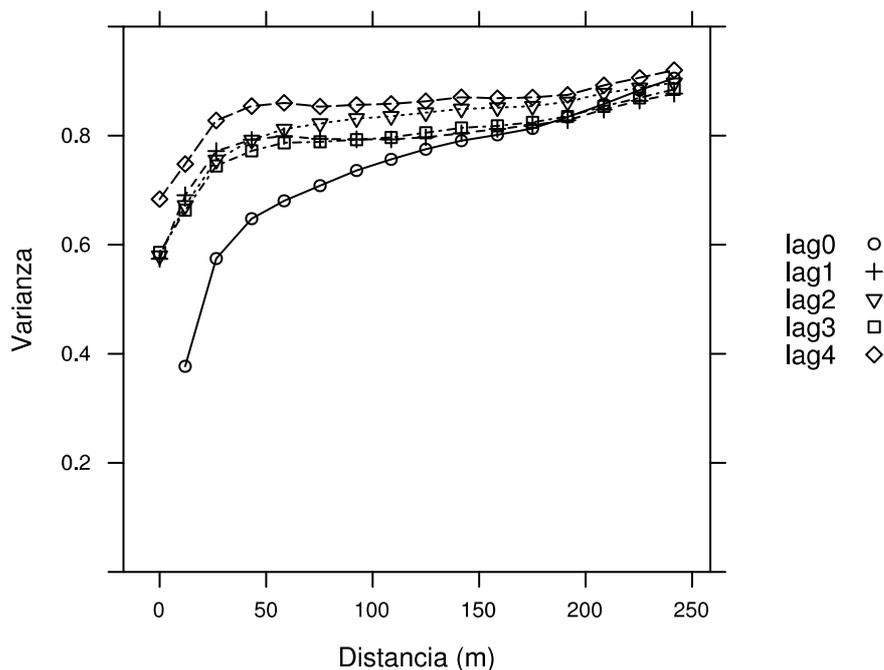


Fig. 3.5. Variogramas espacio-temporales de los mapas de rendimiento de los cultivos de la secuencia maíz-soja durante el período 2007-2012. Cada línea representa un intervalo de tiempo (años).

Al igual que otros enfoques propuestos, la menor disponibilidad de datos en la dimensión temporal es un factor limitante. No obstante, es posible realizar comparaciones entre la magnitud de la variación espacial y temporal. En función de la Fig. 3.5, la variabilidad observada entre años consecutivos, *i.e.* lag1 o bien $t = 1$ y $h=0$, es equivalente a aquella observada entre sitios separados a más de 26 m ($t = 0, h > 26$). En otras palabras, para una misma campaña, las diferencias entre los rendimientos de dos sitios separados a más de 26 m dentro del lote sería equivalente a la variación observada entre campañas para un mismo sitio dentro del lote.

En los apartados anteriores el efecto espacial y temporal en la variabilidad de los rendimientos se ha considerado en forma independiente. Sin embargo, los factores específicos de cada sitio dentro del lote interactúan con las condiciones meteorológicas de cada campaña por lo que la variabilidad de los rendimientos puede ser analizada conjuntamente en ambas dimensiones. Pese a que la información en la dimensión temporal es limitada, los variogramas espacio-temporales permiten examinar el cambio de la

magnitud y estructura de la variabilidad a lo largo del espacio o el tiempo. En la Fig. 3.5 se observa que la estructura espacial de largo alcance se hace nula a medida que se incrementa la distancia en el tiempo, mientras que la estructura de corta distancia persiste. Florin *et al.* (2009) utilizaron el mismo enfoque para cuantificar la variabilidad espaciotemporal de rendimientos de trigo en Australia. En uno de los sitios evaluados, estos autores encontraron estructura espacial consistente entre años mientras que en otro lote la variación espacial fue variable entre años lo cual dificultaría la predicción entre años.

La existencia de variabilidad espacialmente estructurada y estable en el tiempo es un aspecto deseable para la implementación del MSEC (Pierce y Nowak, 1999). La interpretación de estos resultados estableciendo equivalencias entre la magnitud espacial y temporal de la variabilidad sería de utilidad para anticipar la factibilidad del MSEC (Florin *et al.*, 2009). Pese a la relativa estabilidad temporal, las chances para implementar el MSEC en estas condiciones serían limitadas debido a la variabilidad observada a corta distancia.

CONCLUSIONES

En el presente capítulo se avanzó sobre la caracterización de la variabilidad espacial, temporal y espacio-temporal de los rendimientos de la rotación soja-maíz de cinco años en un lote agrícola del centro de la provincia de Santa Fe.

A partir de los resultados del análisis de la variabilidad espacial de los rendimientos se concluye que la misma responde a procesos espaciales con dos escalas de variación. Los factores responsables de la variación local (*i.e.* 20-30 m) contabilizan la mayor parte de la variación de los rendimientos y sus efectos son relativamente estables entre campañas. En cambio, aquellos que actúan a una escala mayor se relacionan inversamente con las precipitaciones indicando por lo que podrían estar asociados a la variación interanual de la dinámica hídrica.

En cuanto a la variabilidad temporal se corroboró un efecto global de las condiciones ambientales de cada campaña que afectó la dispersión y rendimiento relativo medio del lote para cada cultivo en relación a su rendimiento histórico. En cambio, al considerar la variación de cada sitio en el tiempo la mayor parte del área se caracteriza por su estabilidad temporal. Sin embargo, y pese a que los rendimientos no mostraron una inversión de los patrones espaciales de una campaña a otra, se concluye que la utilidad de la información contenida en los mapas de cultivos antecesores para predecir los rendimientos es limitada.

Finalmente, al abordar el análisis de la variabilidad espacio-temporal de los rendimientos se corroboró la hipótesis de trabajo por la cual la variabilidad observada entre años consecutivos es equivalente a la variabilidad observada a corta distancia de modo tal que la implementación del MSEC en estas condiciones representaría cierto grado de dificultad debido a la escala espacial de variación y la baja predictibilidad a través del tiempo.

ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE ATRIBUTOS EDÁFICOS⁸

INTRODUCCIÓN

Los procesos y atributos de suelo que influyen sobre el desempeño de los cultivos varían en el espacio y tiempo (Mulla y Schepers, 1997). La variabilidad de los atributos de suelo depende de la escala a la cual es observada ya que responde a la acción de factores formadores que actúan en un continuo de escalas espaciales y temporales, dando como resultado estructuras de variación anidadas (Trangmar *et al.*, 1985). A escala regional, el clima, los patrones de uso de la tierra, tipo de vegetación y característica del relieve son los principales determinantes de dicha variación (Mallarino y Wittry, 2004). En cambio, a escala de lote, la variación es frecuentemente asociada a la topografía ya que origina variabilidad espacial a través del control de la distribución de agua y sedimentos (Ceddia *et al.*, 2009). 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). En suelos cultivados, las prácticas de manejo como la orientación de los surcos, método de aplicación de nutrientes, labores y compactación pueden dominar las causas de variabilidad a escalas grandes (Mallarino y Wittry, 2004), alterando atributos químicos, físicos, y biológicos del horizonte superficial (Corá *et al.*, 2004).

A partir de las primeras aplicaciones de la teoría de variables regionalizadas a la ciencia del suelo (*e.g.* Burgess *et al.*, 1981; Burgess y Webster, 1980a, 1980b; Webster y Burgess, 1980), el estudio cuantitativo de la distribución espacial de las propiedades

⁸ Parte de los resultados incluidos en este capítulo han sido publicados en Alesso, C.A., Pilatti, M.A., Imhoff, S., Grilli, M.P., 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la Pampa Llana Santafesina. *Ci. Suelo* 30, 85–93.

edáficas ha sido abordado mediante métodos geoestadísticos. Resultados de este tipo de estudios, abarcando diversas condiciones edafoclimáticas y escalas de observación, demuestran que las propiedades edáficas frecuentemente presentan auto-correlación espacial (Mulla y McBratney, 2000; Trangmar *et al.*, 1985; Warrick *et al.*, 1986; Whelan, 1998)

El MSEC basado en mapas de atributos de suelo depende de la correcta especificación de la estructura espacial de dichos atributos para poder aplicar técnicas de interpolación (Kravchenko, 2003). Debido a la interacción entre la variabilidad natural y las prácticas antrópicas la estructura espacial de las propiedades de suelo es específica de cada lote (Mallarino, 1996). En sitios donde se cuenta previamente con una descripción de la continuidad espacial de un atributo suelo, es posible optimizar la intensidad de muestreo en función de la variabilidad deseada en las predicciones, *i.e.* varianza kriging (McBratney y Webster, 1981). En cambio, en ausencia de estudios previos, referencias locales de condiciones similares (*i.e.* tipo de suelo, topografía, etc.) son de gran utilidad para orientar la toma de muestras (Webster y Oliver, 2007). McBratney y Pringle (1999) a partir de variogramas recopilados en la bibliografía propusieron la utilización de variogramas promedios y proporcionales para optimizar el diseño de muestreos intensivos de suelo.

Sin embargo, dependiendo de la escala de variación, la adquisición de información sobre la distribución espacial de los atributos de suelo mediante este tipo de enfoque puede implicar altos requerimientos de tiempo y dinero tornándose así limitante para la aplicación del MSEC (Mueller *et al.*, 2004). Es por ello que se han desarrollado y evaluado diversos sensores de suelo para la adquisición de información secundaria de alta resolución espacial que permita estimar de manera económica la variabilidad espacial de los atributos de suelo de interés (Adamchuk *et al.*, 2011). Entre estos sensores se destacan aquellos basados en la conductividad eléctrica aparente del suelo ya que esta medida se correlaciona directamente con diversos atributos edáficos directamente (*e.g.* salinidad y contenido de nutrientes en solución del suelo, contenido hídrico, granulometría y profundidad de horizonte argílico, densidad de suelo) o indirectamente medidos (*e.g.* materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, etc) (Corwin y Lesch, 2005a; Sudduth *et al.*, 2005). En Corwin y Lesch (2003, 2005) se detallan los principios teóricos y diseños de los sensores así como

también lineamientos generales para su utilización en relevamiento a escala de lotes.

A nivel nacional existen algunos antecedentes sobre estudios de variabilidad espacial de atributos suelo en distintas condiciones edafoclimáticas y utilizando distintas escalas de muestreo (Correa y Sosa, 1998; Cruzate y Rivero, 2010; Di Pietro *et al.*, 1986; Gabioud *et al.*, 2012; Kemmerer y Melchiori, 2004; Melchiori, 2000; Urricariet *et al.*, 2011). No obstante, para el centro de la provincia de Santa Fe la información es más escasa (Alesso y Pilatti, 2008).

La pampa llana santafesina se caracteriza por la presencia de áreas planas de relieve “subnormal” y áreas suavemente onduladas o de relieve “normal”, ambas con micro relieves lo cual presupone la ocurrencia de variaciones de suelo a cortas distancias (Hein *et al.*, 1989). Los objetivos de este capítulo son: (i) modelar la variabilidad espacial de atributos químicos y físicos del horizonte superficial de un lote de producción de la zona central de Santa Fe con relieve normal, cultivado en siembra directa con rotación agrícola y aplicación de fertilizantes, para verificar la viabilidad de implementar el sistema de manejo sitio-específico de cultivos; y (ii) modelar la distribución espacial de las medidas de conductividad eléctrica y su relación con atributos de suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en un lote del distrito La Pelada, provincia de Santa Fe (30° 56' 17" S, 60° 55' 23" O). Detalles de las condiciones generales del lote fueron presentados en el Capítulo 2. Para cuantificar la magnitud y estructura espacial de la variabilidad de atributos edáficos se condujo un muestreo en grilla y otro dirigido en función de la CEa.

MUESTREO EN GRILLA

En un sector con pendiente general 0,7 % se delimitó una parcela de 475 x 100 m y con una estación total Pentax R 326 EX se trazaron tres transectas paralelas distanciadas a 50 m entre sí con 20 puntos cada una (n = 60) cada 25 m (Fig. 4.1). En cada sitio se registró la cota relativa al punto más bajo y se tomó una muestra perturbada de los primeros 20 cm del horizonte A, compuesta de cinco submuestras tomadas en un radio de 2-3 m, y muestras no perturbadas con cilindros de volumen conocido a 0-10 y 10-20 cm de profundidad. Adicionalmente en cada sitio se registró la profundidad al inicio del horizonte B (IniB, cm) mediante pozos de observación. Finalmente, a los efectos de verificar la estructura espacial a corta distancia de algunas de las propiedades de suelo, se

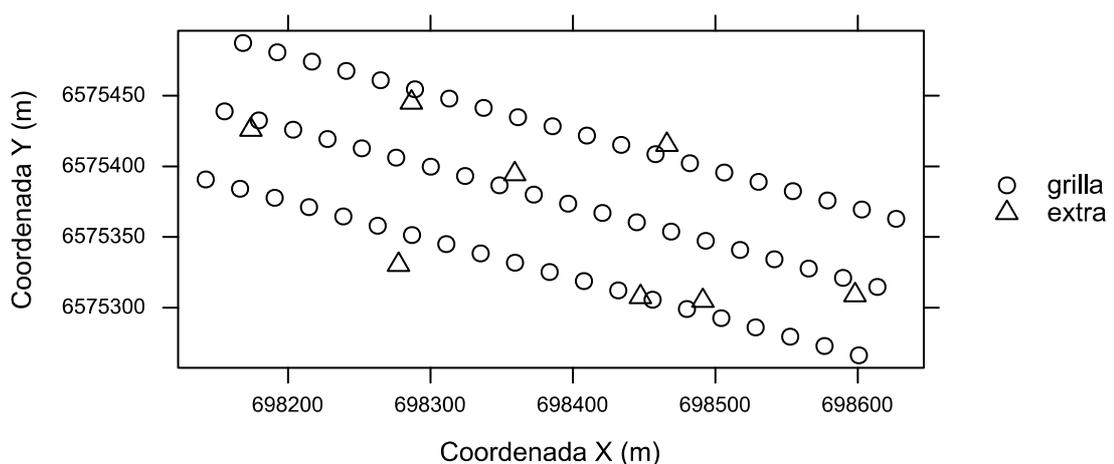


Fig. 4.1. Diseño de muestreo en grilla (círculos) con puntos al azar (triángulos).

seleccionaron al azar 8 sitios de muestreo adicionales los cuales se incorporaron al análisis de la grilla obtenida en la etapa anterior ($n = 60+8$).

Las muestras perturbadas fueron secadas al aire, molidas y tamizadas por malla de 2 mm para realizar las siguientes determinaciones analíticas: C orgánico total (COT, g kg^{-1}) estimado a partir del carbono fácilmente oxidable (Walkley y Black, 1934) con factor de recuperación 0,77; N total (Nt, g kg^{-1}) por el método Kjeldahl (Jackson, 1982); P extractable (P, mg kg^{-1}) según Bray y Kurtz (1945); arena entre 50 μm y 2 mm (Arena, g kg^{-1}) por tamizado en húmedo y arcilla < 2 μm (Arcilla, g kg^{-1}) por el método del hidrómetro sin pre-tratamientos según Gee y Or (2002); y reacción del suelo (pH) por el método potenciométrico en relación suelo-agua 1:2,5 (Jackson, 1982). Para la determinación de N de nitratos (N-NO₃, mg kg^{-1}) previo al secado de las muestras se extrajo una alícuota la cual se mantuvo refrigerada hasta su determinación por el método del ácido fenoldisulfónico (Jackson, 1982). Con las muestras no perturbadas se estimó la densidad aparente del suelo (Ds, Mg m^{-3}) mediante el método del cilindro 100 cm^3 (Forsythe, 1975).

RELEVAMIENTO CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE

En un área de aproximadamente 37 ha se condujo un relevamiento de CEa utilizando un sensor de resistividad eléctrica con arreglo tipo Wenner marca Veris 3100⁹ equipado con DGPS. Las lecturas geo-referenciadas se tomaron recorriendo el área de muestreo a una velocidad de entre 15-20 km h^{-1} siguiendo transectas paralelas distanciadas a 15 m y orientadas en dirección a las líneas de siembra. De acuerdo a la configuración de los electrodos se obtuvieron lecturas de los espesores 0-30 y 0-90 cm. Los datos obtenidos del dispositivo Veris (en mS m^{-1}) resultan de la conversión de resistividad a conductividad eléctrica mediante la siguiente relación: $\text{conductividad} = \text{resistividad}^{-1}$. Los datos sin interpolar fueron pre-procesados para eliminar errores sistemáticos propios del sensor y valores extremos identificados mediante gráfico de caja. La distribución de valores de CEa se dividió en cuartiles y dentro de cada grupo se seleccionaron 10 sitios al azar ($n = 40$) de modo tal de abarcar el espectro de variación de dicha propiedad (Fig. 4.2). Para asegurar la

⁹ Veris Technologies, Salinas, Kansas, USA (www.veristech.com).

independencia de las observaciones se impuso una restricción a la aleatorización de modo tal de no seleccionar sitios distanciados a menos de 27 m correspondiente a la distancia de auto-correlación espacial obtenida el análisis geoestadístico de las variables del muestreo en grilla.

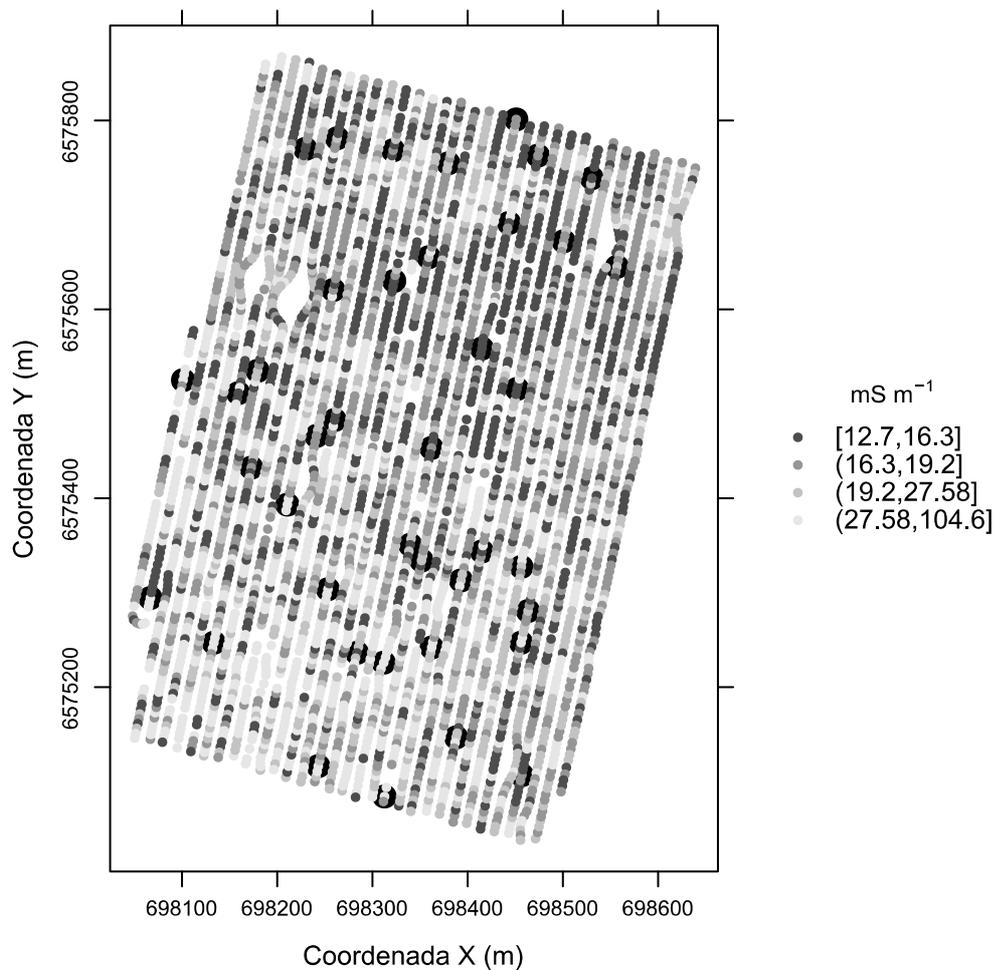


Fig. 4.2. Sitios de muestreo seleccionados en función de la distribución de los valores de CEA 0-30 cm.

En los sitios seleccionados se tomaron muestras de suelo compuestas a una profundidad 0-30 cm con barreno manual. De cada muestra se extrajo una alícuota la cual se conservó en recipiente hermético para posterior determinación del contenido hídrico gravimétrico en estufa con ventilación forzada a 105 °C por 48 hs. El resto del material fue secado al aire, molido y tamizado por malla de 2 mm. Sobre las muestras procesadas se

realizaron las siguientes determinaciones: C orgánico total (COT, g kg⁻¹) estimado a partir del carbono fácilmente oxidable (Walkley y Black, 1934) con factor de recuperación 0,77; P extractable (P, mg kg⁻¹) según Bray y Kurtz (1945); arena entre 50 µm y 2 mm (Arena, g kg⁻¹) por tamizado en húmedo, arcilla < 2 µm (Arcilla, g kg⁻¹) y limo 2 a 50 µm (Limo, g kg⁻¹) por diferencia mediante el método del hidrómetro sin pre-tratamientos según Gee y Or (2002); conductividad eléctrica en relación suelo-agua 1:4 y reacción del suelo (pH) por el método potenciométrico en relación suelo-agua 1:2,5 (Jackson, 1982).

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

Se realizó análisis exploratorio mediante estadísticas de resumen univariadas y gráficos exploratorios para cada atributo utilizando el paquete estadístico R (R Development Core Team, 2013). La presencia de tendencia interna o falta de estacionariedad de segundo orden se modeló mediante funciones polinómicas en función de las coordenadas o covariables. En aquellos casos donde dicha tendencia representó más del 20% de la variación total, los variogramas fueron estimados a partir de los residuales obtenidos mediante mínimos cuadrados generalizados (GLS) (Kerry y Oliver, 2007). Mediante gráficos exploratorios de probabilidad normal se examinó el cumplimiento del supuesto de normalidad y se evaluaron transformaciones tipo box-cox. Se identificaron valores extremos mediante gráficos de caja y se verificó su efecto sobre la normalidad mediante la prueba Shapiro-Francia ($\alpha = 0,05$). Asimismo, para reducir el efecto de valores extremos en el cálculo de los variogramas se utilizó el estimador robusto de la semivarianza de Cressie (Cressie, 1993; Webster y Oliver, 2007) (Ecuación 4.1)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{\left\{ \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} |Z(x_i) - Z(x_{i+h})|^{0,5} \right\}^4}{0,914 + \frac{0,988}{N(h)}} \quad (4.1)$$

donde: $\hat{\gamma}(h)$ es la semivarianza, $N(h)$ es el número total de pares a una distancia h , y

$Z(x_i)$ y $Z(x_{i+h})$ pares de observaciones separados por una distancia h .

La dependencia espacial de los atributos de suelo se examinó mediante el cálculo de variogramas experimentales. En el caso del muestreo en grilla se calcularon variogramas omnidireccionales con intervalos de espaciamento (*lag*) de 25 m y tolerancia de 12,5 m sobre una distancia activa de 200 m con un mínimo de 30 pares por lag (Goovaerts, 1998). Se calcularon los límites mínimos y máximos de los variogramas empíricos (*envelopes*) por el método Monte Carlo mediante permutaciones de los datos sobre las coordenadas bajo el supuesto de independencia espacial (Diggle y Ribeiro Jr., 2007). En cambio, la resolución espacial de muestreo de CEa permitió calcular variogramas empíricos utilizando espaciamientos menores así como examinar posibles efectos direccionales.

La auto-correlación espacial en los datos del muestreo en grilla se modeló mediante el ajuste de variogramas teóricos por el método de máxima verosimilitud restringida (*restricted maximum likelihood*, REML) debido a que la cantidad de observaciones fue menor a la recomendada para la estimación por método de momentos (Kerry y Oliver, 2007). El cálculo de los límites de los variogramas y estimación de parámetros se realizó mediante el paquete *geoR* (Ribeiro Jr. y Diggle, 2001). La estimación de los variogramas teóricos de CEa se realizó mediante el procedimiento de ajuste no lineal por mínimos cuadrados ponderadas implementado en el paquete *gstat* (Pebesma, 2004). Se ajustaron funciones de semivarianza esférica, exponencial y gaussianas con componente no espacial (*pepita*) descritas en Capítulo 3. En el caso de los variogramas ajustados por REML, se retuvo el modelo con menor criterio de información de Akaike (AIC) el cual se comparó con un modelo reducido sin estructura espacial de errores, *i.e.* efecto pepita puro, mediante la prueba de razón de máxima verosimilitud (*log-likelihood ratio test*, LRT). Los variogramas ajustados para CEa se seleccionaron en función de la bondad de ajuste estimada por la suma de cuadrados del error.

Los modelos ajustados fueron validados mediante el procedimiento de validación cruzada (Webster y Oliver, 2007). A partir de los pares de valores observados y predichos se calculó el coeficiente de correlación lineal de Pearson, la raíz cuadrada del error cuadrático medio (*root mean squared error*, RMSE, Ecuación 3.2) y el cociente medio de

desviación cuadrada (*mean squared deviation ratio*, MSDR, Ecuación 3.3).

A partir de los modelos ajustados, se generaron mapas de predicción de las variables de interés utilizando el algoritmo de interpolación kriging en bloque sobre una grilla con tamaño de celda de 10 x 10 m (Webster y Oliver, 2007).

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE Y ATRIBUTOS DE SUELO

La relación entre atributos de suelo obtenidos mediante el muestreo dirigido y los valores de CEa medidos por el sensor en los espesores 0-30 y 0-90 se exploraron mediante análisis de correlación lineal. Posteriormente se ajustaron modelos de predicción de las propiedades edáficas en función de las lecturas del sensor utilizando un modelo completo con interacción y efectos cuadráticos y aplicando el procedimiento de simplificación progresiva en función del AIC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tanto la variabilidad como la estructura espacial son claves para la aplicación del MSEC. A mayor magnitud de variación, mayor es la probabilidad de diferenciar dosis de insumos, mientras que una fuerte estructura espacial determina patrones de variabilidad suaves y amplios que facilitan la aplicación de dosis variables (Pringle *et al.*, 2003).

VARIABILIDAD Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE ATRIBUTOS DE SUELO

En la Tabla 4.1 se presentan las estadísticas de resumen de los atributos de suelo correspondientes al espesor 0-20 cm del horizonte superficial obtenidos a partir del muestreo en grilla. La variabilidad de COT, Arena, Limo, Arcilla, Ds 0-10, Ds 10-20, y pH fue baja (*i.e.* $CV < 0,15$) y moderada para P, Nt, N-NO₃ e IniB (*i.e.* $0,15 < CV < 0,35$) de acuerdo a la clasificación propuesta en (Wilding y Drees, 1983). La mayoría de las variables estudiadas siguieron una distribución normal con coeficientes de asimetría y curtosis bajos ente -1 y 1. Solamente el pH se alejó de la distribución normal debido a que

Tabla 4.1. Estadísticas descriptivas de los atributos del horizonte superficial (0-20 cm) de un Argiudol típico del centro de Santa Fe.

Atributo	n	Mín.	Med.	Mna.	Máx.	CV%	Asim.	Curt.	W
N-NO ₃ (mg kg ⁻¹)	58	6,7	15,8	16,4	23,0	0,22	-0,32	-0,23	0,986
COT (g kg ⁻¹)	68	8,6	11,0	11,0	13,7	0,11	-0,01	-0,55	0,992
Nt (g kg ⁻¹)	67	0,41	0,83	0,84	1,16	0,22	-0,21	-0,65	0,983
P (mg kg ⁻¹)	59	6,5	16,9	16,4	31,2	0,34	0,58	-0,26	0,966
Arena (g kg ⁻¹)	65	63	89	88	117	0,13	-0,10	-0,68	0,984
Limo (g kg ⁻¹)	67	671	711	714	741	0,02	-0,43	-0,23	0,981
Arcilla (g kg ⁻¹)	67	161	198	199	233	0,08	0,10	-0,67	0,972
pH	68	5,32	5,76	5,71	6,55	0,05	0,78	-0,09	0,941*
Ds 0-10 (Mg cm ⁻³)	60	1,24	1,37	1,38	1,49	0,05	-0,11	-0,77	0,981
Ds 10-20 (Mg cm ⁻³)	59	1,34	1,47	1,47	1,56	0,03	-0,31	0,05	0,981
IniB (cm)	60	14	27	27	40	0,20	0,16	-0,21	0,98

Mín = mínimo, Máx = máximo, Med = media, Mna = median, CV = coeficiente de variación, Asim. = asimetría, Curt. = curtosis, W = estadístico de la prueba Shapiro-Francia (* indica $Pr < 0,05$).

dicha variable presenta asimetría intrínseca la cual ha sido citada por otros autores (*e.g.* Goovaerts, 1998; Mulla y McBratney, 2000). Las transformaciones evaluadas no tuvieron efecto sobre los variogramas por lo que se optó por usar los datos originales (Kerry y Oliver, 2007). La variabilidad de los atributos de suelo en términos de CV fue moderada a baja en ambos muestreos con CV cercanos al extremo inferior del intervalo encontrado en la bibliografía para diferentes condiciones edafoclimáticas (Mulla y McBratney, 2000; Trangmar *et al.*, 1985).

En la Tabla 4.2 se muestran las estadísticas de resumen de los atributos de suelo del horizonte superficial 0-30 cm relevados con el muestreo dirigido en función de la distribución espacial de la CEa. La variabilidad registrada en la mayoría de los atributos estudiados fue moderada a baja con valores comparables a los obtenidos mediante el muestreo en grilla pese a las diferencias de profundidades consideradas. Por otro lado, el área abarcada por el muestreo dirigido en función de la CEa fue cerca de 7,5 veces mayor a las dimensiones de la grilla lo cual indicaría estabilidad en la variación de los atributos pese al incremento del área muestreada. En general, el incremento de tamaño del área de muestreo tiende a incrementar la variabilidad total de los atributos de suelo aunque sin seguir una tendencia definida (Wilding y Drees, 1983). Sin embargo, el cambio de escala del muestreo no significó un aumento de la variabilidad total de los atributos estudiados. Solamente la CE medida en solución 1:4 presentó variabilidad moderada alta con

Tabla 4.2. Estadísticas descriptivas de los atributos del horizonte superficial (0-30 cm) de un suelo Argiudol típico obtenidos a partir del muestreo dirigido en función de la distribución espacial de la CEa.

Atributo	n	Mín.	Med.	Mna.	Máx.	CV	Asim.	Curt.	W
CE 1:4 (dS m ⁻¹)	38	0,05	0,07	0,06	0,13	0,34	1,01	-0,29	0,85*
pH	40	5,5	6,2	6,1	6,9	0,08	0,22	-1,41	0,93*
Arcilla (g kg ⁻¹)	39	17	23	23	30	0,14	0,18	-0,87	0,98
Arena (g kg ⁻¹)	39	6	7	7	8	0,09	0,35	-0,70	0,97
Limo (g kg ⁻¹)	39	62	70	70	77	0,05	-0,30	-0,64	0,98
W (g g ⁻¹)	40	0,18	0,22	0,21	0,25	0,07	0,04	-0,24	0,98
COT (g kg ⁻¹)	39	8,8	11,0	10,8	13,9	0,12	0,22	-0,56	0,98

Mín = mínimo, Máx = máximo, Med = media, CV = coeficiente de variación, Asim. = asimetría, Curt. = curtosis.

distribución no normal con asimetría derecha similar a lo observado en la distribución de CEa.

A nivel local, la información cuantitativa sobre la variabilidad de las propiedades de suelo a escala de lote es limitada (*e.g.* Alesso y Pilatti, 2008). La mayoría de estos estudios se han conducido en diferentes condiciones edafoclimáticas a las aquí estudiadas incluyendo diferentes suelos y topografía, así como también diferentes manejo y esquemas de muestreo. En un Argiudol típico del centro de Santa Fe con relieve subnormal, Alesso y Pilatti (2008) encontraron niveles de variación de Ds similares a los presentados en la Tabla 4.1, mientras que el CV del P fue ligeramente superior dentro de una hectárea. Sobre el mismo tipo de suelo pero a escala menor, Di Pietro *et al.* (1986) obtuvieron CV inferiores para P, pH, Nt, COT y Arcilla en una superficie de 20 x 25 m. A escala de lote sobre Argiudoles típicos de la Pampa Ondulada bajo siembra directa Álvarez *et al.* (2004) encontraron resultados similares a los aquí presentados, aunque con CV para P cerca de 10 veces mayor. En estudios realizados sobre otros suelos con textura y relieve contrastantes, la variabilidad documentada para atributos de suelo es significativamente mayor (*e.g.* Gabioud *et al.*, 2012; Kemerer y Melchiori, 2004, 2012; Melchiori, 2000; Zubillaga *et al.*, 2006a).

Los estudios sobre la aplicación de MSEC se caracterizan por los altos niveles de variabilidad de los atributos de suelo relacionados con la producción de los cultivos los cuales justifican la aplicación de manejos diferenciados dentro del lote (*e.g.* Cambardella *et al.*, 1994; Cox *et al.*, 2003; Iqbal *et al.*, 2005; Mallarino, 1996; Mueller *et al.*, 2001; Mzuku *et al.*, 2005; Sudduth *et al.*, 2005). Considerando solamente la magnitud de variación de los atributos edáficos, los resultados presentados en la Tabla 4.1 y Tabla 4.2 sugieren que la variabilidad de la mayoría de propiedades de suelo aquí estudiadas no sería suficiente para requerir la aplicación de estrategias de manejo diferenciadas dentro del lote.

En las Fig. 4.3 y Fig. 4.4 se presentan los variogramas empíricos con sus respectivos límites simulados por el método Monte Carlo. La mayoría de los atributos no mostraron auto-correlación a la escala de muestreo utilizada ya que dichos variogramas se ubicaron dentro de los límites simulados bajo el supuesto de independencia espacial (Diggle y

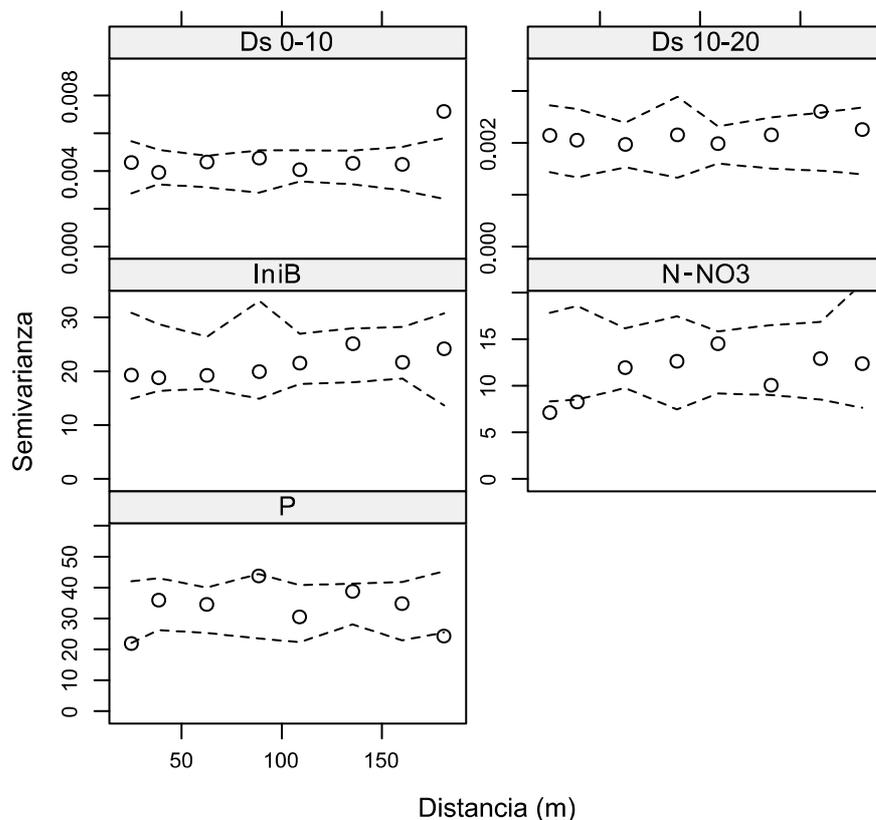


Fig. 4.3. Variogramas empíricos (círculos) y límites (línea cortada) de los atributos del horizonte superficial (profundidad 0-20 cm) obtenidos a partir del muestreo en grilla (n = 60).

Ribeiro Jr., 2007). En cambio, en los primeros intervalos de distancia los variogramas de COT, N-NO₃ y Nt mostraron varianzas ligeramente menores al mínimo obtenido por simulación lo cual indicaría cierta estructura espacial.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados del ajuste de modelos espaciales a los atributos de suelo obtenidos por REML. A diferencia del método de momentos el cual se basa en el cálculo de variogramas empíricos, la estimación de la estructura de auto-correlación espacial se realiza directamente sobre la matriz de observaciones lo cual es aconsejable cuando la cantidad de observaciones es limitada (Diggle y Ribeiro Jr., 2007). Kerry y Oliver (2007) aconsejan la utilización de este método cuando se disponen entre 50 y 100 observaciones.

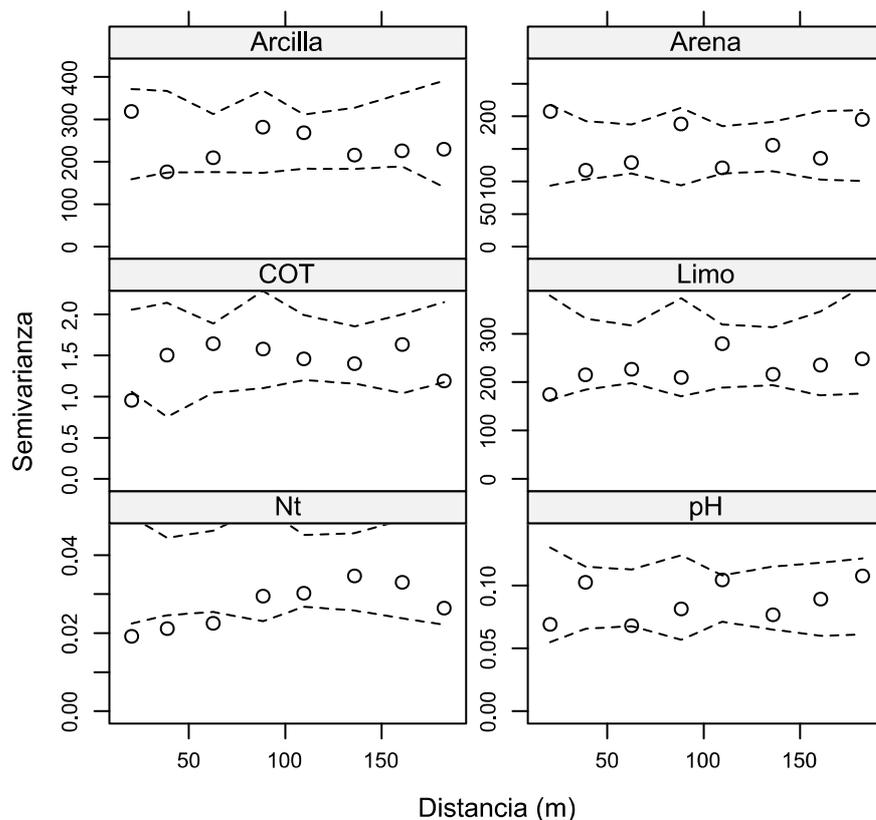


Fig. 4.4. Variogramas empíricos (círculos) y límites (línea cortada) de los atributos del horizonte superficial (profundidad 0-20 cm) obtenidos a partir del muestreo en grilla y muestras adicionales al azar (n = 68).

Los AIC correspondientes a los modelos con y sin estructura espacial de errores indican que para la mayoría de los atributos dicha estructura es nula ($AIC > AICns$). En cambio, para Nt, N-NO₃, Limo y Ds 0-10 los AIC correspondientes al modelo con estructura fueron ligeramente inferiores al AICns. No obstante, al evaluar dichas diferencias mediante LRT, solamente el modelo alternativo de Nt fue significativamente mejor que el modelo no espacial ($Pr < 0,05$), aunque la correlación entre valores observados y predichos obtenidos a partir del procedimiento de validación cruzada fue bajo.

La variabilidad de los atributos de suelo es el resultado de procesos que actúan a diferentes escalas espaciales y temporales (Cambardella *et al.*, 1994). La escala y diseño del muestreo, *i.e.* número y distribución de las muestras, condicionan fuertemente los

Tabla 4.3. Parámetros y validación cruzada de los modelos espaciales ajustados por REML de los atributos de suelo del horizonte superficial (espesor 0-20 cm) en un lote del centro de Santa Fe.

Atributo	Modelo	beta	c ₀	c ₁	a	AIC	AIC _{ns}	r	RMSE	MSDR
COT	esférico	11,058	0,204	1,202	33	224,1	221,3	0,10	1,20	1,02
Nt	esférico	0,829	0,021	0,013	243	-43,1	-37,4	0,43	0,00001	1,01
limo	esférico	711	127,7	119,1	30	563,0	563,4	0,34	16	0,99
arena	esférico	89	0,0	138,4	13	512,9	509,2	0,13	13	0,89
arcilla	esférico	198	239	16,56	499	568,1	565,0	0,15	16	0,99
pH	esférico	5,78	0,0499	0,0407	35	37,1	33,4	0,08	0,37	1,06
N-NO3	esférico	15,8	4,35	7,52	72	310,2	312	0,39	3,52	1,07
P	exponencial	16,9	4,2	28,9	28	381,7	377,9	0,08	6,9	1,02
Ds 0-10	exponencial	1,37	0	0,004	63	-156,6	-155,2	0,39	0,06	1,02
Ds 10-20	exponencial	1,47	0,0018	0,00002	125	-191,8	-195,4	0,08	0,05	1,02
IniB	exponencial	27	19,30	2,85	334	344,6	341,4	0,19	4,6	0,98

beta = parámetro correspondiente a la media; c₀ = varianza no espacialmente estructurada o pepita; c₁ = varianza espacialmente estructurada; a = distancia de autocorrelación espacial; AIC y AIC_{ns} = criterio de información de Akaike de los modelos espaciales y no espacial respectivamente.

resultados obtenidos a partir de los variogramas empíricos (Diggle y Ribeiro Jr., 2007; Kerry y Oliver, 2007). Es por ello que la comparación de estructuras espaciales proveniente de estudios con diferentes diseños de muestreo puede ser dificultosa, aún para suelos similares dado que no existen variogramas absolutos para propiedades de suelo (Stenger *et al.*, 2002). Por ejemplo, Di Pietro *et al.* (1986) trabajando sobre un Argiudol típico con espaciamientos 10 veces menores a los utilizados en este estudio no encontraron auto-correlación espacial para Nt y pH, mientras que determinaron estructuras espaciales alta, media y baja, para P, COT y Arcilla, con rangos de dependencia espacial de 6,3, 9,8 y 15 m respectivamente. En cambio, Alesso y Pilatti (2008) también sobre un Argiudol pero utilizando espaciamientos de 10 m no encontraron auto-correlación espacial para la Ds, mientras que para P observaron estructura espacial moderada y rango de dependencia de 50 m aproximadamente.

Debido a la escasez de información local sobre la estructura espacial de atributos de suelo, los espaciamientos de la grilla se tomaron a partir de la información publicada en

Alesso y Pilatti (2008), donde se informaron distancias de autocorrelación de aproximadamente 50 m. No obstante, la falta de auto-correlación espacial observada en los variogramas empíricos (Fig. 4.3 y Fig. 4.4) y corroborada mediante el ajuste de modelos teóricos mediante REML (Tabla 4.3) indica que la estructura espacial de los atributos ocurre a una escala inferior a la mínima distancia utilizada en el muestreo, incluso con el agregado de sitios de muestreo a distancias intermedias al diseño original, así como a otras fuentes de variación no espaciales tales como errores de medición (Webster y Oliver, 2007).

VARIABILIDAD Y ESTRUCTURA ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE DEL SUELO

En la Tabla 4.4 se presentan las estadísticas de resumen de los valores de CEa obtenidos mediante el sensor de resistividad eléctrica para los espesores 0-30 y 0-90 cm luego de remover los valores ubicados por debajo o por encima de los percentiles 1 y 99, respectivamente, los cuales fueron considerados poco representativos. La correlación entre ambas lecturas fue positiva y fuerte ($r = 0,76$, $Pr < 0,001$). En ambos espesores, la CEa mostró un alto grado de variabilidad ($CV > 0,35$) con distribuciones altamente concentradas en torno a la región de tendencia central con el 50% de los valores entre 16,3 y 27,6 y 29,4 a 69,3 $mS\ m^{-1}$ respectivamente. Se observó fuerte sesgo positivo debido a la densidad de valores ubicados en la cola derecha. La transformación box-cox con coeficientes -1,44 y -0,45 permitió aproximar los valores a una distribución normal con asimetría -0,32 y -0,07, lo cual mejoró la estabilidad de los variogramas empíricos.

A diferencia de lo observado con las mayoría de las propiedades de suelo estudiadas, la variabilidad de las mediciones de CEa obtenidas por el sensor fue muy alta en ambos

Tabla 4.4. Estadísticas descriptivas de los valores de CEa ($mS\ m^{-1}$) de los espesores 0-30 y 0-90 cm de un Argiudol típico obtenidos mediante un sensor de resistividad eléctrica en un lote del centro de Santa Fe.

CEa ($mS\ m^{-1}$)	n	Mín.	Q1	Med.	Mna.	Q3	Máx.	CV	Asim.	Curt.
0-30 cm	3910	12,7	16,3	25,3	19,2	27,6	104,6	0,61	2,36	2,86
0-90 cm	3912	17,2	29,4	53,5	41,2	69,3	168,4	0,60	1,29	-1,99

Mín = mínimo, Máx = máximo, Med = media, Q1 y Q3 = cuartiles 1 y 2, CV = coeficiente de variación, Asim. = asimetría, Curt. = curtosis.

espesores. Los CV encontrados para este sitio de estudio fueron superiores a los reportados para otros suelos (Bosch Mayol *et al.*, 2012; Corwin *et al.*, 2003; Herber, 2011; Johnson *et al.*, 2001; Sudduth *et al.*, 2003, 2005). El perfil de respuesta del sensor en función de la profundidad de suelo y la configuración de los electrodos del sensor utilizado determina el volumen de suelo relacionado con la CEa (Corwin y Lesch, 2005a). En suelos homogéneos el 90% de la CEa superficial se corresponde con el espesor 0-30, mientras que los electrodos restantes miden la CEa del 90% del espesor 0-90 cm, aunque en suelos con fuerte desarrollo de horizontes los perfiles de respuesta pueden ser diferentes (Sudduth *et al.*, 2005). Los Argiudoles del centro de Santa Fe se caracterizan por el desarrollo de horizontes argílicos subsuperficiales los cuales podrían generar diferencias en el volumen de suelo explorado por el sensor en estos suelos. No obstante, la magnitud y estructura espacial de la variabilidad de los valores de CEa observada en área de estudio indica una fuerte variación a corta distancia de propiedades que influyen en su lectura no sólo en superficie si no también en profundidad.

En la Tabla 4.5 se presentan los parámetros de los modelos ajustados para cada variable así también como los indicadores de bondad de ajuste obtenidos a partir del procedimiento de validación cruzada. El modelo exponencial permitió describir la fuerte estructura espacial de dicha medida la cual se caracterizó con rango de auto-correlación espacial a corta distancia entre 22 y 27 m respectivamente. No obstante, la bondad de ajuste del modelo (Tabla 4.5) no se tradujo a los resultados de validación cruzada ya que se obtuvieron niveles de correlación moderados entre los valores de CEa observados y estimados además de una subestimación de la varianza de entre 15 y 19%.

Tabla 4.5. Parámetros y validación cruzada de los modelos espaciales ajustados por REML para la CEa de los espesores 0-30 y 0-90 cm obtenidos mediante un sensor de resistividad eléctrica en un lote del centro de Santa Fe.

CEa	Modelo	beta	c ₀	c ₁	a	R ²	r	RMSE	MSDR
0-30 cm	exponencial	26,27	0	0,0000151	27	0,97	0,64	1,0032	1,19
0-90 cm	exponencial	54,26	0	0,0074189	22	0,98	0,53	1,0075	1,15

beta = parámetro correspondiente a la media; c₀ = varianza no espacialmente estructurada o pepita; c₁ = varianza espacialmente estructurada; a = distancia de autocorrelación espacial; AIC y AICns = criterio de información de Akaike de los modelos espaciales y no espacial respectivamente.

En la Fig. 4.5 se presentan los variogramas empíricos y modelos ajustados para CEa 0-30 y 0-90 cm. En Fig. 4.6 y Fig. 4.7 se presentan los mapas de CEa obtenidos por interpolación kriging en bloque correspondientes a las profundidades 0-30 y 0-90 cm. Las variaciones a corta distancia observadas en los variogramas de la Fig. 4.5 se reflejan en la ocurrencia de valores altos y bajos de CEa en espacios de pocos metros. Mientras que la conductividad 0-30 cm presentó una zona relativamente homogénea de valores bajos ubicada en el sector norte del área de estudio, la CEa 0-90 presentó mayor variación incluso en el sector norte con valores más elevados de CEa. En ambos casos, la heterogeneidad observada en la porción sur del área de estudio es reflejada por ambas lecturas.

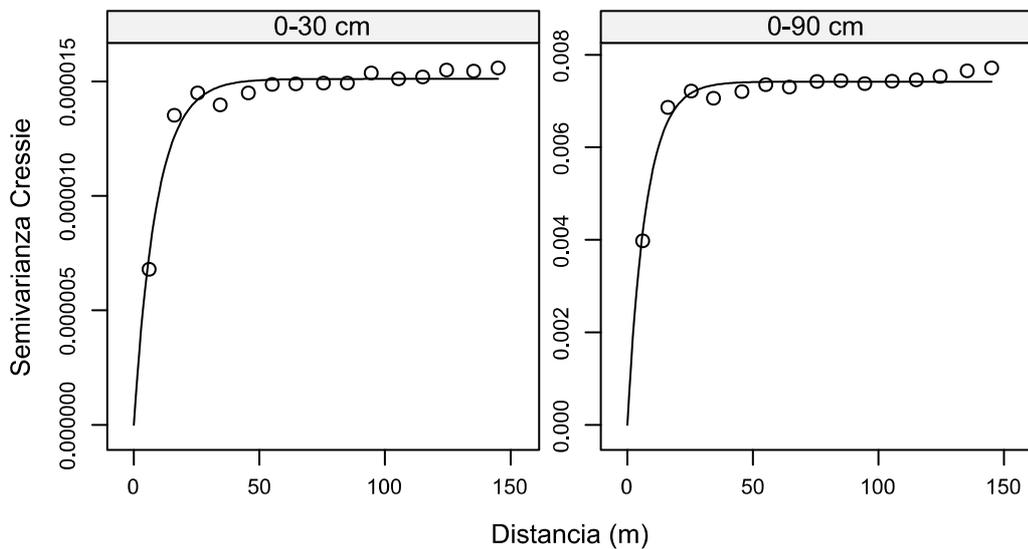


Fig. 4.5. Variogramas empíricos y modelos teóricos ajustados a los datos de CEa de los espesores 0-30 y 0-90 cm obtenidos mediante un sensor de resistividad en un lote del Centro de Santa Fe.

A diferencia de la resolución alcanzada por el muestreo en grilla, la densidad de observaciones logradas en el relevamiento de CEa permitió explorar la continuidad espacial a una escala de mayor detalle. Los variogramas de CEa (Fig. 4.5) mostraron similar comportamiento con estructura de variación de corto alcance. De acuerdo a los parámetros de los modelos ajustados para ambas profundidades, *i.e.* 0-30 y 0-90 cm, la distancia de auto-correlación de esta propiedad sería de 22 y 27 m respectivamente, las

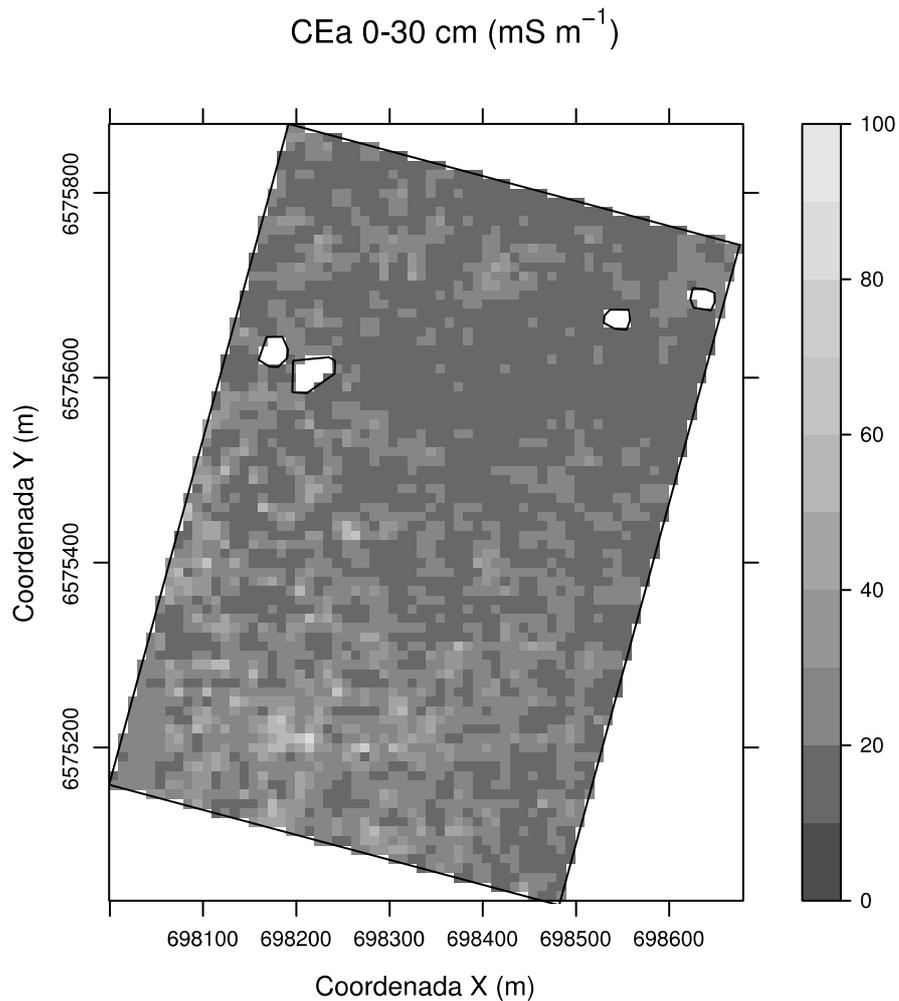


Fig. 4.6. Mapa de predicción de la CEA superficial (0-30 cm) de un Argiudol típico del Centro de Santa Fe obtenido por interpolación kriging en bloque a partir de los modelos de la Tabla 4.5. La escala de grises indica valores de CEA en mS m^{-1} .

cuales son consistentes con los resultados obtenidos por el muestreo en grilla.

En contraste con lo observado aquí, los variogramas reportados para la CEA en otros suelos presentan mayor rango de dependencia espacial. Simon *et al.* (2012) mediante el ajuste de modelos esféricos con efecto pepita estimaron rangos de dependencia espacial de entre 80 a 120 m para las medidas de CEA 0-30 y 0-90 con 25 a 25% de efecto pepita. Herber (2011) encontraron distancias de auto-correlación entre 83 y 360 m para tres lotes de Corrientes porcentajes de efecto pepita inferiores al 5%. En suelos más contrastantes, de

Almeida Machado *et al.* (2006) determinaron un rango de dependencia espacial de 160 m con un efecto pepita de 40% aproximadamente. Sobre Alfisoles, Jung *et al.* (2006) informaron rangos de 80-92 m mientras que en el estudio de Moral *et al.* (2010), el rango para CEa en ambas profundidades fue de 150 m, similar a lo observado para la granulometría por dichos autores.

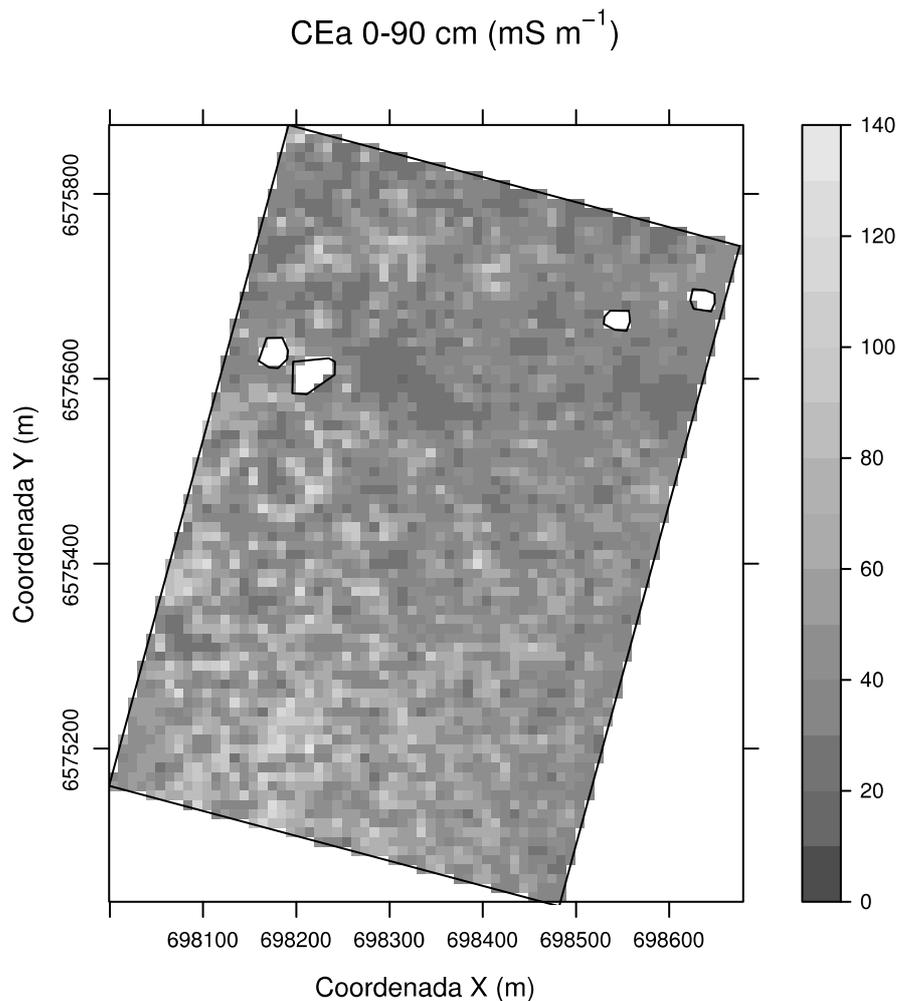


Fig. 4.7. Mapa de predicción de la CEa superficial (0-90 cm) de un Argiudol típico del Centro de Santa Fe obtenido por interpolación kriging en bloque a partir de los modelos de la Tabla 4.5. La escala de de grises indica valores de CEa en mS m^{-1} .

La topografía, a través de su efecto sobre la distribución de agua y sedimentos es uno de los factores intrínsecos comúnmente citados como responsable de la variación espacial a

escala de lote de atributos tales como la granulometría y profundidad del suelo (Cambardella *et al.*, 1994; Ceddia *et al.*, 2009; Trangmar *et al.*, 1985). La región de estudio se caracteriza por la presencia de micro relieves incluso en zonas muy suavemente ondulados lo cual determina diferencias de suelo en espacios de entre 15 y 20 m (Hein *et al.*, 1989). Este tipo de variación a distancias inferiores a la resolución empleada en la este estudio podría explicar la ausencia de auto-correlación espacial observada en la granulometría y espesor del horizonte superficial.

Junto con las variaciones intrínsecas del suelo, la aplicación de fertilizantes y enmiendas o labores constituyen fuentes de variación extrínseca que pueden afectar la estructura espacial a corta distancia de atributos relacionados (Cambardella *et al.*, 1994). En este sentido, Mallarino (1996) encontró asociación entre los patrones de variabilidad de P y K a corta distancia y la distribución no uniforme de fertilizantes y abonos. Estudios sobre la relación entre los sistemas de manejo y estructura espacial de atributos de suelo demuestran que en general los sistemas de labranza convencional con implementos como arado de reja y disco, al mezclar de material edáfico y alterar la estructura del suelo disminuyen la variabilidad así como los rangos de auto-correlación espacial de propiedades físicas (Castrignanò *et al.*, 2003; Corá *et al.*, 2004; Kravchenko *et al.*, 2005; Schaffrath *et al.*, 2008). En este estudio, las variaciones a distancias inferiores a los 25 m de los niveles de nutrientes podrían atribuirse a la aplicación y remoción no uniforme de fertilizantes, mientras que el tránsito de maquinarias puede ocasionar variaciones de la densidad del suelo dado que los últimos años 10 años los cultivos se realizaron bajo el sistema de siembra directa.

Por último, considerando los variogramas de los mapas de rendimiento presentados en el Capítulo 3, los cuales se caracterizaron por la presencia de una estructura de variación a corta distancia consistente entre años con rangos entre 20 y 30 m, la similitud de los rangos de dependencia espacial indicaría que los procesos que gobiernan tanto la variación espacial de los rendimientos como de las propiedades de suelo ocurren a distancias cortas. Desde el punto de vista del MSEC, la estructura espacial de los factores es un característica deseable sin embargo, para el desempeño adecuado de las maquinarias, es preferible que dicha estructura presente mayores rangos de dependencia espacial (Pringle *et al.*, 2003).

RELACIÓN ENTRE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA APARENTE Y PROPIEDADES DEL SUELO

El análisis de correlación lineal entre las medidas de CEa obtenidas por el sensor y los atributos de suelo 0-30 cm se detallan en la Tabla 4.6. Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas aunque moderadas a débiles entre CEa de ambas profundidades y las propiedades de suelo estudiadas. La CE presentó correlación positiva moderada y consistente con ambas medidas de CEa. En cambio, la relación entre pH y CEa disminuyó al considerar las lecturas 0-90 cm, mientras que W manifestó un comportamiento opuesto. Las fracciones granulométricas mostraron relaciones débiles con la CEa superficial y en profundidad, siendo en este último caso no significativas para limo y arcilla. El COT el cual no estuvo correlacionado con ninguna de las medidas de CEa.

Tabla 4.6. Correlaciones significativas entre mediciones de CEa 0-30 y 0-90 cm y atributos de suelo del horizonte superficial 0-30 cm.

	COT	W	pH	CE	Arena	Limo	Arcilla
CEa 0-30 cm		-0,39*	0,61**	0,65*	0,35*	-0,40*	0,34*
CEa 0-90 cm		-0,53**	0,53**	0,61**	0,42**		

* Pr < 0,05; ** Pr < 0,01

Estos resultados podrían atribuirse en algunos casos al estrecho rango de variabilidad observada en los atributos de suelo en relación a las variaciones de CEa, así como también a la presencia de relaciones no lineales e interacciones complejas entre propiedades de suelo y la CEa no consideradas en el análisis de correlación. En la Tabla 4.7 se presentan los modelos de predicción de los atributos de suelo a partir de los valores de CEa correspondientes a ambas profundidades. La adición de términos cuadráticos o CEa correspondiente al espesor 0-90 resultó en reducciones significativas del AIC respecto a los modelos de un solo factor. No obstante, la capacidad predictiva de estos modelos es baja, consistentemente con los resultados de las correlaciones lineales, por lo cual su utilidad para la estimación de dichas propiedades a partir de los datos de CEa es limitada.

La CEa es una medida aparente la cual representa el efecto agregado de diversas

propiedades relacionadas con el contenido de solutos, textura y contenido hídrico (Corwin y Lesch, 2003). Es por esto que su interpretación y relación con los rendimientos depende del establecimiento de relaciones entre esta medida aparente y aquellas propiedades que la influyen (Sudduth *et al.*, 2005).

Tabla 4.7. Modelos de regresión para la estimación de propiedades de suelo en función de la conductividad eléctrica aparente.

Atributo	Modelo	R ² aj.	SE	P
CE (dS m ⁻¹)	$Y = 0,035 + 0,0013 \text{ CE}_{a_{0-30}} + 0,0000003 \text{ CE}_{a_{0-90}}^2$	0,43	0,03	<0,0001
pH	$Y = 4,97 + 0,066 \text{ CE}_{a_{0-30}} - 0,0006 \text{ CE}_{a_{0-30}}^2$	0,37	0,37	<0,0001
Arena (g kg ⁻¹)	$Y = 5,05 + 0,052 \text{ CE}_{a_{0-90}} - 0,00092 \text{ CE}_{a_{0-90}}^2$	0,22	0,55	0,0052
Limo (g kg ⁻¹)	$Y = 81,55 - 0,782 \text{ CE}_{a_{0-30}} + 0,0079 \text{ CE}_{a_{0-30}}^2 + 0,00048 \text{ CE}_{a_{0-90}}^2$	0,25	2,92	0,0053
Arcilla (g kg ⁻¹)	$Y = 21,07 + 0,095 \text{ CE}_{a_{0-30}}$	0,09	3,17	0,0350
W (g kg ⁻¹)	$Y = 0,023 + 0,00029 \text{ CE}_{a_{0-90}}$	0,26	0,01	0,0006

R² aj. = coeficiente de determinación ajustado; SE = error estándar residual; P = valor p del modelo.

El análisis de correlación entre la CEa y los resultados analíticos del muestreo dirigido (Tabla 4.6) mostró correlaciones significativas con la mayoría de los atributos. Se hallaron correlaciones moderadas positivas entre la CEa de ambas medidas y la CE en relación 1:4 y el pH. La relación negativa con el contenido hídrico gravimétrico fue moderada a débil. Los componentes granulométricos mostraron relaciones bajas siendo positiva para arena y arcilla y negativa para limo. El COT no mostró relación con las medidas de CEa.

Pese a la creciente utilización de dicho sensor como fuente de información para la delimitación de zonas de manejo, en el área del presente estudio no existen trabajos publicados donde se aborde la relación entre CEa y atributos de suelo. La información disponible solamente permite comparar estos resultados con suelos de otras zonas los cuales difieren ligeramente en la textura y grado de desarrollo los horizontes. Por ejemplo, Simon *et al.* (2012) encontraron correlaciones significativas entre CEa y materia orgánica ($r = 0,61$ a $0,82$), pH ($r = 0,42$ a $0,43$), CE y granulometría ($r = 0,60$ a $0,76$ para Arena, $r = 0,85$ a $0,88$ para limo+arcilla) para Haplustoles del SE de Córdoba. Herber (2011) en 3 lotes de Corrientes encontró correlaciones variables entre CEa superficial y arena ($r = -0,93$

a -0,31), arcilla ($r = 0,21$ a $0,93$), limo ($r = 0,21$ a $0,81$), CE en relación 1:1 ($r = -0,33$ a $0,66$), MO ($r = -0,26$ a $0,79$), pH ($r = -0,01$ a $0,76$) y humedad ($r = -0,49$ a $0,23$). Peralta *et al.* (2012c) en suelos del SE de Buenos Aires encontraron altas correlaciones entre CEa y arcilla ($r = 0,77$ y $0,81$) y humedad ($r = 0,81$ y $0,83$).

En cambio, Johnson *et al.* (2001) en un estudio en suelos de la región semiárida de EE.UU. documentaron correlaciones significativas aunque moderadas a débiles para textura, pH, materia orgánica y humedad. Resultados variables también para CE extracto, contenido hídrico y textura han sido informados por Corwin y Lesch (2003) para ambientes semiáridos de California (EE.UU.). En el centro oeste de EE.UU., Sudduth *et al.* (2003, 2005) encontraron niveles de correlación variables entre CEa y propiedades edáficas para 12 lotes con una amplia gama de suelos de los orden de los Molisoles y Alfisoles con considerable variación textural. En dichos trabajos se encontraron correlaciones consistentes entre sitios para el contenido de arcilla y la CEa ($r = 0,61$ a $0,79$, promedio $0,74$) mientras que las correlaciones con C orgánico, humedad, limo, arena fueron menores y más variables.

En concordancia con los niveles de correlación observados en este trabajo, los modelos de regresión no espacial presentados en la Tabla 4.7 permitieron explicar una porción reducida de la variabilidad de las propiedades edáficas en función de la CEa de ambos espesores. En contraste, en el trabajo realizado por Sudduth *et al.* (2005) las relaciones entre CEa y arcilla y capacidad de intercambio catiónico permitieron realizar estimaciones aceptables ($R^2 > 0,5$) de dichas propiedades a partir de modelos de regresión en función de la CEa medida por un sensor o en combinación.

CONCLUSIONES

En este capítulo se avanzó sobre la caracterización de la magnitud y estructura espacial de la variabilidad de propiedades físicas y químicas del horizonte superficial de un suelo de la pampa llana santafesina sometido a manejo agrícola uniforme. Asimismo, se evaluó la conductividad eléctrica aparente como medida sustituta para predecir dichas propiedades.

Los atributos estudiados presentaron niveles de variabilidad moderada a bajo con débil o nula estructura espacial a la escala de muestreo utilizada ya que a excepción del Nt, los modelos ajustados no difirieron significativamente del modelo sin estructura espacial. En el caso de Nt, si bien se detectó estructura espacial para este atributo, la misma fue débil lo cual se tradujo en predicciones poco confiables.

Por su parte, la CEa presentó mayores niveles de variación con estructura espacial de corta distancia consistente con lo observado en el muestreo en grilla. No obstante, los niveles de correlación entre esta medida indirecta y aquellas propiedades que la influyen no son suficientes para su utilización como medida sustituta para predecir la distribución espacial de estas últimas.

Finalmente, lo observado en este capítulo permite corroborar la segunda Hipótesis de trabajo por la cual se concluye que los niveles de variación de la mayoría de los atributos aquí examinados no justificarían la aplicación diferencial de insumos, mientras que en aquellos casos donde la variabilidad fue moderada, la escala a la cual ocurren los procesos que generan la variación de éstos requiere incrementar los esfuerzos de muestreo necesarios para obtener mapas de distribución espacial confiables aplicando técnicas de interpolación y dificultaría la delimitación de zonas homogéneas.

DELIMITACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS MEDIANTE MAPAS DE RENDIMIENTO

INTRODUCCIÓN

La Agricultura de Precisión (AP) tiene como objetivo la optimización de la producción agrícola atendiendo a la variabilidad espacial y temporal de los sistemas de producción (Pierce y Nowak, 1999). Entre el manejo uniforme y la representación continua de la variabilidad de un lote con alta resolución se encuentra el enfoque de zonas de manejo (Kitchen *et al.*, 2005). Mediante éste se busca simplificar la representación espacial de dicha variabilidad identificando áreas dentro de la unidad de manejo (*i.e.* lote) definidas por su relativa homogeneidad en los factores de suelo y cultivo (zonas), y para la cual es necesaria una única dosis de insumos (Doerge, 1999). Dada la ambigüedad del concepto de manejo, se puntualiza la necesidad de incluir información adicional sobre el objetivo para el cual se dividió el lote (Kitchen *et al.*, 2005). Pedroso *et al.* (2010) distinguen entre zonas de manejo y clases de manejo: mientras que las primeras constituyen áreas contiguas a las que se le puede aplicar un determinado tratamiento, una clase de manejo es un área no necesariamente contigua que puede recibir el mismo manejo y por lo tanto pueden estar conformadas por más de una zona de manejo.

La delimitación de zonas dentro de un lote no es una tarea sencilla ya que en cada caso se requiere conocer el tipo de información a utilizar (*i.e.* datos de entrada), cómo debe ser procesada (*i.e.* algoritmo) y el número de zonas en que debe ser dividido el lote (Fridgen *et al.*, 2004). En la literatura se han propuesto numerosos métodos para delimitar potenciales zonas de manejo. Jaynes *et al.* (2005) los dividen en tres grandes grupos según la información utilizada: (i) propiedades de suelo directamente relacionadas con los rendimientos de los cultivos, (ii) atributos secundarios relacionados con los factores

limitantes del cultivo y (iii) estimaciones de productividad mediante mapas de rendimiento o imágenes satelitales. Mientras que en los dos primeros enfoques se asume una relación directa o indirecta entre los atributos de suelo y rendimientos, el tercero se basa en el supuesto de que la identificación de patrones de rendimiento estables en el tiempo se corresponde con áreas de similares atributos de suelo, y por lo tanto, necesidades de manejo comunes (Jaynes *et al.*, 2005). Adicionalmente se han propuesto enfoques mixtos que combinan toda la información disponible (*e.g.* Li *et al.*, 2008).

La adquisición de información sobre la distribución espacial de los atributos de suelo directamente relacionados con la respuesta del cultivo implica altos requerimientos de tiempo y dinero para lograr exactitud y precisión adecuadas (Mueller *et al.*, 2004), por ello su utilización como fuente de información para la delimitación de zonas de manejo ha sido cuestionada. Numerosos autores han propuesto la utilización de información secundaria relacionada con aquellas propiedades que influyen sobre los rendimientos en la delimitación de zonas (Kitchen *et al.*, 2005). Entre las alternativas más comunes se citan mapas de conductividad eléctrica, altimetría y atributos topográficos extraídos de modelos digitales de terreno los cuales son de fácil adquisición y alta resolución espacial (Fraisie *et al.*, 2001; Johnson *et al.*, 2003; Kaspar *et al.*, 2003; Khosla *et al.*, 2008; Kitchen *et al.*, 2005; Kravchenko y Donald, 2000). No obstante, su utilidad depende de la existencia de correlaciones fuertes entre este tipo de información y los atributos de suelo y respuesta de los cultivos, las cuales puede variar entre condiciones edafoclimáticas (Jaynes *et al.*, 2005)

Por su parte, la información contenida en los *ensayos de uniformidad*¹⁰ es de gran utilidad para estimar directamente la variación espacial y temporal de los cultivos a bajo costo (Whelan y McBratney, 2000). Es por ello que se han propuesto diversos métodos para delimitar zonas en función de series multi-temporales de mapas de rendimientos. Lark y Stafford (1997) identificaron patrones espaciales de rendimientos asociados a diferencias de humedad edáfica utilizando un algoritmo de clasificación difusa no supervisado (*i.e.* *fuzzy k-means*). Brock *et al.* (2005), utilizando el mismo algoritmo, clasificaron una serie de 6 mapas de rendimiento de secuencias soja-maíz y encontraron diferencias en los patrones espaciales en función del tipo de cultivo. Jaynes *et al.* (2003, 2005) identificaron

¹⁰ Mapas de rendimiento de lotes con manejo uniforme.

patrones de rendimiento de soja y maíz mediante análisis de conglomerados y los relacionaron con la conductividad eléctrica aparente (CEa). Por su parte, Blackmore *et al.* (2003) desarrollaron un método empírico para delinear zonas en función de su nivel de productividad y estabilidad temporal a partir de mapas de rendimiento. Dicho enfoque, les permitió identificar zonas de rendimiento altas o bajas consistentes entre campañas y zonas inestables temporalmente. En un enfoque similar, Cox y Gerard (2007) derivaron zonas de manejo mediante el análisis de la estabilidad de rendimientos. Diker *et al.* (2004) delimitaron zonas aplicando análisis de frecuencias a dos mapas de rendimiento. No obstante, la inestabilidad de los rendimientos producto de la variabilidad de las condiciones meteorológicas entre campañas, así como la escasa disponibilidad de series temporales suficientemente extensas pueden limitar la identificación de patrones de rendimientos consistentes entre años (Florin *et al.*, 2009).

Finalmente, además de agrupar los sitios dentro del lote en función de sus características de modo que se minimicen las diferencias entre éstos y se maximicen las diferencias entre las zonas, otro objetivo en la delimitación de zonas es lograr zonas contiguas para facilitar su manejo (Roudier *et al.*, 2010). Los algoritmos de clasificación no supervisada han demostrado ser efectivos en la reducción de varianza de los rendimientos aunque no abordan el problema de la contigüidad espacial ya que trabajan sobre el espacio de los atributos (Dobermann *et al.*, 2003). Recientemente, en la literatura se han propuesto diversos enfoques para incorporar la estructura espacial en la delimitación de zonas: aplicación de filtros *a posteriori* (Ping y Dobermann, 2003), segmentación utilizando directamente las coordenadas geográficas (Pedroso *et al.*, 2010), alteración de la matriz de disimilitud a partir de estructura de covarianza espacial estimada por variogramas (Frogbroock y Oliver, 2007; Milne *et al.*, 2012) o bien mediante la utilización de componentes principales espaciales (Córdoba *et al.*, 2013).

Los objetivos de este capítulo son (i) identificar y delimitar zonas homogéneas mediante métodos de clasificación empíricos y no empíricos a partir de datos de productividad de una secuencia de 5 años de mapas de rendimiento de soja-maíz, (ii) comparar los resultados de las clasificaciones en término de reducción de la varianza de los rendimientos dentro de cada zona y (iii) determinar si existen diferencias en las

propiedades de suelos entre las zonas delineadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

La información utilizada en este capítulo corresponde a los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja de las campañas 2007/08 a 2011/12 obtenidos por interpolación geoestadística que fueron presentados en Capítulo 3 (Tabla 3.4 y Fig. 3.2). El procedimiento de depuración de los datos sin procesar así como el ajuste de los modelos espaciales y técnica de interpolación se detallan en la sección Materiales y Métodos de dicho capítulo. Los mapas individuales se combinaron para crear una matriz multi-temporal de 5 años con una resolución espacial de 10 m (*i.e.* 68 filas x 84 columnas x 5 capas).

Las identificación de zonas homogéneas se realizó mediante: (i) clasificación según productividad y estabilidad temporal de los rendimientos; (ii) análisis de conglomerados sobre mapas de rendimiento originales; y (iii) análisis de conglomerados sobre componentes espaciales de los mapas de rendimiento. A continuación se detalla cada uno de los procedimientos.

CLASIFICACIÓN SEGÚN NIVEL Y ESTABILIDAD TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

Este método propuesto por Cox y Gerard (2007) consiste en la clasificación de los sitios dentro de lote (*i.e.* pixel) en función de su nivel de productividad media interanual relativa al promedio de cada campaña y su variación temporal.

A partir del rendimiento relativo en cada sitio se calculó promedio y coeficiente de variación interanual utilizando las ecuaciones 3.4, 3.5 y 3.6. Posteriormente, se clasificó cada sitio aplicando la siguiente regla de decisión: los sitios con un $CV_T \geq 0,3$ fueron considerados como inestables y se les asignó la categoría “Inestable”, mientras que los sitios estables (*i.e.* $CV_T < 0,3$) se dividieron en función de su rendimiento medio interanual en alto ($\bar{Y} > 1,2$), medio ($0,8 \leq \bar{Y} \leq 1,2$) y bajo ($\bar{Y} < 0,8$), asignándole las categorías “Alto”, “Medio” y “Bajo” respectivamente. De este modo se obtuvo un mapa de los sitios con rendimientos consistentemente altos, medios o bajos en la secuencia de cultivos así como sitios caracterizados por su inestabilidad temporal.

ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS SOBRE MAPAS DE RENDIMIENTO Y COMPONENTES PRINCIPALES ESPACIALES

La delimitación de zonas dentro del lote mediante análisis de conglomerados se realizó mediante el algoritmo *fuzzy k-means* implementado en programa estadístico R (R Development Core Team, 2013) a través del paquete *cluster* (Maechler *et al.*, 2013). El algoritmo de clasificación no jerárquica difusa (*i.e. fuzzy k-means*) es uno de los más aceptados y se ha aplicado a diversos tipos de datos (*e.g.* Boydell y McBratney, 2002; Dobermann *et al.*, 2003; Fraisse *et al.*, 2001; Fridgen *et al.*, 2004; Jaynes *et al.*, 2003; Lark y Stafford, 1997). Partiendo de n sitios dentro del lote de los cuales se dispone información sobre p atributos medidos (*i.e.* rendimientos), este algoritmo busca establecer un conjunto de k clases de modo tal que los elementos de cada grupo se asemejen en sus atributos minimizando la expresión 5.1:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k d_i^2(\mu_{ij})^m \quad (5.1)$$

donde: d_{ij} es una medida de similitud entre el objeto i y el grupo j respecto a las p variables en estudio, μ_{ij} es un valor de membresía del objeto i a la clase j que varía entre $0 \leq \mu_{ij} \leq 1$ y cumple con $\sum_{j=1}^k \mu_{ij} = 1$, y m es el exponente de borrosidad que puede variar $0 < m < \infty$. Cuando $m = 1$, el resultado es equivalente al algoritmo de clasificación dura *k-means*. Si bien no hay regla definida para establecer el valor de m , en la práctica es $1 < m < 2$, siendo comúnmente 1,5 (Lark y Stafford, 1997). De este modo, la incertidumbre asociada a los límites de clase se incorpora mediante la asignación de cada individuo a más de una clase con membresía continuas lo cual es adecuado dada la naturaleza continua de la variabilidad y la falta de estructura jerárquica de los datos de rendimientos y atributos de suelo (Dobermann *et al.*, 2003; Lark y Stafford, 1997).

Se consideraron dos alternativas dentro de la clasificación por análisis de conglomerados ya que se evaluaron tres conjuntos de datos de entrada: (1) la matriz \mathbf{Y}_{MR} compuesta por la serie de mapas de rendimiento estandarizados de una serie de 5 años de la secuencia soja-maíz, (2) la matriz \mathbf{Y}_{PC} compuesta por los componentes principales no

espaciales (PC) y (3) la matriz \mathbf{Y}_{sPC} compuesta por los componentes principales espaciales (sPC) extraídos de dicha serie de mapas de rendimiento a los efectos de obtener zonas con mayor contigüidad espacial siguiendo el método propuesto por Córdoba *et al.* (2013).

Los componentes principales de los mapas de rendimiento se obtuvieron mediante el algoritmo propuesto por Dray *et al.* (2008) implementado en el paquete *ade4* (Dray y Dufour, 2007) del programa estadístico R, mediante la función “*multispati*”. Este algoritmo introduce la información espacial en el análisis de componentes principales a través de una matriz de conectividad estandarizada por filas \mathbf{W} para obtener sPC que maximicen la varianza así como la autocorrelación espacial de la matriz de rendimientos estandarizados \mathbf{Y} . La matriz de conectividad estandarizada se construyó seleccionando vecinos en un radio de búsqueda de 30 m mediante la función “*dnearneigh*” del paquete *spdep* (Bivand *et al.*, 2008). Esta distancia se seleccionó en función de los resultados del análisis de dependencia espacial de los rendimientos (Capítulo 3) donde se observó que la primera estructura de autocorrelación de los rendimientos se encontraba entre 20 a 30 m y explicaba entre 50 - 80% de la variación estructurada de los mismos.

Se evaluó la clasificación de cada conjunto de datos de entrada en dos a seis zonas. Para ello se fijó el coeficiente de borrosidad en $m = 1,5$ y se realizaron un máximo de 300 iteraciones con una tolerancia de convergencia de 1×10^{-10} . El número óptimo de zonas se determinó a partir de el cálculo de los índices de desempeño de borrosidad (FPI, del inglés *fuzziness performance index*) y el entropía normalizada de la clasificación (NCE, del inglés *normalized classification entropy*) propuestos en Fridgen *et al.* (2004), los cuales se reproducen en las Ecuaciones 5.2 y 5.3:

$$\text{FPI} = 1 - \frac{k}{1 - k} \left[1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{(u_{ij})^2}{n} \right] \quad (5.2)$$

$$\text{NCE} = \frac{- \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k \frac{u_{ij} \log_a(u_{ij})}{n}}{1 - \frac{k}{n}} \quad (5.3)$$

donde: n es el número total de observaciones, k el número de grupos, u_{ij} la membresía de la observación i en el grupo j . El primer indicador cuantifica el grado de superposición entre clases (*i.e.* borrosidad) mientras que el segundo cuantifica el nivel de desorganización de la clasificación resultante. Según Fridgen *et al.* (2004), el mínimo de ambos indicadores representa la mejor clasificación ya que se minimiza la superposición de clases mientras que se mantiene bajo el nivel de desorganización dentro de las clases.

Dado que no siempre se obtiene la convergencia de ambos indicadores se utilizó una medida de reducción de la varianza de los rendimientos como criterio complementario para determinar el número óptimo de zonas (Brock *et al.*, 2005). De este modo, para cada mapa de rendimiento y número de zona se calculó el complemento de la varianza relativa (RV, Ecuación 5.4) (Webster y Oliver, 1990) el cual expresa el porcentaje de la varianza total de los rendimientos que es explicada por la clasificación. La varianza de dentro de las zonas (Ecuación 5.5) se calculó como el promedio de la varianza de los rendimientos de cada zona ponderado por el tamaño de las mismas Fraisse *et al.* (2001).

$$RV = 1 - \frac{S_D^2}{S_T^2} \quad (5.4)$$

$$S_D^2 = \sum_{j=1}^k \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} \frac{n_j}{n} (Y_{ij} - \bar{Y}_j)^2 \quad (5.5)$$

donde: S_T^2 es la varianza total de los rendimientos sin dividir en zonas; S_D^2 la varianza promedio dentro de las k zonas delimitadas; Y_{ij} el rendimiento relativo del sitio i perteneciente a la zona j ; \bar{Y}_j el rendimiento medio de la zona j ; n_j la superficie de la zona j y n la superficie total del área de estudio. De este modo, altos valores de RV indican zonas con mayor homogeneidad interna y mayores diferencias entre zonas. La proporción de varianza explicada varía entre campañas y a medida que se incrementa el número de zonas el RV promedio tiende a aumentar aunque a tasas decrecientes. El número óptimo de zonas para cada método se determinó mediante ANOVA y prueba de Dunnet ($\alpha = 0,05$) considerando como nivel de referencia el número de zonas con mayor RV medio. De este modo, aquella clasificación con menor número de zonas que no difiera significativamente

con la de mayor orden (*i.e.* $k = 6$) es considerada como óptima.

COMPARACIONES ENTRE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

Los métodos de clasificación aquí presentados se compararon en función de su habilidad para reducir la varianza de los rendimientos dentro de las zonas mediante el complemento de la varianza relativa detallado anteriormente. Se calculó RV para cada campaña y las diferencias de RV promedio entre métodos considerando cada campaña como repetición se evaluaron mediante ANOVA y prueba de comparación múltiple de Tukey con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

La fragmentación de los mapas clasificados se cuantificó mediante el cálculo del índice de autocorrelación I de Moran (Bivand *et al.*, 2008). Similar al concepto de correlación, este índice varía entre -1 y 1. Valores cercanos a 1 indican que los sitios pertenecientes a un determinado grupo se distribuyen de manera agregada en el espacio y por lo tanto se asemejan al concepto de zona. En cambio, cuando I se acerca a -1 la fragmentación y la intercalación de zonas distintas es mayor.

CARACTERIZACIÓN PROPIEDADES EDÁFICAS POR ZONA

La caracterización de las zonas obtenidas con cada método en relación a sus propiedades de edáficas se realizó a partir de la información de suelo obtenida en el muestreo en grilla descrito en el Capítulo 4. Los sitios de muestreo geo-referenciados se asignaron a cada zona en función de su ubicación espacial y las diferencias entre zonas se evaluaron mediante ANOVA con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. En los casos donde se detectaron diferencias se realizó prueba de comparación múltiple de Tukey con el mismo nivel de significancia. El ajuste de los modelos se realizó con el procedimiento de mínimos cuadrados generalizados (GLS) implementado en el paquete *nlme* (Pinheiro *et al.*, 2013) del programa estadístico R. Se corroboraron los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia de los errores modelando estructuras de correlación y varianza evaluando su significancia mediante prueba de razón de máxima verosimilitud (LRT).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CLASIFICACIÓN SEGÚN NIVEL Y ESTABILIDAD TEMPORAL DE LOS RENDIMIENTOS

En la Fig. 5.1 se presenta el mapa de zonas delimitadas en función del nivel y estabilidad de los rendimientos de los cultivos de la secuencia soja-maíz a partir del método propuesto por Cox y Gerard (2007). La mayor parte del área de estudio (26,8 ha) fue clasificada como Medio debido a que el promedio interanual de sus rendimientos relativos fue mayor a 0,8 y menor a 1,2 con un $CV < 0,3$. En el sector SE se concentró la

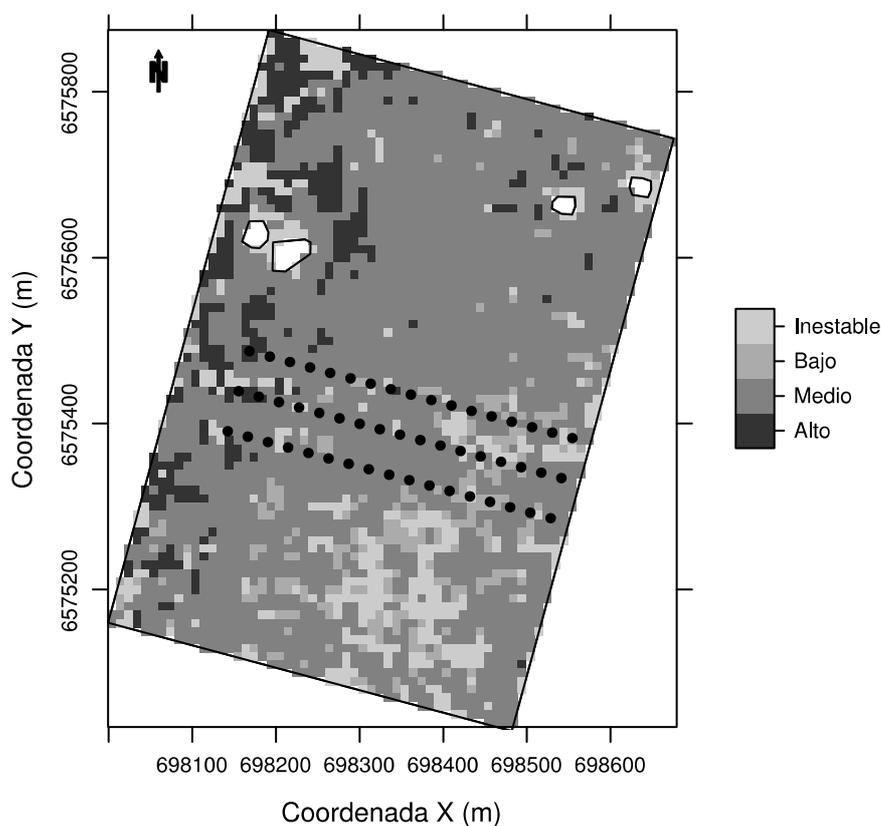


Fig. 5.1. Zonas delimitadas en función del nivel de productividad y estabilidad temporal de los cultivos de la secuencia maíz-soja 2007/12 dentro del área de estudio. Los círculos negros indican la ubicación de los puntos del muestreo en grilla utilizados para caracterizar las diferencias de propiedades de suelo.

mayoría de los sitios clasificados como Inestables (11% del área total) los cuales

estuvieron asociados a áreas de bajo rendimiento. Las áreas con rendimientos altos y estables (9% del total del área) se distribuyeron en el margen O aunque de manera dispersa. En dicha zona, el rendimiento relativo promedio fue un 66% más alto que el rendimiento medio del lote, mientras que en la zona Bajo éste fue 46% inferior. A excepción de la zona de rendimientos Medios que domina el área estudiada, las zonas restantes presentan menor contigüidad debido a que este procedimiento no considera la estructura espacial de manera explícita en la clasificación lo cual dificultaría su manejo espacial. Estos autores informaron resultados similares aunque con diferencias de menor magnitud entre las zonas en lotes de Mississippi (USA) con relieve normal (hasta 5% de pendiente) y suelos Vertisoles. Al igual que en este estudio, la mayor proporción de los lotes se caracterizó por su estabilidad y niveles de rendimientos medios, mientras que las zonas con rendimientos inconsistentes entre campañas se ubicaron en sectores marginales.

Los gráficos de caja de la Fig. 5.2 resumen la distribución de los rendimientos relativos dentro de cada zona para las distintas campañas de la secuencia maíz-soja analizada. La distancia entre las medianas de los rendimientos de cada zona fue variable entre campañas. Las mayores diferencias se observaron en la Soja 2008/09 donde las zonas Alto, Mediano y Bajo tuvieron rendimientos relativos medianos de 1,66, 0,97 y 0,56 respectivamente. En el otro extremo, la campaña 2009/10 presentó la menor separación con el 50% de los rendimientos de cada una de las zonas dentro del intervalo delimitado por los rendimientos equivalentes a 0,8 y 1,2 veces el rendimiento medio del lote. La zona denominada Inestable debido a alta variación temporal, presentó la mayor variación en todas las campañas a excepción de 2009/10.

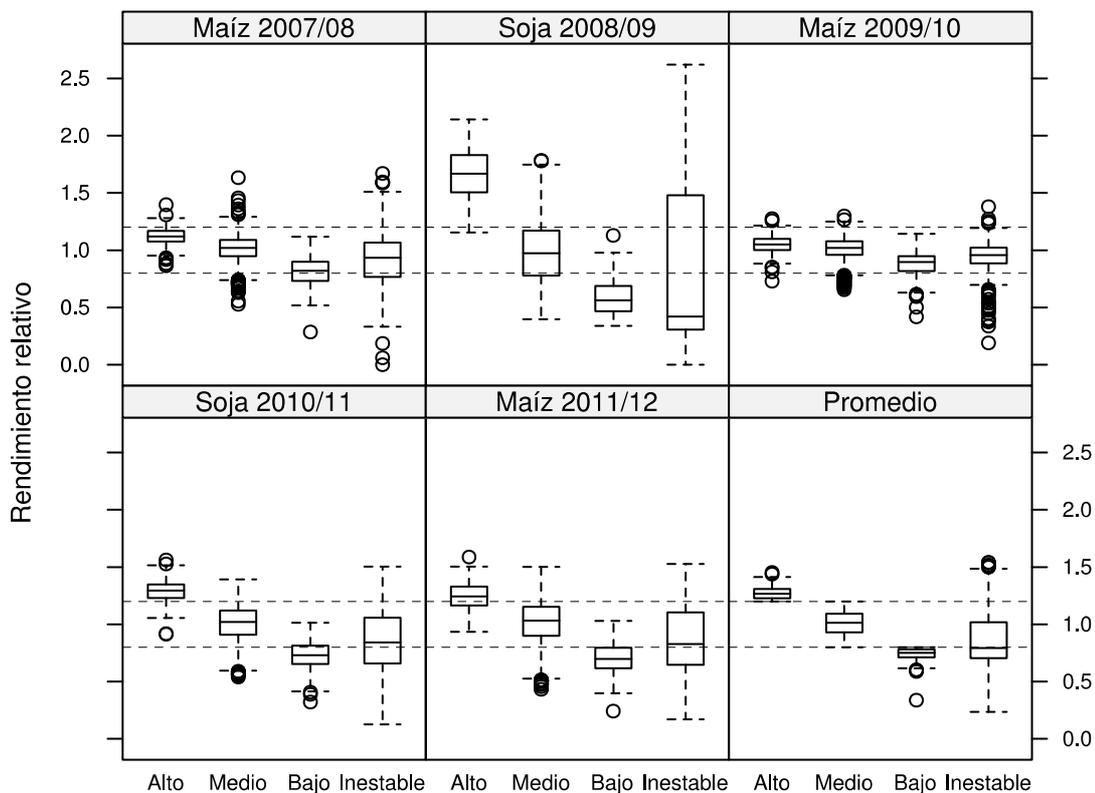


Fig. 5.2. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja agrupados por zonas delimitadas en función de su nivel y estabilidad temporal de rendimientos.

Los rendimientos medios absolutos y la heterogeneidad dentro de cada zona expresada en términos de CV se resumen en la Tabla 5.1. Las diferencias entre los rendimientos medios de cada zona sugieren que los umbrales utilizados en la regla de clasificación fueron adecuados para identificar zonas con distinto nivel de rendimiento consistente entre campañas. Asimismo, en la mayoría de las campañas la variabilidad de los rendimientos dentro de las zonas Alto, Medio y Bajo es menor a la variabilidad observada en los mapas de rendimientos sin clasificar, siendo esto más notable en el cultivos de soja 2008/09 donde el CV fue 3,5, 1,5 y 1,7 veces el CV de las zonas Alto, Medio y Bajo debido al alto nivel de variabilidad registrada en dicha campaña ($CV \approx 0,42$). Incluso en la campaña 2009/10 donde la variabilidad fue baja, se observaron diferencias de 1600 kg ha^{-1} entre los rendimientos medios de la zona Alta y Bajo.

Tabla 5.1. Rendimientos medios, coeficiente de variación (valores entre paréntesis) y superficie total de las zonas delimitadas en el área de estudio a partir de los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja 2007/12.

Zona	Maíz 2007/08	Soja 08/09	Maíz 09/10	Soja 10/11	Maíz 11/12
Alto (3,3 ha)	8818 (0,07)	2227 (0,12)	9681 (0,07)	3340 (0,07)	6644 (0,09)
Medio (26,8 ha)	7375 (0,11)	1313 (0,27)	9350 (0,09)	2616 (0,15)	5428 (0,18)
Bajo (2,5 ha)	5884 (0,15)	780 (0,25)	8082 (0,12)	1887 (0,16)	3733 (0,19)
Inestable (4,1 ha)	6688 (0,23)	1110 (0,88)	8668 (0,16)	2246 (0,33)	4614 (0,34)
Lote entero (36,7 ha)	7261 (0,14)	1335 (0,42)	9216 (0,11)	2589 (0,21)	5338 (0,22)

Según Dobermann *et al.* (2003), la ventaja de los métodos de clasificación empíricos radica en su simplicidad y la posibilidad de utilizar criterios basados en conocimiento experto. No obstante, Blackmore *et al.* (2003) advierten sobre la sensibilidad de los resultados a los umbrales utilizados en la clasificación. Por otro parte, utilización de un número de clases fijo podría no ser adecuado para representar la variabilidad espacial de los rendimientos (Dobermann *et al.*, 2003). A diferencia de la metodología propuesta por Blackmore *et al.* (2003) que divide los rendimientos estables en dos clases según superen o no el rendimiento medio, la discriminación de los rendimientos estables en tres niveles permite un mayor detalle en la delimitación de áreas con mayores rendimientos. En cuanto a la zona Inestable que se caracteriza por su elevada variación interanual (*i.e.* $CV_T > 0,30$), la información sobre la variación anual de los rendimientos en relación a las condiciones meteorológicas de cada campaña podrían ser de utilidad para predecir el comportamiento de estos sectores del lote en relación a los restantes. En este estudio, los rendimientos medios de la Tabla 5.1 indicarían que en todas las campañas de la serie evaluada el rendimiento medio de la zona Inestables se ubicó entre los de la zona Medio y Bajo. No obstante, la Fig. 5.2 se muestra que esta zona tendría sectores con rendimientos similar a las categorías restantes dependiendo de las condiciones de cada campaña.

ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES DE MAPAS DE RENDIMIENTO

En la Tabla 5.2 se presenta la proporción de varianza explicada por los componentes principales no espaciales (PC) y espaciales (sPC) así como su nivel de auto correlación estimado por el índice de Moran. En ambos casos se observa que los primeros dos componentes contabilizan el 72 y 69% de la variación total observada en los mapas de rendimiento. Si bien sPC muestra una pérdida de varianza en relación a PC en el primer componente, (2,73 vs 2,51 para PC1 y sPC1), este último presenta una ganancia en el nivel de autocorrelación espacial estimado por el índice de Moran (0,51 vs 0,58) debido a que los sPC obtenidos por el algoritmo *multispati* maximizan tanto la variación como la autocorrelación espacial.

Tabla 5.2. Estadísticas descriptivas y autovectores de los componentes principales no espaciales (PC) y espaciales (sPC) obtenidos mediante el algoritmo *multispati* a partir de los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja 2007/12 del sitio de estudio.

	Var.	Prop.	Prop. Acum.	I ^a	Autovectores				
					Maíz 2007/08	Soja 2008/09	Maíz 2009/10	Soja 2010/11	Maíz 2011/12
No espaciales									
PC1	2,73	0,55	0,55	0,51	-0,41	-0,48	-0,31	-0,52	-0,49
PC2	0,86	0,17	0,72	0,56	-0,28	-0,40	0,85	-0,08	0,14
Espaciales									
sPC1	2,57	0,51	0,51	0,58	-0,51	-0,64	-0,25	-0,41	-0,33
sPC2	0,88	0,18	0,69	0,52	-0,02	-0,33	0,93	-0,11	0,11

^a I = índice de autocorrelación de Moran

Los pesos relativos de los mapas de rendimiento en los primeros dos componentes principales se detallan en la tabla Tabla 5.2. De acuerdo a los autovectores, la mayor proporción de variación de los rendimientos de la secuencia analizada cuando no se considera su estructura espacial se corresponde con los mapas de Soja 2010/11, Maíz 2011/12 y Soja 2008/09, mientras que Maíz 2009/10 domina la variación del segundo eje principal. En cambio, cuando los componentes principales son ponderados por su autocorrelación espacial, se observa que Soja 2008/09 y Maíz 2007/08 determinan la

variación de sPC1, mientras que el segundo componente es dominado por Maíz 2009/10. Esta distribución de pesos en los componentes principales se corresponde con la mayor estructura espacial observada en los mapas de rendimiento de 2008/09 y 2007/08.

Si bien el análisis de componentes principales espaciales ha sido sugerido en combinación con el análisis de conglomerados *fuzzy k-means* para delimitar zonas de manejo con mayor autocorrelación espacial (Córdoba *et al.*, 2013), no se registran antecedentes de su utilización para el análisis de mapas de rendimiento. En este caso, esta técnica permitiría resumir en un espacio de menor dimensión la variación del conjunto de mapas de rendimiento generando variables sintéticas (*i.e.* los componentes principales) permitiendo además maximizar la autocorrelación espacial de estos componentes de modo tal de extraer patrones espaciales generales de mayor utilidad para la delimitación de zonas de manejo.

ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS SOBRE MAPAS DE RENDIMIENTO Y COMPONENTES PRINCIPALES

En la Fig. 5.3 se presentan los índices de borrosidad (FPI) y entropía normalizada de la clasificación (NCE) del área de estudio mediante el algoritmo *fuzzy k-means* a partir de los mapas de rendimiento (FKM-YM) y sus componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC).

En todos los casos se observa que el NCE aumenta con el número de zonas aunque con tasas de cambio más pronunciadas en FKM-YM. Por su parte, FPI disminuye con el número de zonas en FKM-YM mientras que en FKM-PC es constante y FKM-sPC presenta un máximo en 3 zonas. Para FKM-YM, los mínimos de ambos índices no convergen dentro del intervalo de número de zonas estudiado y dado que el aumento de NCE entre 2 a 3 zonas es mayor a la disminución en la superposición de clases contabilizada por el índice FPI, el menor número de zonas sería la solución más parsimoniosa en términos de nivel de desorganización y borrosidad de la clasificación. En cambio, para FKM-sPC la relación entre NCE y FPI se invierte observándose mayor nivel de borrosidad o superposición de clases que en FKM-YM para 2 a 4 zonas. No obstante, el valor mínimo de ambos índices se logra con dos zonas en cada caso.

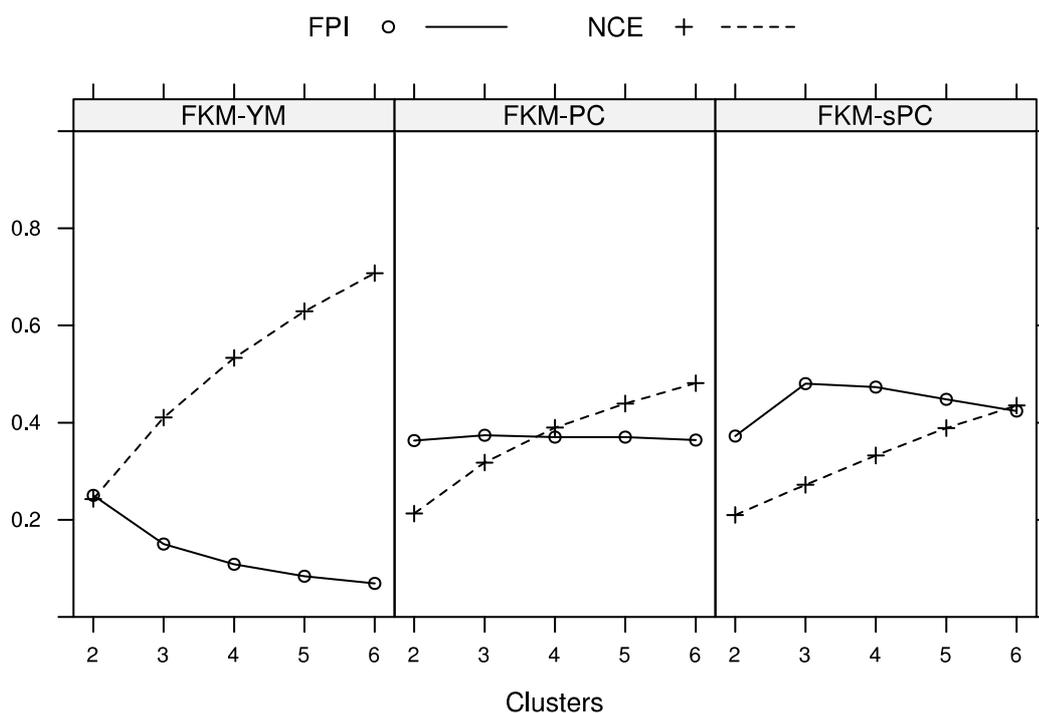


Fig. 5.3. Índice de borrosidad (FPI) y entropía normalizado (NCE) de la clasificación mediante el algoritmo *fuzzy k-means* a partir de los mapas de rendimiento originales (FKM-YM) y sus componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC).

Además de las decisiones sobre el tipo de información y algoritmo a utilizar para identificar zonas, la identificación del número óptimo de clases que represente la estructura de los rendimientos es un punto crítico en los métodos de clasificación no supervisada dado que depende la fuente de información utilizada (Fridgen *et al.*, 2004) y determina el grado de fragmentación de los resultados (Dobermann *et al.*, 2003). Cuando se utiliza el algoritmo *fuzzy k-means*, el número óptimo de zonas se puede determinar analizando la entropía de la clasificación (*i.e.* NCE) y el nivel de solapamiento de las clases (*i.e.* FPI), donde el mínimo de ambos es la solución óptima (Fridgen *et al.*, 2004). En este estudio, los indicadores FPI y NCE sólo convergieron para FKM-sPC (Fig. 5.3), por lo cual se consideró como solución óptima el mínimo de NCE.

La falta de convergencia de estos indicadores ha sido abordada por algunos autores los cuales han propuesto indicadores alternativos basados en la proporción de reducción de la varianza (Brock *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2010). Los perfiles de RV medios en función

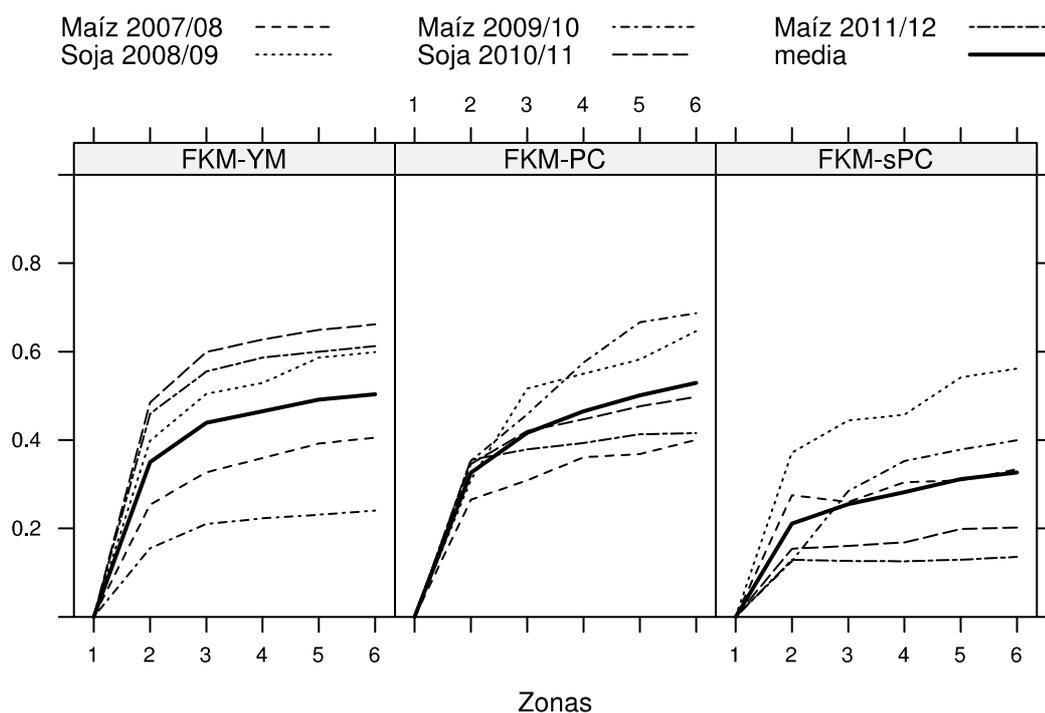


Fig. 5.4. Complemento de la varianza relativa de los rendimientos en función del número de zonas.

del número de zonas (Fig. 5.4) muestran que la proporción de variabilidad explicada por cada clasificación aumenta a medida que se incrementa este último. No obstante, la determinación del número óptimo de zonas mediante la prueba de Dunnett indicó que de manera consistente con lo observado en la Fig. 5.3, la división del área de estudio en dos zonas es una solución adecuada para FKM-YM y FKM-sPC. En cambio para FKM-PC, el RV de la clasificación en 3 zonas no difiere significativamente de aquella con 6 zonas. Brock *et al.* (2005) encontraron mayores discrepancias entre la solución determinada por NCE-FPI y las medidas de reducción de varianza. En dicho estudio, los indicadores NCE y FPI sugerían solamente 2 zonas mientras que con los indicadores calculados a partir de la reducción de la varianza, dichos autores concluyeron que la varianza de los rendimientos era mejor representada por 4 zonas (bajo, medio-bajo, medio-alto y alto).

Por otra parte, la Fig. 5.4 permite observar diferencias en los perfiles de RV para cada campaña según el método utilizado. Para FKM-MR el aumento de la RV en función del número de zonas sigue una tendencia similar en cada campaña mientras que en FKM-PC y FKM-sPC se observa mayor variación. En todos los casos, las proporción de variación explicada en el mapa de Soja 2008/09 fue consistentemente superior al promedio. Por otra parte, en FKM-YM los mapas Soja 2010/11 y Maíz 2011/12 registraron

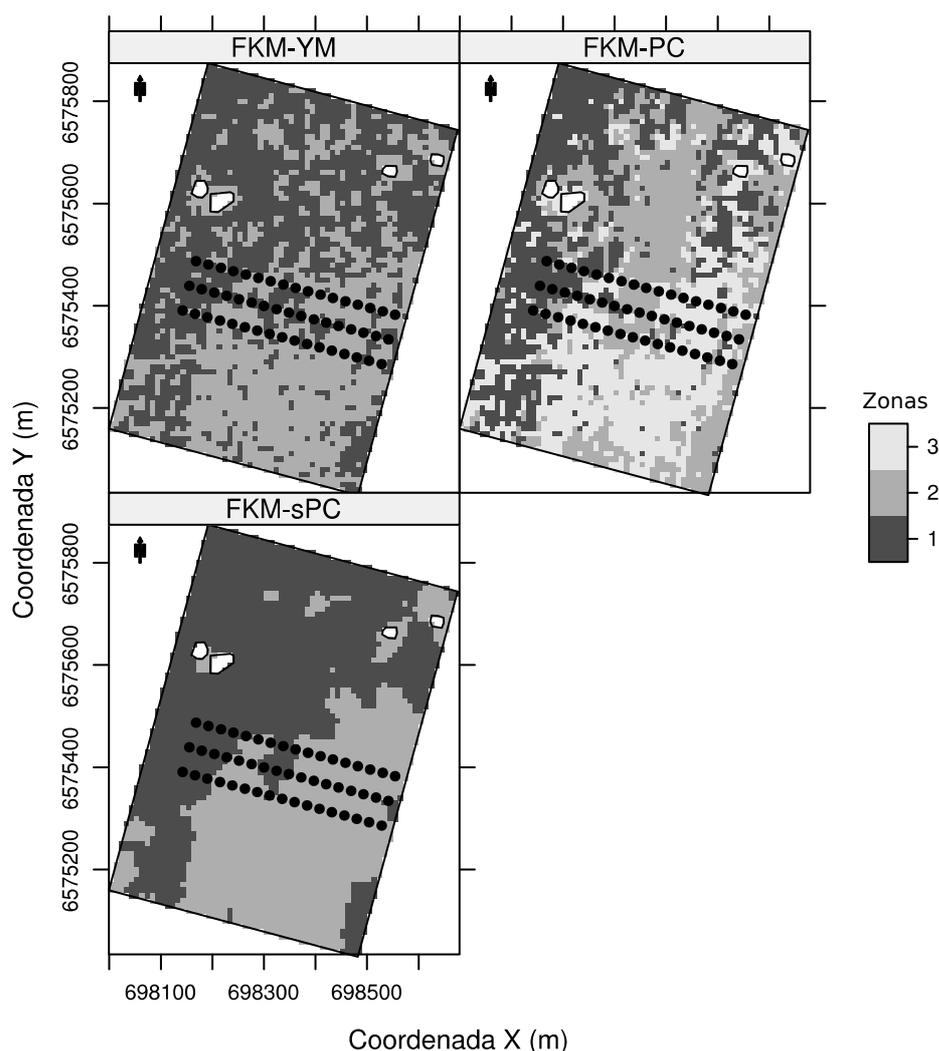


Fig. 5.5. Zonas delimitadas mediante análisis de conglomerados *fuzzy k-means* de los mapas de rendimiento originales (FKM-MR) y componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC) de la secuencia maíz-soja 2007/12 dentro del área de estudio. Los círculos negros indican la ubicación de los puntos del muestreo en grilla utilizados para caracterizar las diferencias de propiedades de suelo.

niveles de RV por encima del promedio de la serie para todos los números de zonas evaluados mientras que FKM-sPC explicó la menor proporción de varianza de las campañas Soja 2010/11 y Maíz 2011/12. Estas diferencias podrían explicarse por la incorporación de la estructura espacial en el proceso de clasificación ya que en estas campañas el análisis de estructura espacial (Capítulo 3) reveló la presencia de una estructura de variación que explicó el 80% de la variabilidad pero con un alcance de 21 m el cual es inferior a las distancias utilizadas en construcción de la matriz de conectividad incrementando las chances de incluir la información de vecinos con menor correlación espacial. Al igual que en este estudio, Brock *et al.* (2005) informaron la ocurrencia de variabilidad interanual en las proporciones de varianza explicada por las zonas.

En la Fig. 5.5 se presentan los mapas clasificados en dos zonas FKM-MR y FKM-sPC, y tres zonas para FKM-PC. En líneas generales, se observa que las tres alternativas de clasificación capturaron un patrón espacial similar con una zona de más bajos rendimientos ubicada en el sector SE y una zona de mayor productividad en el sector NO. No obstante, FKM-PC detectó una zona intermedia ubicada de S a N en la porción N del lote. Por otro lado, debido a la inclusión explícita de la estructura espacial mediante el análisis de componentes principales espaciales, las zonas delineadas por el método FKM-sPC presentaron mayor contigüidad que FKM-MR y FKM-PC.

En las Figs. 5.6, 5.7 y 5.8 se resume la distribución de los rendimientos relativos dentro de cada zona para las distintas campañas de la secuencia maíz-soja analizada según los métodos de clasificación evaluados. Se observa que para todos los métodos de clasificación la distancia entre las medianas de cada clase fueron variables entre campañas. En general, la máxima variación entre zonas se observó en la campaña Soja 2008/09. En el resto de las campañas, aproximadamente el 50% de los sitios tuvieron rendimientos comprendidos dentro del intervalo delimitado por el 20% en torno al rendimiento medio del lote (líneas discontinuas). Finalmente, el ordenamiento de las mismas en función de su rendimiento mediano fue consistente entre años, es decir, la zona 1 tuvo rendimientos superiores en todos los años examinados mientras que la zona 2 siempre tuvo rendimientos inferiores.

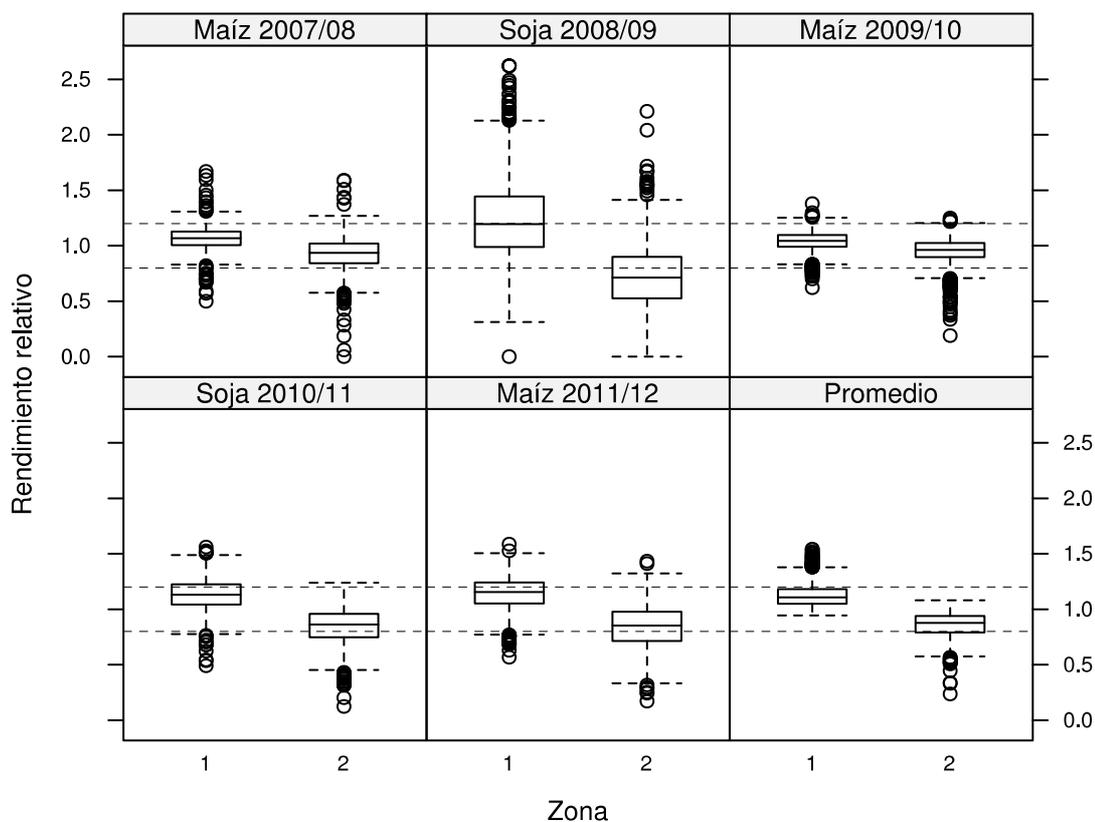


Fig. 5.6. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja en zonas delimitadas por el método FKM-YM. Líneas discontinuas indican rendimiento relativo 0,8 y 1,2.

En la Tabla 5.3 se presentan los rendimientos medios absolutos y coeficiente de variación dentro de cada zona. Los tres métodos evaluados identificaron regiones dentro del lote con diferencias en sus rendimientos medios. Asimismo, el nivel de variación dentro de las zonas fue menor en relación a la variación total dentro del lote. Las diferencias entre los rendimientos medios en las zonas delimitadas por FKM-YM oscilaron entre 799 y 1605 kg ha⁻¹ para maíz y 702 y 742 kg ha⁻¹ para soja. En FKM-sPC, dichas diferencias fueron 724 y 1079 kg ha⁻¹ para maíz y 421 y 682 kg ha⁻¹ para soja. Por su parte, las diferencias mínimas y máximas entre los rendimientos medios de las 3 zonas delimitadas por FKM-PC fueron 377 y 1709 para maíz y 392 y 973 kg ha⁻¹ para soja.

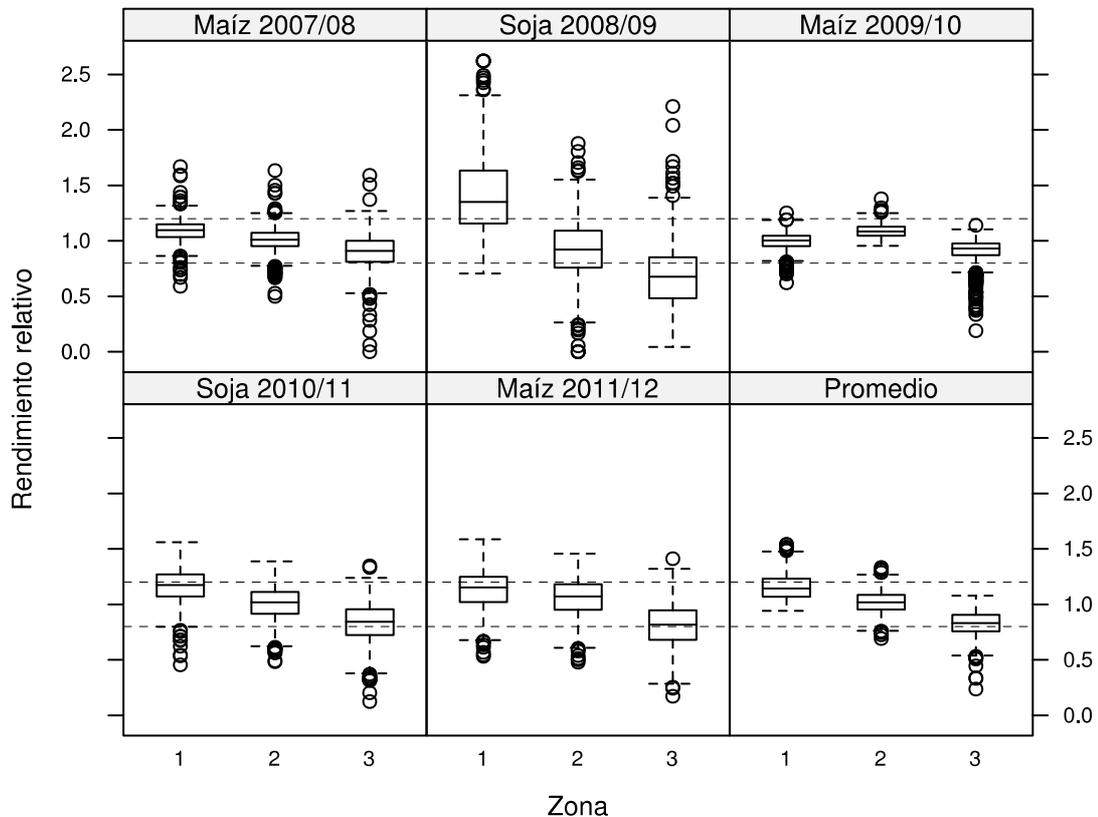


Fig. 5.7. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja en zonas delimitadas por el método FKM-PC. Líneas discontinuas indican rendimiento relativo 0,8 y 1,2.

Las zonas identificadas mediante el análisis de conglomerados presentaron menores diferencias de rendimiento relativo en relación al promedio del lote. En las tres alternativas evaluadas, los rendimientos promedio de las zonas estuvieron en torno al $\pm 20\%$ promedio del lote (Figs. 5.6, 5.7 y 5.8). Posiblemente, la menor separación de los rendimientos medios se haya debido al número reducido de zonas identificadas las cuales presentarían mayor heterogeneidad interna. En un estudio similar, Brock *et al.* (2005) utilizando el algoritmo *fuzzy k-means* identificaron 4 zonas a partir de mapas de rendimiento de secuencia maíz-soja de 6 años, no obstante las diferencias de rendimiento observadas entre las zonas contrastantes (alto y bajo rendimiento) fueron de aproximadamente $\pm 10\%$ entorno al rendimiento medio del lote. Diferencias menores fueron obtenidas por Dobermann *et al.* (2003) en lotes con monocultivo de maíz bajo riego incluso delimitando

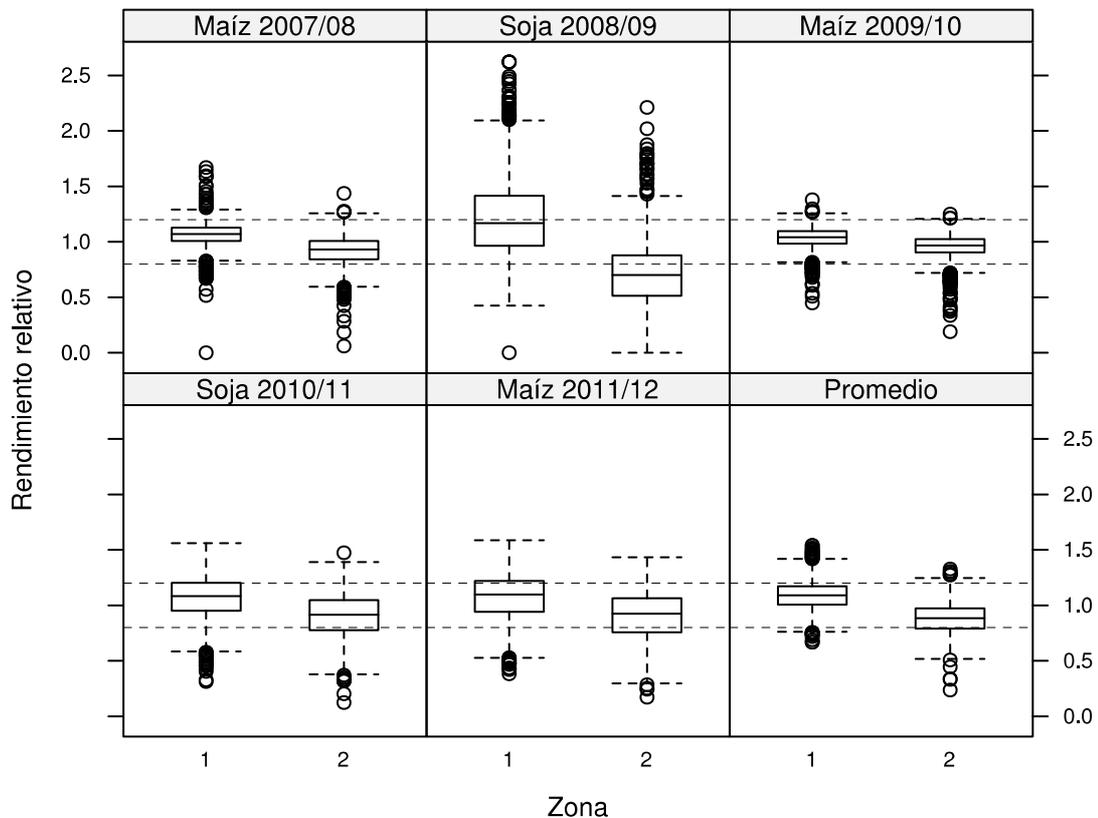


Fig. 5.8. Rendimientos relativos de los cultivos de maíz-soja en zonas delimitadas por el método FKM-sPC. Líneas discontinuas indican rendimiento relativo 0,8 y 1,2.

6 zonas. Jaynes *et al.* (2003, 2005), agruparon los rendimientos de soja y maíz respectivamente en 5 grupos asociados a la topografía y obtuvieron mayores diferencias de rendimiento entre grupos.

COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE CLASIFICACIÓN

En cuanto a la comparación de los métodos en relación a la habilidad de reducir la variación de los rendimientos dentro de las zonas y maximizar las diferencias entre éstas, en la Tabla 5.4 se resumen para cada método de clasificación los RV de cada campaña y se presenta el RV medio de la clasificación. Solamente se observaron diferencias significativas en los promedios interanuales de RV correspondientes a los métodos FKM-sPC y FKM-PC ya que este último en promedio contabilizó el doble de la varianza de los rendimientos. No obstante, de todos los métodos evaluados, FKM-sPC es el único que

permitió delimitar zonas que maximicen su contigüidad espacial lo cual se reflejó en el mayor índice de autocorrelación.

Tabla 5.3. Rendimientos medios, coeficiente de variación (valores entre paréntesis) y superficie total de las zonas delimitadas en el área de estudio a partir de los mapas de rendimiento de la secuencia maíz-soja 2007/12.

Zona	Maíz 2007/08	Soja 08/09	Maíz 09/10	Soja 10/11	Maíz 11/12
FKM-YM					
Zona 1 (26,8 ha)	7744 (0,09)	1665 (0,29)	9590 (0,08)	2937 (0,12)	6081 (0,13)
Zona 2 (2,5 ha)	6714 (0,16)	962 (0,38)	8791 (0,12)	2195 (0,19)	4477 (0,22)
FKM-PC					
Zona 1 (36,7 ha)	7930 (0,08)	1882 (0,24)	9179 (0,08)	3013 (0,13)	6023 (0,15)
Zona 2	7335 (0,10)	1233 (0,27)	10040 (0,05)	2603 (0,15)	5647 (0,16)
Zona 3	6531 (0,17)	911 (0,39)	8379 (0,11)	2159 (0,21)	4315 (0,23)
FKM-sPC					
Zona 1	7734 (0,10)	1634 (0,30)	9533 (0,09)	2773 (0,17)	5703 (0,19)
Zona 2	6654 (0,15)	952 (0,40)	8809 (0,12)	2352 (0,21)	4847 (0,24)
Total lote	7261 (0,14)	1335 (0,42)	9216 (0,11)	2589 (0,21)	5338 (0,22)

Los valores de RV obtenidos fueron similares a los informados en otros estudios donde se utilizaron mapas de rendimiento para delimitar zonas homogéneas, incluso con mayor número de zonas (Brock *et al.*, 2005; Dobermann *et al.*, 2003). A diferencia de lo encontrado por Dobermann *et al.* (2003), la cantidad de varianza contabilizada por la clasificación mediante reglas de decisión empíricas en función de la estabilidad y nivel de rendimiento (*i.e.* método de Cox-Gerard) fue similar a los métodos basados en el análisis de conglomerados.

De acuerdo a la variación de RV a lo largo de la serie se observa que Cox-Gerard y FKM-YM tuvieron patrón similar con menor desempeño en la campaña 2009/10, en cambio FKM-PC tuvo un desempeño mas uniforme entre campañas. Finalmente en FKM-sPC los mejores RV se obtuvieron en las campañas 2007/08 y 2008/09 lo cual se puede

explicar por la mayor autocorrelación espacial observada en estos años lo cual incidió en la distribución de pesos de los autovectores de los componentes principales espaciales (Tabla 5.2) y por ello los patrones identificados se asocian a la variación de estas dos campañas.

Por otro lado, el nivel de fragmentación de las clases resultantes fue diferente según el método empleado (Fig. 5.1 y Fig. 5.5). La distribución espacial de las clases en todos los métodos no fue al azar ya que presentaron niveles de autocorrelación variables (Tabla 5.4). La mayor contigüidad espacial de las zonas se logró con el procedimiento FKM-sPC (Índice I de Moran = 0,87). A diferencia de los métodos restantes donde la fragmentación de las zonas es el resultado de la autocorrelación espacial de las propiedades subyacentes que afectan a los rendimientos (Jaynes *et al.*, 2005), en FKM-sPC la estructura espacial es incorporada en el proceso de clasificación ya que a partir de los mapas de rendimientos originales se crean variables sintéticas que maximizan la variación así como su autocorrelación espacial (Córdoba *et al.*, 2013). Desde el punto de vista de la aplicación de dosis diferenciales, la contigüidad de las zonas incide en el desempeño de los sistemas de dosificación variables (Paoli *et al.*, 2010; Pringle *et al.*, 2003; Roudier *et al.*, 2010). Asumiendo que las zonas aquí delineadas implicarían necesidades de manejo diferentes, el patrón espacial delineado mediante FKM-sPC sería más adecuado, no obstante, el promedio de la proporción de variación de los rendimientos explicada por este algoritmo fue la menor.

Tabla 5.4. Complemento de la varianza relativa (RV) de cada método de clasificación para los distintos años de la serie analizada.

Método	Maíz 2007/08	Soja 08/09	Maíz 09/10	Soja 10/11	Maíz 11/12	Media	I
Cox-Gerard	0,23	0,32	0,15	0,35	0,28	0,27 ab	0,36*
FKM-YM	0,25	0,40	0,16	0,49	0,46	0,35 ab	0,46*
FKM-PC	0,31	0,52	0,46	0,42	0,38	0,42 b	0,53*
FKM-sPC	0,28	0,37	0,13	0,15	0,13	0,21 a	0,83*

Letras distintas indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha=0,05$).

* Pr < 0,001

CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS POR ZONA

En términos de discriminación de propiedades de suelo que estén asociadas a la delimitación de zonas en función de la información contenida en los mapas de rendimientos, en la Tabla 5.5 se presentan los valores medios de los atributos edáficos obtenidos en el muestreo en grilla agrupados en función de la zonas delimitadas por cada método.

Las zonas delimitadas por el método Cox-Gerard estuvieron asociadas a diferencias de COT, CE, arena y arcilla, mientras que para el resto de los atributos las diferencias no fueron significativas. Las zonas de rendimientos altos estarían asociados a menor proporción de arena y mayores contenidos arcilla. El COT fue significativamente mayor en las zonas con rendimientos Altos y Medios, mientras que las diferencias de arcilla entre las zonas de rendimientos bajos y medios no fueron significativas. La zona con rendimientos Inestables se caracterizó por mayores valores de CE mientras que los niveles de COT, arena y arcilla fueron intermedios. En general la magnitud de las diferencias de los atributos entre las zonas fueron pequeñas. No obstante, las zonas Alto y Medio presentaron un 25% más de COT que las áreas de rendimientos Bajos lo cual podría estar asociado diferencias en la dinámica de nutrientes.

Tabla 5.5. Valores medios y error estándar obtenidos para los atributos edáficos del espesor 0-20 cm de un Argiudol típico según las zonas delimitadas por nivel y estabilidad de rendimientos (método Cox-Gerard), análisis de conglomerados sobre mapas de rendimientos (FKM-YM), componentes principales no espaciales (FKM-PC) y espaciales (FKM-sPC).

Método	Atributo									
	COT	Nt	pH	CE	Arc	Lim	Are	IniB	Ds10	Ds20
Cox-Gerard										
Alto (n = 3)	12,6 b ± 0,6	0,87 a ± 0,04	5,5a ± 0,2	0,08 a ± 0,01	222 b ± 8	705 a ± 9	72 a ± 6	28 a ± 3	1,33a ± 0,04	1,42a ± 0,03
Medio (n = 40)	11,3 b ± 0,2	0,80 a ± 0,17	5,8 a ± 0,1	0,10 a ± 0,01	197 a ± 2	710 a ± 2	93 b ± 2	27 a ± 1	1,37a ± 0,01	1,46a ± 0,01
Bajo (n = 5)	9,5 a ± 0,5	0,65 a ± 0,14	5,9 a ± 0,1	0,09 a ± 0,01	188 a ± 6	702 a ± 7	110 c ± 5	22 a ± 2	1,40a ± 0,03	1,50a ± 0,02
Inestable (n = 4)	11,0 ab ± 1,5	0,76 a ± 0,18	5,8 a ± 0,1	0,12 b ± 0,01	197 ab ± 7	709 a ± 7	94 abc ± 5	24 a ± 3	1,39a ± 0,03	1,47a ± 0,02
FKM-YM										
Zona 1 (n = 20)	11,6 a ± 0,3	0,83 a ± 0,07	5,6 a ± 0,04	0,09 a ± 0,003	205 a ± 3	709 a ± 2	86 a ± 2	28 a ± 1	1,36 a ± 0,01	1,45 a ± 0,01
Zona 2 (n = 32)	11,0 a ± 0,2	0,76 a ± 0,06	5,8 b ± 0,05	0,10 b ± 0,004	193 b ± 2	708 a ± 3	97 b ± 2	25 a ± 1	1,38 a ± 0,01	1,47 a ± 0,01
FKM-PC										
Zona 1 (n = 14)	11,7 a ± 0,3	0,84 b ± 0,08	5,6 a ± 0,07	0,09 a ± 0,003	204 a ± 5	714 a ± 4	83 a ± 2	27 a ± 1	1,35 a ± 0,02	1,46 a ± 0,01
Zona 2 (n = 17)	11,1 a ± 0,3	0,81 b ± 0,07	5,7 a ± 0,07	0,09 a ± 0,004	202 a ± 4	706 a ± 4	94 b ± 2	28 a ± 1	1,36 a ± 0,02	1,46 a ± 0,01
Zona 3 (n = 19)	11,0 a ± 0,3	0,70 a ± 0,07	5,9 b ± 0,06	0,11 b ± 0,005	191 b ± 4	707 a ± 3	99 b ± 2	24 a ± 1	1,39 a ± 0,01	1,47 a ± 0,01
FKM-sPC										
Zona 1 (n = 18)	11,7 a ± 0,3	0,83 a ± 0,07	5,6 a ± 0,04	0,09 a ± 0,005	202 a ± 3	712 a ± 2	86 a ± 2	27 a ± 1	1,36 a ± 0,02	1,45 a ± 0,01
Zona 2 (n = 32)	10,9 b ± 0,2	0,77 a ± 0,06	5,8 b ± 0,05	0,10 a ± 0,004	195 a ± 3	707 a ± 3	96 b ± 2	26 a ± 1	1,38 a ± 0,01	1,47 a ± 0,01

Letras distintas indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha=0,05$).

La delimitación de zonas mediante el análisis de conglomerados sobre los mapas de rendimiento originales (FKM-YM) permitió discriminar sectores con diferencias

significativas en los niveles de pH, CE, arena y arcilla. Cuando se utilizaron los componentes principales (FKM-PC) las zonas se caracterizaron por diferencias en Nt, CE, arcilla y arena, en cambio, la delimitación utilizando los componentes principales espaciales (FKM-sPC) derivó en diferencias estadísticamente significativas de COT, pH y arena de cada zona.

Finalmente, independientemente del método utilizado para la delimitación de zonas, no se detectaron diferencias significativas en el contenido de limo, profundidad de inicio del horizonte B (iniB), y densidad de suelo de las profundidades 0-10 y 10-20 cm.

No obstante su significancia, la mayoría de las diferencias observadas en los atributos de suelo fueron de escasa magnitud. Esto limita el grado de asociación que se puede establecer entre estas propiedades de suelo y las diferencias de rendimiento observadas así como la necesidad de adoptar estrategias de manejo diferenciales en función de los atributos edáficos. López de Sabando *et al.* (2008b) en Argiudoles de la Pampa ondulada no encontraron diferencias de atributos de suelo como COT, Nt, pH y CE mientras que detectaron diferencias en fracciones granulométricas medias a finas aunque de mayor magnitud a las de la Tabla 5.5. En dicha tabla se observa que los contenidos de arcilla y arena presentaron diferencias entre zonas independientemente del método utilizado, con mayores contenidos de arcilla y menos arena en las zonas con mayor rendimiento. No obstante, la magnitud de las diferencias fue escasa para atribuir la diferencias de rendimientos entre zonas al resultado del efecto de la textura sobre la capacidad de infiltración y retención hídrica.

En otros estudios las zonas delimitadas a partir de mapas de rendimiento se caracterizaron por diferencias en los atributos de suelo. Cox y Gerard (2007) a partir de zonas delimitadas según nivel y estabilidad de rendimientos encontraron diferencias de mayor magnitud entre zonas de alto y bajo rendimiento para algunas propiedades de suelo y atributos topográficos. No obstante, las diferencias no fueron consistentes entre los lotes estudiados indicando la limitación para la extrapolación de resultados aún entre lotes vecinos. Jaynes *et al.* (2003, 2005) en lote con relieve normal encontraron fuertes asociaciones entre las zonas delimitadas por análisis de conglomerados y posiciones de

relieve y atributos topográficos debido a su incidencia sobre la dinámica de la infiltración y redistribución del agua. Brock *et al.* (2005), en lotes con mayor heterogeneidad edáfica encontraron asociación entre las zonas delimitadas por análisis de cluster de mapas de rendimiento y mapas de suelo a escala 1:15.000.

La falta o débil de asociación entre las zonas delimitadas por el historial de rendimientos y las propiedades de suelo aquí examinadas podría explicarse por el bajo nivel de variación y estructura espacial de corta distancia de éstas en relación a la variabilidad de los rendimientos. Es por ello que sería necesario ampliar la caracterización de las zona delineadas incluyendo otros atributos de suelo no considerados en este estudio así como también examinar bien variaciones en los horizontes subsuperficiales.

Finalmente, independientemente del método de delimitación utilizado, la aplicación efectiva del manejo por zonas requiere el conocimiento de cuales son los principales factores de suelo que limitan el crecimiento y desarrollo de los cultivos en cada zona así como la respuesta a la aplicación de insumos (Schepers *et al.*, 2004). Es por ello a menos que se realicen más investigaciones para identificar cuales son las causas de dichos patrones de rendimiento, la discriminación de zonas en función de sus rendimientos no sería efectiva en este lote.

CONCLUSIONES

En este capítulo se evaluaron procedimientos para delimitar de zonas homogéneas a partir de datos de productividad de una secuencia de 5 años de mapas de rendimiento de soja-maíz y se determinó si existen diferencias entre éstas en términos de propiedades edáficas que sugieran la necesidad de un manejo diferencial.

Al comparar los patrones espaciales delimitados por los métodos evaluados se observó que éstos fueron variables con distinto grado de autocorrelación. No obstante, debido a la variación interanual en la proporción de varianza explicada por cada clasificación, sólo se diferenciaron los métodos FKM-PC y FKM-sPC, siendo este último el que menor desempeño tuvo en términos de RV. La inclusión de la estructura espacial permitió delimitar zonas con mayor contigüidad, lo cual es deseable para facilitar el manejo espacial, pero que disminuyeron la proporción de varianza explicada.

Desde el punto de la caracterización edáfica de las zonas, los resultados aquí presentados permiten rechazar en parte la Hipótesis de trabajo ya que no se encontraron diferencias significativas entre zonas para la mayoría de las propiedades de suelo. No obstante, en en los casos donde las diferencias fueron estadísticamente significativas, la magnitud de las mismas fue estrecha lo cual no sugiere la necesidad de un tratamiento diferencial. Posiblemente esto se deba a la baja variabilidad observada en dichas propiedades en relación con la variación de los rendimientos.

Es necesario realizar más investigaciones para identificar cuales son las causas de dichos patrones de rendimiento ya que la discriminación de zonas en función de sus rendimientos sin establecer los factores que determinan dichos patrones no sería aconsejable.

CONCLUSIONES GENERALES

La aplicación de la AP requiere del conocimiento de la variabilidad espacial y temporal de los atributos de suelo y la respuesta productiva del cultivo dentro del lote. En el centro de Santa Fe la información de base sobre estos aspectos es deficiente. Por ello este trabajo se realizó para contribuir con información cuantitativa acerca de la variabilidad espacial y temporal de rendimientos y atributos de suelo en un lote con suelos Argiudoles y secuencia de maíz-soja de cinco años. Además, se evaluó la posibilidad de delimitar de zonas homogéneas en función de la información de los mapas de rendimiento.

Luego de analizar la variabilidad espacial de los rendimientos para las condiciones estudiadas se puede afirmar éstos se caracterizan por su variabilidad moderada, dependiente de las condiciones climáticas de de cada campaña, y fuerte estructura espacial con dos escalas de variación. La mayor porporción de la variabilidad espacial ocurre a distancias cortas (20-30 m), aspecto que se mantiene entre campañas, mientras que la variabilidad a mayor distancia (más de 165 m) se asocia con la variación interanual de las precipitaciones. Por lo tanto, desde el punto de vista del MSEC es esperable que no sea necesario realizar diferenciados en función de los rendimientos en todas las campañas y, de ser necesarios, dichos manejos deberían ser aplicados utilizando maquinaria que permita manejar superficies reducidas.

El análisis de los rendimientos de cada sitio a través del tiempo indica que desde el punto de vista de la variabilidad temporal, la mayor parte de los sitios del lote podrían considerarse estables según umbrales sigueridos por la bibliografía. No obstante, los niveles de correlación no favorecen la predictibilidad de los rendimientos entre campañas. En otras palabras, la estabilidad temporal permitiría disminuir el riesgo al considerar un rendimiento objetivo para un determinadio sitio pero la predicción del dicho en función de la información contenida en los mapas anteriores no es confiable.

La integración de las dimensiones espaciales y temporal en análisis permite corroborar la preponderancia de la estructura espacial de corta distancia la cual es consistente para distintos intervalos de tiempo. Al comparar la variabilidad espacial y temporal se puede concluir que para estas condiciones las diferencias de rendimiento que ocurren entre sitios a más de 25 m de separación son equivalentes a aquellas observadas entre campaña para un mismo sitio.

Desde el punto de vista edáfico, el bajo nivel de variabilidad de la mayoría de propiedades aunque con estructura espacial débil o nula a la escala observada caracterizaron las condiciones del área de estudio. Esto se corroboró con lo observado para CEa quien mostró una fuerte estructura espacial a corta distancia (entre 20 y 30 m). Sin embargo, las relaciones entre esta medida aparente y los atributos edáficos normalmente citados como responsables de su variación limitaría su utilización como fuente de información alternativa para estimar la distribución espacial de aquellos. Estos resultados concuerdan con lo observado en el análisis de la variabilidad espacial de los rendimientos, por lo que desde el punto de vista del MSEC, la escasa variación de algunos atributos y la falta de estructura espacial podrían limitar la necesidad de aplicar estrategias de manejo diferenciada o bien requerirían mayores esfuerzos de muestreo para poder obtener mapas de su distribución espacial mediante técnicas de interpolación.

Los métodos de delimitación evaluados aquí permiten discriminar, con distinto grado de efectividad, sectores con diferentes rendimientos medios y menor variabilidad interna que la observada en todo el lote. Pero la falta de correspondencia entre estas zonas y las propiedades que podrían explicar las diferencias limitan su utilidad para sugerir estrategias de manejo diferenciadas.

Por lo tanto, para las condiciones edafoclimáticas y de manejo observadas en el presente estudio se concluye que la aplicación del MSEC podría no ser efectiva debido a que la variabilidad de los rendimientos y atributos de suelo en algunos casos no se requiere el manejo diferenciales debido a la magnitud de las diferencias y en otros, la estructura espacial de corta distancia limitaría la aplicación a campo.

Finalmente, este estudio consituye un avance en el conocimiento de los aspectos

necesarios para la aplicación de la AP en el centro de Santa Fe, alertando acerca de las dificultades que plantea la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos y propiedades de suelo para MSEC. Es necesario ampliar los estudios para abarcar mayor número de años y otras condiciones experimentales incluyendo diferentes rotaciones de cultivos, relieve y heterogeneidad edáfica, ya que aquí se limitó a suelos con aptitud agrícola a agrícola ganadera y en la Región abundan también suelos con menor aptitud de importancia creciente por el corrimiento de la frontera agrícola. Por otro lado en base a los resultados obtenidos en este trabajo se plantean las siguientes líneas de investigación:

1. Cuantificar la variabilidad espacial de otros atributos edáficos claves para el desempeño de los cultivos tales como: infiltración, N particulado, intervalo hídrico óptimo, salinidad, sodio intercambiable, encharcamiento, nivel freático próximo a la superficie, y abarcando horizontes subsuperficiales. Debido a la mayor dificultad y costo que plantean estos atributos, se debería avanzar en la utilización de sensores para optimizar la adquisición de información mediante muestreos dirigidos.
2. Identificar relaciones entre la variabilidad de los rendimientos dentro del lote y la variabilidad de las propiedades de suelo sugeridas en (1).
3. Comparar estrategias de delimitación de zonas de manejo basadas en fuentes de información alternativa como atributos de suelo medidos a través de sensores y atributos de paisaje derivados de modelos de elevación de terreno.
4. Evaluar la estabilidad temporal de las zonas de manejo con series de más extensas y explorar diferencias entre cultivos y/o campañas según su nivel de precipitación (*i.e.* años secos, normales, húmedos)
5. Continuar con el desarrollo y validación de índices de oportunidad para el manejo por zonas en función de la magnitud y estructura espacial de los rendimientos o atributos secundarios relacionados con estos de modo tal de detectar los lotes donde sería adecuado implementar el manejo por zonas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Adamchuk, V. I., Hummel, J. W., Morgan, M. T., y Upadhyaya, S. K. 2004. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 44: 71–91.
- Adamchuk, V. I., Rossel, R. A. V., Sudduth, K. A., y Lammers, P. S. 2011. Sensor fusion for precision agriculture. En: *Sensor Fusion: Foundation and Applications*, p 226. T. Ciza (ed). InTech.
- Albarenque, S. M., Caviglia, O. P., y Melchiori, R. J. M. 2012. Evaluación de la eficiencia en el uso de nitrógeno y respuesta a la fertilización nitrogenada por ambiente en el cultivo de maíz. Resúmenes del 1º Congreso de Valor Agregado en Origen y 11º Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.
- Albarenque, S. M., Melchiori, R. J. M., y Caviglia, O. P. 2009. Sensibilidad del modelo CERES-Maize a parámetros de suelo relacionados con el manejo por zonas. *Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Alesso, C. A., y Pilatti, M. A. 2008. Variabilidad espacial de la densidad del suelo, fósforo extractable y potasio intercambiable. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Álvarez, R., Steinbach, H., Bauschen, B., y Ejalbert, J. N. 2004. Variabilidad espacial de propiedades de los suelos de la pampa ondulada: efecto sobre el número de submuestras a tomar para el diagnóstico de la fertilidad. *XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná.
- Amiotti, N., Bravo, O., y Ibarguren, G. 2008. Utilización de tecnologías digitales en la identificación de factores ambientales que regulan la producción de granos. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Anselin, L., Bongiovanni, R., y Lowenberg-DeBoer, J. 2004. A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production. *American Journal of Agricultural Economics* 86: 675-687.
- Arslan, S., y Colvin, T. S. 2002. Grain yield mapping: Yield sensing, yield reconstruction, and errors. *Precision Agriculture* 3: 135–154.
- Ateca, M. R., Aoki, A., Ruiz Posse, E. J., y Serrano, R. 2012. Variabilidad espacial del rendimiento de soja en la región central de Córdoba. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Bakhsh, A., Jaynes, D., Colvin, T., y Kanwar, R. 2000. Spatio-temporal analysis of yield variability for a corn-soybean field in Iowa. *Transactions of the ASAE* 43: 31-38.
- Barnes, E. M., Sudduth, K. A., Hummel, J. W., Lesch, S. M., Corwin, D. L., Yang, G.,

- Doughtry, C. S. T., *et al.* 2003. Remote and Ground-Based Sensor Techniques to Map Soil Properties. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69: 619–630.
- Barraco, M., Díaz Zorita, M., Brambilla, C., y Duarte, G. 2008. Productividad de soja en ambientes definidos por su posición en el relieve. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Bausch, W. C., y Khosla, R. 2010. QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. *Precision Agriculture* 11: 274–290.
- Beal, J. P., y Tian, L. F. 2001. Time shift evaluation to improve yield map quality. *Applied Engineering in Agriculture* 17: 385–390.
- Bivand, R. S., Pebesma, E. J., y Gómez-Rubio, V. 2008. *Applied Spatial Data Analysis with R*. Springer, New York, USA. 379 pp.
- Blackmore, S. 1999. Remedial correction of yield map data. *Precision Agriculture* 1: 53–66.
- Blackmore, S. 2000. The interpretation of trends from multiple yield maps. *Computers and electronics in agriculture* 26: 37–51.
- Blackmore, S., Godwin, R. J., y Fountas, S. 2003. The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems engineering* 84: 455–466.
- Bongiovanni, R. G., Robledo, C. W., y Lambert, D. M. 2007. Economics of site-specific nitrogen management for protein content in wheat. *Computers and Electronics in Agriculture* 58: 13–24.
- Bongiovanni, R., y Lowenberg-DeBoer, J. 2004. Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture* 5: 359–387.
- Bongiovanni, R., y Lowenberg-DeBoer, J. 2006. Argentina. En: *Handbook of Precision Agriculture: Principles And Applications*, 1.^a edn, pp 615–633. A. Srinivasan (ed). CRC Press.
- 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: 95–105.
- Bourennane, H., Nicoullaud, B., Couturier, A., Pasquier, C., Mary, B., y King, D. 2012. Geostatistical filtering for improved soil water content estimation from electrical resistivity data. *Geoderma* 183–184: 32–40.
- Boydell, B., y McBratney, A. B. 2002. Identifying potential within-field management zones from cotton-yield estimates. *Precision agriculture* 3: 9–23.
- Bragachini, M., Méndez, A., y Vélez, J. P. 2011. Argentina, un referente mundial en tecnología de Agricultura de Precisión. .
- Bragachini, M., Méndez, A., Vélez, J. P., y Villaroel, D. 2009. Determinación de viabilidad económica de la tecnología de dosis variable de insumos en maíz. *Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Bray, R., y Kurtz, L. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. *Soil Science* 59: 29–45.
- Brevik, E. C., Fenton, T. E., y Lazari, A. 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture* 7: 393–404.

- Brock, A., Brouder, S. M., Blumhoff, G., y Hofmann, B. S. 2005. Defining Yield-Based Management Zones for Corn-Soybean Rotations. *Agronomy Journal* 97: 1115-1128.
- Burgess, T. M., y Webster, R. 1980a. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties: II. Block kriging. *Journal of Soil Science* 31: 333-341.
- Burgess, T. M., y Webster, R. 1980b. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties I. The semi-variogram and punctual kriging. *Journal of Soil Science* 31: 315-331.
- Burgess, T. M., Webster, R., y McBratney, A. B. 1981. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy. *Journal of Soil Science* 32: 643-659.
- 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 Science Society of America Journal* 58: 1501-1511.
- Casa, R., Baret, F., Buis, S., Lopez-Lozano, R., Pascucci, S., Palombo, A., y Jones, H. G. 2010. Estimation of maize canopy properties from remote sensing by inversion of 1-D and 4-D models. *Precision Agriculture* 11: 319-334.
- Castrignanò, A., Maiorana, M., y Fornaro, F. 2003. Using Regionalised Variables to assess Field-scale Spatiotemporal Variability of Soil Impedance for different Tillage Management. *Biosystems Engineering* 85: 381-392.
- Castro Franco, M., Peralta, N., Domenech, M., y Costa, J. L. 2012. Relación cuantitativa entre atributos topográficos y rendimiento. Resúmenes del 1° Congreso de Valor Agregado en Origen y 11° Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.
- Castro Franco, M., Peralta, N. R., y Costa, J. L. 2011. Uso de herramientas geomáticas para el análisis de la relación espacio temporal entre rendimiento y topografía, para la determinación de zonas de manejo homogéneo. *Anales del III Congreso Argentino de AgroInformática*. Sociedad Argentina de Informática, Córdoba, Argentina.
- Ceddia, M. B., Vieira, S. R., Villela, A. L. ., Mota, L. S., Anjos, L. H. ., y Carvalho, D. F. 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Scientia Agricola* 66: 338-352.
- Chang, D. H., y Islam, S. 2000. Estimation of soil physical properties using remote sensing and artificial neural network. *Remote sensing of environment* 74: 534-544.
- Charadia, R., Albarenque, S. M., Melchiori, R. J. M., y Barbagelata, P. A. 2009. Estimacion del NDVI y la prescripcion de dosis variable de nitrogeno para maiz y trigo basada en sensores ópticos. *Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Chung, S. O., Sudduth, K. A., y Drummond, S. T. 2002. Determining yield monitoring system delay time with geostatistical and data segmentation approaches. *Transactions of the ASABE* 45: 915-926.
- Corá, J. E., Araújo, A. V., Pereira, G. T., y Beraldo, J. M. G. 2004. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisao na cultura de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28: 1013-1021.
- Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M., y Costa, J. L. 2012. Análisis de componentes principales con datos georreferenciados: Una aplicación en agricultura de precisión.

- Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo 44: 27-39.
- Córdoba, M., Bruno, C., Costa, J., y Balzarini, M. 2013. Subfield management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Computers and Electronics in Agriculture* 97: 6-14.
- Correa, M. de T., y Sosa, D. A. 1998. Análisis geoestadístico de propiedades del suelo. XVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Villa Carlos Paz, Argentina.
- Corwin, D. L., y Lesch, S. M. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal* 95: 455-471.
- Corwin, D. L., y Lesch, S. M. 2005a. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 11-43.
- Corwin, D. L., y Lesch, S. M. 2005b. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity:: Part II. Case study. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 135-152.
- Corwin, D. L., y Lesch, S. M. 2005c. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 103-133.
- Corwin, D. L., Lesch, S. M., Shouse, P. J., Soppe, R., y Ayars, J. E. 2003. Identifying soil properties that influence cotton yield using soil sampling directed by apparent soil electrical conductivity. .
- Corwin, D. L., y Plant, R. E. 2005. Applications of apparent soil electrical conductivity in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 1-10.
- Cox, M. S., y Gerard, P. D. 2007. Soil Management Zone Determination by Yield Stability Analysis and Classification. *Agronomy Journal* 99: 1357-1365.
- Cox, M. S., Gerard, P. D., Wardlaw, M. C., y Abshire, M. J. 2003. Variability of Selected Soil Properties and Their Relationships with Soybean Yield. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1296.
- Cressie, N. 1993. *Statistics for Spatial Data*. Wiley-Interscience, New York, USA.
- Cruzate, G. A., y Rivero, E. 2010. Variabilidad espacial y temporal de P y Zn en siembra directa y la relación con algunas propiedades de un suelo de Paraná. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- De Almeida Machado, P. L. ., de Campos Bernardi, A. C., Valencia, L. I. ., Molin, J. P., Gimenez, L. M., Silva, C. A., de Andrade, A. G., *et al.* 2006. Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília 41: 1023-1031.
- Diggle, P. J., y Ribeiro Jr., P. J. 2007. *Model-based Geostatistics*. . Springer Series in StatisticsSpringer, New York, USA. 241 pp.
- Diker, K., Heermann, D. F., y Brodahl, M. K. 2004. Frequency analysis of yield for delineating yield response zones. *Precision Agriculture* 5: 435-444.
- Di Pietro, L. B., Marbán, L., y Ritcher, V. 1986. Variabilidad Espacial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. *Ciencia del Suelo* 2: 99-106.
- Dobermann, A., Blackmore, S., Cook, S. E., y Adamchuk, V. I. 2004. Precision farming: Challenges and future directions. *New Directions for a Diverse Planet. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress*. .
- Dobermann, A. P., Adamchuk, J. L., Simbahan, V. I., y Ferguson, G. C. 2003. Classification of Crop Yield Variability in Irrigated Production Fields. *Agronomy*

- Journal 95: 1105-1120.
- Doerge, T. A. 1999. Management Zone Concepts. .
- Doraiswamy, P. C., Moulin, S., Cook, P. W., y Stern, A. 2003. Crop yield assessment from remote sensing. *Photogrammetric engineering and remote sensing* 69: 665–674.
- Dray, S., y Dufour, A.-B. 2007. The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists. *Journal of statistical software* 22: 1–20.
- Dray, S., Saïd, S., y Débias, F. 2008. Spatial ordination of vegetation data using a generalization of Wartenberg’s multivariate spatial correlation. *Journal of Vegetation Science* 19: 45–56.
- Espósito, G., Balboa, G., Castillo, C., Balboa, R., y Degioanni, A. 2012a. Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre haplustoles de cordoba. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.*
- Espósito, G., Robledo, W., Bongiovanni, R., Ruffo, M., y Balboa, G. 2012b. Dosificación variable de nitrógeno en maíz según el índice topográfico compuesto. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.*
- Espósito, G., Robledo, W., Bongiovanni, R., Ruffo, M., Diez, E., y Balboa, G. 2012c. Análisis del efecto año sobre la dosis variable de nitrógeno en maíz. *XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.*
- Espósito, G., Robledo, W., Bongiovanni, R., Ruffo, M. L. ., y Balboa, G. 2010. Manejo sitio-específico de nitrógeno ajustado por atributos espaciales del terreno. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Rosario, Argentina.*
- Florin, M. J., McBratney, A. B., y Whelan, B. M. 2009. Quantification and comparison of wheat yield variation across space and time. *European Journal of Agronomy* 30: 212-219.
- Forsythe, W. 1975. *Manual de laboratorio de física de suelos. . Libros y materiales educativos IICA, San José, Costa Rica.* 212 pp.
- Fraisse, C. W., Sudduth, K. A., y Kitchen, N. R. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Transactions of the ASAE* 44: 155-166.
- Fridgen, J. J., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Drummond, S. T., Wiebold, W. J., y Fraisse, C. W. 2004. Management zone analyst (MZA): Software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal* 96: 100–108.
- Frogbroock, Z. L., y Oliver, M. A. 2007. Identifying management zones in agricultural fields using spatially constrained classification of soil and ancillary data. *Soil Use and Management* 23: 40-51.
- Gabioud, E. A., Wilson, M. G., Albarenque, S. M., Kemerer, A. C., Melchiori, R. J. M., Sasal, M. C., y Pioto, C. 2012. Variabilidad espacial de la rmp y la dap de un molisol en siembra directa y su relación con el rendimiento de soja. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.*
- Gambaudo, S., Fontanetto, H., Sosa, N., Albrecht, J., Boschetto, H., Forni, M., y Boretto, D. 2012. Aplicación de enmiendas por ambientes en suelos halomórficos. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.*
- Gebbers, R., y Adamchuk, V. I. 2010. Precision agriculture and food security. *Science* 327:

828-831.

- Gee, G. W., y Or, D. 2002. Particle-Size Analysis. En: *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*, pp 255-293. J. H. Dane y G. C. Topp (eds). Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Goovaerts, P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. *Biology and Fertility of Soils* 27: 315–334.
- Gregoret, M. C., Dardanelli, J. L., Bongiovanni, R., y Díaz Zorita, M. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un haplustol. *Ciencia del Suelo* 24.
- Gregoret, M. C., Díaz Zorita, M., Dardanelli, J., y Bongiovanni, R. G. 2011. Regional model for nitrogen fertilization of site-specific rainfed corn in haplustolls of the central Pampas, Argentina. *Precision Agriculture*.
- 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: 97-102.
- Herber, L. 2011. Conductividad Eléctrica aparente como herramienta para delimitar Zonas de Manejo Sitio Especifico en Maíz (*Zea mays*) en la Provincia de Corrientes. Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Argentina. 95 pp.
- INTA. 1992. Carta de Suelos de la República Argentina: hoja 3160-14 (San Justo). INTA EEA Rafaela.
- INTA. 2009. Mapa de Suelos semi-detallado de la Provincia de Santa Fe. Rafaela, Argentina.
- Iqbal, J., Thomasson, J. A., Jenkins, J. N., Owens, P. R., y Whisler, F. D. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society American Journal* 69: 1338–1350.
- Isaaks, E. H., y Srivastava, R. M. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York, USA. 547 pp.
- Jackson, M. 1982. *Análisis químico de suelos*. Omega, Barcelona, España. 662 pp.
- Jaynes, D. B., Colvin, T. C., James, T. S., y others. 2003. Cluster analysis of spatiotemporal corn yield patterns in an Iowa field. *Agronomy Journal* 95: 574-586.
- Jaynes, D. B., y Colvin, T. S. 1997. Spatiotemporal Variability of Corn and Soybean Yield. *Agronomy Journal* 89: 30-37.
- Jaynes, D. B., Colvin, T. S., y Kaspar, T. C. 2005. Identifying potential soybean management zones from multi-year yield data. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 309–327.
- Joernsgaard, B., y Halmoe, S. 2003. Intra-field yield variation over crops and years. *European journal of agronomy* 19: 23–33.
- Johnson, C. K., Doran, J. W., Duke, H. R., Wienhold, B. J., Eskridge, K. M., y Shanahan, J. F. 2001. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Soil Science American Journal* 65: 1829-1837.
- Johnson, C. K., Mortensen, D. A., Wienhold, B. J., Shanahan, J. F., y Doran, J. W. 2003. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. .
- Jonhson, C. E., Schafer, R. L., y Young, S. C. 1983. Controlling agricultural machinery intelligently. *Proceedings of the National Conference on Agricultural Electronics Applications*. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, USA.

- Jung, W. K., Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Kremer, R. J., y Motavlli, P. P. 2006. Spatial Characteristics of Claypan Soil Properties in an Agricultural Field. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1387.
- Justo, C., Scianca, C., y Barraco, M. 2012. Estrategias de manejo en maíz para suelos con diferente aptitud productiva en el noroeste bonaerense. Resúmenes del 1° Congreso de Valor Agregado en Origen y 11° Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.
- Kaspar, T. C., Colvin, T. S., Jaynes, D. B., Karlen, D. L., James, D. E., Meek, D. W., Pulido, D., *et al.* 2003. Relationship between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture* 4: 87–101.
- Kemerer, A. C., y Melchiori, R. J. M. 2004. Variabilidad espacial en suelos agrícolas de la provincia de Entre Ríos. *Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Argentina.
- Kemerer, A. C., y Melchiori, R. J. M. 2012. Estrategias de muestreo y representación de la variabilidad espacial de propiedades del suelo. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Kerry, R., y Oliver, M. A. 2007. Comparing sampling needs for variograms of soil properties computed by the method of moments and residual maximum likelihood. *Geoderma* 140: 383–396.
- Khosla, R., Inman, D., Westfall, D. G., Reich, R. M., Frasier, M., Mzuku, M., Koch, B., *et al.* 2008. A synthesis of multi-disciplinary research in precision agriculture: site-specific management zones in the semi-arid western Great Plains of the USA. *Precision Agriculture* 9: 85-100.
- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., y Hong, S. Y. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 285-308.
- Kravchenko, A. N. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Science Society of America Journal* 67: 1564-1571.
- Kravchenko, A. N. , y Donald, G. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal* 92: 75-83.
- Kravchenko, A. N., Robertson, G. P., Thelen, G. P., y Harwood, K. D. 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agronomy Journal* 97: 514.523.
- Kravchenko, A. N., Thelen, K. D., Bullock, D. G., y Miller, N. R. 2003. Relationship among Crop Grain Yield, Topography, and Soil Electrical Conductivity Studied with Cross-Correlograms. *Agronomy Journal* 95: 1132.
- Lamb, J., Dowdy, R., Anderson, J., y Rehm, G. 1997. Spatial and temporal stability of corn grain yields. *Journal of Production Agriculture* 10: 410-414.
- Lark, R. M., y Stafford, J. V. 1997. Classification as a first step in the interpretation of temporal and spatial variation of crop yield. *Annals of Applied Biology* 130: 111–121.
- Lark, R. M., Stafford, J. V., y Bolam, H. C. 1997. Limitations on the spatial resolution of yield mapping for combinable crops. *Journal of Agriculture Engineering Research* 66: 183-193.
- Larsolle, A., y Hamid Muhammed, H. 2007. Measuring crop status using multivariate analysis of hyperspectral field reflectance with application to disease severity and

- plant density. *Precision Agriculture* 8: 37-47.
- Lauzon, J. D., Fallow, D. J., O'Halloran, I. P., Gregory, S. D., y von Bertoldi, A. P. 2005. Assessing the temporal stability of spatial patterns in crop yields using combine yield monitor data. *Canadian journal of soil science* 85: 439–451.
- Leon, C. T., Shaw, D. R., Cox, M. S., Abshire, M. J., Ward, B., Wardlaw, M. L. ., y Watson, C. 2003. Utility of remote sensing in predicting crop and soil characteristics. *Precision Agriculture* 4: 359–384.
- Li, Y., Shi, Z., Wu, C., Li, H., y Li, F. 2008. Determination of potential management zones from soil electrical conductivity, yield and crop data. *Journal of Zhejiang University-Science B* 9: 68–76.
- López de Sabando, M. J., Díaz Zorita, M., y Mousegne, F. 2010. Fertilización nitrogenada dentro de ambientes de trigo. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- López de Sabando, M. J., Díaz Zorita, M., Mousegne, F., y Mercuri, P. 2008a. Zonas de manejo agrícola en argiudoles: I. Comparación entre metodologías de delimitación. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- López de Sabando, M. J., Díaz Zorita, M., Mousegne, F., Mercuri, P., y Grognett, E. 2008b. Zonas de manejo agrícola en argiudoles: II. variabilidad de propiedades de suelos. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- López de Sabando, M. J., Díaz Zorita, M., Otegui, M., Mousegne, F., y Mercuri, P. 2008c. Zonas de manejo agrícola en argiudoles: III. Uso del agua en cultivos de trigo. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- López de Sabando, M. J., Díaz Zorita, M., Otegui, M., Mousegne, F., Mercuri, P., y Romero, N. 2008d. Zonas de manejo agrícola en argiudoles: IV. productividad de trigo. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Maechler, M., Rousseeuw, P., Struyf, A., Hubert, M., y Hornik, K. 2013. *cluster: Cluster Analysis Basics and Extensions*. .
- Mallarino, A. P. 1996. Spatial Variability Patterns of phosphorus and Potassium in No-Tilled Soils for Two Sampling Scales. *Soil Science Society of America Journal* 60: 1473-1481.
- 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. *Precision Agriculture* 5: 131–144.
- MapShots Inc. 2009. FOViewer. MapShots Inc.
- Matteucci, S. D. 2012. Capítulo 11: Ecorregión Espinal. En: *Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos*, 1.^a edn, pp 358-362. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, Argentina.
- McBratney, A. B., y Pringle, M. J. 1999. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture* 1: 125–152.
- McBratney, A. B., y Webster, R. 1981. The design of optimal sampling schemes for local estimation and mapping of regionalized variables II. Program and examples.

- Computers & Geosciences 7: 335-365.
- McBratney, A. B., Whelan, B. M., Ancev, T., y Bouma, J. 2005. Future Directions of Precision Agriculture. *Precision Agriculture* 6: 7-23.
- Melchiori, R. J. M. 2000. Variabilidad espacial del rendimiento en trigo, asociación con parámetros edáficos y evaluación de aplicación de nitrógeno para sitios específicos. Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce. 102 pp.
- Melchiori, R. J. M., Albarenque, S. M., Perez Zamora, F., Vicini, L., Rodríguez, R., Sanchez, H., y Masanti, J. 2009a. Propuesta de desarrollo de un sistema para el manejo de dosis variable de nitrógeno en caña de azúcar utilizando sensores remotos activos. *Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Melchiori, R. J. M., Kemerer, A. C., Melchiori, A. E., y Bellomo, M. 2009b. Análisis de la variabilidad espacial en el rendimiento del cultivo de caña de azúcar mediante fotografías aéreas multiespectrales. *Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Island Press, Washington, DC. 137 pp.
- Miller, R. O., Pettygrove, S., Denison, R. F., Jackson, L. F., Cahn, M., Plant, R., y Kearney, T. 1999. Site-Specific Relationships between Flag Leaf Nitrogen, SPAD Meter Values and Grain Protein in Irrigated Wheat. *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture*. American Society of Agronomy, Madison, USA.
- Milne, A. E., Webster, R., Ginsburg, D., y Kindred, D. 2012. Spatial multivariate classification of an arable field into compact management zones based on past crop yields. *Computers and Electronics in Agriculture* 80: 17-30.
- Molin, J. P., y Castro, C. N. 2008. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. *Scientia Agricola* 65: 567-573.
- Moral, F. J., Terrón, J. M., y Silva, J. R. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research* 106: 335-343.
- Mosso, J. E., y Zubillaga, M. M. 2010. Comparación entre NDVI y REIP para discriminar efectos de dosis de N y ambientes de manejo en maíz. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- Mosso, J. E., y Zubillaga, M. M. 2012. Comparación entre índices espectrales para predecir inn en condiciones contrastantes de ambientes de manejo y dosis de n en maíz. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Mueller, T. G., Pierce, F. J., Schabenberger, O., y Warncke, D. D. 2001. Map quality for site-specific fertility management. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1547-1558.
- Mueller, T. G., Pusuluri, N. B., Mathias, K. K., Cornelius, P. L., Barnhisel, R. I., y Searer, S. A. 2004. Map Quality for Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted Interpolation. *Soil Science Society of America Journal* 68: 2042-2047.
- Mulla, D. J. 2012. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*.

- Mulla, D. J., y McBratney, A. B. 2000. Soil spatial variability. En: Handbook of soil science, Boca Raton, USA, pp 321-352. M. E. Sumner (ed). CRC Press.
- Mulla, D. J., y Schepers, J. S. 1997. Key processes and properties for site-specific soil and crop management. En: The State of Site-Specific Management for Agriculture, pp 1-18. F. J. Pierce y E. J. Sadler (eds). American Society of Agronomy, Madison, USA.
- Muschetti Piana, M. P., Cipriotti, P. A., Niborski, M., y Urricariet, S. 2010a. Cambios en la eficiencia de uso del agua y nitrógeno del maíz con fertilización uniforme y variable según zonas de manejo. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Rosario, Argentina.
- Muschetti Piana, M. P., Cipriotti, P. A., Rimski-Korsakov, H., y Urricariet, S. 2010b. Nitrógeno residual y vegetal en el cultivo de maíz con fertilización uniforme y variable según zonas de manejo. Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Rosario, Argentina.
- Muschetti Piana, M. P., Cipriotti, P. A., y Urricariet, S. 2012. ¿Cómo afecta la fertilización y la variabilidad del lote a la distribución del nitrógeno residual del maíz? Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Muschetti Piana, M. P., y Urricariet, S. 2009. Respuesta a la fertilización nitrogenada y eficiencia en el uso del agua del maíz en tecnologías de dosis variable y uniforme. Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Muschetti Piana, M. P., Urricariet, S., y Niven, A. 2008. Causas de la variabilidad de rendimiento del maíz (*Zea mays* L) a nivel lote en suelos de la pampa arenosa. Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Mzuku, M., Khosla, R., Reich, R., Inman, D., Smith, F., y MacDonald, L. 2005. Spatial Variability of Measured Soil Properties across Site-Specific Management Zones. *Soil Science Society American Journal* 69: 1572–1579.
- Nanni, L., Ronchi, J., López de Sabando, M. J., Fernández, F., y Zubillaga, M. M. 2012. Variabilidad de la respuesta al nitrógeno del maíz según zonas de productividad a escala de lote. Resúmenes del 1º Congreso de Valor Agregado en Origen y 11º Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.
- National Research Council. 1997. Precision agriculture in the twenty-first century: Geospatial and Information Technologies in Crop Management. National Academy Press. 178 pp.
- Paggi, M. V., Peralta, N. R., Calandroni, M., y Costa, J. L. 2012. Relación entre la conductividad eléctrica aparente y la profundidad efectiva en la diferenciación de suelos. Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Paoli, J. N., Tisseyre, B., Strauss, O., y McBratney, A. B. 2010. A technical opportunity index based on the fuzzy footprint of a machine for site-specific management: an application to viticulture. *Precision Agriculture* 11: 379-396.
- Pebesma, E. J. 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. *Computers & Geosciences* 30: 683-691.

- Pedroso, M., Taylor, J., Tisseyre, B., Charnomordic, B., y Guillaume, S. 2010. A segmentation algorithm for the delineation of agricultural management zones. *Computers and Electronics in Agriculture* 70: 199-208.
- Peralta, N., Castro Franco, M., Costa, J. L., y Calandroni, M. 2012a. Delimitación de zonas de manejo mediante la relación entre conductividad eléctrica aparente del suelo y mapas de rendimiento. Resúmenes del 1° Congreso de Valor Agregado en Origen y 11° Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.
- Peralta, N. R., Costa, J. L., y Angelini, H. 2010a. Relación entre la variabilidad espacial de la Conductividad Eléctrica Aparente y el contenido de agua del suelo. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- Peralta, N. R., Costa, J. L., Balzarini, M., y Castro Franco, M. 2012b. Delimitación de zonas de manejo con la medición de la conductividad eléctrica aparente del suelo. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Peralta, N. R., Costa, J. L., y Calandroni, M. 2010b. Relación entre la conductividad eléctrica aparente y algunas propiedades del suelo. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- Peralta, N. R., Costa, J. L., y Castro, F. M. 2012c. Interpretación de la conductividad eléctrica aparente para la delimitación de zonas de manejo en el sudeste bonaerense. *Informaciones Agronómicas Hispanoamericana* 6.
- Pierce, F. J., y Nowak, P. 1999. Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy* 67: 1-85.
- Ping, J. L., y Dobermann, A. 2005. Processing of yield map data. *Precision Agriculture* 6: 193–212.
- Ping, J. L., y Dobermann, A. P. 2003. Creating Spatially Contiguous Yield Classes for Site-Specific Management. *Agronomy Journal* 95: 1121-1131.
- Pinheiro, J. C., Bates, D. M., DebRoy, S., Sarkar, D., y R Development Core Team. 2013. *nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models*. R Foundation for Statistical Computing.
- Pinter, P. J., Hatfield, J. L., Schepers, J. S., Barnes, E. M., Moran, M. S., Daughtry, C. S. ., y Upchurch, D. R. 2003. Remote sensing for crop management. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 69: 647–664.
- Plant, R. E. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture* 30: 9–29.
- Porter, M., Lauer, J. G., Huggins, D. R., Oplinger, E. S., y Crookston, R. K. 1998. Assessing Spatial and Temporal Variability of Corn and Soybean Yields. *J. Prod. Agric.* 11: 359-363.
- Pringle, M. J., McBratney, A. B., Whelan, B. M., y Taylor, J. A. 2003. A preliminary approach to assessing the opportunity for site-specific crop management in a field, using yield monitor data. *Agricultural Systems* 76: 273-292.
- QGIS Development Team. 2012. *Quantum GIS*. Open Source Geospatial Foundation.
- Ramankutty, N., Evan, A. T., Monfreda, C., y Foley, J. A. 2008. Farming the planet: 1. Geographic distribution of global agricultural lands in the year 2000. *Global Biogeochemical Cycles* 22: GB1003.
- R Development Core Team. 2013. *R: A language and environment for statistical*

- computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena, Austria.
- Reyns, P., Missotten, B., Ramon, H., y De Baerdemaeker, J. 2002. A review of combine sensors for precision farming. *Precision Agriculture* 3: 169–182.
- Ribeiro Jr., P. J., y Diggle, P. J. 2001. *geoR: a package for geostatistical analysis*. R-NEWS 1: 15-18.
- Rivero, E., Cruzate, G. A., Beltran, M., Scianca, C., y Russo, S. 2012a. Variabilidad de nutrientes en un suelo bajo siembra directa. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Rivero, E., Cruzate, G. A., Beltran, M., Scianca, C., Russo, S., y Mallarino, A. P. 2012b. Variabilidad de nutrientes poco móviles en un suelo bajo siembra directa. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Rivero, E., Cruzate, G. A., y Russo, S. 2010. Variabilidad espacial y temporal de P y Zn en siembra directa y la relación con algunas propiedades de un suelo de San Andrés de Giles. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- Robertson, M. J., Lyle, G., y Bowden, J. W. 2008. Within-field variability of wheat yield and economic implications for spatially variable nutrient management. *Field Crops Research* 105: 211-220.
- Ross, F. 2012a. Densidad de plantas en maíz: ajuste por ambiente. *Informaciones Agronómicas Hispanoamericana* 8: 11-14.
- Ross, F. 2012b. Determinación espacial de la profundidad de suelo (tosca) y su relación con el rendimiento de cultivo. *Resúmenes del 1º Congreso de Valor Agregado en Origen y 11º Curso Internacional de Agricultura de Precisión*. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.
- Ross, F., Massigoea, J., y Zamora, M. 2011. Fertilización de cebada cervecera en ambientes con tosca en el sur de Buenos Aires, Argentina. *Informaciones Agronómicas Hispanoamericana* 3: 3-13.
- Roudier, P., Tisseyre, B., Poilvé, H., y Roger, J.-M. 2010. A technical opportunity index adapted to zone-specific management. *Precision Agriculture* 12: 130-145.
- Schaffrath, V. R., Tormena, C. A., Fidalski, J., y Gonçalves, A. C. . 2008. Variabilidade e correlação espacial de propriedades físicas de solo sob plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira da Ciência do Solo* 32: 1369-1377.
- Schepers, A. R., Shanahan, J. F., Liebig, M. A., Schepers, J. S., Johnson, S. H., y Luchiari Jr, A. 2004. Appropriateness of management zones for characterizing spatial variability of soil properties and irrigated corn yields across years. *Agronomy Journal* 96: 195-203.
- Shanahan, J. F., Schepers, J. S., Francis, D. D., Varvel, G. E., Wilhelm, W. W., Tringe, J. M., Schlemmer, M. R., *et al.* 2001. Use of remote-sensing imagery to estimate corn grain yield. *Agronomy Journal* 93: 583–589.
- Silva Rossi, M. M. 2008. Caracterización y clasificación de ambientes edáficos para la producción de maíz en suelos del sur de la provincia de Santa Fe. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Silverman, B. W. 1998. *Density estimation for statistics and data analysis*. . Monographs on statistics and applied probability Chapman & Hall/CRC, Boca Raton. 175 pp.

- Simbahan, G. C., Dobermann, A., y Ping, J. L. 2004. Screening Yield Monitor Data Improves Grain Yield Maps. *Agronomy Journal* 96: 1019-1102.
- Simon, M., Peralta, N. R., Castr Franco, M., y Costa, J. L. 2012. Estimación de propiedades del suelo con la conductividad eléctrica aparente para delimitar zonas de manejo. *Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACs, Mar del Plata, Argentina.
- Srinivasan, A. 2006a. Precision Agriculture: An Overview. En: *Handbook of Precision Agriculture: Principles And Applications*, 1.^a edn, pp 3-18. A. Srinivasan (ed). CRC Press.
- Srinivasan, A. (Ed.). 2006b. *Handbook of Precision Agriculture: Principles And Applications*. CRC Press. 683 pp.
- Stenger, R., Priesack, E., y Beese, F. 2002. Spatial variation of nitrate-N and related soil properties at the plot-scal. *Geoderma* 105: 259-275.
- Sudduth, K. A., y Drummond, S. T. 2007. Yield Editor: Software for Removing Errors from Crop Yield Maps. *Agronomy Journal* 99: 1471-1482.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Bollero, G. A., Bullock, D. G., y Wiebold, D. J. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal* 95: 472.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D. E., *et al.* 2005. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and electronics in agriculture* 46: 263-283.
- Taylor, R., Kluitenberg, G., Schrock, M., Zhang, N., Schmidt, J., y Havlin, J. 2001. Using yield monitor data to determine spatial crop production potential. *Transactions-American Society of Agricultural Engineers* 44: 1409-1414.
- Thorp, K. R., y Tian, L. F. 2004. A Review on Remote Sensing of Weeds in Agriculture. *Precision Agriculture* 5.
- Timlin, D. J., Pachepsky, Y., Snyder, V. A., y Bryant, R. B. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Science Society of America Journal* 62: 764-773.
- Tisseyre, B., y McBratney, A. B. 2008. A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: an application to viticulture. *Precision Agriculture* 9: 101-113.
- 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.
- United Nations. 2011. *World economic and social survey 2011: The Great Green Technological Transformation*. United Nations Pubns.
- Urricariet, S., Niborski, M., y Kvolek, C. M. 2011. Atributos del suelo asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz en la pampa arenosa. *Ciencia del Suelo* 29: 49-59.
- Urricariet, S., Niborski, M., Orden, N., y Giana, M. 2008. Evaluación de la respuesta a la fertilización nitrogenada del cultivo de maíz mediante índices espectrales de vegetación. *Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACs, Potrero de los Funes, Argentina.
- Van Ittersum, M. K., y Rabbinge, R. 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52:

- 197–208.
- Van Ittersum, M. ., Leffelaar, P. ., van Keulen, H., Kropff, M. ., Bastiaans, L., y Goudriaan, J. 2003. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18: 201-234.
- Viscarra Rossel, R. A., Adamchuk, V. I., Sudduth, K. A., McKenzie, N. J., y Lobsey, C. 2011. Chapter Five - Proximal Soil Sensing: An Effective Approach for Soil Measurements in Space and Time. En: *Advances in Agronomy*, pp 243-291. Donald L. Sparks (ed). Academic Press.
- Walkley, A., y Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science Society American Journal* 63: 251-163.
- Warrick, A. W., Myers, D. E., y Nielsen, D. R. 1986. Geostatistical methods applied to soil science. En: *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*, 2.^a edn Soil Science Society of America, Madison, USA.
- Webster, R., y Burgess, T. M. 1980. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging. *Journal of Soil Science* 31: 505-524.
- Webster, R., y Oliver, M. A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press. 336 pp.
- Webster, R., y Oliver, M. A. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. . Statistics in practice Wiley. 333 pp.
- Whelan, B. M. 1998. *Reconciling Continuous Soil Variation & Crop Yield: A study of some implications of within-field variability for site-specific crop management*. University of Sydney, Australia. 356 pp.
- Whelan, B. M., y McBratney, A. B. 2000. The «Null Hypothesis» of Precision Agriculture Management. *Precision Agriculture* 2: 265-279.
- Wilding, L. P., y Drees, L. R. 1983. Spatial variability and pedology. En: *Pedogenesis and soil taxonomy: concepts and interactions*, pp 83-116. L. P. Wilding y L. R. Drees (eds). Elsevier, New York, USA.
- Zamora, M., y Costa, J. L. 2010. Conductividad eléctrica aparente del suelo, altimetría y variabilidad de la respuesta del trigo a nitrógeno. *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Rosario, Argentina.
- Zen, O., Imhoff, S., Gambaudo, S., Fontanetto, H., y Martel, R. 2009. Identificación de ambientes homogéneos de manejo mediante indicadores de calidad física y química de suelos. *Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural*. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Zhang, X., Shi, L., Jia, X., Seielstad, G., y Helgason, C. 2010. Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. *Precision Agriculture* 11: 103-114.
- Zubillaga, M. M., Carmona, M., Latorre, A., Falcon, M., y Barros, J. 2006a. Estructura espacial de variables edáficas a nivel lote en Vedia provincia de Buenos Aires. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Salta, Argentina.
- Zubillaga, M. M., Cipriotti, P. A., y Barros, M. J. 2006b. Asociaciones espaciales entre el N mineralizado y otras variables edáficas a nivel de lote. *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. AACCS, Salta, Argentina.
- Zubillaga, M. M., López de Sabando, M. J., Muñoz, G., y Vilches, M. V. 2008. Indices de

- reflectancia espectral para la prediccion de rendimientos de trigo en pampa ondulada. Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Potrero de los Funes, Argentina.
- Zubillaga, M. M., López de Sabando, M. J., y Zubillaga, M. S. 2012a. Indices espectrales y fertilizacion nitrogenada de trigo a escala intralote. Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Zubillaga, M. M., López de Sabando, M. J., Zubillaga, M. S., y Vilches, M. V. 2009. Nitrogeno potencialmente mineralizable en zonas diferenciales de manejo de un lote de produccion de trigo de San Antonio de Areco. Actas del X Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- Zubillaga, M. M., Mosso, J. E., Redel, H. M., y Solari, F. 2012b. Atributos edaficos y relieve asociados a la mineralizacion aparente de nitrogeno escala de lote. Actas del XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. AACCS, Mar del Plata, Argentina.
- Zúñiga, P. D., Ferreyra, A., Portillo, J., y López de Sabando, M. J. 2012. Predicción de zonas de productividad de maíz mediante índice de verdor de cultivos anteriores. Resúmenes del 1º Congreso de Valor Agregado en Origen y 11º Curso Internacional de Agricultura de Precisión. Ediciones INTA, Manfredi, Argentina.

FE DE ERRATAS

Tesis Doctoral

VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE RENDIMIENTOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) Y SOJA [*Glycine max* (L.) Merr.] Y DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO EN LAS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS DE LA PAMPA LLANA SANTAFESINA

Pág.	Párr.	Línea	Dice	Debe decir
II	5	2	20 de Marzo 2014	20 de Marzo de 2014
17	3	2	fósforo disponible	fósforo extractable
18	3	2	rotación maíz-soja	secuencia maíz-soja
18	3	2	fósforo disponible	fósforo extractable
18	5	4	rotación	secuencia
18	4	3	conductividad eléctrica	conductividad eléctrica en relación 1:2,5
26	2	2	mediante mediante técnicas	mediante técnicas
26	3	7	rotación	secuencia
27	1	2	secuencia soja-maíz	secuencia maíz-soja
30	4	6	rotación	secuencia
35	1	1	secuencia soja-maíz	secuencia maíz-soja
38	1	6	rotación soja-maíz	secuencia soja-maíz
41	Fig 3.4	2	secuencia soja-maíz	secuencia maíz-soja
42	Tabla 3.5	2	secuencia soja-maíz	secuencia maíz-soja
43	1	6	rotación	secuencia
46	1	2	rotación soja-maíz	secuencia maíz-soja
49	3	6	rotación agrícola	secuencia agrícola
49	3	9	conductividad eléctrica	conductividad eléctrica aparente
56	Tabla 4.1	12-13	Mg cm ⁻³	Mg m ⁻³
56	Tabla 4.1	15	Median	Mediana
74	3	3	mapas de rendimiento de soja-maíz	mapas de rendimiento de maíz-soja
77	3	4	soja-maíz	maíz-soja
81	1	2	soja-maíz	maíz-soja
100	1	3	soja-maíz	maíz-soja