

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**IMPACTO DE DISTINTOS NIVELES DE FERTILIDAD Y ATRIBUTOS DE  
TERRENO SOBRE LA VARIABILIDAD DE RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE  
SOJA A ESCALA DE CHACRA**

por

**Carlos OTAÑO LUNA  
Ignacio ZARUCKI RODRÍGUEZ**

**TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo.**

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2010**

Tesis aprobada por:

Director:

-----  
Ing. Agr. PhD. José Terra

-----  
Ing. Agr. PhD. Guillermo Siri-Prieto

-----  
Ing. Agr. PhD. Oswaldo Ernst

-----  
Ing. Agr. PhD. Jorge Sawchik

Fecha:

Autor:

-----  
Carlos Alberto Otaño Luna

-----  
Ignacio Zarucki Rodríguez

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Agr. Daniel Melo integrante de la hectárea que nos dio su tiempo y dedicación para poder hacer el trabajo de campo.

A la Ing. Agr. Virginia Pravia quien nos brindo especial ayuda con el análisis de datos.

A los ayudantes de campo de INIA La Estanzuela, Marcelo Schusselin y Leonardo Silva por su aporte desinteresado en la realización del trabajo de campo.

Y a los principales contribuyentes para que todo esto se llevara a cabo, las familias, por su apoyo permanente e incondicional. También a todas las personas que aportaron su granito de arena sin esperar nada a cambio.

Muchas Gracias....

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VIII
<b>1. <u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	1
<b>2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u></b> .....	4
<b>2.1. METODOLOGÍAS DE MUESTREO</b> .....	6
<b>2.1.1. <u>Electroconductividad aparente (ECa)</u></b> .....	6
<b>2.1.2. <u>Mapas de rendimiento</u></b> .....	9
<b>2.2. FACTORES DETERMINANTES DE LA VARIACIÓN DE RENDIMIENTO</b> .....	10
<b>2.2.1. <u>Variabilidad de rendimiento de soja</u></b> .....	15
<b>2.3. FERTILIZACIÓN EN SOJA</b> .....	16
<b>2.4. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)</b> .....	19
<b>2.5. GEOESTADÍSTICA</b> .....	20
<b>2.6. ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN Y REGRESIÓN (CART)</b> .....	27
<b>2.7. ZONAS DE MANEJO (CLUSTERS)</b> .....	28
<b>3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u></b> .....	31

<b>3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS EXPERIMENTOS.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.1. <u>Descripción del sitio experimental</u>.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1.2. <u>Tratamientos y diseño experimental</u>.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1.3. <u>Manejo general del ensayo</u>.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2. DETERMINACIONES.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.1. <u>Datos climáticos</u>.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.2. <u>Determinaciones presiembra</u>.....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2.1. Electroconductividad aparente del suelo (ECa)....</b>	<b>36</b>
<b>3.2.2.2. Relevamiento detallado de suelos.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.2.3. Mapas topográficos.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.2.4. Muestreo dirigido de suelos (presiembra).....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.3. <u>Determinaciones en cultivo</u>.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3.1. Muestreo dirigido de plantas.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3.2. Estimación de rendimiento y sus componentes...</b>	<b>38</b>
<b>3.2.3.4. Mapas de rendimiento.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.3.5. Extracción de nutrientes.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.3.6. Muestreo dirigido de suelos (postcosecha).....</b>	<b>40</b>
<b>3.3. PROCESAMIENTO DE CAPAS DE INFORMACIÓN.....</b>	<b>40</b>
<b>3.3.1. <u>Capa discreta</u>.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.2. <u>Capas continuas</u>.....</b>	<b>42</b>

3.3.2.1. Mapa de rendimiento.....	42
3.3.2.2. Mapa de electroconductividad aparente (ECa).....	43
3.3.2.3. Mapas topográficos.....	44
3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	46
3.4.1. <u>Estadística descriptiva</u> .....	46
3.4.2. <u>Análisis espacial</u> .....	47
3.4.3. <u>Análisis de correlaciones</u> .....	49
3.4.4. <u>Análisis de varianza (ANAVA) y test de Tukey</u> .....	50
3.4.5. <u>Análisis de regresión lineal</u> .....	51
3.4.6. <u>Análisis de clusters</u> .....	53
3.4.7. <u>Análisis por árboles de clasificación y regresión (CART)</u> .....	54
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	55
4.1. RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO.....	55
4.2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS EXPERIMENTOS.....	56
4.2.1. <u>Estadística descriptiva de las variables</u> .....	56
4.2.2. <u>Análisis de componentes del rendimiento</u> .....	56
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.....	65
4.3.1. <u>Análisis geoestadístico</u> .....	65

4.3.2. <b><u>Análisis estadístico clásico</u></b> .....	70
4.3.2.1. <b>Análisis de varianza</b> .....	70
4.3.2.2. <b>Análisis de correlaciones</b> .....	71
4.3.2.3. <b>Análisis de regresión múltiple</b> .....	76
4.3.2.4. <b>Análisis de clusters</b> .....	78
4.3.2.5. <b>Análisis de árboles de clasificación y               regresión (CART)</b> .....	81
4.4. <b>MAPAS RELEVANTES DE LAS VARIABLES MEDIDAS</b> .....	84
4.4.1. <b><u>Mapas del EXP.1</u></b> .....	84
4.4.2. <b><u>Mapas del EXP.2</u></b> .....	86
5. <b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....	88
6. <b><u>RESUMEN</u></b> .....	90
7. <b><u>SUMMARY</u></b> .....	91
8. <b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....	92
9. <b><u>ANEXOS</u></b> .....	107

**LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES**

<b>Cuadro No.</b>	<b>Página</b>
1. Descripción de las unidades de suelo CONEAT presentes en los padrones donde fueron ubicados los experimentos.....	32
2. Descripción de los cuatro tratamientos para los dos experimentos evaluados.....	33
3. Manejo agronómico de los experimentos.....	35
4. Estadística descriptiva de los atributos del terreno medidos y calculados para el sitio del EXP.1.....	58
5. Estadística descriptiva de los atributos del terreno medidos y calculados para el sitio del EXP.2.....	59
6. Estadística descriptiva de los rendimientos y sus componentes obtenidos en el EXP.1.....	60
7. Estadística descriptiva de los rendimientos y sus componentes obtenidos en el EXP.2.....	61
8. Parámetros de los semivariogramas para las variables medidas en el muestreo discreto (componentes de rendimiento y P Bray 1) obtenidos para el EXP.1.....	66
9. Parámetros de los Semivariogramas para las variables medidas en el muestreo discreto (componentes de rendimiento y P Bray 1)	



obtenidos para el EXP.2.....	67
10. Validación cruzada para los diferentes métodos de interpolación basados en los semivariogramas teóricos ajustados para el EXP.1.....	68
11. Validación cruzada para los diferentes métodos de interpolación basados en los semivariogramas teóricos ajustados para el EXP.2.....	69
12. Coeficientes de correlación de Pearson para las diferentes variables medidas en el EXP.1 (n = 48).....	74
13. Coeficientes de correlación de Pearson para las diferentes variables medidas en el EXP.2 (n = 48).....	75
14. Promedio de variables medidas y calculadas dentro del área experimental para los diferentes clusters en el EXP.1.....	79
15. Promedio de todas las variables medidas y calculadas dentro del área experimental para los diferentes clusters en el EXP.2.....	80

### Figura No.

1. Ejemplo de posibles capas o niveles de información de un mapa en un SIG.....	20
2. Componentes de semivariograma teórico.....	23
3. Disposición a escala de las fajas (niveles	

fertilidad), para los dos sitios experimentales. <b>A)</b> Mapa del EXP.1. <b>B)</b> Mapa del EXP.2.....	34
<b>4.</b> Duración de las etapas fenológicas del cultivo de soja y precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica de Cañada Nieto, desde inicio de barbecho hasta madurez fisiológica para el EXP.1.....	55
<b>5.</b> Duración de las etapas fenológicas del cultivo de soja y precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica de Dolores, desde inicio de barbecho hasta madurez fisiológica para el EXP.2.....	56
<b>6.</b> Árbol de componentes de rendimiento para el EXP.1.....	62
<b>7.</b> Árbol de componentes de rendimiento para el EXP.2.....	63
<b>8.</b> Regresiones lineales simples de entre algunas variables medidas en el cultivo y el rendimiento de grano de soja para el EXP.1. <b>A)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de granos/m <sup>2</sup> . <b>B)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de peso de 1.000 granos. <b>C)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de Altura de plantas (cm). <b>D)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de plantas/ha.....	64
<b>9.</b> Regresiones lineales simples de entre algunas variables medidas en el cultivo y el rendimiento de grano de soja para el EXP.2. <b>A)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de granos/m <sup>2</sup> . <b>B)</b> Rendimiento	

(kg/ha) en función de peso de 1.000 granos. <b>C)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de altura de plantas (cm). <b>D)</b> Rendimiento (kg/ha) en función de plantas/ha.....	65
<b>10.</b> Mapa interpolado de P disponible a presiembra a partir de muestreo discreto para el EXP.1.....	69
<b>11.</b> Efecto de diferentes niveles de fertilidad sobre el rendimiento de soja y CV en el EXP.1.....	70
<b>12.</b> Efecto de diferentes niveles de fertilidad sobre el rendimiento de soja y CV en el EXP.2.....	71
<b>13.</b> Árbol de clasificación y regresión generado en el software R versión 2.10.0 con el promedio de la totalidad de las variables medidas en el área experimental del EXP.1.....	82
<b>14.</b> Árbol de clasificación y regresión generado en el software R versión 2.10.0 con el promedio de la totalidad de las variables en las celdas del EXP.2.....	83

## **1. INTRODUCCIÓN**

En Uruguay, los suelos se caracterizan por su gran heterogeneidad, causando variaciones significativas en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Del Campo, 2006). Además presentan en su estado natural deficiencia de formas de fósforo (P) asimilables por los cultivos (Duran y García Préchac, 2007).

La producción agrícola de secano se realiza en potreros que en general fueron subdivididas con objetivos de producción ganadera-agrícola sin tener en cuenta la diversidad de sus suelos. En casi la totalidad del área agrícola las chacras son manejadas de manera uniforme, sin considerar la variabilidad espacial natural del suelo y/o inducida por el manejo agronómico que determinan diferentes condiciones para el crecimiento y desarrollo de los cultivos dentro de las chacras.

El cultivo de soja *Glycine max (L.)* ha tenido un incremento sostenido de la superficie sembrada en los últimos años, pasando de 8.900 ha en la zafra 1999/2000 a 859.400 ha equivalente al 82 % del área de cultivos de verano de secano para la zafra 2009/2010 (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010). El cultivo tiene una alta extracción de nutrientes (García 2005, Berardo 2005, Martínez et al. 2006), por este motivo es importante conocer el efecto de la fertilización y la variación de nutrientes a escala de chacra en este cultivo.

Los costos de los fertilizantes en los últimos tiempos, ha llevado a los productores a plantearse alternativas de manejo tendientes a ajustar el agregado de éstos, para mejorar la eficiencia de uso de los mismos. En ese contexto, la optimización del uso de insumos a través de la Agricultura de

Precisión (AP) puede ser una alternativa para promover la estabilidad de los sistemas de producción a través de la optimización de los recursos, maximizando el retorno económico y preservando el medio ambiente.

Existen limitantes para la adopción de la AP y escasos antecedentes nacionales que hayan buscado identificar y cuantificar las causas de la variabilidad intra-chacra, entre ellas se destacan: la falta de capacitación de productores y asesores; el vínculo que tiene que existir entre la toma de datos y las recomendaciones; la dificultad de obtener datos de calidad; ensayos básicos para relacionar el rendimiento con las condiciones del suelo; análisis estadístico y la falta de tecnología (maquinaria y software específicos) (Kitchen et al., Wiebold, citados por Bongiovanni y Lowenberg-DeBoer, 2006). Estas barreras para la adopción deben ser vistas como oportunidades para el desarrollo y como áreas potenciales de trabajo.

El uso de herramientas como mapas de rendimiento, muestreos georreferenciados de suelo en forma dirigida y su geomodelización permite conocer la distribución espacial de nutrientes de una chacra, el cruce de esta información mediante software especializados permite la creación de una gran base de datos de utilidad para la toma de decisiones a nivel predial (Orellana et al., 2006). Los ensayos en fajas a escala de chacra es una metodología de trabajo crecientemente aceptada, a los efectos de complementar la investigación analítica generada en parcelas pequeñas, para adaptar y validar tecnologías a las condiciones comerciales (Plant, 2001).

En muchas chacras, la variación espacial de rendimiento de los cultivos de verano esta relacionada a factores edáficos y topográficos que afectan la dinámica del agua y la disponibilidad de ésta para los cultivos (Terra et al., 2008).

La fertilización uniforme de P basada en promedios y en curvas de probabilidades de respuesta en relación a niveles críticos en chacras con alta intensidad de uso agrícola, genera mayor variación del nutriente en el suelo e ineficiencias productivas y económicas ya que existen zonas sub y sobrefertilizadas. Esto puede ser agravado en la medida que la magnitud de respuesta al agregado de P sea mayor en zonas de alto potencial de rendimiento que en zonas de bajo potencial.

El objetivo general de la tesis fue determinar los efectos interactivos de utilizar tecnologías disponibles vinculadas a la AP para desarrollar una metodología de análisis que permita cuantificar, georeferenciar, analizar y relacionar la variabilidad espacial de la chacra y las prácticas de manejo sobre la productividad del cultivo de soja.

El objetivo específico fue evaluar mediante ensayos en fajas el impacto de diferentes niveles de fertilidad sobre la variación de rendimiento a escala de chacra y su interacción con atributos edáficos y topográficos sobre el rendimiento del cultivo de soja en dos chacras del litoral durante la zafra 2007-2008.

Las hipótesis planteadas en los trabajos experimentales fueron: 1) Los atributos edáficos y topográficos son los que explican la mayor parte de la variación de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. 2) La respuesta productiva del cultivo a niveles de fertilidad creciente interaccionan con el potencial de rendimiento de las distintas zonas de la chacra determinadas en base a atributos del terreno.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

La existencia de variabilidad espacio-temporal de factores bióticos, abióticos y prácticas de manejo así como sus efectos combinados sobre el rendimiento en las chacras es conocida desde los inicios de la investigación agrícola (Plant 2001, Mulla y McBratney, citados por Terra et al. 2008).

Los investigación agrícola ha sido afectada por la heterogeneidad espacial de rendimiento de los cultivos a lo largo de la historia (Harris, 1915), y de hecho, Smith (1938) ofrece un mapa a escala de grises del rendimiento de grano similar a los mapas de rendimiento modernos (Plant, 2001).

La agricultura de secano en Uruguay se realiza en el marco de una alta variabilidad climática y de ambientes edáficos. Esto determina importantes variaciones de rendimiento entre años y a su vez una gran variación en la respuesta vegetal intra o entre chacras (Del Campo, 2006).

A fines de la década del '80 y comienzos del '90, con la liberación del Sistema de Posicionamiento Global satelital, por sus siglas en inglés (GPS, Global Positioning System) para uso civil, fue posible desarrollar equipos inteligentes que permitieron el manejo localizado de las prácticas agrícolas (Montovani et al., 2006). Actualmente las tecnologías vinculadas a la AP permiten, cuantificar, georeferenciar, analizar, relacionar y manejar esa variabilidad (Terra et al., 2008).

La AP es un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de los insumos agrícolas (semillas, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos

insumos, dependiendo del potencial y de la necesidad de cada punto en un área específica de manejo (Mantovani et al., 2006).

El concepto “agricultura sitio-específica o agricultura de precisión”, implica el uso de información acerca de la variabilidad presente en las chacras de manera de delinear zonas y realizar prácticas agronómicas adecuadas a las mismas (Roel y Terra, 2006).

Existen tres criterios básicos que deben cumplirse para justificar el manejo sitio-específico: a) la existencia de importante variabilidad espacial en factores que influyen significativamente en la productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores; y c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental (Plant, 2001).

El estudio de los impactos de la variabilidad espacial del suelo sobre la productividad de los cultivos ha venido en aumento en los últimos años (Kravchenko y Bullock 2000, Kaspar et al. 2003).

Plant (2001) señala que el objetivo primordial en el análisis de la variabilidad espacial en general es determinar los factores de producción asociados al rendimiento. McBratney y Pringle (1997) determinaron que la relación entre la variabilidad espacial en el rendimiento de los cultivos y la variabilidad espacial en las propiedades del suelo es a menudo compleja. Los métodos de purificación de la información contenida en los datos de rendimiento en general parten del supuesto de que la mayoría de las zonas de rendimientos es limitada por algún factor primario (Webb 1972, Loomis y Connor 1992).



## **2.1. METODOLOGÍAS DE MUESTREO**

Tradicionalmente los muestreos se han centrado en determinar propiedades promedio a través del campo (Wollenhaupt et al., citados por Plant, 2001). La variabilidad espacial de suelos y cultivos en las chacras puede ser cuantificada o estimada a través de varias metodologías. Los métodos de medición se pueden clasificar como: discretos (muestreo de suelos y propiedades de las plantas), continuos (monitores de rendimiento, sensores de ECa) y remotos (fotos aéreas, imágenes satelitales) (Senay et al., citados por Plant, 2001).

Una desventaja importante de los muestreos discretos, en particular el caso de la extracción de suelos es su costo, implican mucho tiempo y mano de obra, éstos costos se justifican si el manejo de una chacra utilizando ésta información aumenta los beneficios (Kaspar et al., 2004). Por otra parte, los valores deben ser interpolados entre los puntos de muestreo para obtener una completa caracterización del campo, dando lugar a errores potencialmente graves debido a la interpolación (Best y León, 2006).

Las formas más comunes de detección continua son el monitor de rendimiento y la medición de la ECa que se ha observado por varios autores correlacionada con el rendimiento (Lund et al., citados por Plant, 2001).

### **2.1.1. Electroconductividad aparente (ECa)**

La ECa del suelo está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas. Es una forma rápida, confiable, de gran volumen de información y de relativa facilidad de obtención de datos. Por estas razones, la medición de la ECa es una herramienta utilizada frecuentemente en AP, para la

caracterización espacio-temporal de las propiedades edáficas y antropogénicas que influyen en el rendimiento de los cultivos (Corwin, 2005).

En suelos suficientemente húmedos ésta estaría explicada principalmente por las sales contenidas en el agua que ocupa los macroporos del suelo, sin embargo, hay también una contribución por la fase sólida por medio de los cationes intercambiables asociados a los minerales de las arcillas, además del contacto directo y continuo de una partícula con otra (Rhoades et al., citados por Corwin y Lesch, 2003).

La ECa del suelo es una medida de la cantidad de corriente eléctrica del suelo y se puede estimar mediante un par de electrodos, uno inyecta una cantidad conocida de voltaje en el suelo, mientras que el otro mide la caída de voltaje. El resultado es un mapa detallado de la variabilidad en la zona radicular de los cultivos, donde las tres vías de la conductancia se ven influenciadas por varias propiedades físicas y químicas de suelo (Corwin y Lesch, 2003).

Según Kitchen et al. (2005) la ECa del perfil de suelo ofrece una medida indirecta de las propiedades físicas y químicas de éste (McNeill 1992, Rhoades et al. 1999), pudiendo tener una influencia dominante sobre el crecimiento de las plantas (Jaynes et al. 1995, Lund et al. 2001, Zhang y Taylor 2001, Kitchen et al. 2003). La aplicación de la ECa en la agricultura tiene su origen en la medición de la salinidad del suelo, problema de zonas áridas asociados con la agricultura bajo riego.

Muchos factores contribuyen a la variabilidad de ECa del suelo, incluyendo factores que afectan la cantidad y la conectividad del agua del suelo (densidad aparente, estructura, contenido de agua, precipitaciones y tiempo de medida), estructura del suelo (agentes de cementación como arcilla y materia orgánica),

electrolitos en el agua del suelo (salinidad, iones intercambiables y contenido de agua en el suelo), y la conductividad de la fase mineral (tipo y cantidad de minerales, grado de sustitución isomórfica e iones intercambiables) estos factores varían potencialmente en profundidad y en el tiempo (McNeill, citado por Mueller et al., 2003).

Debido al hecho de que los factores que afectan ECa son complejos y están interrelacionados, interpretar los resultados es un desafío. Según Mueller et al. (2003), varios estudios han identificado situaciones en las cuales ECa del suelo estaba relacionado a los factores individuales que afectan el uso, manejo y productividad del suelo, como contenido de agua (Kachanoski et al. 1988, Sheets y Hendrickx 1995), salinidad (Rhoades y Ingvalson 1971, De Jong et al. 1979, Rhoades y Corwin 1981, Williams y Hoey 1987, Hendrickx et al. 1992, McKenize et al. 1997), concentraciones de Ca y Mg (McBride et al., 1990), contenido de arcilla (William y Hoey, 1987), profundidad de la deposición de arena (Kitchen et al., 1996) y profundidad de horizonte Bt (Doolittle et al., 1994), además de la temperatura (Rhoades et al., McNeill, citados por Johnson et al. 2003, Corwin y Lesch 2003), MO y densidad aparente (Corwin y Lesch, 2003).

En este sentido Mueller et al. (2003), utilizando las variables: arcilla, arena, humedad del suelo, pH, saturación de bases, Ca, temperatura del suelo, profundidad al horizonte cámbico o argiluvico y pendiente, ajustó a un modelo de regresión múltiple que predijo la ECa en superficie (30 cm) con un  $R^2 = 0,7$ .

Trabajos realizados por Johnson et al. (2003), Mueller et al. (2003), determinaron que suelos con el horizonte superior más fino producto de la erosión presentaron correlación positiva entre ECa 30 y las variables densidad aparente, contenido de arcilla, sales de  $\text{CaCO}_3$  y pH. A la inversa, el contenido de agua, la MO, C, N, P lábil y profundidad de arraigamiento fueron

determinantes de altos potenciales de producción, estando correlacionadas negativamente con ECa 30, estos resultados obtenidos determinarían una correlación negativa de éstas con rendimiento.

### **2.1.2. Mapas de rendimiento**

El mapa de rendimiento es la representación gráfica de una serie de datos georreferenciados. Una de las aplicaciones inmediatas de la AP es la evaluación de ensayos a campo, teniendo en el mapeo de rendimiento una herramienta práctica, rápida y precisa para cosechar, pesar y grabar en forma georreferenciada, en una sola operación, todos los tratamientos y repeticiones realizados (Bragachini et al., 2000).

La superficie que abarcan los puntos de rendimiento está compuesta por el ancho de la plataforma de la cosechadora y la distancia recorrida por ésta en un tiempo dado. Para poder calcular el rendimiento, el monitor debe poseer una serie de sensores instalados en la cosechadora, cuyo objetivo es medir y grabar el rendimiento y la humedad del grano en tiempo real (Bragachini et al., 2006).

Bragachini et al. (2000), encontraron que la diferencia entre medir el rendimiento en pequeñas parcelas y con monitor de rendimiento es solo de 5,75 % si se descartan las cabeceras, independizándose de esta forma del error de entrada y salida de la cosechadora. Desde el punto de vista agronómico queda demostrada la utilidad de esta herramienta para evaluar ensayos a escala de chacra.

Bragachini et al. (2003) demostraron luego de varios años, como los mapas de rendimiento muestran la alta variabilidad expresada por el cultivo de soja,

según los ambientes dentro de una chacra, presentando esta una elevada variabilidad temporal (diferente disponibilidad hídrica, ocurrencia de enfermedades, etc).

## **2.2. FACTORES DETERMINANTES DE LA VARIACIÓN DE RENDIMIENTO**

Los factores definitorios del crecimiento y del rendimiento son: el genotipo (características de cada cultivar), la radiación solar y la temperatura ambiente, dichos factores determinan el rendimiento potencial. Los factores limitantes son: agua y nutrientes, estos se consideran factores determinantes del rendimiento alcanzable. Los factores reductores son: malezas, enfermedades, plagas, etc, y son los que deciden el rendimiento logrado o real (Soldini, 2008).

Las características edáficas (químicas y físicas) así como las topográficas y sus interacciones con el clima, explican parte de la variación del rendimiento a escala de chacra. El caso más común es que más de un factor influya en el rendimiento, es decir, diferentes factores influyen en el rendimiento de manera diferente en diferentes partes de la chacra (Plant, 2001).

Los factores que podrían estar influyendo en el rendimiento incluyen: la capacidad del suelo de retener agua, tasa de infiltración, textura, estructura, densidad aparente, MO, acidez o alcalinidad, disponibilidad de nutrientes, profundidad, presencia de capas restrictivas del suelo, cantidad y distribución de los residuos de cosecha (Plant 2001, Kitchen et al. 2003, Stone et al., Miller et al., Wright et al., citados por Jiang et al. 2004), competencia de malezas, plagas, presencia de toxinas y el manejo histórico de la chacra. La variabilidad espacial de estos factores puede ser influenciado por las diferencias en la topografía del campo (Moore et al. 1993, Kravchenko y Bullock 2000, Plant

2001), el agua subterránea, o por pura casualidad del microclima (Plant, 2001). En un campo dado, la importancia de los factores que limitan el rendimiento puede variar dentro y entre zafras de cultivos (Plant 2001, Kitchen et al. 2003).

El terreno modifica la distribución de procesos hidráulicos, erosionales y la temperatura del suelo, afectando el desgaste mineral, lixiviación, erosión, sedimentación, descomposición, horizontalización, y otros atributos del suelo (Moore et al., 1993). Afecta también la disponibilidad de agua, debido a la redistribución vertical y horizontal (Verity y Anderson, citados por Kravchenko y Bullock, 2000).

Kravchenko y Bullock (2000) señalan que las relaciones entre condiciones meteorológicas y topografía-rendimiento relatadas en la literatura son contradictorias. Halvorson y Doll (1991) observaron menor influencia de la topografía sobre el rendimiento en años secos que en años húmedos; lo relacionaron con cantidades menores de agua disponible para la redistribución topográfica durante años secos. En tales años podría esperarse que el contenido de agua fuera más homogéneamente distribuidos por el campo. Sin embargo, Simmons et al. (1989), reportaron mayor influencia de la topografía sobre la productividad en años secos. En años húmedos, Lindstrom et al. (1986) destacaron que drenajes pobres en sitios localizados en posiciones bajas del terreno, afectaban negativamente el rendimiento incrementando la variación espacial de este. Varios investigadores (Sinaí et al. 1981, Piedra et al. 1985, Daniels et al. 1987, Afyuni et al. 1993) reportaron que años con precipitaciones por encima de lo normal determinan menor variabilidad espacial de rendimiento comparados con años secos. Estas contradicciones pueden ser explicadas en parte por diferencias en el suelo y condiciones climáticas en las cuales se realizaron los experimentos.

En trabajos realizados en campos de topografía variable, el rendimiento fue explicado en forma aditiva por la elevación, pendiente, poder de escorrentía y curvatura del terreno. La elevación fue la variable que más influyó, observándose en las posiciones más bajas los mayores rendimientos, el resto de las variables topográficas solo tuvieron efecto cuando las condiciones topográficas y de precipitaciones fueron extremas (Kravchenko y Bullock, 2000). Las zonas cóncavas (curvatura negativa) podrían proporcionar más agua disponible para las plantas que las áreas convexas (curvatura positiva), observándose correlación negativa entre el rendimiento y la curvatura. El efecto negativo de posiciones topográficas más altas en el rendimiento era más intenso en campos con pendiente pronunciadas (Timlin et al. 1998, Kravchenko y Bullock 2000, Ciha, Halvorson y Doll, Afyuni et al., Jaynes et al., citados por Kaspar et al. 2004).

Las propiedades del suelo y los atributos de terreno vinculados con la capacidad de retener agua, el drenaje y el régimen hídrico a escala de chacra suelen estar relacionados con la variabilidad espacial de rendimiento (Kravchenko y Bullock 2000, Fraisse et al., Li et al., citados por Terra et al. 2005).

Trabajos realizados por Kaspar et al. (2004) lograron explicar el 71 % de la variación en rendimiento de maíz por la combinación de propiedades de suelo y topografía. En tres chacras con suelos y climas contrastantes (Kitchen et al., 2003), donde se evaluaron la ECa y propiedades topográficas, estas lograron explicar entre un 21 y 17 % del rendimiento de los cultivos, respectivamente. Otro trabajo realizado por Terra et al. (2006a), determinaron que el suelo y los atributos del terreno explicaron entre el 16 y el 64 % de la variación del rendimiento, fluctuando entre años y prácticas de manejo de suelos.

La degradación del suelo y la dinámica del agua a escala de chacra afectan significativamente el rendimiento de los cultivos (Terra et al., 2006a). Los menores rendimientos se encuentran comúnmente en suelos erosionados con horizonte superficial poco profundo ubicados en pendientes pronunciadas y curvaturas convexas. Las diferencias relativas de rendimiento de suelos erosionados con suelos profundos fueron mayores en años secos que en años húmedos (Pennock y de Jong, Lindstrom et al., citados por Kaspar et al., 2004). Para años con lluvias por encima del promedio, Jaynes et al., citados por Kaspar et al. (2004), encontraron rendimientos reducidos en áreas con leve pendiente y depresiones cerradas.

En chacras de maíz con alta pendiente (6 - 15 %) Timlin et al. (1997) encontraron que el contenido de MO y la profundidad del suelo tuvieron un efecto importante en la variación del rendimiento. En otro trabajo Terra et al. (2006b) encontraron que la textura, COS y ECa explicaron entre el 15 y 71 % de la variación de rendimiento de maíz.

Los patrones de variación de nutrientes como fósforo (P) y potasio (K) pueden estar relacionados con el tipo de suelo, pero en muchos casos están más afectados por prácticas de manejo, como la propia fertilización, la historia de la chacra, o la remoción diferencial de nutrientes dentro de éstas (Cambardella y Karlen, Franzen y Peck, citados por Del Campo 2006, Mallarino 2006).

Kravchenko y Bullock (2000) encontraron que la materia orgánica del suelo (MO), la capacidad de intercambio catiónico (CIC), el contenido de P y K, explicaron el 30 % de la variabilidad de rendimiento para maíz y soja, siendo el contenido de MO el más influyente principalmente en suelos pobres (baja MO).



El aumento de pH en campos ligeramente ácidos (pH = 5,1) han sido reportado como influyente en el incremento del rendimiento de cultivos (Cox et al. 2003, Sawchik y Mallarino 2008).

En trabajos realizados en Uruguay, Aunchain y Klasseen (1990) encontraron un menor contenido de ciertos macronutrientes en la zona baja con respecto a las otras posiciones topográficas en una chacra comercial de trigo. Esto, junto a un menor peso radicular por unidad de suelo, habría determinado el menor desarrollo y rendimiento de trigo observado en esta zona.

La disponibilidad de agua en el suelo esta relaciona con la productividad de los cultivos aún en regiones con altas precipitaciones (promedio 1.350 mm/año), además, esta actúa como un factor importante relacionado con la variabilidad espacial del rendimiento (Paz et al., Li et al., citados por Terra et al., 2006a).

La zona agrícola del litoral oeste en nuestro país presenta como principal limitante para la producción de cultivos de verano una baja capacidad de almacenar agua de sus suelos (entre 80 y 180 mm de agua disponible), pero existe una amplia variabilidad para cada tipo de suelo según sea su génesis y su posición topográfica y a su vez dentro de cada Unidad de suelo. Las precipitaciones que ocurran en el período crítico de los cultivos son las principales determinantes del rendimiento final, en especial si la capacidad de almacenaje del suelo no es alta, tanto en cultivos de primera como de segunda (Ernst et al., 2009).

En este sentido, Del Campo (2006) encontró que la variación de rendimiento para un cultivo de maíz fue explicada fundamentalmente por variables intrínsecas de carácter permanente relacionadas a la disponibilidad de agua, topografía (elevación y pendiente), y la textura asociada al tipo de suelo

dominante (% arena, % limo y relación del contenido de arcilla entre el horizonte B y A).

### **2.2.1. Variabilidad de rendimiento de soja**

La variabilidad del rendimiento de soja ha sido explicada en diferentes proporciones y por diferentes factores edáficos y topográficos en varios trabajos. Así por ejemplo, Jiang et al. (2004) encontraron que entre el 28 y 85 % de la variabilidad del rendimiento de soja fue atribuido a las variables de suelo y topografía. El contenido de arena fue el factor que más limitó el rendimiento de soja. Otras variables como saturación de bases, pH, contenido de arcilla y elevación, explicaron en menor medida la variabilidad del rendimiento.

Sawchik y Mallarino (2008) lograron explicar entre el 5 - 64 % de la variabilidad del rendimiento. En algunos campos encontraron correlaciones positivas del rendimiento con contenido de arcilla, MO, Ca y CIC. Las correlaciones entre las concentraciones de nutrientes en el suelo y otros factores edáficos variaron considerablemente entre campos.

Kaspar et al. (2004) encontraron que en años secos el rendimiento estuvo correlacionado positivamente con variables relacionadas con la disponibilidad de agua, posición topográfica, suelos de textura fina y alto contenido de COS, siendo la posición topográfica el factor más importante. Los mayores rendimientos fueron asociados a formaciones del terreno cóncavas, cercanas a las bases de las colinas donde la profundidad del horizonte superior, la infiltración de agua, el almacenamiento de agua, y el abastecimiento de agua desde las zonas altas, serían superiores a posiciones de ondulación convexa.

Sin embargo en Minesota (Khakural et al., citados por Kaspar et al., 2004), reportaron que el rendimiento estaba relacionado a la concentración de K int, perfil de suelo para el almacenamiento de agua, pendiente y profundidad del horizonte calcáreo.

Según Cox et al. (2003), las áreas con mayor proporción de arcilla tuvieron mayor rendimiento, lo que se atribuye a mayor cantidad de agua disponible durante periodos secos en la etapa de crecimiento, de todas maneras el efecto de la arcilla en años con precipitaciones normales podrían ser opuestos al encontrado en este estudio y por eso reducir el rendimiento.

### **2.3. FERTILIZACIÓN EN SOJA**

En los últimos años, la agricultura ha experimentado cambios significativos, el escenario agrícola fue dominado por la expansión del cultivo de soja. Esta transformación fue acompañada por un importante aporte de la tecnología: siembra directa, surgimiento de variedades transgénicas, mejoramiento genético en búsqueda de resistencia a enfermedades, adopción de grupos de madurez (GM) de mejor comportamiento y el desarrollo de materiales adaptados a las distintas zonas productivas (Satorre, 2003).

La predominancia de la soja en la rotación, implica que gran parte del área se encuentra ya sea bajo monocultivo de soja o en rotaciones con una baja proporción de otros cultivos. Desde el punto de vista de la fertilidad de los suelos, esta situación genera interrogantes importantes acerca del balance del carbono (C), y por lo tanto de la materia orgánica (MO), y de los nutrientes en los suelos. Por otra parte, el papel dominante de la soja en la agricultura hace

imprescindible conocer y manejar la nutrición del cultivo para maximizar rendimientos y resultados económicos de las empresas (García, 2005).

La expansión de la soja y la reducida aplicación de fertilizantes en el cultivo han generado balances negativos para los nutrientes del suelo, con la consiguiente degradación de la fertilidad de los mismos. La degradación resultante a partir de la disminución de la MO y el desbalance de nutrientes afecta la productividad de la soja y de otros cultivos” (García 2005, Berardo 2005, Martínez et al. 2006).

La concentración de la mayoría de los nutrientes en grano está asociada a un mayor contenido de proteína, en comparación con otros cultivos esta concentración es menor para maíz y progresivamente mayor para trigo, girasol y soja. Por tal razón, en relación a los cereales, el grano de soja (proteico-oleaginoso), puede contener hasta el doble de concentración de P, el triple de S y una relación aún mayor de K (Berardo 2005, Martínez et al. 2006).

En un trabajo realizado por Cano et al. (2008) en Uruguay sobre balance aparente de P, los cultivos de maíz, soja y sorgo son quienes exportan más P en grano. Sorgo y soja además están entre los cultivos menos fertilizados, existe una tendencia de los productores a fertilizar menos los cultivos de segunda, siendo éstos los que se siembran en mayor medida en esta condición, llevándolos a que sean los principales cultivos que en promedio arrojen balances negativos.

El ajuste de la fertilización es una herramienta estratégica para aumentar rendimientos de soja y mejorar la rentabilidad del cultivo. El manejo de la nutrición y fertilización del cultivo puede ser enfocado conceptualmente en el manejo de la nutrición del suelo o de la rotación. La respuesta de los cultivos a

la fertilización fosfatada depende del nivel de P disponible en el suelo, pero también es afectada por factores del suelo, del cultivo y de manejo del fertilizante (García, 2005).

Según Mallarino (2005) existen dos filosofías distintas para las interpretaciones y recomendaciones de fertilización que se basan en una combinación de los conceptos de "nivel de suficiencia" y "subir y mantener".

En su forma estricta, el concepto de nivel de suficiencia establece que hay un nivel de nutriente por debajo del cual hay respuesta a la fertilización, cada nutriente tiene su nivel de suficiencia y deficiencia, se fertiliza cada cultivo con la dosis óptima de acuerdo al nivel de cada nutriente y se reconoce que la dosis óptima de un nutriente puede ser afectada por el nivel de otros. El concepto de subir y luego mantener se basa en el poder residual de los fertilizantes fosfatados y potásicos y establece que si el nivel es por debajo del nivel óptimo se fertiliza no solo para alcanzar el máximo rendimiento sino para subir el nivel de nutriente disponible hasta el óptimo nivel en un plazo determinado. En algunos casos se interpreta mal este concepto y se recomienda fertilizar con lo que el cultivo va a remover en el grano cosechado aun cuando los niveles de nutriente en el suelo sean altos y la probabilidad de respuesta sea casi nula (Mallarino, 2005).

En una comparación de dos redes de ensayos de fertilización fosforada realizada por varios autores (García, 2005), el cultivo de soja alcanzó el 90 y 95 % del rendimiento relativo con contenidos de P Bray 1 de 8 y 12,4 ppm, respectivamente. La respuesta del cultivo al agregado de fósforo se volvió nula cuando el contenido de P fue de 15,8 ppm y aumenta 48,5 kg/ha de rendimiento por cada ppm por debajo de ese valor (Gutiérrez Boem et al., Echeverría et al., García, citados por Rubio, 2006). En este sentido, trabajos citados por Espósito

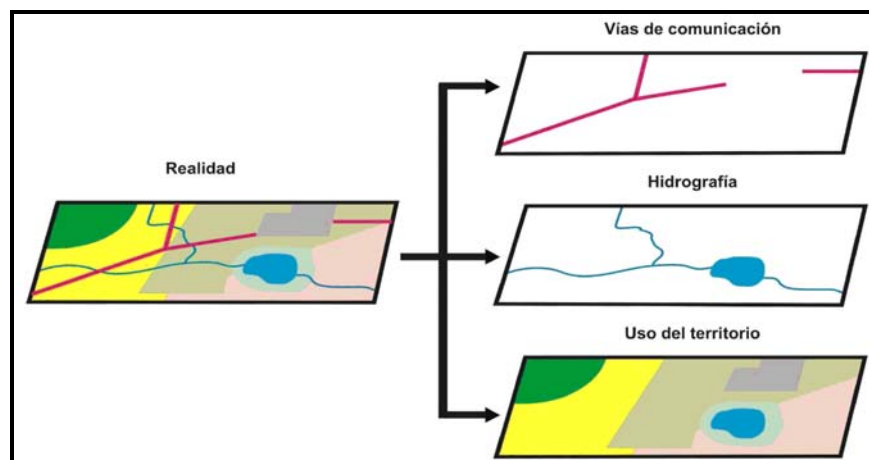
(2008) informan que la fertilización fosfatada incrementó los rendimientos de soja cuando la disponibilidad de P en la capa superficial de suelo (0 - 20 cm) fue menor a 12 ppm (Ferraris y Couretot, 2004), mientras que, Díaz Zorita (2002) no encontró respuesta a la fertilización fosfatada de la soja en suelos con más de 20 ppm de P en los primeros 20 cm de suelo.

#### **2.4. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)**

Habitualmente se almacena la información en planillas que permite manejar gran cantidad de información con gran agilidad. En tanto las bases de datos generados en la AP tienen otro componente muy importante que es la georreferenciación de los datos, los software comunes no tienen la capacidad de manipular este tipo de información (Molin, 2003).

La utilización de los mapas ha sido tradicionalmente asociada a la ubicación de elementos, sin embargo, actualmente, mediante los SIG, el punto de vista ha variado hacia resolver problemáticas que surgen al intentar realizar asociaciones de tipo espacial (Best y León, 2006). Los SIG pueden trabajar con varios atributos para un mismo punto, al mismo tiempo (Figura 1), pudiendo estos atributos ser mostrados en capas como un mapa encima de otro (Molin, 2003).

Los SIG tienen muchas definiciones entre ellas se puede mencionar la propuesta por National Center for geographic Information and Analysis (NCGIA) "Sistema computarizado compuesto por hardware, software, datos y aplicaciones que es usado para registrar digitalmente, editar, modelizar y analizar datos espaciales, y presentados en forma alfanumérica y gráfica" (Introducción a SIG, 2008).



**Figura 1:** Ejemplo de posibles capas o niveles de información de un mapa en un SIG.

Dado que los SIG son herramientas que ayudan a conocer y manejar la variabilidad espacial, pueden también administrar, entregar, cuantificar, y procesar información relacionada con los factores que afectan el rendimiento de los cultivos. Por éstas razones y porque la información geográfica es importante para el análisis en la agricultura, ha sido una de las herramientas base en la AP (Rava y Santa Ana, 2007).

## 2.5. GEOESTADÍSTICA

El proceso de identificación de la variabilidad en general, comienza con un análisis estadístico de los datos. El análisis de datos con un componente espacial se denomina geoestadística (Cressie, Isaak y Srivastava, Journel y Huijbregts, citados por Plant, 2001), rama de la estadística que trata fenómenos espaciales. Su objetivo primordial es la estimación, predicción y simulación de dichos fenómenos (Journel y Huijbregts., citados por Giraldo, 2003), a diferencia de la investigación tradicional donde la variación es evitada y/o controlada

mediante la implementación de bloques homogéneos y repeticiones, parte de la variación ambiental es expresada entonces como diferencias entre bloques (Steel y Torrie, 1981).

La extensión de los experimentos clásicos parcelarios y sus resultados a escala de chacra muchas veces no resulta factible, ya que al pasar a una escala mayor es difícil encontrar sitios homogéneos como los bloques experimentales. Las observaciones cercanas en el espacio tienden a ser más parecidas que aquellas que se encuentran más apartadas, por lo tanto la distribución espacial de los atributos observados no es al azar (Goovaerts, citado por Pravia, 2009).

Cuando se detectan patrones espaciales una de las asunciones claves de los métodos estadísticos clásicos deja de ser válida: “los errores no son independientes ni se encuentran idénticamente distribuidos”. Si la variabilidad espacial no es controlada el error experimental es sobreestimado, reduciendo la precisión de las estimaciones del efecto de los tratamientos (Wu et al., Bishop y Lark, citados por Pravia et al., 2009). Para evitar que esto suceda, la variabilidad espacial debería ser estudiada, y los patrones espaciales removidos del error experimental en el análisis estadístico de los tratamientos (Bhatti et al., citados por Pravia et al., 2009).

La geoestadística opera básicamente en dos etapas, la primera es el análisis estructural, en la cual se describe la correlación entre puntos en el espacio. En la segunda fase se hace predicción en sitios de la región no muestreados por medio de técnicas de interpolación (Bosques Sendra, 2000).

Una forma de presentación de la autocorrelación espacial de una variable, es decir, su estructura espacial es empleando como instrumento al

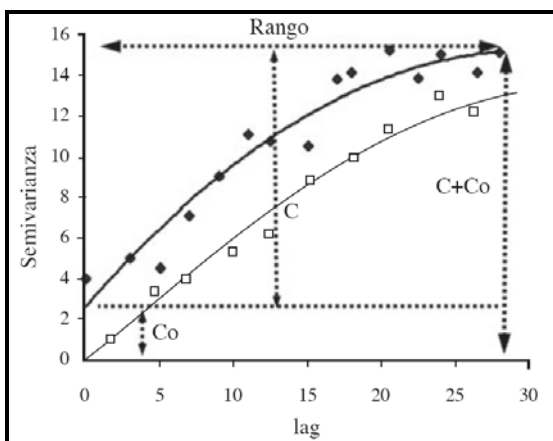


semivariograma (Clark, citado por Bosque Sendra, 2000). El semivariograma  $\gamma(h)$  es una función matemática que mide la variabilidad, es decir la desemejanza espacial.

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

donde  $Z(x_i)$  es el valor de la variable en un sitio  $N$ ,  $Z(x_i + h)$  es otro valor muestral separado del anterior por una distancia  $h$  y  $N$  es el número de parejas que se encuentran separadas por dicha distancia. Para calcular el variograma se generan todas las parejas de puntos/objetos espaciales que están separados por 1, 2, 3...n unidades de distancia a lo largo de una dirección del plano (Norte-Sur, Este-Oeste, o cualquier otro) y se calcula la varianza ( $\gamma$ ) en función de la distancia ( $h$ ) en cada uno de estos grupos de casos (Alfonso, Krajewsky, Journal, David, citados por Cuador et al., 1997).

Graficando  $\gamma(h)$  se obtiene la Figura 2 que muestra los parámetros del semivariograma, en donde  $C_0$  es la varianza de discontinuidad espacial también llamada el “*efecto pepita*” (Nugget effect) o ruido espacialmente no correlacionado (Burrough y McDonnell, citados por Villatoro et al., 2008).  $C$  es la varianza estructural o espacialmente dependiente, en donde a mayor participación tenga en la suma entre  $C$  y  $C_0$  las estimaciones son mejores (Muñoz et al., 2006). El ámbito o rango es el valor de la correlación espacial o punto en la distancia a partir del cual los datos no tienen influencia en el punto de comparación  $C + C_0$  llamado meseta o cima, representa donde las varianzas de las diferencias son máximas (Demmers, citado por Villatoro et al., 2008).  $Lag(h)$  representa la distancia de los puntos circundantes a cada uno de los puntos en comparación.



**Figura 2:** Componentes de semivariograma teórico.

Para interpretar el semivariograma experimental se parte del supuesto de que a menor distancia entre los sitios mayor similitud o correlación espacial entre las observaciones. Por ello en presencia de autocorrelación se espera que para valores de  $h$  pequeños el semivariograma experimental tenga magnitudes menores a las que este toma cuando las distancias  $h$  se incrementan (Giraldo, 2003).

Puesto que el uso del semivariograma ajustado es la estimación espacial de una variable regionalizada  $Z(x_i)$ , parece razonable plantear un estimador del semivariograma que se base en la idea de minimizar los errores de estimación de  $Z(x_i)$ . La validación cruzada ha sido ampliamente utilizada para evaluar el grado de “bondad” de un modelo de semivariograma y reconocido como un método óptimo de estimación de sus parámetros que tiene como objetivo validar el ajuste realizado en el método kriging (Journel, David, citados por Cuador et al., 1997). La operación de validar un semivariograma teórico ajustado a uno experimental se considera como el último de los pasos importantes del análisis de variabilidad (Krajewsky, citado por Cuador et al., 1997), donde:  $Z(x)$  sea una función aleatoria estacionaria con semivariograma

$\gamma(h)$ , su función de covarianza  $C(h)$  viene dada por  $C(h) = \sigma^2 - \gamma(h)$  donde  $\sigma^2$  es la varianza de  $Z(x)$ . Sea  $Zx_1, Zx_2, \dots, Zx_n$  los valores de  $Z(x)$  en  $n$  puntos medidos. La validación cruzada consiste en suprimir el  $i$ -ésimo valor medido  $Z(x_i)$  y estimarlo a partir del resto de los datos.

Si se repite este proceso para los  $n$  puntos, de modo que se puedan calcular los  $n$  errores de validación con la siguiente fórmula:

$$E(x_i) = Z^*(x_i) - Z(x_i) \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

El valor estimado  $Z^*(x_i)$  se calcula por Krigeage, término creado por George Matheron en el año 1960, basado en las ideas iniciales del ingeniero en minas sudafricano Danie G. Krige, hecho por el que surge este interpolador y la Geoestadística en general (Olea, citado por Cuador et al., 1997).

La medición de la probabilidad efectuada por los métodos kriging, hace la diferencia con respecto a los métodos determinísticos para interpolación espacial, del cual el más usado es el de ponderación de distancia inversa por sus siglas en inglés (IDW, Inverse Distance Weighting) (Burrough y Mc Doncell, 1998).

El método IDW es similar al kriging ordinario, ya que da más peso a los valores más cercanos pero posee una menor complejidad en el cálculo. El IDW utiliza un algoritmo simple basado en distancias (Johnston et al., citados por Cuador et al., 1997).

Ambos modelos Kriging ordinario e IDW asumen que las predicciones son una combinación lineal de los datos como lo muestra la siguiente ecuación:

$$\hat{z}(s_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad i=1, \dots, n \quad (3)$$

donde  $\hat{z}$  es el valor estimado en el punto interpolado  $S_o$ ;  $n$  es el número de observaciones vecinas usadas para la estimación y  $\lambda_i$  es el peso dado al valor observado  $z(s_i)$  en las cercanías del valor  $S_o$  (Lozano et al., 2004). Este último parámetro hace la diferencia entre Kriging e IDW.

El método ordinario de kriging obtiene los pesos (o influencias) de los valores, resolviendo la ecuación mostrada a continuación:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma[d(s_i, s_j)] + m = \gamma[d(s_o, s_i)], \quad i=1, \dots, n ; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (4)$$

donde  $n$  es el número de observaciones,  $m$  es el multiplicador *Lagrange* usado para la minimización de las restricciones,  $\lambda_i$  es el peso dado a cada una de las observaciones, y la suma de todos los  $\lambda_i$  es igual a 1. Los subíndices  $i$  y  $j$  denotan los puntos muestreados, el subíndice 0 es el punto en estimación,  $S$  simboliza la medición efectuada (variable medida) y  $d(S_i, S_j)$  es la distancia entre  $S_i$  y  $S_o$  a partir del semivariograma.

$$\gamma[d(s_i, s_o)] = \text{var}[z(s_i) - z(s_o)] \quad (5)$$

Esta semivarianza calculada es una medida para determinar la similitud entre observaciones, en donde a mayor similitud, menor semivarianza (Lozano et al., 2004).

Los pesos  $\lambda_i$  o las relevancias de los valores son determinados con el fin de asegurar que el error promedio para el modelo sea cero y además la varianza del error sea minimizada (Cuador et al., 1997), lo cual ofrece una predicción no sesgada.

Por otro lado, el IDW calcula el peso de los valores de acuerdo a la relación inversa de la distancia (Cuador et al., 1997):

$$\lambda_i = \frac{[d(s_i, s_o)]^{-p}}{\sum_{i=1}^n [d(s_i, s_o)]^{-p}} \quad i=1, \dots, n \quad (6)$$

donde  $p$  (power-value) es el parámetro del exponente que controla que tan rápido los pesos de los puntos tienden a cero al aumentar su valor conforme aumenta la distancia del sitio de interpolación. En cuanto mayor sea  $p$ , mayor peso es dado a los puntos más cercanos y por consiguientes se obtienen superficies más continuas o suaves y las predicciones tienden hacia el promedio de la muestra (Cuador et al., 1997) los valores de  $p$  están usualmente entre 1 y 3 (Gotway et al., 1996); de acuerdo a resultados de este mismo autor la exactitud del IDW tiende a aumentar conforme  $p$  aumenta, el uso de datos de variación menores al 25 %.

Kravchenko (2003) recomienda el IDW para bases de datos pequeñas, en donde los parámetros del variograma no son conocidos, y además cuando la distancia entre muestras es muy grande e incluso cuando la distancia de muestreo es mayor al rango de correlación espacial. La precisión de las estimaciones es influenciada por la varianza aleatoria, la estructura de la variación, y por la intensidad de muestreo.

Según Plant (2001) la ventaja de kriging es que, bajo ciertas hipótesis en torno a  $Z$ , la estimación interpolada de  $Z(x, y)$  es la "mejor" estimación en el sentido de que minimiza la varianza sobre todas las estimaciones de las medias ponderadas en los puntos más cercanos. Otra ventaja de kriging es que el variograma, calculado como una parte de la proceso de kriging, proporciona información útil acerca de cómo los valores medidos de la variable  $Z$  se puede esperar que se relacionan entre si.

De acuerdo con Kravchenko (2003), si la estructura espacial es pobre o nula y/o no es viable hacer un muestreo intensivo para crear un buen mapa, es mejor trabajar usando la media general de los datos.

## **2.6. ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN Y REGRESIÓN (CART)**

Los árboles de clasificación y regresión CART (Breiman et al., citados por Plant, 2001) es un método estadístico no paramétrico que usa algoritmos de partición binaria recursiva para, esencialmente, crear una clave dicotómica que describe la relación de una variable (ej: rendimiento) con otros factores que la pueden influir (Plant, 2001). CART tiene varias ventajas sobre el uso de métodos de regresión lineal clásica, 1) no hay necesidad de especificar en forma funcional y verificar que se ajuste a los datos, 2) hace la selección de variables en forma automática, 3) minimiza el efecto de los valores extremos, aislándolos en pequeños nodos, y 4) aísla el efecto de las variables a las artes del árbol, para descubrir la dependencia del contexto y las interacciones entre las variables.

La presentación de la información se hace en un diagrama en forma de árbol invertido donde el proceso recursivo, muy esquemáticamente, se traduce en los

siguientes pasos: a) el nodo raíz es dividido en subgrupos (dos o más) determinados por la partición de una variable predictora elegida por el software, generando nodos hijos, b) Los nodos hijos son divididos usando la partición de una nueva variable. El proceso recursivo se repite para los nuevos nodos hijos sucesivamente hasta que se cumpla alguna condición de detención, c) algunos de los nodos resultantes son terminales, mientras que otros nodos continúan dividiéndose hasta llegar a un nodo terminal, y d) en cada árbol se cumple la propiedad de tener un camino único entre el nodo raíz y cada uno de los demás nodos del árbol (Plant, 2008).

Los parámetros “*minsplit*” y “*cp*” en el software R, gobiernan la complejidad del árbol determinando el número de nodos, y por tanto, el primer problema a resolver es determinar si los valores por defecto de estos parámetros es la adecuada. En particular, es importante determinar si el parámetro de “*cp*”, que controla la complejidad del árbol es óptimo, el objetivo es lograr el equilibrio correcto entre el sesgo y la varianza. Un árbol demasiado simple dará lugar a un resultado excesivamente sesgado que perderá información valiosa (*underfitting*), y un árbol demasiado complejo tendrá como resultado un árbol con mucha varianza dificultando su análisis (*overfitting*). Por lo tanto, el parámetro “*cp*” debe generar una secuencia de ramas que se detiene en el equilibrio óptimo entre el sesgo y la varianza (Plant, 2008).

## **2.7. ZONAS DE MANEJO (CLUSTERS)**

Una estrategia práctica para reducir la complejidad de una chacra es centrarse en clasificar el factor o los factores más importantes para delimitar el rendimiento en cualquier área determinada. Siempre, estos factores son más o menos continuos, el resultado del análisis es un conjunto de áreas que dividen

al campo en regiones definidas por factores limitantes del rendimiento. Estas regiones comúnmente se denominan zonas de manejo (ZM) (McCann et al., citados por Plant, 2001).

El manejo de zonas debe cumplir los siguientes criterios específicos, 1) las diferencias de rendimiento entre las zonas deben ser significativas, y 2) el principal conjunto de factores que influyen en el rendimiento dentro de una zona debe ser el mismo (Plant 2001, Johnson et al. 2003).

La utilización de suelos con escasa variación temporal y atributos del terreno relacionados con componentes sistemáticos del rendimiento pueden dar lugar al desarrollo de métodos rápidos y rentables para la delineación de ZM optimizando la entrada de insumos (Fraisse et al., citados por Terra, 2006b).

En general, las ZM en un campo en un año puede ser muy diferente que en el mismo campo en un año distinto, incluso si el cultivo es el mismo (Plant 2001, Fraisse et al., citados por Terra et al. 2006). La ventaja de la creación de ZM es que proporcionan un medio conveniente de simplificar la distribución espacial del rendimiento y los factores que influyen en esa zafra. La acumulación de mapas de ZM en un gran número de zafras en el mismo campo puede ser una forma de obtener conocimiento de la respuesta espacial de los cultivos al medio ambiente. Por otra parte, la subdivisión de un campo en ZM se puede utilizar para aumentar la eficiencia de los muestreos a través de estratificación de las redes de muestreo (Plant, 2001).

Debido a que los atributos del terreno pueden ser cuantificados y agrupados (clusters), es que la evaluación de cómo éstos atributos están relacionados con la productividad y las propiedades del suelo es un factor clave (Fraisse et al., Muller et al., citados por Terra, 2006).



La clasificación es la división del suelo en regiones de potencial de producción similar, para que los productores adopten el manejo sitio-específico, el desarrollo de las zonas debe ser simple, funcional, y económicamente factible (Johnson et al., 2003).

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS EXPERIMENTOS**

##### **3.1.1. Descripción del sitio experimental**

Se eligieron dos chacras contrastantes que difieren principalmente en topografía e historia de uso agrícola, éstas se encuentran en establecimientos agrícola-ganaderos ubicadas en el litoral oeste del país en el departamento de Soriano cercanos a Dolores.

El experimento uno (EXP.1) con las coordenadas geográficas 33° 33' 16,52" S, 58° 11' 2,15" W, se encuentra en el paraje Prieto, dentro de una chacra de 33,4 ha perteneciente al padrón 1.472, sobre los grupos de suelos CONEAT 03.40 y 11.7, que ocupan un 30 y 70 % del área respectivamente. El experimento dos (EXP.2) con las coordenadas geográficas 33° 42' 44,98" S, 58° 10' 37,91" W, se encuentra situado en una chacra de 26,7 ha, sobre el grupo de suelos CONEAT 03.51 perteneciente al padrón 4.838, del paraje Paso Ramos (ver ANEXOS). En el cuadro 1 se describen las diferentes unidades de suelos CONEAT anteriormente mencionadas.

**Cuadro 1:** Descripción de las unidades de suelo CONEAT presentes en los padrones donde fueron ubicados los experimentos.

	Unidad CONEAT	Índice	Unidad de suelos	Mat. Geológico	Suelos dom.	Suelos asoc.
EXP.1	03.40	96	Fray Bentos, San Manuel y Young	Sedimentos limo arcillosos y sedimentos aluviales de texturas variables	Brunosoles Éútricos Lúvicos y Solonetz Ocrito	Gleysoles Típicos Melánicos y Fluvisoles
	11.7	193	Cañada Nieto	Sedimentos de la formación Fray Bentos	Brunosoles Subéútricos	Brunosoles Éútricos, Típicos
EXP.2	03.51	175	Villa Soriano y Kiyu	Sedimentos limo arcillosos de color pardo	Brunosoles Éútricos Luvicos	Solonetz

Fuente: URUGUAY. MGAP. DGRNR. PRENADER (1999).

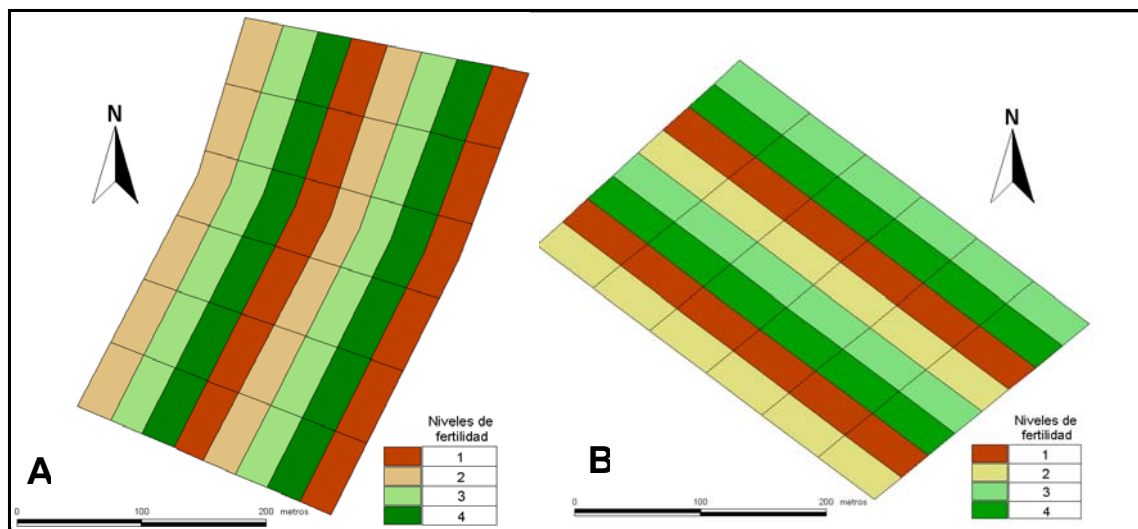
### **3.1.2. Tratamientos y diseño experimental**

Los dos ensayos evaluaron el impacto de tres niveles de fertilización y un testigo sin fertilizar (tratamientos) sobre el rendimiento de soja a escala de chacra (Cuadro 2). El diseño experimental fue de Bloques Completos al Azar (DBCA), dispuestos en ocho fajas (unidades experimentales) y dos bloques, ubicados de modo de interceptar la máxima variabilidad de la chacra (Figura 3). El área del EXP.1 fue de 6,7 ha y la del EXP.2 de 6,2 ha, las dimensiones aproximadas de las fajas fueron de 24 m (ancho operativo de la fertilizadora) por 355 m de longitud y de 25 m por 305 m, para el EXP.1 y EXP.2 respectivamente.

Cabe destacar que en una primera instancia la fertilización se planteó como diferentes dosis de  $P_2O_5$ , debido a un error del productor quien aplicó un fertilizante binario que aporta N, P y S es que se denominan a los tratamientos como niveles de fertilidad. Las fertilizaciones en los experimentos fueron realizadas con abonadoras de doble plato equipadas cada una con un banderillero satelital SACTLOC Edif., la metodología de aplicación de fertilizante fue regular las máquinas para la mínima dosis y repetirla 1, 2 o 3 pasadas según el tratamiento.

**Cuadro 2:** Descripción de los cuatro tratamientos para los dos experimentos evaluados.

Tratamientos	EXP.1	EXP.2	Niveles fertilidad
	$N_{(7)} - P_2O_{5(40)} - K_2O_{(0)} - S_{(5)}$ (kg/ha)	$N_{(10)} - P_2O_{5(50)} - K_2O_{(0)} - S_{(1)}$ (kg/ha)	
1	0 (Testigo)	0 (Testigo)	1
2	95	60	2
3	190	120	3
4	285	180	4



**Figura 3:** Disposición a escala de las fajas (niveles fertilidad), para los dos sitios experimentales. **A)** Mapa del EXP.1. **B)** Mapa del EXP.2.

### 3.1.3. Manejo general del ensayo

El trabajo experimental para ambas chacras se realizó sobre una soja de primera en siembra directa (SD), la aplicación de herbicida de inicio del barbecho fue con una mezcla de Glifosato y Metsulfuron (4 lts y 7 g respectivamente), para el EXP.1 el 28 de agosto de 2007 sobre una cobertura de Raigrás y para el EXP.2 fue el 17 de mayo de 2007 sobre una pradera vieja (ver ANEXOS). En el Cuadro 3 se presenta parte del manejo cultural utilizado en los experimentos.

**Cuadro 3:** Manejo agronómico de los experimentos.

	EXP.1	EXP.2
Fecha de siembra	5 de nov.	20 de nov.
Variedad	Don Mario 5.800	RA 516
Población objetivo (plantas/ha siembra)	300.000	300.000
Distancia entre hileras (cm)	38	38
Largo de barbecho (meses)	3	6
Antecesor	Maíz - Raigrás	Pradera vieja

El manejo del cultivo (Malezas, Plagas y Enfermedades) se realizó en forma homogénea dentro de los experimentos teniendo en cuenta los umbrales de daño para las diferentes situaciones.

### **3.2. DETERMINACIONES**

Dentro de los ensayos se realizaron diferentes determinaciones y muestreos, denominados: a) Datos climáticos, b) Presiembra (previo a la siembra y fertilización inicial) y c) En Cultivo. Todos los muestreos realizados fueron georreferenciados, para los discretos, se utilizó un GPS Garmin modelo ETREX LEGEND H, mientras que para los continuos se utilizaron herramientas equipadas con DGPS (GPS diferencial).

#### **3.2.1. Datos climáticos**

Los datos climáticos fueron obtenidos de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), correspondientes a las dos estaciones meteorológicas más cercanas a las chacras, para el período desde junio de 2007 a marzo de 2008 inclusive, Cañada Nieto para el EXP.1 y Dolores para el EXP.2.

### **3.2.2. Determinaciones presiembra**

Antes de instalado el ensayo se realizó fotointerpretación para determinar la ubicación del experimento, hacer el muestreo dirigido de suelos y elaborar el mapa detallado de suelos. Para las chacras se contó con información complementaria que incluyó cartografía CONEAT, mapas altimétricos del SGM (Servicio Geográfico Militar), planos georreferenciados de los establecimientos, caminería e imágenes satelitales de Google Earth.

#### **3.2.2.1. Electroconductividad aparente del suelo (ECa)**

Cada una de las chacras fue mapeada en el invierno de 2007 con un sensor de conductividad eléctrica (Veris Tech. ® 3100) remolcado por un vehículo equipado con DGPS (Trimble AgGPS 132). El vehículo realizó pasadas a intervalos regulares de 20 - 25 m en la dirección de la máxima variabilidad de la chacra. Las medidas de ECa fueron determinadas a dos profundidades en el perfil: 0 - 30 (ECa<sub>30</sub>) y 0 - 90 cm (ECa<sub>90</sub>). Las determinaciones se realizaron a contenidos de agua en el suelo próximos a capacidad de campo para que los mapas obtenidos reflejen la variación espacial de propiedades edáficas (Corwin y Lesch, 2003).

En base a las determinaciones realizadas ECa<sub>30</sub> y ECa<sub>90</sub> se calcularon la ECa entre 30 y 90 cm (ECa<sub>30-90</sub>) en base a la ecuación empírica ( $EC_{30-90} = (\text{lectura profunda} - 0,36 * \text{lectura superficial}) / 0,64$ ) y la relación de ECa<sub>90</sub>/ECa<sub>30</sub> (ECa<sub>90/30</sub>).

### **3.2.2.2. Relevamiento detallado de suelos**

Para esto se recurrió a un especialista en descripción y clasificación de suelos, que estableció transectas interceptando la máxima variabilidad esperada (en base a fotografías aéreas y mapas topográficos) para delinear las distintas unidades de suelos presentes en los sitios experimentales.

Para los suelos presentes se establecieron sitios representativos de muestreo a los efectos de su descripción y el muestreo de los distintos horizontes de acuerdo al protocolo de relevamiento de suelos (URUGUAY. MAP. DSA, 1975).

### **3.2.2.3. Mapas topográficos**

La elevación de cada chacra fue determinada simultáneamente al sensoramiento de ECa mediante la utilización de un GPS con corrección diferencial (Trimble AgGPS® 124/132) para posteriormente procesar la información y generar atributos topográficos primarios y secundarios.

### **3.2.2.4. Muestreo dirigido de Suelos (presembrado)**

Las chacras tuvieron una intensidad de muestreo de 0,2 y 0,15 ha/punto para EXP.1 y EXP.2, respectivamente. En cada punto de muestreo se tomó una muestra compuesta de ocho submuestras en un radio de 5 m desde el punto a una profundidad de 15 cm, utilizando un taladro holandés. Las muestras colectadas se procesaron en el laboratorio de suelos de INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria) “La Estanzuela”, los métodos utilizados fueron:



para pH (agua) con una relación suelo agua 1:1, NO<sub>3</sub> (CuSO<sub>4</sub> y potenciometría), P disponible (Bray I).

### **3.2.3. Determinaciones en cultivo**

#### **3.2.3.1. Muestreo dirigido de plantas**

Aproximadamente en el estado fenológico de V4 (26 y 27 de diciembre) se realizó la determinación de número de plantas por metro, se hicieron ocho mediciones georeferenciadas a lo largo de la faja, en zigzag tomando como referencia el centro de la misma. Cada punto de muestreo es una hilera de cinco metros de longitud, donde se contaron el número de plantas y se determinó el estado fenológico cada 10 plantas (ver ANEXOS).

#### **3.2.3.2. Estimación de rendimiento y sus componentes**

Para este muestreo se colectaron las plantas en un área de 4,8 m<sup>2</sup> (cuatro surcos por tres metros de longitud), previo a la cosecha mecánica, tomando como referencia las coordenadas del muestreo inicial de suelo. Para cada punto de muestreo se tomaron cinco mediciones de altura de plantas al azar, luego se cortaron en la base, se acondicionaron y se llevaron a la Estación Experimental de INIA “La Estanzuela” donde se realizó la trilla con una cosechadora experimental, posteriormente se determinó en el laboratorio de semillas, humedad de grano, el peso de muestra y peso de mil granos corregidos a 11 % de humedad.

De las plantas obtenidas en el corte se tomó una submuestra representativa de 15 plantas al azar por cada sitio de muestreo para determinar componentes de rendimiento mediante el conteo directo de: número de vainas con granos por planta, número de vainas vanas por planta y número de granos por planta. Posteriormente se realizó el cociente entre número de granos y vainas con granos por planta.

Los componentes fueron convertidos a unidades de área teniendo en cuenta la cantidad de plantas, el promedio obtenido de la submuestra (15 plantas) y el área de muestreo (4,8 m<sup>2</sup>).

Los resultados obtenidos fueron ingresados a los programas estadísticos InfoStat versión 2008 y SAS PROC MIXTOS (SAS Inst., Cary, Carolina del Norte), para el análisis de Correlaciones de Pearson, además de regresiones lineales simples entre componentes y rendimiento estimado.

#### **3.2.3.4. Mapas de rendimiento**

El mapa de rendimiento del cultivo de soja 2007/08 se generó a partir de los datos obtenidos de las pasadas de la cosechadora por el centro de cada faja, para evitar el solapamiento de los diferentes tratamientos. Se corroboró los datos del monitor de rendimiento utilizando una balanza experimental al término de la cosecha de cada faja. En el EXP.1 se disponía de los mapas de rendimiento de cultivos anteriores cosechados en forma convencional: maíz (verano 2006/07) y trigo (invierno 2006).

La cosechadora utilizada fue una John Deere SLC 6.200 con un cabezal de 16 pies, equipadas con un Monitor de Rendimiento Ag Leader PF Advantage y

un GPS Garmin 36 TracPak, lo que permitió conocer la productividad en diferentes puntos de la chacra.

### **3.2.3.5. Extracción de nutrientes**

Simultáneamente a la cosecha se extrajo una muestra compuesta de las diferentes zonas de la tolva cargada luego de cosechar cada faja para la determinación a nivel de laboratorio (Estación Experimental “La Estanzuela”) de: peso de 1.000 granos, porcentaje de humedad y contenido de N (combustión a 950° C y posterior detección de N<sub>2</sub> por conductividad térmica), P (digestión sulfúrica y colorimetría molibdato de amonio) y K (digestión vía seca y emisión atómica). Estos contenidos de nutrientes fueron utilizados para estimar la extracción del cultivo de soja en los diferentes tratamientos.

### **3.2.3.6. Muestreo dirigido de suelos (postcosecha)**

Sobre los puntos muestreados previo a la siembra se retomo el muestreo con la misma metodología. Para este muestreo se tomo en cuenta la distancia a la hilera de plantas, para minimizar el efecto de la extracción de nutrientes<sup>1</sup>, la zona donde se extrajo las submuestras, se ubico aproximadamente a 10 cm de la hilera.

## **3.3. PROCESAMIENTO DE CAPAS DE INFORMACIÓN**

A partir de los datos recabados en los diferentes muestreos discretos y continuos (Plant, 2001) realizados, se crearon capas de información geográfica

---

<sup>1</sup> Sawchik, J. 2008. Com. personal

que fueron analizadas mediante el uso de SIG con los software Arc View 3.2, DNR Garmin 5.4.1, GPS TrackMaker 13.6, GPS Utility 4.93, gV SIG 1.1.3 y MapSorce 6.5.

La información de los muestreos continuos y discretos fue georreferenciada y cargada a un SIG asignando coordenadas geográficas de latitud y longitud y planas globales utilizando la proyección cilíndrica UTM por sus siglas en inglés (Universal Transversal de Mercator) con el datum NAD 1983 Zona 21 Sur, para el posterior análisis en un software de geoestadística.

Aquellas variables que tenían buena estructura espacial y se podían predecir por validación cruzada (con la excepción de los datos de rendimiento), se interpolaron para obtener una grilla de datos de 10 por 10 m.

Las fajas fueron subdivididas en seis celdas de igual tamaño con el objetivo de asignarle los valores promedio de los datos interpolados de toda la información edáfica, topográfica y del cultivo, de forma de correlacionar la productividad de cada celda con la variación inherente al área experimental.

### **3.3.1. Capa discreta**

Las variables recolectadas en forma discreta fueron:

- ✓ P Bray 1 presiembra (ppm)
- ✓ pH
- ✓ K (meq/ 100 g. de suelo)
- ✓ Número de plantas a V4
- ✓ Número de plantas a cosecha
- ✓ Altura de plantas (cm)

- ✓ Estimación de Rendimiento (kg/ha)
- ✓ Peso de 1.000 semillas (g)
- ✓ Vainas vanas/planta
- ✓ Vainas con granos/planta
- ✓ Granos/planta
- ✓ P Bray 1 postcosecha (ppm)

Esta capa de información quedó constituida por las variables anteriormente mencionadas y las derivadas de los cálculos realizados en base a éstas.

### **3.3.2. Capas continuas**

#### **3.3.2.1. Mapa de rendimiento**

Los mapas de rendimiento obtenidos fueron filtrados y procesados antes de su utilización para remover los errores y problemas más comunes (Simbahan et al., citados por Terra et al., 2008). El monitoreo de rendimiento abarcó la adquisición, análisis y síntesis de datos de rendimiento del cultivo y su ubicación dentro de las chacra. El producto final consistió en un mapa con distintos colores que muestra rangos de rendimiento dentro de los experimentos (ver ANEXOS).

La depuración del mapa de rendimiento consistió en eliminar los puntos que se lograron identificar como “errores”. La forma de identificar esto “*out leyer*” es filtrando los puntos en donde las mediciones se generaron con errores. Para esto se utilizaron varios criterios:

- ✓ Verificar posición de Cabezal en el archivo original en la columna “Cuenta de área”, que indica activado-desactivado, eliminando los datos en los cuales el cabezal esta desactivado.

- ✓ Chequear si la velocidad de avance cambia en una pasada y entre pasadas, se compara el punto actual con el anterior y si varía más de un 15 % se elimina el punto.

- ✓ Comparación de velocidad de GPS y de rueda, se comparan ambas magnitudes en tiradas de 100 m.

- ✓ Descartar puntos cuando las velocidades son menores a 1,5 km/hora.

- ✓ Eliminar los puntos fuera del rango comprendido entre la media más menos 3 desvíos estándar. Se hace para todos los puntos del mapa a la vez y las variables sobre las que se aplica son: flujo de granos, humedad y velocidad.

- ✓ Eliminar puntas de cabeceras

- ✓ Eliminar puntos superpuestos (uno de ellos).

- ✓ Prorratear los datos de rendimiento con dato de balanza para obtención de datos reales.

- ✓ Esta capa de información queda constituida por las siguientes atributos:  
a) Humedad instantánea del grano (%) que se estima por medio de un sensor de capacitancia y b) Rendimiento instantáneo (ton/ha) que se estima a partir del flujo de grano estimado por medio de un sensor de fuerza de impacto (Bragachini et al., 2007).

### **3.3.2.2. Mapa de electroconductividad aparente (ECa)**

La ECa representa la variación de conductividad generada por cambios en las propiedades físico-químicas. Los mapas obtenidos fueron depurados debido a que la variabilidad de ECa tiene tres componentes: error de medidas, variaciones en ECa del suelo y variaciones asociadas a los procedimientos de

mapeo (contorno e interpolación). El error en la medida del ECa del suelo es la diferencia entre ECa medida y la ECa verdadera y puede ser causada, por ejemplo, por errores de GPS, contacto inconsistente del sensor de suelo, y ruido o deriva asociados con la electrónica del sensor (Sudduth et al. 2003, Mueller et al. 2003). Los criterios utilizados para depurar los mapas de ECa fueron similares a los del mapa de rendimiento:

- ✓ Eliminar los puntos fuera del rango comprendido entre la media más menos 3 desvíos estándar. Se hace para todos los puntos del mapa a la vez y las variables sobre las que se aplica son: ECa<sub>30</sub>, ECa<sub>90</sub> y altura.
- ✓ Eliminar puntas de cabeceras
- ✓ Eliminar puntos superpuestos (uno de ellos).

Esta capa de información quedó constituida por los siguientes atributos: ECa<sub>30</sub>, ECa<sub>30-90</sub>, ECa<sub>90</sub> y ECa<sub>90/30</sub>.

### **3.3.2.3. Mapas topográficos**

En base a los datos de elevación colectados en el muestreo de ECa, usando el software Geostatistic for the Environmental Sciences (GS +) versión 5.1 se interpoló para generar Modelos Digitales de Elevación por sus siglas en inglés (DEM, Digital Elevation Model), que pueden ser analizados en un SIG. Utilizando Spatial Analyst 2.0a (ESRI) para Arc View 3.2 se rasterizó el DEM en una rejilla de 10 m de lado, para posteriormente obtener los atributos secundarios utilizando el scripts de Arc View desarrollado por Schmidt (2003), basado en ecuaciones de Moore y Wilson, citados por Moore (1993), Pravia et al. (2009).

De esta manera se obtuvo la pendiente como atributo primario y los atributos secundarios o compuestos: Índice de Poder de Escorrentía por sus siglas en inglés (SPI, Stream Power Index), Factor Longitud de Pendiente por sus siglas en inglés (L-S Factor, Length-Slope Factor) y el Índice Compuesto Topográfico por sus siglas en inglés (TWI, Topographic Wetness Index) (Moore et al., 1993). Los mapas topográficos generan un nivel de detalle de 1 m de intervalo vertical en las chacras.

El SPI (Fórmula 7), es proporcional al poder de escurrimiento y es una medida del poder erosivo de la escorrentía (Moore et al., 1993).

$$\text{SPI} = \ln (A_s * \tan \beta) \quad (7)$$

dónde:

$A_s$  = Zona específica de captación

$\beta$  = Ángulo de la pendiente (grados)

El L-S factor es un índice de la capacidad de transporte de sedimentos, derivado de la zona específica de captación y la pendiente (Moore y Wilson, citados por Moore, 1993) (Fórmula 8). Da un valor potencial de erosión hídrica en relación a una longitud de pendiente de 22,13 m y un ángulo de 5° de inclinación y para laderas de dos dimensiones. Este factor es equivalente al factor LS de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo por sus siglas en inglés (USLE, Universal Soil Loss Equation) (Moore y Wilson, citados por Moore, 1993).

$$\text{L-S factor} = (m + 1)(A_s / 22,13)^m (\sin \beta / 0,0896)^n \quad (8)$$

con:  $m = 0,4$  y  $n = 1,3$  para longitud de pendiente < 100 m y un ángulo < 14°

dónde:

$A_s$  = zona de captación específica.



$\beta$  = ángulo de la pendiente (grados).

$m$  = longitud de la pendiente expuesta en el factor LS en USLE.

$n$  = ángulo de la pendiente expuesta en el factor LS en USLE.

El TWI (Fórmula 9) se calcula mediante el ángulo de pendiente ( $\tan\beta$ ) en una zona de captación específica. Se basa en el supuesto que la topografía controla el movimiento del agua en la pendiente del terreno y, por tanto, el patrón espacial de la humedad del suelo. Los valores altos se encuentran en la convergencia, terreno plano, mientras que los valores bajos son típicos de zonas empinadas, divergentes (Moore et al., 1993).

$$\text{TWI} = \ln (A_s / \tan\beta) \quad (9)$$

dónde:

$A_s$  = Zonas específicas de captación.

$\beta$  = Ángulo de la pendiente (grados).

Esta capa de información quedó constituida por los siguientes atributos: Elevación (m), Pendiente (%), TWI, SPI y SLF.

### 3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

#### 3.4.1. Estadística descriptiva

Para el conocimiento de la población de muestreo se utilizó estadística descriptiva de tendencia central para todas las variables medidas en forma discreta y continua determinando: Mínimo, Máximo, Media, Desvío Estándar, Coeficiente de Variación (CV) y Rango.

### **3.4.2. Análisis espacial**

Por medio de geoestadística utilizando el software GS +, se empleó para a) verificar y analizar la estructura espacial de todas las variables medidas, b) interpolar y realizar mapas a partir de muestreos discretos y c) eliminar la autocorrelación espacial de rendimiento para poder analizar el efecto tratamiento.

La estructura espacial se determinó mediante el uso del semivariograma teórico, para el cual se seleccionó el modelo que más se ajustaba en función al  $R^2$ , después de modelar la variación espacial, fue clasificada como fuerte, moderado o débil, en base al coeficiente pepita/umbral, menor a 25 %, entre 25 y el 75 % y mayor a 75 % respectivamente (Cambardella et al., citados por Pravia et al., 2009).

Luego se procedió a realizar la validación cruzada de los puntos muestreados con los procedimientos kriging ordinario e IDW (valores de power-value entre 1 y 3) que remueven consecutivamente un valor de los datos y éste es interpolado con los datos remanentes para luego ser comparado con el dato removido u observado. Con los datos interpolados, se graficaron cada uno de los resultados de las interpolaciones y se realizó también una comparación de los coeficientes de determinación y el residuo de los errores de los modelos con el fin de determinar cual de los métodos ajusta mejor a la generación del semivariograma.

Las variables que presentaron autorrelación espacial fuerte, altos coeficientes de determinación entre estimado y observado y además tener bajo error estándar fueron interpoladas por el método que mejor se comportara.

Para analizar el efecto tratamiento, la distribución espacial de los errores fue descripta, modelada y luego removida de los datos de campo. Se eliminó la estructura espacial del rendimiento obteniendo un “rendimiento limpio” utilizando el método propuesto por Hernández y Mulla (2002) como una variante del método de Papadakis que se propuso por primera vez en 1937. Los residuales para cada celda se calculan restando el promedio de rendimiento de tratamiento con el promedio de cada celda (Pravia et al., 2009).

$${}^m r_{ij} = \frac{(Y_{ij} - \bar{Y}_{t(ij)})}{\bar{Y}_{t(ij)}} \quad (10)$$

donde:

${}^m r_{ij}$  = Residual normalizado en cada lugar ij

$Y_{ij}$  = Valores observados de Rendimiento en el lugar ij

$\bar{Y}_t$  = Rendimiento promedio para el tratamiento t

Se determinó la estructura espacial de los residuales  ${}^m r_{ij}$  y se realizó kriging para estimar un nuevo residual para cada celda por medio de validación cruzada de vecinos observados más cercanos (Fórmula 11).

$${}^{m+1} \hat{r}_o = \sum_{h=1}^n \lambda_h {}^m r_{ij} \quad (11)$$

donde:

${}^{m+1} \hat{r}_o$  = Residual estimado para la interacción m + 1

$\lambda_h$  = Vector de kriging ordinario basadas en ponderaciones en el modelado semivarianza

${}^m r_{ij}$  = Residual (Fórmula 10)

Estos nuevos residuos  ${}^{m+1}\hat{r}_o$  se utilizan para calcular el rendimiento con la fórmula 12. La constante  $b$  se fijó a 0,5, de modo que el ajuste elimine parcialmente la tendencia, para evitar oscilaciones de las medias de los tratamientos (Bhatti et al., citados por Pravia et al., 2009).

$${}^{m+1}Y_{ij} = {}^mY_{ij} (1 - b \times {}^{m+1}\hat{r}_o) \quad (12)$$

donde:

${}^{m+1}Y_{ij}$  = Valor de rendimiento actualizadas para la interacción  $m + 1$

${}^mY_{ij}$  = Rendimiento original en los lugares  $i$  y  $j$

$b$  = Constante (0,5)

${}^{m+1}\hat{r}_o$  = Residual estimado de la fórmula 11 para la interacción  $m + 1$

Este procedimiento fue reiterado con rendimientos actualizados hasta que los residuales dejaron de tener estructura espacial, permitiendo así analizar los efectos de los tratamientos sobre el rendimiento mediante modelos lineales con errores aleatorios por medio de los software SAS PROC MIXTOS (SAS Inst., Cary, Carolina del Norte) e InfoStat versión 2008.

### **3.4.3. Análisis de correlaciones**

Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson para establecer relaciones simples entre variables dentro de cada experimento (Fórmula 13). Fue efectuado para dos conjuntos de variables, a) los componentes del rendimiento entre si y con el rendimiento estimado y b) con los promedios asignados a las celdas de las variables medidas en todo el experimento.

$$\rho = \sigma_{xy}/(\sigma_x \cdot \sigma_y) \quad (13)$$

donde  $\sigma_{xy}$  es la covarianza entre  $x$  e  $y$ , y  $\sigma_x$  y  $\sigma_y$  son las desviaciones estándar de las variables  $x$  e  $y$  respectivamente.

Hipótesis:

Ho:  $\rho = 0$

Ha:  $\rho \neq 0$

Ho:  $\rho = 0$

Ha:  $\rho > 0$

Ho:  $\rho = 0$

Ha:  $\rho < 0$

Criterio de Decisión: Si  $\rho$  es diferentes de cero con p-valor  $\leq$  a 0,05 se rechazan las Ho, existe correlación entre las variables.

#### **3.4.4. Análisis de varianza (ANAVA) y test de Tukey**

El modelo estadístico que se ajustó a nuestros experimentos para analizar el efecto de los tratamientos fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (14)$$

$i = 1, 2, 3 \text{ y } 4$

$j = 1 \text{ y } 2$

Supuestos:

Modelo es correcto (en relación al material experimental) y aditivo.

$\epsilon_{ij} \text{ Vs } A_s \text{ Is ID} \sim N(0, \sigma^2)$

Hipótesis planteadas:

Ho:  $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = 0 \Rightarrow$  Ningún tratamiento tiene Efecto.

Ha: Al menos un  $\alpha_i \neq 0 \Rightarrow$  Al menos un tratamiento tiene Efecto.

El Test de Tukey se utilizó para la comparación de medias de tratamientos calculadas a partir del “rendimiento limpio” de cada celda y las medias de los diferentes clusters utilizando los residuales de cada celda calculados a partir de los datos del monitor de rendimiento.

Hipótesis planteadas:

Ho:  $\mu_i = \mu_{i'} \quad \forall i \neq i' \Rightarrow$  Las medias de tratamiento son iguales.

Ha:  $\mu_i \neq \mu_{i'} \Rightarrow$  Las medias de tratamiento son diferentes.

donde:

$\mu_i$  = media del i-ésimo tratamiento.

$\mu_{i'}$  = media del i'-ésimo tratamiento

### **3.4.5. Análisis de regresión lineal**

Para realizar el análisis de regresión lineal múltiple (Fórmula 15), se utilizó el método stepwise (paso a paso) empleando el software SAS PROC MIXTOS, para todas las variables medidas en el EXP.1 y EXP.2 con el rendimiento de soja. En el experimento EXP.1 se utilizaron además los rendimientos de los cultivos anteriores (Maíz 2006/2007 y Trigo 2006). Con éste análisis se

determina que proporción de la variación de rendimiento podía explicarse por las variables medidas y cuales eran las más importantes.

Modelo de regresión teórico:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \epsilon_i \quad (15)$$

Supuestos:

Modelo correcto (en relación al material experimental) y aditivo.

$\epsilon_{ij} \text{ Vs } A_s \text{ Is ID} \sim N(0, \sigma^2)$

Hipótesis al modelo:

Ho: El modelo propuesto no explica el comportamiento observado

Ha: Si lo explica

Ho:  $Y \neq f(X_i)$

Ha:  $Y = f(X_i)$

Criterio de Decisión: Si la variación explicada por “el modelo” es suficientemente grande se rechaza Ho

Hipótesis parciales:

Ho:  $\beta_0 = 0$

Ha:  $\beta_0 \neq 0$

Ho:  $\beta_1 / \beta_0 = 0$

Ha:  $\beta_1 / \beta_0 \neq 0$

Criterio de Decisión: Si  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son diferentes de cero con p-valor  $\leq 0,05$  se rechazan las  $H_0$ .

### **3.4.6. Análisis de clusters**

Las zonas de manejo fueron creadas utilizando el software libre Management Zone Analyst (MZA) versión 1.0.1 de la Universidad de Missouri-Columbia desarrollado por Fridgen et al. (2004) que está basado en el procedimiento de análisis de cluster no supervisado de medias  $k$  difusas. El análisis de clusters es una de las herramientas estadísticas más extendidas para la creación de zonas de manejo, debido a la objetividad y neutralidad del procedimiento.

Se delinearón un máximo de seis zonas en el software MZA por el método de similaridad de Mahalonobis, con 1,3 de exponente de tolerancia, usando un criterio de convergencia de 0,0001 y un máximo de 300 interacciones. El número óptimo de clusters es aquel que provoca la máxima reducción de varianza y el criterio es en función de los índices de Clasificación de la Entropía Normalizada por sus siglas en inglés (NCE, Normalized Classification Entropy) y el Índice de Desempeño de Tolerancia por sus siglas en inglés (FPI, Fuzziness Performance Index) cuando el NCE y/o FPI se hacen mínimos en el menor número de zonas (Fridgen et al., 2004).

Las variables seleccionadas y cargadas al programa para determinar los diferentes clusters fueron las que presentaran correlación significativa con el rendimiento de soja dentro del área experimental. El MZA agrupa celdas similares entre si dentro de un cluster determinado teniendo en cuenta éstas



variables. En el EXP.2 hay solamente una variable con correlación débil por tanto se tomaron todas las variables medidas en el experimento.

Luego de obtenido la agrupación de celdas se procedió a identificar mediante el análisis en SIG la combinación y los valores de las variables que explicaron su similitud además de su ubicación en el experimento.

#### **3.4.7. Análisis por árboles de clasificación y regresión (CART)**

Para complementar el entendimiento de los diferentes variables y las interacciones que afectaron el rendimiento, se realizó un análisis no paramétrico utilizando el software de uso libre R versión 2.10.0 que utiliza el método CART, desarrollado por Breiman et al. (1984). Se ingresaron en forma individual todas las variables medidas en el área experimental para realizar éste análisis.

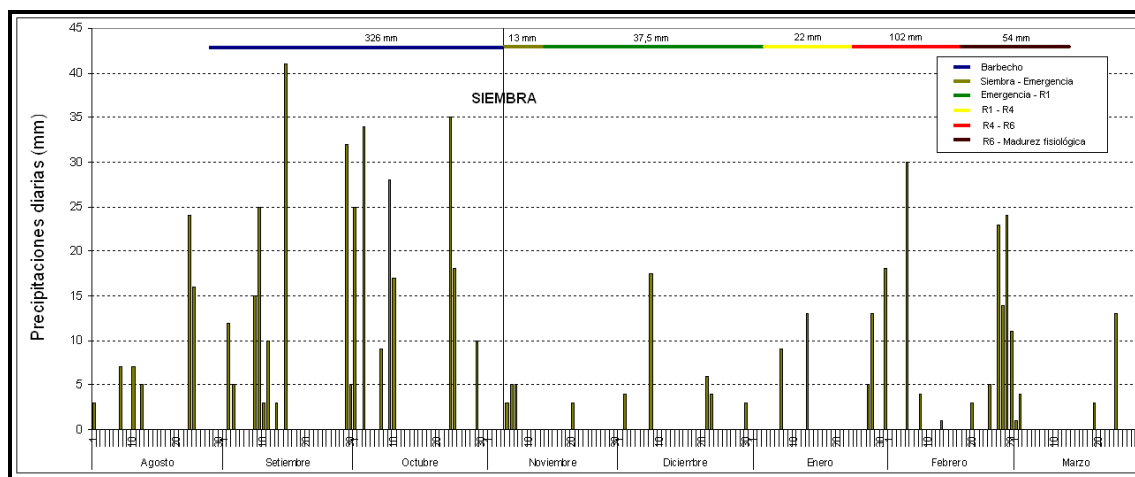
Para lograr un árbol que tenga el óptimo número de ramas se utilizó los parámetros "*minsplit*" y "*cp*" que gobiernan la complejidad del árbol. Un árbol demasiado simple dará como resultado pérdida de información valiosa y un árbol demasiado complejo tendrá como resultado un árbol de difícil comprensión. El objetivo fue lograr el equilibrio entre el sesgo y la varianza.

Al igual que para el análisis de clusters, luego de obtenido las diferentes ramas del árbol para cada situación, se procedió a identificar mediante el análisis en SIG los valores de las variables que explicaron la similitud entre celdas y su ubicación en el experimento.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. RÉGIMEN PLUVIOMÉTRICO

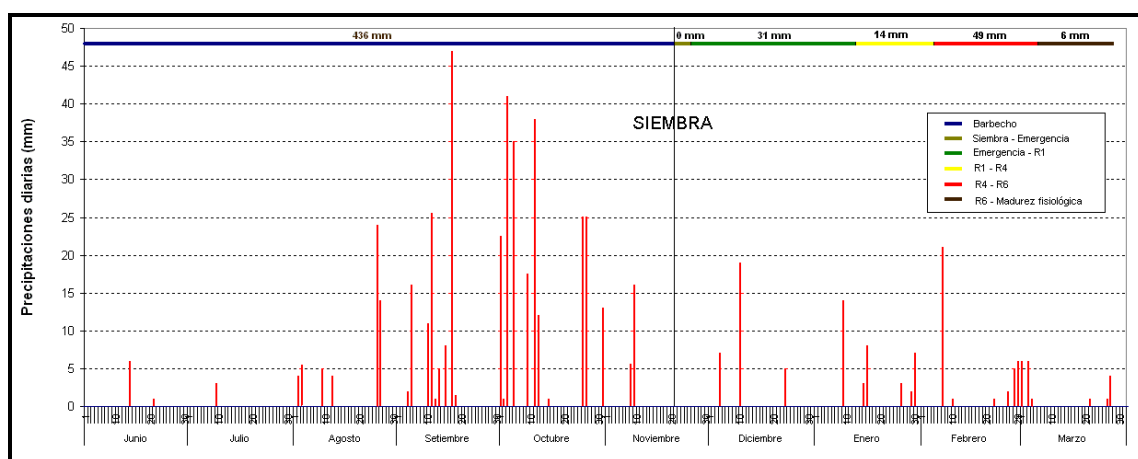
El período de barbecho en el EXP.1 permitió recargar el perfil del suelo, mitigando las bajas precipitaciones en la etapa vegetativa, donde solo se registraron 37,5 mm comparado con los 194 mm en éste período para el promedio histórico (ver ANEXOS). Durante el período crítico (R4 - R6) donde el agua disponible en el suelo es determinante del rendimiento, se produjeron lluvias significativas (102 mm) (Figura 4), lo que permitió recargar el perfil de suelo y obtener rendimientos aceptables (2.517 kg/ha) a pesar de la baja población (181.360 plantas/ha a cosecha) y bajas precipitaciones totales del período de cultivo (229 mm).



**Figura 4:** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de soja y precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica de Cañada Nieto, desde inicio de barbecho hasta madurez fisiológica para el EXP.1.

En el EXP.2 las precipitaciones durante el período de barbecho permitieron recargar el perfil de suelo, principalmente con las lluvias de primavera (117 y

231 mm en septiembre y octubre respectivamente). Durante la etapa del cultivo las precipitaciones estuvieron 67 % por debajo del promedio histórico (484 mm, período diciembre - marzo). Sin embargo los determinantes de los buenos rendimientos obtenidos (3.612 Kg/ha) serían la combinación de buen stand de plantas a cosecha (276.629 plantas/ha), buena capacidad de almacenaje de agua (155 mm) y la contribución de casi 50 mm en torno al período crítico (Figura 5).



**Figura 5:** Duración de las etapas fenológicas del cultivo de soja y precipitaciones diarias registradas en la estación meteorológica de Dolores, desde inicio de barbecho hasta madurez fisiológica para el EXP.2.

## 4.2. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LOS EXPERIMENTOS

### 4.2.1. Estadística descriptiva de las variables

La chacra del EXP.1 se encuentra en un terreno variable topográficamente, con un rango de 12 m de altitud y una pendiente que alcanza valores máximos del orden del 7 % (Cuadro 4).

Los contenidos de P a siembra se encuentran dentro del rango de probabilidad de respuesta citados en la bibliografía (García, 2005), presentando un CV a presembrado coincidente con trabajos similares realizados en el litoral del país (Ahunchain y Klasseen 1990, Del Campo 2006, Terra et al. 2008). Se observa a su vez, como el CV de P aumenta a postcosecha, producto de las diferencias entre los niveles de fertilización utilizados (rango de 114 kg de  $P_2O_5$ ), combinado con las diferencias de extracción de éste nutriente en los diferentes lugares de la chacra.

La concentración promedio de K intercambiable estuvo por encima del rango de probabilidad de respuesta de 0,18 - 0,37 meq/100 g. de suelo citados por Baudes et al. (2009). Sin embargo, existieron zonas de la chacra con niveles de K en el rango de respuesta, probablemente debido a la historia de uso agrícola sin fertilización potásica y por las diferencias en extracción de los cultivos. El CV de éste nutriente para el sitio (23 %), estuvo algo por debajo a los promedios obtenidos en otras chacras de la zona (28 %) (Terra et al., 2008) y se considera bajo en relación a los reportados por Mulla y McBratney (2002) que lo clasifican como un nutriente muy variable (CV = 39 - 157 %).

**Cuadro 4:** Estadística descriptiva de los atributos del terreno medidos y calculados para el sitio del EXP.1.

Variables <sup>u</sup>	Media	Desvío estándar	CV	Máximo	Mínimo	Rango
P Bray 1 presiembra (ppm)	6,1	1,7	28,3	10,5	4,0	6,5
P Bray 1 postcosecha (ppm)	10,1	5,0	49,9	22,8	4,6	18,2
Ph (H <sub>2</sub> O) <sup>v</sup>	6,0	0,2	3,4	6,5	5,7	0,8
K (meq/100 grs) <sup>v</sup>	0,4	0,1	23,1	0,6	0,3	0,4
E <sub>Ca<sub>30</sub></sub> (mS/m)	28,9	7,7	26,7	47,6	11,7	35,8
E <sub>Ca<sub>90</sub></sub> (mS/m)	44,5	5,4	12,1	66,8	16,7	50,0
E <sub>Ca<sub>90/30</sub></sub>	1,7	0,4	25,6	3,0	0,8	2,2
Elevación (m)	59,3	2,9	4,9	65,1	53,0	12,1
Pendiente (%)	3,0	1,3	42,7	6,9	0,2	6,7
TWI	7,7	0,3	4,1	8,7	7,1	1,6
SPI	0,2	0,1	68,0	0,7	0,02	0,7
SLF	0,3	0,2	56,8	0,8	0,03	0,8

<sup>u</sup> E<sub>Ca<sub>30</sub></sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad; E<sub>Ca<sub>90</sub></sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad; E<sub>Ca<sub>90/30</sub></sub> = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm; TWI = Índice Topográfico de Humedad; SPI = Índice de Poder de Escorrentía; SLF = Factor Longitud de Pendiente.

<sup>v</sup> Datos generales de toda la chacra.

El sitio del EXP.2, presentó poca variación altimétrica, por lo que no fue posible calcular atributos topográficos primarios y secundarios debido a la insuficiente precisión vertical del GPS utilizado.

La E<sub>Ca<sub>30</sub></sub> en este experimento muestra elevados CV, lo que conjuntamente con los valores máximos alcanzados para ésta variable que estarían dados por altos contenidos de sales disueltas en superficie (1,1 meq de Na/100 suelo), permitirían exhibir la existencia de zonas con y sin blanqueales.

La concentración P promedio se encuentra dentro del rango de probabilidad de respuesta al agregado de fertilizante, aunque existieron zonas donde éste nutriente no sería limitante (máximo de 17 ppm). El CV para éste sitio estuvo

algo por encima al del EXP.1 y fue similar al reportado por Ahunchain y Klasseen (1990), Del Campo (2006), Terra et al. (2008) de 39 % para chacras de la zona. De todas formas los CV de la concentración de P en ambas chacras se encuentra por debajo del rango manejado por Mulla y McBratney (2002).

Aunque el K presenta una alta variación dentro del EXP.2, los valores mínimos estuvieron por encima de los niveles críticos de respuesta (Bautés et al., 2009), por lo tanto no existiría deficiencia de éste nutriente, estos valores encontrados serían producto de la escasa historia agrícola en esta chacra.

**Cuadro 5:** Estadística descriptiva de los atributos del terreno medidos y calculados para el sitio del EXP.2.

Variables <sup>u</sup>	Media	Desvío estándar	CV	Máximo	Mínimo	Rango
P Bray 1 presiembrera (ppm)	8,2	3,1	37,4	17,0	4,1	12,9
P Bray 1 postcosecha (ppm)	10,5	3,7	35,5	21,5	4,5	17,0
Ph (H <sub>2</sub> O) <sup>v</sup>	5,9	0,3	5,3	7,0	5,5	1,5
K (meq/100 grs) <sup>v</sup>	0,9	0,5	58,1	2,3	0,4	2,0
E <sub>Ca<sub>30</sub></sub> (mS/m)	22,6	10,9	48,2	62,9	10,6	52,3
E <sub>Ca<sub>90</sub></sub> (mS/m)	43,3	10,8	24,8	67,0	7,2	59,8
E <sub>Ca<sub>90/30</sub></sub>	2,3	0,7	31,3	3,9	0,2	3,7
Elevación (m)	19,6	1,0	5,0	21,7	17,9	3,9

<sup>u</sup> E<sub>Ca<sub>30</sub></sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad; E<sub>Ca<sub>90</sub></sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad; E<sub>Ca<sub>90/30</sub></sub> = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm.

<sup>v</sup> Datos generales de toda la chacra.

#### **4.2.2. Análisis de componentes del rendimiento**

En el EXP.1 se obtuvo un stand de plantas adecuado a V4 (Cuadro 6), aunque con un elevado CV (28,4 %), y una alta variabilidad de desarrollo de los individuos. Estas diferencias de desarrollo entre plantas (ver ANEXOS), podrían estar explicando el descenso de plantas desde V4 a cosecha.

El rendimiento estimado por el muestreo presenta elevada similitud con el rendimiento por el monitor, y ambos se encuentran dentro de los rangos de variación citados en la bibliografía para cultivos extensivos entre 8 - 29 % (Mulla y McBratney, 2002) y de soja entre 9 - 47 % (Kravchenko y Bullock, 2000).

**Cuadro 6:** Estadística descriptiva de los rendimientos y sus componentes obtenidos en el EXP.1.

	Media	Desvío estándar	CV	Máximo	Mínimo	Rango
No. plantas (plantas/ha) <sup>1</sup>	357.450	101.527	28,4	542.105	121.053	421.053
No. plantas (plantas/ha) <sup>2</sup>	181.360	50.283	27,7	278.509	89.912	188.597
Altura de plantas (cm)	64,1	6,1	9,4	80,6	54,8	25,8
Rendimiento (kg/ha) <sup>u</sup>	2.609	470	18,0	4.053	1.908	2.145
Rendimiento (kg/ha)	2.499	322	12,9	3.971	1.285	2.686
Vainas/m <sup>2</sup>	1.016	192	18,9	1.542	707	835
Granos/vaina	2,2	2,1	2,7	2,3	2,1	0,2
Peso de 1.000 granos (g)	142	10,0	6,8	162	113	48,0
Vainas/planta	59,6	17,2	28,9	108	30,8	77,5
Granos/planta	129	36,9	28,6	232	65,6	166
Vanas/planta	1,9	0,9	44,6	3,5	0,6	2,9
Granos/m <sup>2</sup>	2.205	443	20,1	3.446	1.458	1.988
Vanas/m <sup>2</sup>	32,7	14,7	44,9	66,1	11,0	54,1

<sup>u</sup> Rendimiento = Rendimiento de Soja 2007/2008 estimado por muestreo manual.

<sup>v</sup> <sup>1</sup> Plantas en estado vegetativo (V4), <sup>2</sup> Plantas a cosecha.

El número de plantas a V4 y cosecha en el EXP.2 se encuentra dentro de la población planteada como objetivo (Cuadro 7). Las vainas vanas son la variable con mayor CV y la relación grano/vainas la de menor variación al igual que en el EXP.1.

Los rendimientos obtenidos por estimación y medido en forma directa tuvieron una diferencia de 600 kg, lo que podría estar dado por la heterogeneidad de rendimiento de ésta chacra, la cantidad y/o distribución de muestras no fueron suficientes para lograr una estimación precisa.

**Cuadro 7:** Estadística descriptiva de los rendimientos y sus componentes obtenidos en el EXP.2.

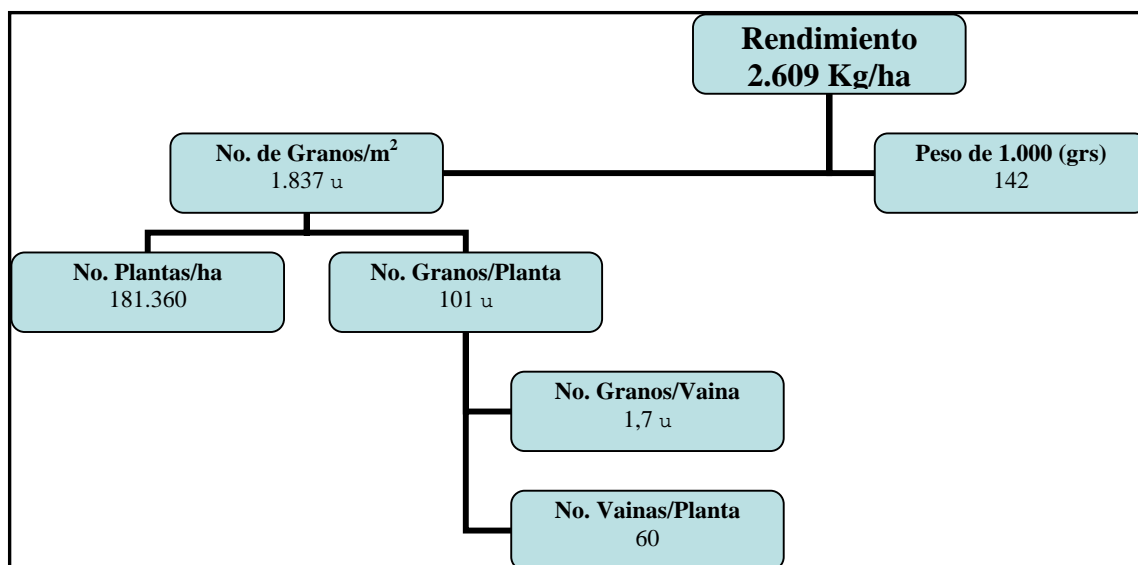
	Media	Desvío estándar	CV	Máximo	Mínimo	Rango
No. plantas (plantas/ha) <sup>1</sup>	318.378	48.081	15,1	473.684	194.737	278.947
No. plantas (plantas/ha) <sup>2</sup>	276.629	40.914	14,8	364.035	195.175	168.860
Altura de plantas (cm)	92,7	9,6	10,4	111	67,0	44,0
Rendimiento (kg/ha) <sup>u</sup>	3.007	698	23,2	4.184	1.316	2.868
Rendimiento (kg/ha)	3611	641	17,8	5486	1672	3640
Vainas/m <sup>2</sup>	1.127	240	21,4	1.577	563	1.013
Granos/vaina	2,3	0,1	5,1	2,6	2,0	0,6
Peso de 1.000 granos (g)	129	9,4	7,2	148	106	42,3
Vainas/planta	40,9	7,9	19,3	56,1	25,9	30,1
Granos/planta	88,9	18,6	20,9	136	54,3	81,7
Vanas/planta	1,7	0,6	32,8	2,9	0,5	2,4
Granos/m <sup>2</sup>	2.449	550	22,5	3.800	1.263	2.537
Vanas/m <sup>2</sup>	47,6	15,7	33,1	81,0	10,9	70,0

<sup>u</sup> Rendimiento = Rendimiento de Soja 2007/2008 estimado por muestreo manual.

<sup>v</sup> <sup>1</sup> Plantas en estado vegetativo (V4), <sup>2</sup> Plantas a cosecha.

Los componentes de rendimiento presentados en la Figura 6, muestran como la baja población del EXP.1, fue compensada en mayor medida por el número de granos por unidad de área ( $r = 0,7$  p-valor  $\leq 0,05$ ) y en menor medida por el peso de los mismos ( $r = 0,5$  p-valor  $\leq 0,05$ ). Esta compensación fue corroborada al no observarse correlación significativa entre el número plantas/ha con el rendimiento estimado (ver ANEXOS), ésta a su vez generó altos CV de plantas/ha, granos/planta y vainas/planta (Cuadro 6).





**Figura 6:** Árbol de componentes de rendimiento para el EXP.1.

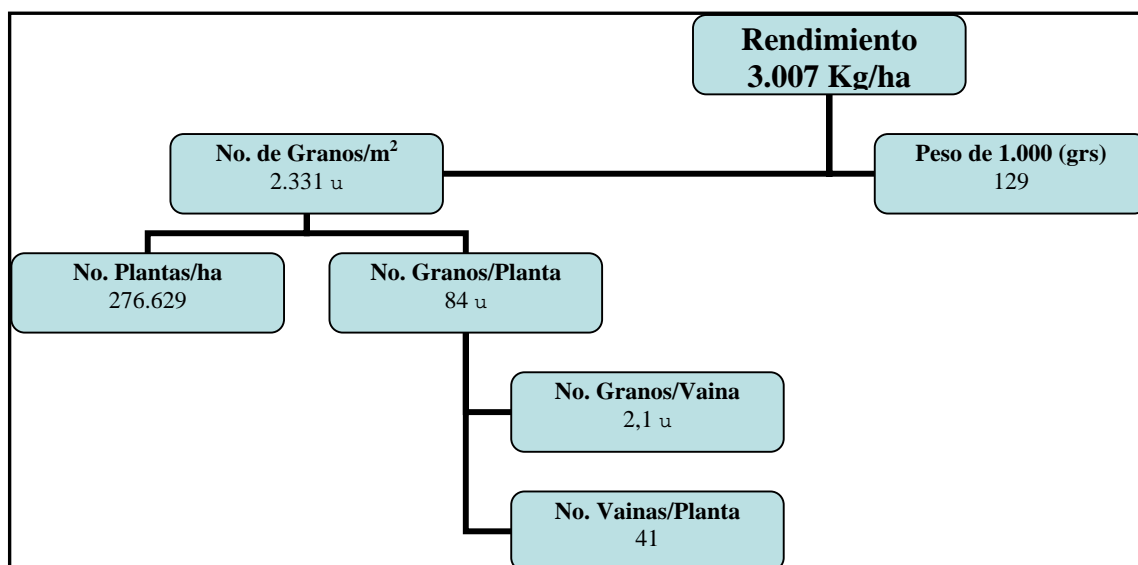
u Estimados a partir del Rendimiento (Kg/ha), No. de plantas/ha y Peso de 1.000 (grs) del muestreo manual.

En la Figura 7 el árbol de componentes del rendimiento para el EXP.2 muestra como el rendimiento obtenido dependió principalmente del número de plantas/ha, determinando un mayor número de granos por unidad de superficie.

En ambos sitios experimentales los rendimientos estimados a partir de sus componentes fueron similares, pero contruidos en forma diferente. El EXP.2 obtuvo una mejor población a cosecha que el EXP.1 (276.629 vs 181.360 plantas/ha), mientras que en el EXP.1, existe compensación por mayor cantidad de granos/planta que en el EXP.2 (101 vs 84 granos), además de un mayor peso de los granos obtenidos (142 vs 129 g/1.000 granos, respectivamente).

Los granos/m<sup>2</sup> y vainas/m<sup>2</sup> tuvieron una correlación entre si cercana a la unidad y estas se correlacionan en la misma magnitud con el rendimiento ( $r = 0,7$ ) para ambos sitios experimentales (ver ANEXOS). Esto muestra la

posibilidad de estimar rendimiento a partir de vainas/m<sup>2</sup>, utilizando la información del número de grano/vaina de la variedad utilizada en cada caso.

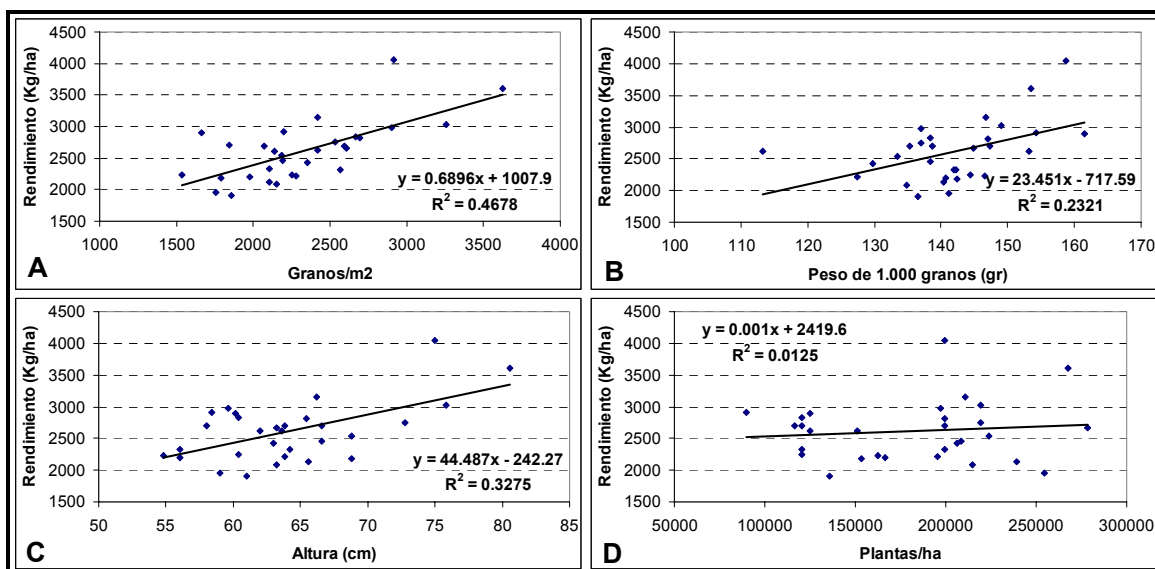


**Figura 7:** Árbol de componentes de rendimiento para el EXP.2.

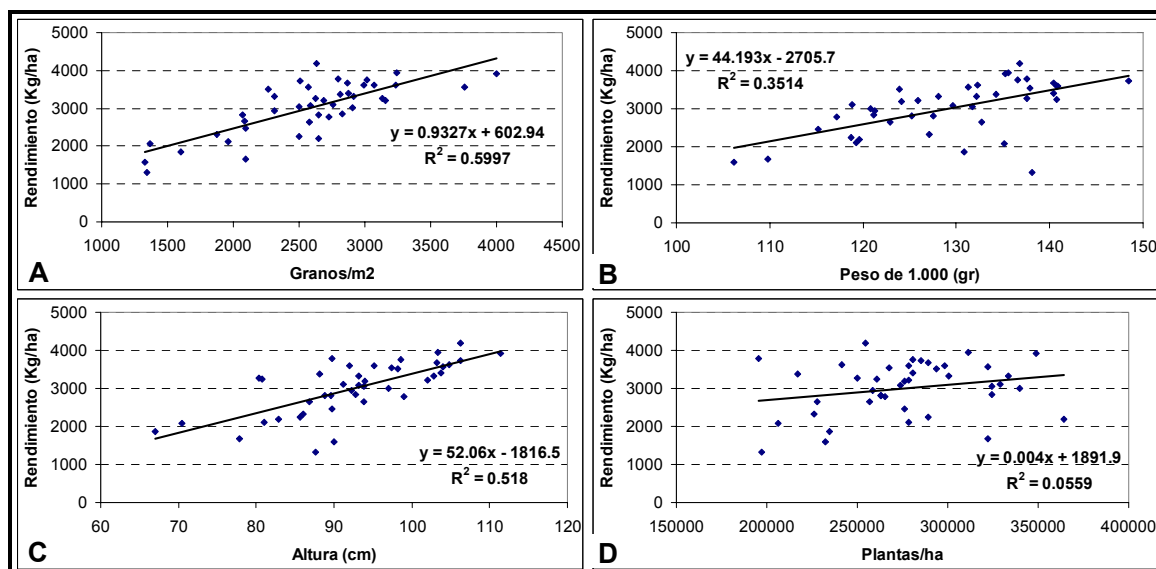
u Estimados a partir del Rendimiento (Kg/ha), No. de plantas/ha y Peso de 1.000 (grs) del muestreo manual.

Aunque la variación de rendimiento en ambos experimentos fue explicada por las mismas variables del cultivo (Figura 8 y 9), éstas lograron explicar entre un 10 - 20 % más de la variación en el EXP.2 que en el EXP.1. Se destaca el número de granos/m<sup>2</sup> como el componente que explica en mayor proporción el rendimiento. La segunda variable más relacionada al rendimiento fue la altura de plantas, que explicó hasta el 50 % de la variación en el EXP.2. Posiblemente esto se deba a un mayor desarrollo de las plantas en zonas de alto potencial productivo. El peso de 1.000 granos, en concordancia con Egli, citado por Giménez (2008), explican en menor medida la variación de rendimiento obtenido ( $R^2 = 0,2 - 0,3$ ). Cabe resaltar que no hubo relación entre el número de plantas/ha y el rendimiento. La compensación es una característica de esta

espacio y en particular de estos cultivares (indeterminados) que poseen mayor plasticidad.



**Figura 8:** Regresiones lineales simples de entre algunas variables medidas en el cultivo y el rendimiento de grano de soja para el EXP.1. **A)** Rendimiento (kg/ha) en función de Granos/m<sup>2</sup>. **B)** Rendimiento (kg/ha) en función de Peso de 1.000 granos. **C)** Rendimiento (kg/ha) en función de Altura de plantas (cm). **D)** Rendimiento (kg/ha) en función de Plantas/ha.



**Figura 9:** Regresiones lineales simples de entre algunas variables medidas en el cultivo y el rendimiento de grano de soja para el EXP.2. **A)** Rendimiento (kg/ha) en función de Granos/m<sup>2</sup>. **B)** Rendimiento (kg/ha) en función de Peso de 1.000 granos. **C)** Rendimiento (kg/ha) en función de Altura de plantas (cm). **D)** Rendimiento (kg/ha) en función de Plantas/ha.

### 4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

#### 4.3.1. Análisis geoestadístico

Para el EXP.1 el modelo teórico de semivarianza que más se ajustó para la mayoría de las variables fue el esférico (Cuadro 8). En éstas variables se encontró autocorrelación espacial fuerte dado que se obtuvo un buen ajuste ( $R^2 > 0,8$ ) y la relación pepita/umbral fue menor al 25 %. Plantas/ha y vainas/m<sup>2</sup> fueron las variables que presentaron los menores ajustes (0,7 y 0,6 respectivamente) y mayor proporción de efecto pepita, explicado por errores de medición y/o elección incorrecta de la escala de medición.

Los resultados obtenidos para P evidenciaron una fuerte autocorrelación espacial a presiembra y postcosecha en el EXP.1 para éste nutriente ( $R^2 = 0,8$  y  $0,9$  respectivamente). Esto permitiría predecir la concentración de P en puntos no muestreados para delinear un mapa del nutriente en la chacra que posibilite el manejo diferencial del mismo.

**Cuadro 8:** Parámetros de los semivariogramas para las variables medidas en el muestreo discreto (componentes de rendimiento y P Bray 1) obtenidos para el EXP.1

Parámetros <sup>u</sup>	Plantas/ha	Altura de Plantas (cm)	Rend. (Kg/ha)	Peso 1.000 (g)	Vainas/ m <sup>2</sup>	Granos/ m <sup>2</sup>	P Bray I (ppm)	P Bray F (ppm)
Modelo de ajuste	Exp.	Esf.	Exp.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.	Esf.
Co	6,8 E+8	0,1	100	9,1	16.600	100	0,3	2,4
Meseta	3,2 E+9	51,2	269.600	108	101.910	177.400	2,7	31,6
Rango	271	379	109	128	911	69,8	196	269
Rel Co/(Co+C)	0,2	≤ 0,01	≤ 0,0001	0,1	0,2	≤ 0,0001	0,1	0,1
R <sup>2</sup>	0,7	0,9	0,9	0,8	0,6	0,8	0,8	0,9
SRC	3,6 E+18	128	4,7 E+9	1.759	2,9 E+9	2,6 E+9	1,1	62,7

<sup>u</sup> Co = Varianza de discontinuidad espacial “efecto pepita” (Nugget effect) o ruido espacialmente no correlacionado ; C = Varianza estructural o espacialmente dependiente; Rango = Valor de la correlación espacial, punto en la distancia a partir del cual los datos no tienen influencia en el punto de comparación; Meseta o Umbral = C + Co Representa donde las varianzas de las diferencias son máximas; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; SRC = Suma residual de los cuadrados; P Bray I = Fósforo Bray 1 presiembra; P Bray F = Fósforo Bray 1 postcosecha.

Para el EXP.2 (Cuadro 9), se obtuvieron buenos ajustes para la mayoría de las variables medidas, con la excepción de plantas/ha y P a cosecha. En plantas/ha el ajuste del modelo de semivarianza es alto ( $R^2 = 0,9$ ), en cambio presenta estructura espacial media producto de un efecto pepita elevado. El P a cosecha obtuvo un semivariograma con escaso ajuste ( $R^2 = 0,1$ ) con alta proporción de efecto pepita, ésta sería la variable con menor estructura espacial medida.

Los rangos del semivariograma mostraron diferencias entre chacras donde se observa rangos menores para las variables medidas en el EXP.2, esto estaría indicando menor dependencia espacial en las variables para este experimento, que tiene como antecedente largos períodos de praderas permanentes. En éste sentido Pravia et al. (2009) encontraron en chacras que venían de largos períodos de pradera, las variables K, P y COS presentaban menor estructura espacial que chacras con rotación larga de cultivos.

**Cuadro 9:** Parámetros de los Semivariogramas para las variables medidas en el muestreo discreto (componentes de rendimiento y P Bray 1) obtenidos para el EXP.2

	Plantas/ha	Altura de Plantas (cm)	Rend. (Kg/ha)	Peso 1.000 (g)	Vainas/ m <sup>2</sup>	Granos/ m <sup>2</sup>	P Bray I (ppm)	P Bray F (ppm)
Modelo de ajuste	Esf.	Esf.	Esf.	Exp.	Esf.	Exp.	Esf.	Exp.
Co	8,3 E+8	0,1	1.000	0,1	100	1.000	≤ 0,01	12,2
Meseta	2,7 E+9	93,9	533.900	131	54.010	360.900	10,5	24,3
Rango	393	68,0	101	77,6	65,4	37,3	56,5	510
Rel Co/(Co+C)	0,3	≤ 0,001	≤ 0,01	≤ 0,001	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,001	0,5
R <sup>2</sup>	0,9	0,8	0,9	1,0	0,8	0,9	0,7	0,1
SRC	1,3 E+17	2.741	3,6 E+10	200	5,9 E+8	8,8 E+8	25,7	33,4

u Co = Varianza de discontinuidad espacial “efecto pepita” (Nugget effect) o ruido espacialmente no correlacionado ; C = Varianza estructural o espacialmente dependiente; Rango = Valor de la correlación espacial, punto en la distancia a partir del cual los datos no tienen influencia en el punto de comparación; Meseta o Umbral = C + Co Representa donde las varianzas de las diferencias son máximas; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinación; SRC = Suma residual de los cuadrados; P Bray I = Fósforo Bray 1 presiembra; P Bray F = Fósforo Bray 1 postcosecha.

Si bien la mayoría de las variables presentaron estructura espacial fuerte, los coeficientes de determinación obtenidos de la validación cruzada (estimados

vs medidos) fueron en su mayoría bajos, lo que sugiere que para estas variables no se podría realizar mapas confiables a partir de esta cantidad y distribución de muestras.

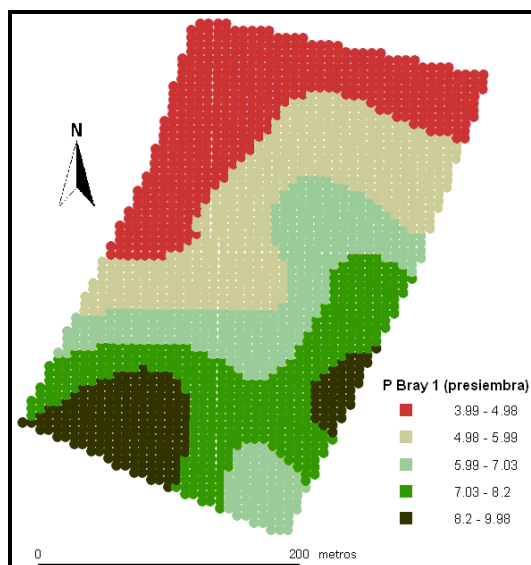
Sin embargo, en ambos experimentos, en base a los resultados obtenidos de la validación cruzada, hay algunas variables en las que sería posible realizar una interpolación confiable para obtener un mapa continuo.

En el EXP.1 las variables más adecuadas para la interpolación fueron: altura de plantas, fósforo disponible a presiembra y postcosecha que presentaron un  $R^2$  de 0,5, 0,6 y 0,8, con un error estándar de 4,1 cm, 1,1 y 2,0 ppm en un rango de variación de 25,8 cm, 6,5 y 18,2 ppm respectivamente (Cuadro 10). A los efectos de la continuidad del análisis se interpoló solamente el P a presiembra (Figura 10), con el objetivo de relacionarlo con la productividad y las otras variables edáficas y topográficas.

**Cuadro 10:** Validación cruzada para los diferentes métodos de interpolación basados en los semivariogramas teóricos ajustados para el EXP.1.

Validación cruzada	Plantas/ha	Altura de Plantas (cm)	Rend (Kg)	Peso 1.000 (g)	Vainas/m <sup>2</sup>	Granos/m <sup>2</sup>	P Bray I (ppm)	P Bray F (ppm)
$r^2$	1,1	1,1	0,8	0,6	≤ 0,1	0,4	1,0	1,1
EE	0,6	0,2	0,5	0,3	0,5	0,9	0,2	0,1
$R^2$	0,1	0,5	0,1	0,2	≤ 0,001	≤ 0,01	0,6	0,8
Intercepto	-27.032	- 9,3	455	56	981	1.368	≤ 0,01	- 0,8
Predicción EE	46.787	4,1	449	8,9	192	441	1,1	2,0

u  $r^2$  = Coeficiente de regresión; EE = Error estándar;  $R^2$  Coeficiente de determinación; P Bray I = Fósforo Bray 1 presiembra; P Bray F = Fósforo Bray 1 postcosecha.



**Figura 10:** Mapa interpolado de P disponible a presiembra a partir de muestreo discreto para el EXP.1.

En el EXP.2, las variables aptas para ser interpoladas fueron: altura de plantas y rendimiento con un  $R^2$  de 0,4 y 0,6, y un error estándar de 7,4 cm y 468 kg/ha respectivamente (Cuadro 11). En éste sitio la validación cruzada reveló que no era confiable la interpolación del contenido de P.

**Cuadro 11:** Validación cruzada para los diferentes métodos de interpolación basados en los semivariogramas teóricos ajustados para el EXP.2.

Validación cruzada	Plantas/ha	Altura de Plantas (cm)	Rend (Kg)	Peso 1.000 (g)	Vainas/m <sup>2</sup>	Granos/m <sup>2</sup>	P Bray I (ppm)	P Bray F (ppm)
$r^2$	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	1,1	0,7
EE	0,3	0,2	0,1	0,3	0,2	0,3	0,6	0,3
$R^2$	0,2	0,4	0,6	0,2	0,3	0,2	0,1	0,1
Intercepto	21.338	0,5	171	9,3	153	538	-0,7	3,4
Predicción EE	37.233	7,4	468	8,3	199	515	2,9	3,5

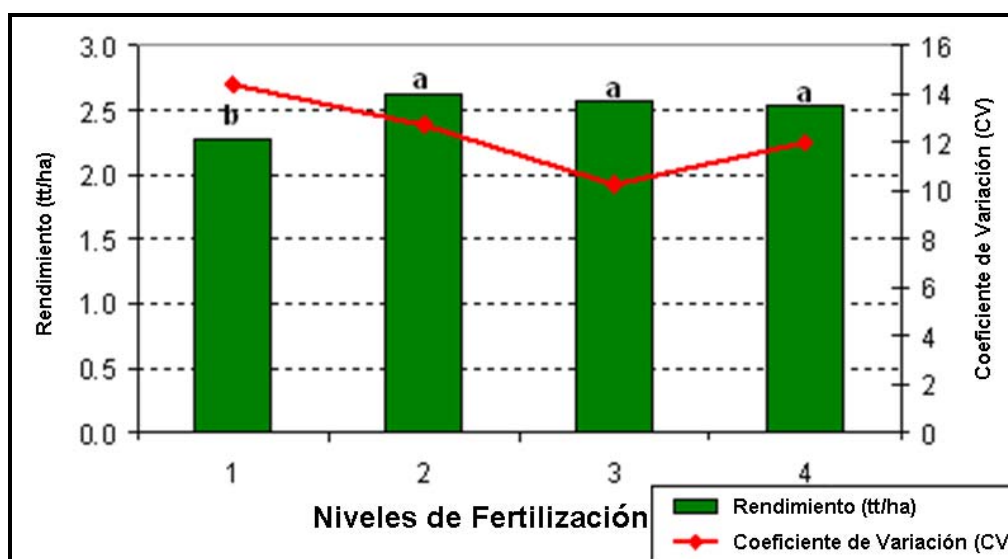
u  $r^2$  = Coeficiente de regresión; EE = Error estándar;  $R^2$  Coeficiente de determinación; P Bray I = Fósforo Bray 1 presiembra; P Bray F = Fósforo Bray 1 postcosecha.



### 4.3.2. Análisis estadístico clásico

#### 4.3.2.1. Análisis de varianza

En el EXP.1 el modelo propuesto para medir el efecto de los 4 niveles de fertilidad sobre el rendimiento fue significativo ( $p$ -valor  $\leq 0,01$ ). El rendimiento del testigo fue un 12 % inferior al resto de los niveles de fertilidad, no existiendo diferencias entre los niveles restantes. El mayor CV observado para el testigo podría estar indicando que con la fertilización se está eliminando un factor de variación de rendimiento (Figura 11).



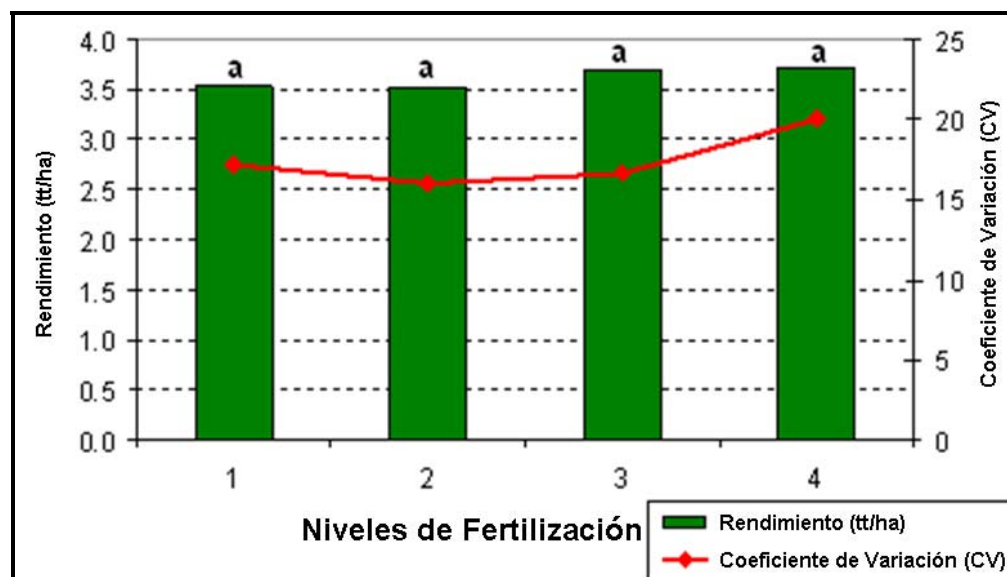
**Figura 11:** Efecto de diferentes niveles de fertilidad sobre el rendimiento de soja y CV en el EXP.1.

u Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), DMS = 130 kg/ha.

Nivel 1 = 0 kg/ha, Nivel 2 = 95 kg/ha, Nivel 3 = 190 kg/ha, Nivel 4 = 285 kg/ha de  $N_{(7)} - P_2O_5_{(40)} - K_2O_{(0)} - S_{(5)}$ .

La productividad del EXP.2 fue un 30 % mayor al EXP.1, sin embargo no se observaron diferencias significativas de rendimiento entre los diferentes niveles

de fertilidad impuestos (Figura 12). La ausencia de respuesta en éste sitio podría estar relacionado a los mayores niveles iniciales de P (8 ppm), sumado a la historia de largos períodos de praderas que determinarían condiciones favorables para la absorción de P (estructura, actividad de microorganismos, etc).



**Figura 12:** Efecto de diferentes niveles de fertilidad sobre el rendimiento de soja y CV en el EXP.2.

α Letras distintas indican diferencias significativas ( $p \leq 0,05$ ), DMS = 359 kg/ha.

Nivel 1 = 0 kg/ha, Nivel 2 = 60 kg/ha, Nivel 3 = 120 kg/ha, Nivel 4 = 180 kg/ha de  $N_{(10)} - P_2O_5_{(50)} - K_2O_{(0)} - S_{(1)}$ .

#### 4.3.2.2. Análisis de correlaciones

Los factores edáficos fueron los más correlacionados con los rendimientos de soja en el EXP.1 (Cuadro 12). Las variables correlacionadas positivamente con la productividad en orden descendiente fueron: relación  $E_{Ca_{90/30}}$ ,  $E_{Ca_{30-90}}$ ,

rendimiento de maíz (zafra 2006/07), niveles de fertilidad y SPI (única variable topográfica). Las variables con correlación negativa fueron:  $ECa_{30}$ , P a presiembra y postcosecha.

El análisis del rendimiento de cultivos previos a nuestro experimento en éste sitio muestra otras tendencias. El rendimiento de trigo se correlacionó en mayor medida con las variables topográficas, mostrando correlación positiva con maíz (ambas gramíneas), P a presiembra, agua potencialmente disponible, TWI y elevación, y negativa con  $ECa_{90}$ ,  $ECa_{30-90}$ , SPI, SLF y pendiente. Rendimiento de maíz se correlacionó positivamente con rendimiento de soja (ambos cultivos de verano), rendimiento de trigo,  $ECa_{90/30}$  y TWI, y negativamente con  $ECa_{30}$ , SLF y pendiente. Por lo tanto los factores topográficos serían los que afectan en mayor medida los rendimientos de trigo (Aunchain y Klasseen, 1990) y maíz (Kravchenko y Bullock, 2000), influyendo de igual manera en ambos cultivos. Zonas planas de acumulación de sedimentos serían calificadas como zonas de alto potencial productivo, mientras que zonas de mayor riesgo de erosión fueron consideradas de bajo potencial (Timlin et al. 1998, Kravchenko y Bullock 2000, Ciha, Halvorson y Doll, Afyuni et al., Jaynes et al., citados por Kaspar et al. 2004).

La  $ECa_{30}$  y  $ECa_{30-90}$  se correlacionan fuerte y negativamente. Cuando las  $ECa$  fueron elevadas en superficie, en profundidad fueron bajas, lo que podría estar explicado por profundidad de suelo, cercanía al material madre (Formación Fray Bentos). Niveles elevados de  $CaCO_3$  y/o Na en superficie estarían explicando las altas  $ECa_{30}$ , y la cercanía al horizonte C la baja  $ECa$  en profundidad (entre 30 y 90 cm), las zonas que cumplen con estas características serían las consideradas zonas de bajo potencial. En tal sentido, estas zonas se pueden reconocer según ubicación topográfica ya que  $ECa_{30-90}$

se correlaciona negativamente y  $ECa_{30}$  positivamente con elevación (Johnson et al. 2003, Mueller et al. 2003).

El P a presiembra estuvo correlacionado negativamente tanto con elevación como con rendimiento de soja, esto estaría explicado por la mayor extracción de este nutriente en las zonas de alto potencial de rendimiento para cultivos de verano (Cox et al., 2003). Concordando con la bibliografía, la elevación presentó correlación con la mayoría de las variables tanto edáficas como topográficas (Moore et al., 1993), la correlación positiva entre elevación y TWI estaría advirtiendo la presencia de zonas altas con terrenos planos.

**Cuadro 12:** Coeficientes de correlación de Pearson para las diferentes variables medidas en el EXP.1 (n = 48).

Variables	Soja	Trigo	Maíz	E <sub>Ca</sub> <sub>30</sub>	E <sub>Ca</sub> <sub>90</sub>	E <sub>Ca</sub> <sub>90/30</sub>	E <sub>Ca</sub> <sub>30-90</sub>	P Bray 1 i	P Bray 1 f	Agua	TWI	SPI	SLF	Pendiente	Elevación
Trigo	NS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Maíz	0,46 **	0,53 ***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E <sub>Ca</sub> <sub>30</sub>	-0,60 ***	NS	-0,56 ***	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E <sub>Ca</sub> <sub>90</sub>	NS	-0,50 ***	NS	NS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E <sub>Ca</sub> <sub>90/30</sub>	0,70 ***	NS	0,44 **	-0,92 ***	0,33 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
E <sub>Ca</sub> <sub>30-90</sub>	0,46 **	-0,35 *	NS	-0,57 ***	0,84 ***	0,77 ***	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P Bray 1 i	-0,45 **	0,46 ***	NS	0,63 ***	-0,31 *	-0,70 ***	-0,60 ***	-	-	-	-	-	-	-	-
P Bray 1 f	-0,40 **	-0,17 **	-0,51***	0,86 ***	NS	-0,77 ***	-0,58 ***	0,54 ***	-	-	-	-	-	-	-
Agua	NS	0,33*	NS	0,29 *	NS	NS	NS	0,49 ***	0,38 **	-	-	-	-	-	-
TWI	NS	0,55 ***	0,41**	-0,40 **	-0,33 *	NS	NS	NS	-0,46 ***	NS	-	-	-	-	-
SPI	0,43 **	-0,58 ***	NS	NS	0,39 **	0,37 **	0,41 **	-0,56 ***	NS	NS	-0,54 ***	-	-	-	-
SLF	NS	-0,66 ***	-0,39**	NS	0,41 **	NS	NS	-0,39 **	NS	NS	-0,75 ***	0,93 ***	-	-	-
Pendiente	NS	-0,47 ***	-0,35*	0,35 **	0,30 *	NS	NS	-0,18 ***	0,39 **	NS	-0,90 ***	0,53 ***	0,74 ***	-	-
Elevación	NS	0,60 ***	NS	0,29 *	-0,29 *	-0,42 **	-0,39 ***	0,87 ***	NS	0,48 ***	0,38 ***	-0,65 ***	-0,56 ***	-0,32 *	-
Trat	0,38 **	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

u Trigo = Rendimiento de Trigo 2006; Maíz = Rendimiento de Maíz 2006/2007; Soja = Rendimiento de Soja 2007/2008; E<sub>Ca</sub><sub>30</sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad; E<sub>Ca</sub><sub>90</sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad; E<sub>Ca</sub><sub>90/30</sub> = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm; E<sub>Ca</sub><sub>30-90</sub> = Electroconductividad aparente entre 30 y 90 cm de profundidad; P Bray 1 i = Fósforo Bray 1 presembrado; P Bray 1 f = Fósforo Bray 1 postcosecha; Agua = Agua potencialmente disponible en el suelo; TWI = Índice Topográfico de Humedad; SPI = Índice de Poder de Escorrentía; SLF = Factor Longitud de Pendiente; Trat = Tratamientos (niveles de fertilidad).

v Diferencias significativas: \* = Diferencia significativa p ≤ 0,05; \*\* = Diferencia significativa p ≤ 0,01; \*\*\* = Diferencia significativa p ≤ 0,001; NS = Sin diferencia significativa p ≤ 0,05.

En el EXP.2 se observaron correlaciones pobres entre las variables edáficas y el rendimiento de soja (Cuadro 13). La variable más correlacionada con la productividad fue la ECa<sub>30</sub>. Se observó además correlación negativa con la capacidad potencial de almacenaje de agua del suelo, dado que el suelo más profundo es el Brunosol alcalino que presentó altos niveles de CaCO<sub>3</sub> y/o Na y por lo tanto se comportó como una zona de bajo potencial productivo. Se destaca a su vez la fuerte correlación del blanqueal con ECa<sub>30</sub> y ECa<sub>90/30</sub> lo que permitió realizar posteriormente la delimitación de blanqueales con esta herramienta.

**Cuadro 13:** Coeficientes de correlación de Pearson para las diferentes variables medidas en el EXP.2 (n = 48).

Variables <sup>u</sup>	Rendimiento	ECa <sub>30</sub>	ECa <sub>90</sub>	ECa <sub>30-90</sub>	ECa <sub>90/30</sub>	Blanqueal
ECa <sub>30</sub>	-0,37 **	-	-	-	-	-
ECa <sub>90</sub>	NS	NS	-	-	-	-
ECa <sub>30-90</sub>	NS	NS	0,91 ***	-	-	-
ECa <sub>90/30</sub>	NS	- 0,85 ***	NS	0,55 ***	-	-
Blanqueal	NS	0,80 ***	NS	- 0,45 ***	- 0,85 ***	-
Agua	-0,28 *	0,48 ***	NS	NS	- 0,47 ***	0,56 ***
Trat	NS	NS	NS	NS	NS	NS

<sup>u</sup> Rendimiento = Rendimiento de Soja 2007/2008; ECa<sub>30</sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad; ECa<sub>90</sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad; ECa<sub>90/30</sub> = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm; ECa<sub>30-90</sub> = Electroconductividad aparente entre 30 y 90 cm de profundidad; Agua = Agua potencialmente disponible en el suelo; Trat = Tratamientos (niveles de fertilidad).

<sup>v</sup> Diferencias significativas: \* = Diferencia significativa  $p \leq 0,05$ ; \*\* = Diferencia significativa  $p \leq 0,01$ ; \*\*\* = Diferencia significativa  $p \leq 0,001$ ; NS = Sin diferencia significativa  $p \leq 0,05$ .

#### 4.3.2.3. Análisis de regresión múltiple

En el EXP.1 las variables edáficas hicieron la mayor contribución para explicar la variación del rendimiento de soja, destacándose la  $ECa_{90/30}$  como la primer variable seleccionada que explicó por si misma el 50 % de la variación ( $p$ -valor  $\leq 0,01$ ). Se observó al mismo tiempo un efecto de los tratamientos sobre el rendimiento, explicando 11,3 % adicional ( $p$ -valor  $\leq 0,01$ ). La única variable topográfica incluida en el modelo es el SPI que realizó una contribución modesta al  $R^2$  total (0,02). Con éstas variables se explicó el 73,2 % de la variación de rendimiento (Fórmula 16). Kravchenko y Bullock (2000) reunieron para 8 chacras mapas generados por monitores de rendimiento desde 1994 hasta 1997 encontrando que la relación entre variables edáficas y topográficas y el rendimiento variaron entre 18 y 68 % para el cultivo de soja.

$$\text{Soja (ton/ha)} = 1,54 + 0,38 (ECa_{90/30}) + 0,0007 (\text{Trat (Kg fertilizante/ha)}) + 0,31 (\text{SPI}) + 0,002 (\text{Agua (mm)})$$

$$R^2 = 0,73 \quad (16)$$

u Soja = Rendimiento de Soja 2007/2008;  $ECa_{90/30}$  = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm; Trat = Tratamientos (niveles de fertilidad); SPI = Índice de Poder de Escorrentía; Agua = Agua potencialmente disponible en el suelo.

En éste sitio la variación del rendimiento de maíz previo estuvo explicada en un 41 % por dos de las variables medidas, una edáfica y otra topográfica. Ambas variables afectaron negativamente el rendimiento, siendo la  $ECa_{30}$  la que afectó en mayor medida ( $R^2 = 0,31$ ) (Fórmula 17). Para maíz la relación entre variables edáficas y topográficas y el rendimiento varió entre 13 y 78 % (Kravchenko y Bullock, 2000).

$$\text{Maíz (ton/ha)} = 6,29 - 0,06 (\text{ECa}_{30} \text{ (mS/m)}) - 1,53 (\text{SLF})$$

$$R^2 = 0,41 \quad (17)$$

u Maíz = Rendimiento de Maíz 2006/2007;  $\text{ECa}_{30}$  = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad; SLF = Factor Longitud de Pendiente.

La variación del rendimiento de trigo previo (Fórmula 18) a diferencia de los cultivos anteriores, estuvo explicado mayoritariamente por las variables topográficas. De las variables más correlacionadas que se ingresaron al programa estadístico, SLF, agua potencialmente disponible,  $\text{ECa}_{90}$  y SPI, explicando el 65 % de la variación de rendimiento, constituido por  $R^2$  parciales de 0,43; 0,11; 0,05 y 0,04 respectivamente.

$$\text{Trigo (ton/ha)} = 3,01 - 0,02 (\text{ECa}_{90} \text{ (mS/m)}) + 1,17 (\text{SPI}) - 1,87 (\text{SLF}) + 0,002 (\text{Agua (mm)})$$

$$R^2 = 0,65 \quad (18)$$

u Trigo = Rendimiento de Trigo 2006;  $\text{ECa}_{90}$  = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad; SPI = Índice de Poder de Escorrentía; SLF = Factor Longitud de Pendiente; Agua = Agua potencialmente disponible en el suelo.

En resumen los cultivos incluyeron en sus modelos para explicar la variación de rendimiento a diferentes variables medidas, la ECa figura calculada y/o medida de distinta manera, y además éstas afectaron la variación del rendimiento en forma diferente. Los rendimientos de soja y trigo fueron afectados por SPI, mientras que los rendimientos de maíz y trigo fueron afectados en forma similar por SLF. Estos resultados exhiben la dificultad de pretender explicar la variación de rendimiento para los tres cultivos con los resultados obtenidos para un cultivo en particular, en función de las variables medidas (Kravchenko y Bullock 2000, Kaspar et al. 2003).



En el EXP.2 la única variable que explicó el rendimiento de soja (Fórmula 19) fue la  $ECa_{30}$  con un 15 % ( $p$ -valor  $\leq 0,01$ ) lo que estaría indicando que éste se determina por interacciones de variables y/o alguna variable no medida. El modelo propuesto para éste ensayo a diferencia del anterior no permitiría predecir el rendimiento de soja en los diferentes lugares de la chacra.

$$\text{Soja (ton/ha)} = 3,99 - 0,02 (ECa_{30} \text{ (mS/m)})$$

$$R^2 = 0,15 \quad (19)$$

<sup>u</sup> Soja = Rendimiento de Soja 2007/2008;  $ECa_{30}$  = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad.

#### 4.3.2.4. Análisis de clusters

El análisis de cluster para el EXP.1 utilizando las variables más correlacionadas con el rendimiento de soja dentro del área experimental, dio como resultado que seis fue el número óptimo para agrupar las celdas en función de los índices FPI y NCE. Los rendimientos sometidos a un análisis de medias identificó que los clusters 2 y 3 presentaron rendimientos significativamente superiores al resto ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ). Para los dos clusters de mayores rendimientos las principales características que los diferencian son:  $ECa_{90/30}$  altas (promedio 2,2) y  $ECa_{30}$  bajas (promedio 21,5 y 21,8 mS/m respectivamente), teniendo alguna relación con bajos niveles de P a presiembrá (promedio 4,6 y 5,3 ppm) y postcosecha (promedio 7,6 y 6,7 ppm respectivamente) (Cuadro 14).

**Cuadro 14:** Promedio de variables medidas y calculadas dentro del área experimental para los diferentes clusters en el EXP.1.

Variables <sup>u</sup>	Clusters					
	1	2	3	4	5	6
Rendimiento (kg/ha)	2475 (b)	2700 (a)	2862 (a)	2471 (b)	2360 (b)	2459 (b)
EC <sub>30</sub> (mS/m)	32,1	21,5	21,8	27,8	41,3	29,0
EC <sub>90</sub> (mS/m)	49,5	45,7	46,3	43,1	39,9	44,1
EC <sub>90/30</sub>	1,7	2,2	2,2	1,6	1,0	1,6
EC <sub>30-90</sub> (mS/m)	59,3	59,2	60,2	51,7	39,1	52,7
Agua (mm)	76,4	75,0	128,3	86,9	139	123
P presiembra (ppm)	5,6	4,6	5,3	6,3	7,6	8,1
P postcosecha (ppm)	11,2	7,6	6,7	9,0	17,5	10,0
Elevación (m)	56,8	55,4	58,5	60,2	60,0	62,6
Pendiente (%)	3,8	3,2	3,9	2,5	4,0	2,1
TWI	7,4	7,6	7,5	7,9	7,4	8,0
SPI	0,3	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1
SLF	0,4	0,3	0,5	0,2	0,4	0,2

<sup>u</sup> Rendimiento = Rendimiento de Soja 2007/2008; ECa<sub>30</sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad; ECa<sub>90</sub> = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad; ECa<sub>90/30</sub> = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm; ECa<sub>30-90</sub> = Electroconductividad aparente entre 30 y 90 cm de profundidad; P presiembra = Fósforo Bray 1 presiembra; P postcosecha = Fósforo Bray 1 postcosecha; Agua = Agua potencialmente disponible en el suelo; TWI = Índice Topográfico de Humedad; SPI = Índice de Poder de Escorrentía; SLF = Factor Longitud de Pendiente..

<sup>v</sup> Diferencias significativas  $p \leq 0,05$ .

Se podría sintetizar en función del análisis clusters realizado para el EXP.1 que, el sitio experimental presentaría dos grupos de celdas que tendrían requerimientos de manejo diferentes, una de alto potencial productivo (clusters 2 y 3) con las características anteriormente mencionadas y el resto del ensayo.

Para el EXP.2 debido a que sólo una variable presentó correlación y esta fue débil, es que se incluyeron todas las variables dentro análisis de clusters para el área experimental. Las celdas clasificadas como 4 presentaron los mayores rendimiento de soja con diferencias significativas respecto a 1 y 2 ( $p$ -valor  $\leq 0,05$ ). Éstas celdas de mayores rendimientos se corresponden casi en su totalidad por el suelo 1 (Brunosol Típico profundo) (ver MAPAS RELEVANTES) y además presentan bajas  $ECa_{30}$  (promedio 15,4 mS/m) y altas  $ECa_{90/30}$  (promedio 2,7). Las celdas clasificadas como 1 y 2 se corresponden con el blanqueal y proximidades donde se destacan altas  $ECa_{30}$  (promedio 30,4 y 43,2 mS/m) y bajas  $ECa_{90/30}$  (promedio 1,0 y 1,2 respectivamente). Las celdas asignadas al cluster 3 presentaron valores intermedios de rendimiento,  $ECa_{30}$  y  $ECa_{90/30}$  y altos valores de  $EC_{30-90}$  (promedio 62,8 mS/m) (Cuadro 15).

**Cuadro 15:** Promedio de todas las variables medidas y calculadas dentro del área experimental para los diferentes clusters en el EXP.2.

Variables <sup>u</sup>	Clusters			
	1	2	3	4
Rendimiento (kg/ha)	3369 (b)	3339 (b)	3501 (ab)	3837 (a)
$EC_{30}$ (mS/m)	30,4	43,2	22,2	15,4
$EC_{90}$ (mS/m)	28,7	44,3	48,2	40,2
$EC_{90/30}$	1,0	1,2	2,4	2,7
$EC_{30-90}$ (mS/m)	27,8	44,7	62,8	54,2
Agua (mm)	160	153	156	140

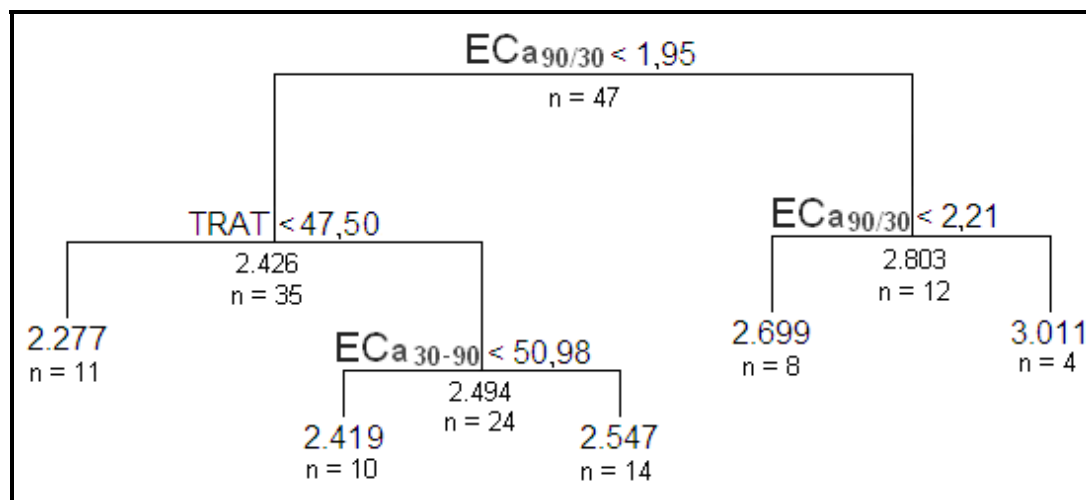
<sup>u</sup> Rendimiento = Rendimiento de Soja 2007/2008;  $ECa_{30}$  = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad;  $ECa_{90}$  = Electroconductividad aparente entre 0 y 90 cm de profundidad;  $ECa_{90/30}$  = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm;  $ECa_{30-90}$  = Electroconductividad aparente entre 30 y 90 cm de profundidad.

<sup>v</sup> Diferencias significativas  $p \leq 0,05$ .

En función al análisis de clusters, el área del EXP.2 se podría manejar con tres zonas diferentes (ver MAPAS RELEVANTES), 1) zona de alto potencial productivo perteneciente al suelo 1 (cluster 4), 2) zona de bajo potencial que se correspondería con el blanqueal y su proximidad (clusters 1 y 2) y 3) el resto del área experimental (cluster 3).

#### **4.3.2.5. Análisis de árboles de clasificación y regresión (CART)**

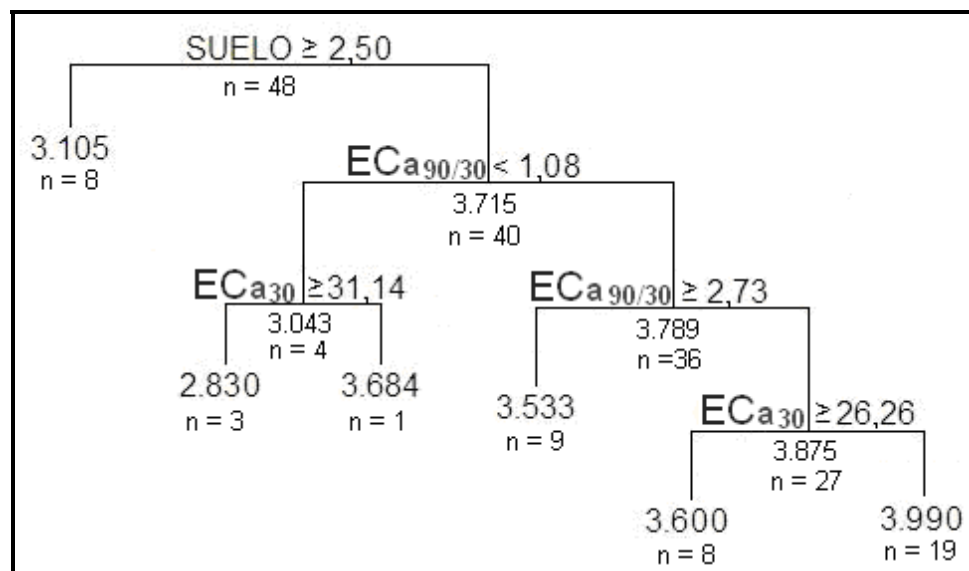
En la Figura 13 se incluye todas las variables medidas para EXP.1, la  $ECa_{90/30}$  es la primera variable de clasificación, donde se discrimina 12 celdas de alto rendimiento (promedio 2.803 kg/ha) y 35 celdas de bajo rendimiento (promedio 2.426 kg/ha). Con  $ECa_{90/30} < 1,9$  se observa un efecto de la fertilización. La clasificación de rendimientos en función de la variable  $ECa_{30-90}$  no sería útil desde el punto de vista agronómico dado que separa celdas con promedios similares (diferencia 128 kg/ha de promedio). Estos resultados del árbol de regresión son coincidentes con los obtenidos por las correlaciones y regresiones múltiples.



**Figura 13:** Árbol de clasificación y regresión generado en el software R versión 2.10.0 con el promedio de la totalidad de las variables medidas en el área experimental del EXP.1.

<sup>u</sup> ECa<sub>90/30</sub> = Relación de Electroconductividad aparente entre 90 y 30 cm; ECa<sub>30-90</sub> = Electroconductividad aparente entre 30 y 90 cm de profundidad; TRAT = Tratamientos (niveles de fertilidad).

En el EXP.2 (Figura 14), la segmentación inicial es por suelos, donde el suelo 3 (Brunosol Éutrico Típico con planicie deprimida) presenta menor rendimiento que los otros dos. Posteriormente el rendimiento se clasifica en función de la ECa<sub>90/30</sub>, donde relaciones muy bajas asociadas a elevadas ECa<sub>30</sub>, el rendimiento es bajo (3.043 kg/ha). Con ECa<sub>90/30</sub> moderadas (entre 1,1 y 2,7) se obtienen los mayores rendimientos y éste se discrimina en función de la ECa<sub>30</sub>, valores menores a 26,3 mS/m determina mayores rendimientos. Ésta agrupación de celdas coincide con los clusters generados dentro del ensayo donde se identifican 2 zonas contrastantes (ver MAPAS RELEVANTES).

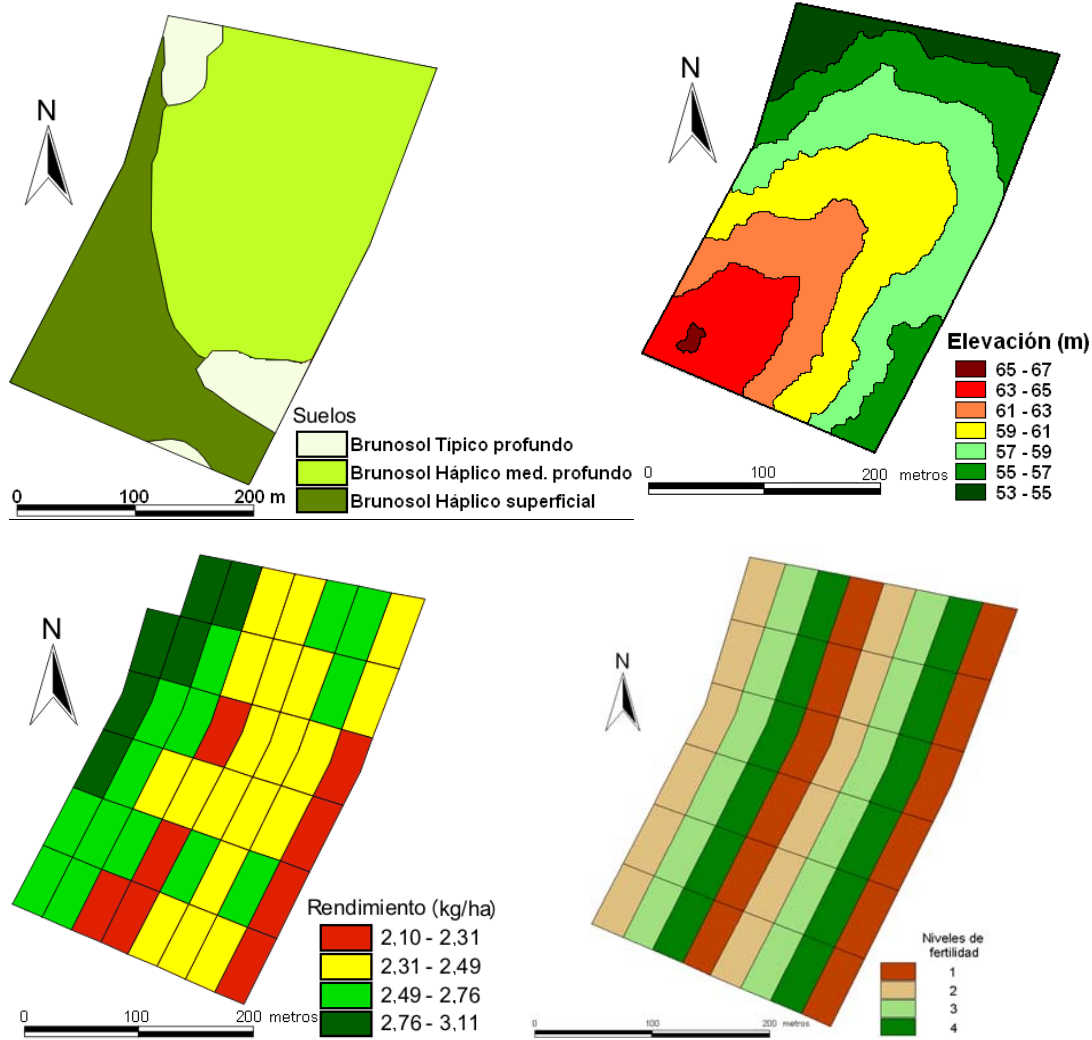


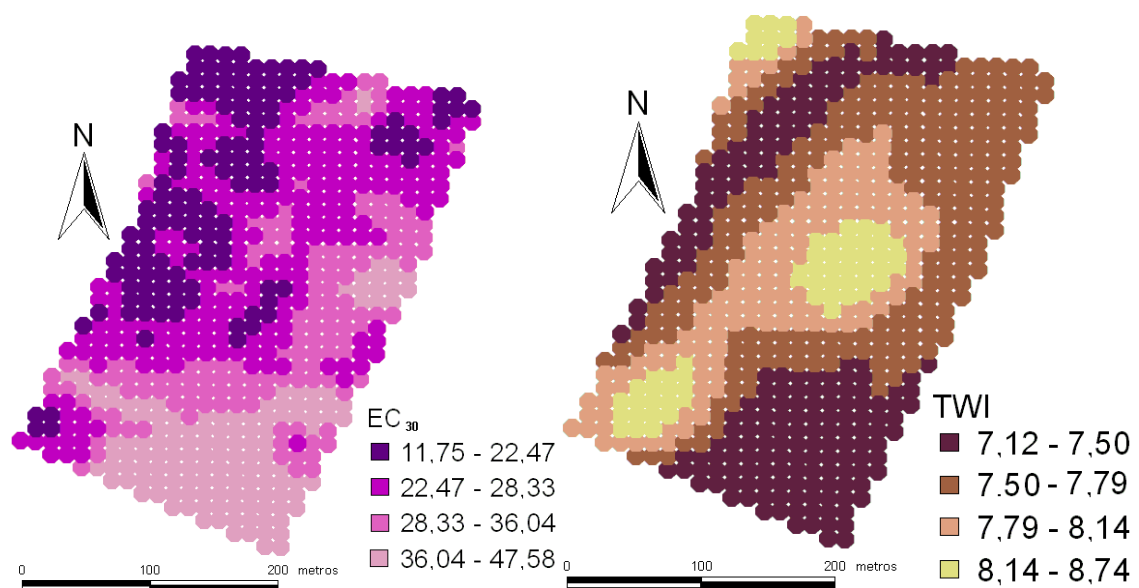
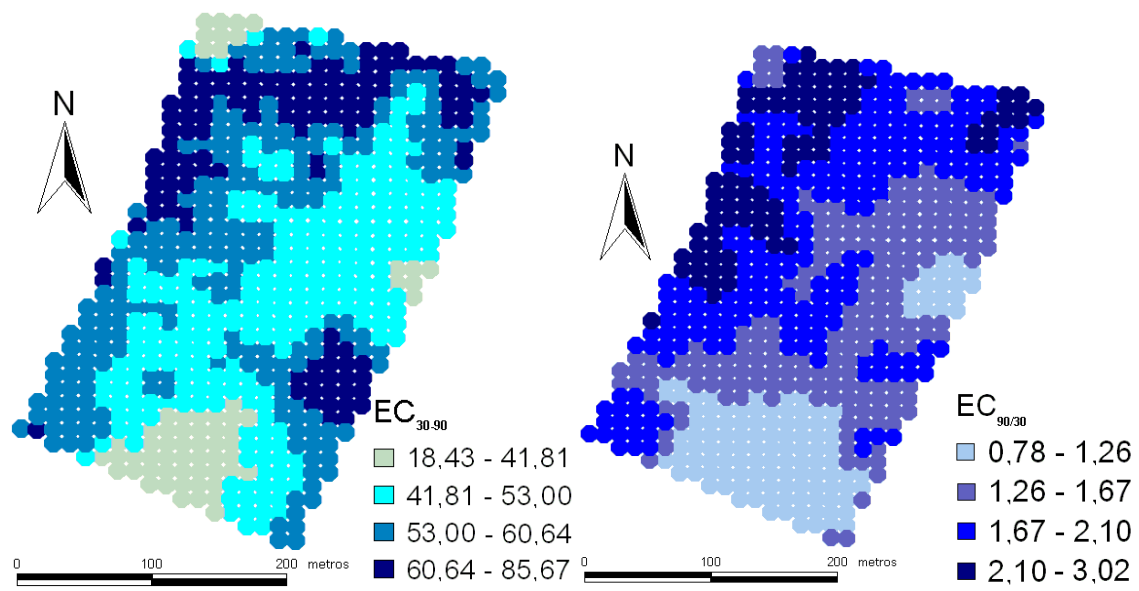
**Figura 14:** Árbol de clasificación y regresión generado en el software R versión 2.10.0 con el promedio de la totalidad de las variables en las celdas del EXP.2.

u  $ECa_{30}$  = Electroconductividad aparente entre 0 y 30 cm de profundidad;  $ECa_{90/30}$  = Relación de Electroconductividad aparente entre 0 - 90 y 0 - 30 cm; SUELO = Clasificación de suelos.

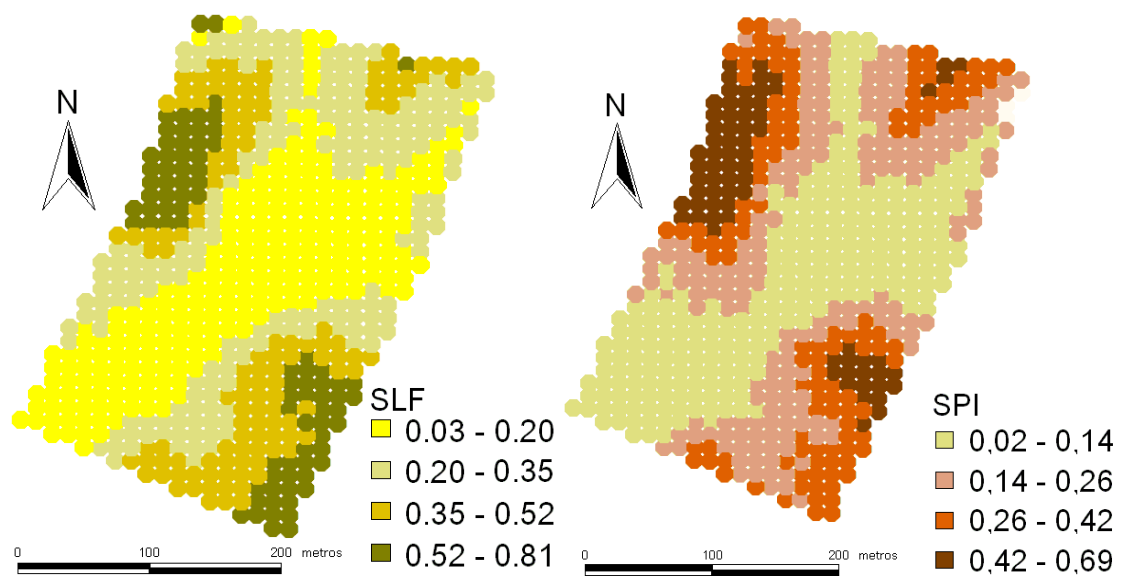
## 4.4. MAPAS RELEVANTES

### 4.4.1. Mapas del EXP.1

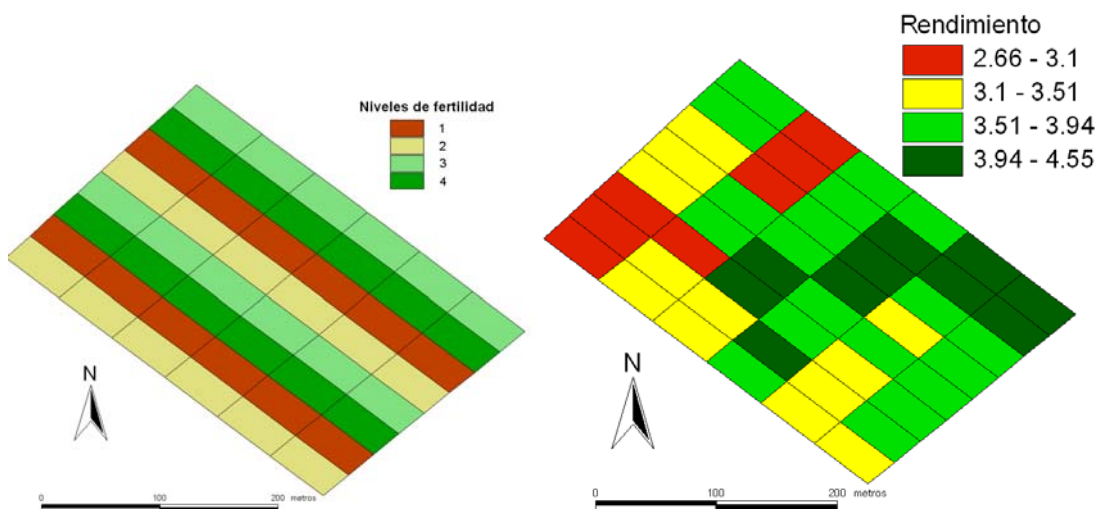


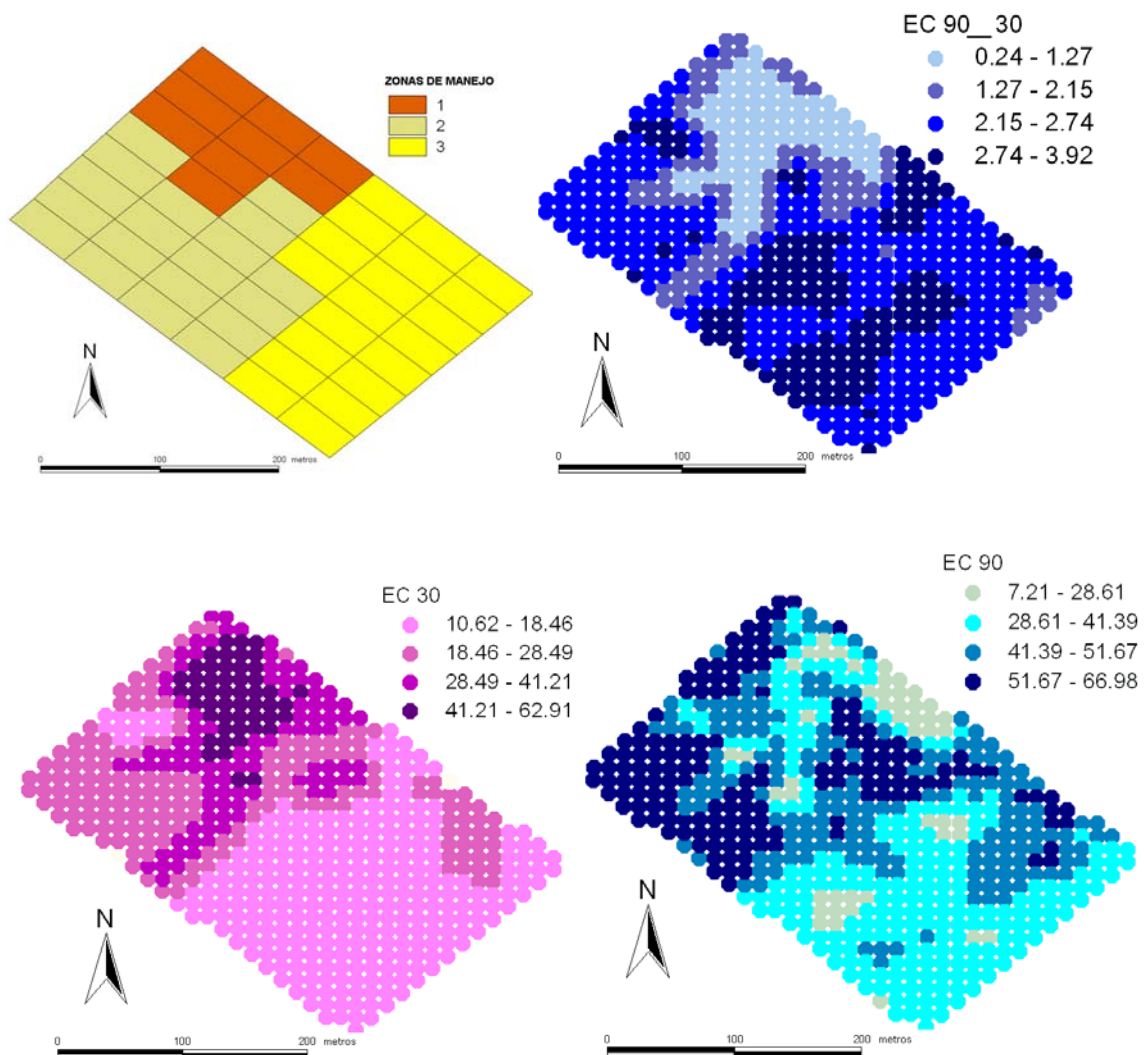






#### 4.4.2. Mapas del EXP.2





## **5. CONCLUSIONES**

Empleando las herramientas vinculadas a la AP utilizadas en este estudio se logró cuantificar, georeferenciar, analizar y relacionar la variabilidad espacial de las chacras y su interacción con los niveles de fertilidad impuestos artificialmente sobre la productividad del cultivo de soja.

Los ensayos en faja y la medición en forma intensiva del rendimiento por medio de monitores fue una buena metodología para estudiar la variación de rendimiento a escala de chacra complementando la investigación analítica generada en parcelas pequeñas, para adaptar y validar tecnologías a condiciones comerciales.

La mayoría de las variables presentaron estructura espacial fuerte, lo que permitiría realizar mapas interpolados para éstas variables. Sin embargo, la validación cruzada permitió realizar la interpolación para algunas de éstas, permitiendo delinear mapas confiables, a partir de esta cantidad y distribución de muestras. El mapa de P presiembra obtenido en el EXP.1 fue el más importante ya que aporta información relevante para un posible manejo diferencial del agregado de P para éste sitio.

Los resultados obtenidos en los experimentos instalados en las dos chacras fueron diferentes. En el EXP.1 hubo respuesta a los niveles de fertilidad, el testigo fue un 12 % inferior al resto, no existiendo diferencias significativas entre los restantes niveles. Mientras que en el EXP.2, no se observaron diferencias significativas para ninguno de los niveles evaluados.

En el EXP.1 las variables más correlacionadas con el rendimiento de soja fueron las edáficas, para trigo las topográficas y para maíz ambas presentaron

similar importancia (edáficas y topográficas). De las variables mencionadas se logró predecir el 73, 41 y el 65 % de la variación de rendimiento de soja, maíz y trigo respectivamente. Las variables que más explicaron el rendimiento no se repitieron, encontrándose que la  $ECa_{90/30}$  representó el 50 %,  $ECa_{30}$  un 31 % y SLF el 43 % de la variación de rendimiento de soja, maíz y trigo respectivamente. Estos resultados implican que los diferentes cultivos no responden de igual manera a las condiciones de los diferentes lugares de una misma chacra.

En el EXP.2 los análisis lineales no arrojaron resultados capaces de explicar la interacción entre las variables medidas y el rendimiento de soja, sin embargo utilizando análisis no paramétricos se encontró que, los altos rendimientos (4.000 kg/ha) se dan con  $ECa_{90/30}$  moderadas (entre 1,1 y 2,7) y  $ECa_{30}$  bajas (< 26,3 mS/m), permitiendo entender la complejidad entre las variables medidas y el rendimiento para éste sitio.

El análisis clusters realizado para el EXP.1 identificó dos grupos de celdas que tendrían requerimientos de manejo diferentes, una de alto potencial productivo (clusters 2 y 3) y el resto del ensayo. Mientras que en el EXP.2 el área se podría manejar con tres zonas diferentes, a) zona de alto potencial productivo perteneciente al cluster 4, b) zona de bajo potencial que se correspondería con el clusters 1 y 2 y c) el resto del área experimental (cluster 3). Para ambos experimentos se logró identificar áreas continuas con variables relacionadas con el rendimiento, permitiendo así la posibilidad de optimizar los recursos.

En base al estudio se concluye que los atributos edáficos y topográficos fueron más importantes en determinar la variación de rendimiento que la incorporación artificial de diferentes niveles de fertilidad.

## 6. RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto combinado de cuatro niveles de fertilidad y su interacción con la variabilidad espacial del terreno sobre la productividad del cultivo de soja a escala de chacra. El estudio se realizó en dos chacras comerciales de soja en siembra directa, contrastantes en topografía e historia de uso agrícola (EXP.1 y EXP.2 respectivamente) durante la zafra 2007-08. El diseño experimental fue de Bloques Completos al Azar (DBCA), dispuestos en ocho fajas y dos bloques interceptando la máxima variación. Los niveles de fertilidad correspondieron a dosis de 0, 95, 190 y 285 kg/ha de fertilizante  $N_{(7)}-P_2O_{5(40)}-K_2O_{(0)}-S_{(5)}$  en EXP.1, y 0, 60, 120, 180 kg/ha de  $N_{(10)}-P_2O_{5(50)}-K_2O_{(0)}-S_{(1)}$  en EXP.2. Se realizó un muestreo intensivo de suelos y se midió la conductividad eléctrica en superficie ( $E_{Ca_{30}}$ ) y profundidad ( $E_{Ca_{90}}$ ). La productividad de soja se determinó con cosechadora equipada monitor de rendimiento y GPS. En el EXP.1 el testigo sin fertilizar tuvo un rendimiento 12 % inferior al promedio de los tratamientos fertilizados. La  $E_{Ca_{90/30}}$  explicó el 50 % de la variación de rendimiento de soja en el EXP.1, y junto con el contenido de agua potencialmente disponible, y el nivel de fertilidad explicaron el 73 % de la variación. En el EXP.2 no se encontraron efectos significativos del nivel de fertilidad en el rendimiento, mientras que la  $E_{Ca_{30}}$  explicó el 15 % de la variación. Aplicando métodos no paramétricos de análisis se encontró que en ambas chacras el primer factor que discriminó rendimientos altos y bajos fue la  $E_{Ca_{90/30}}$ , donde la mayor productividad (3.800 kg/ha) se obtuvo con valores de  $E_{Ca_{90/30}}$  moderados (1,1 - 2,7), y  $E_{Ca_{30}} < 26,3$  mS/m en EXP.2. Los atributos del terreno fueron el primer factor determinante de la variación de rendimiento, dejando el manejo de la fertilización en un segundo lugar.

Palabras clave: Agricultura de precisión (AP); Variación de rendimiento intrachacra; Factores edáficos y topográficos.

## 7. SUMMARY

The goal of this study was to evaluate the combined effect of four fertility levels and their interactions with spatial variability on field-scale for soybean productivity. The study was performed during the 2007-08 season in two commercial farms with no-tillage, contrasting on their topography and agricultural history (EXP.1 and EXP.2 respectively). The experimental design was a completely randomized block, ordered in eight strips and two blocks intercepting the higher variation. The fertility levels were applied in doses of 0, 95, 190 y 285 kg/ha of N<sub>(7)</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sub>(40)</sub> - K<sub>2</sub>O<sub>(0)</sub> - S<sub>(5)</sub> on EXP.1 and 0, 60, 120, 180 kg/ha of N<sub>(10)</sub> - P<sub>2</sub>O<sub>5</sub><sub>(50)</sub> - K<sub>2</sub>O<sub>(0)</sub> - S<sub>(1)</sub> fertilizer on EXP.2. An intensive sampling was performed on soils and the electrical conductivity was measured on the surface (ECa<sub>30</sub>) and in depth (ECa<sub>90</sub>). To determine soybean productivity we used a harvester equipped with a yield monitor and a GPS. On EXP.1 the non fertilized witness had a yield 12 % lower than the average for the fertilized treatments. The ECa<sub>90/30</sub> ratio explained 50 % of the yield variation for soja on EXP.1, that combined with the potentially available water content and fertility level explained 73 % of the variation. Fertility level had no significative effects on EXP.2, while the ECa<sub>30</sub> explained 15 % of the yield variation. Non parametric methods were performed to analyze the data set having as a result that the first factor separating high and low yields for both fields was ECa<sub>90/30</sub>, were the greater productivity (3800 kg/ha) was obtained with moderated ECa<sub>90/30</sub> values (1.1 - 2.7), and less than 26.3 mS/m ECa<sub>30</sub> values on EXP.2. The field attributes were the first determining value for yield variation, leaving the fertilizing management on a second place.

Keywords: Precision agriculture (PA); Variability yield field-scale; Soil and topographic factors.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. AHUNCHAIN, M.; KLAASSEN, M. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.
2. ALVAREZ, J.; AMARO, U.; AMARAL, E. 1999. I) Ensayos regionales para la evaluación de la respuesta a la fertilización de la soja (*Glycine Max. L. Merrill*) sobre las unidades de suelo Vergara y Río Branco (Dirección de suelos). II) Respuesta a la dosis y la localización del fertilizante fosfatado de la soja (*Glycine Max. L. Merrill*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 231 p.
3. ALVEZ MOREIRA, M.; MONTOVANI, E. 2006. Sensores remotos. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 81 - 96.
4. BAUTES, C.; BARBAZÁN, M.; BEUX, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre areniscas cretácicas y transicionales. *Informaciones Agronómicas*. no. 41: 1 - 9.
5. BEHM, V. 2005. Curso Básico ArcView 3.2; teoría y práctica. (en línea). Caracas, Universidad de Los Andes. Consultado jun. 2009. Disponible en <http://www.scribd.com/doc/6235237/Curso-Basico-de-ArcView>

6. BERARDO, A. 2004. Manejo de la fertilización en una agricultura sustentable. *Informaciones Agronómicas*. no. 23: 23 - 28.
7. BEST, S.; LEÓN, L. 2006a. Análisis de datos. *Geoestadística*. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 145 - 161.
8. \_\_\_\_\_. 2006b. Tecnología de dosis variable. *Tecnología de riego variable*. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 106 - 111.
9. BONGIOVANNI, R. 2002. A spatial econometrics approach to the economics of site-specific nitrogen management in corn production. (en línea). Ph.D. Thesis. West Lafayette, USA. Purdue University. Department of Agricultural Economics. 280 p. Consultado 15 abr. 2009. Disponible en <http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/analecon.htm>
10. \_\_\_\_\_.; LOWENBERG-DEBOER, J. 2006. Adopción de la agricultura de precisión en el cono sur de América. *Agricultura de precisión en Argentina*. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 201 - 218.



11. BOSQUE SENDRA, J. 2000. Sistema de Información Geográfica. 2ª. reimpr. Madrid, España, Rialp. 451 p.
12. BRAGACHINI, M.; VON MARTINI, V.; MÉNDEZ, A. 2000. Potencialidad de la información de los mapas de rendimiento en la interpretación del manejo de factores de rendimiento y su respuesta sitio específica en el cultivo de soja. (en línea). Córdoba, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Consultado may. 2009. Disponible en <http://www.agriculturadeprecision.org/monrend/PotencialidadInformacionMapasRendimiento.pdf>
13. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2003. Alcances y precisión de los monitores de rendimiento. Comparación entre el monitor de rendimiento y una cosechadora de parcelas para evaluación de ensayos. (en línea). Córdoba, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). Consultado may. 2009. Disponible en <http://www.agriculturadeprecision.org/monrend/AlcancesyPrecisionMonitoresRend.htm>
14. \_\_\_\_\_.; MENDEZ, F.; SCARAMUZZA, F.; PROIETTI, F. 2006a. Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 43 - 60.
15. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2006b. Sistema de posicionamiento global y su aplicación en la agricultura. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y

sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores.  
pp. 38 - 41.

16. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; GREGORET, M.C.; PROIETTI, F. 2006c. Tecnología de dosis variable. Tecnología de manejo de dosis variable. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 101 - 106.
17. BRULSEMA, T.; WITT, C.; GARCÍA, F.; LI, S.; NAGENDRA RAO, T.; CHEN, F.; IVANOVA, S. 2008. Un marco global para las mejores prácticas de manejo (MPM) de los fertilizantes. *Informaciones Agronómicas*. no. 38: 1 - 5
18. CANO, J.; ERNST, O.; GARCÍA, F. 2006. Balance aparente de fósforo en rotaciones agrícolas del litoral oeste del Uruguay. *Informaciones Agronómicas*. no. 32: 8 - 12.
19. CLARET, M.; BEST, S.; LEÓN, L. 2006. Sistema de posicionamiento global (GPS). In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 25 - 37.
20. CORWIN, D.; LESCH, S. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture; theory, principles, and guidelines. *Agronomy Journal*. 95: 455.

- 21.\_\_\_\_\_. 2005a. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Computers and electronics in agriculture. Agronomy Journal. 46: 11 - 43.
- 22.\_\_\_\_\_.; LESCH, S. 2005b. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity; I. survey protocols. Computers and electronics in agriculture. Agronomy Journal. 46:103 - 133.
- 23.COX, M.; GERARD, P.; WARDLAW, M.; ABSHIRE, M. 2003. Variability of selected soil properties and their relationships with soybean yield. Agronomy Journal. 67: 1296 - 1302.
- 24.CURSO DE AGRICULTURA DE PRECISIÓN (7°.), EXPO DE MÁQUINAS PRECISAS (2ª., 2007, Cordoba, Argentina). 2007. Resúmenes de trabajos presentados. Cordoba, Argentina, INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 271 p.
- 25.DEL CAMPO, B. 2007. Factores que afectan la variabilidad intra chacra del rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 77 p.
- 26.DÍAZ ZORITA, M. F.; GARCÍA, F.; MELGAR, R. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja; respuesta a la fertilización en la región pampeana. EEA INTA Pergamino. Boletín Proyecto Fertilizar. 44 p.
- 27.DURAN, A.; GARCÍA PRÉCHAC, F. 2007. Suelos del Uruguay, origen, clasificación, manejo y conservación. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. t. 1, 334 p.

28. ECHEVERRÍA, H.; FERRARIS, G.; GERSTER, G.; GUTIÉRREZ BOEM, F.; SALVAGIOTTI, F. 2002. Fertilización en soja y trigo-soja; respuesta a la fertilización en la región pampeana. INTA EEA Pergamino. Boletín Proyecto Fertilizar. 43 p.
29. ESPÓSITO, G.; CASTILLO, C.; BALBOA, G.; BALBOA, R. 2008. Nivel crítico de fósforo y azufre en suelos del sur de Córdoba para el cultivo de soja. *Informaciones Agronómicas*. no. 43: 16 - 19.
30. FERRARIS, G.; COURETOT, L.; TORIBIO, M.; FALCONI, R. 2008. Efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento de maíz y el balance de nutrientes en el noroeste de la Provincia de Buenos Aires Campaña 2006/07. *Informaciones Agronómicas*. no. 37: 20 - 23.
31. FRIDGEN, J.; KITCHEN, N.; SUDDUTH, K.; DRUMMOND, S.; WIEBOLD, W.; FRAISSE, C. 2004. Management zone analyst (MZA); software for subfield management zone delineation. *Agronomy Journal*. 96:100 - 108.
32. GAMBAUDO, S.; BONGIOVANNI, R. 2006. Tecnología de dosis variable. Encalado con dosis variable. *In*: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 111 - 122.
33. GARCÍA, F. 2005. Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo. *Informaciones Agronómicas*. no. 27: 1 - 7.

34. \_\_\_\_\_. 2006. La nutrición de los cultivos y la nutrición de los suelos. *Informaciones Agronómicas*. no. 29: 13 - 17.
35. GIRALDO, R. 2003. Introducción a la geoestadística; teoría y aplicación. (en línea). Bogotá, Departamento de Estadística Universidad Nacional de Colombia. Consultado may. 2009. Disponible en <http://www.docentes.unal.edu.co/rgiraldoh/docs/LIBRO%20DE%20GEOESTADISTICA..pdf>
36. GUTIÉRREZ BOEM, F.; PRYSTUPA, P.; ALVAREZ, C. 2006. Comparación de dos redes de ensayos de fertilización fosforada de soja en la región pampeana. *Informaciones Agronómicas*. no. 31: 6 - 9.
37. INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICOS. (5º, 2008, Montevideo). 2008. *Sistemas de Información Geográfico, concepto, evolución, componentes, funciones y programas*. Montevideo, Uruguay, Facultad de Ciencias. Laboratorio de Técnicas para el Análisis del Territorio. 37 p.
38. JAYNES, D.; COLVIN, T. 1997. Spatiotemporal variability of corn and soybean yield. *Agronomy Journal*. 89: 30 - 37.
39. JIANG, P.; THELEN, K. 2004. Effect of soil and topographic properties on crop yield in a north-central corn-soybean cropping system. *Agronomy Journal*. 96: 252 - 258.
40. JOHNSON, C.; DORAN, J.; DUKE, H.; WIENHOLD, B.; ESKRIDGE, K.; SHANAHAN, J. 2003a. Field scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. *Agronomy Journal*. 65:1829 - 1837.

41. \_\_\_\_\_.; MORTENSEN, D.; WIENHOLD, B.; SHANAHAN, B.; DORAN, J. 2003b. Site-specific management zones based on soil electrical conductivity in a semiarid cropping system. *Agronomy Journal*. 95: 303 - 315.
42. JORNADA TÉCNICA: AGRICULTURA DE PRECISIÓN “AGRICULTURA CON LUPA” (1er., 2008, Dolores, Uruguay). 2008. Memorias. Colonia, Uruguay, INIA. 43 p.
43. KASPAR, T.; COLVIN, T.; JAYNES, D.; KARLEN, D.; JAMES, D.; MEEK, D. 2003. Relationships between six years of corn yields and terrain attributes. *Agronomy Journal*. 4: 87 - 101.
44. \_\_\_\_\_.; PULIDO, D.; FENTON, T.; COLVIN, T.; KARLEN, D.; JAYNES, D.; MEEK, D. 2004. relationship of corn and soybean yield to soil and terrain properties. *Agronomy Journal*. 96:700 - 709.
45. KITCHEN, N.; DRUMMOND, S.; LUND, E.; SUDDUTH, K.; BUCHLEITER, G. 2003. Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil-crop systems. *Agronomy Journal*. 95: 483 - 483.
46. KOOLHAAS, M. 2006. El GPS y sus aplicaciones agronómicas. 2<sup>a</sup>. ed. amp. corr. Montevideo, Comisión Sectorial de Educación Permanente. 153 p.
47. KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D.; BOAST, C. 2000a. Joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope. *Agronomy Journal*. 92: 1279 - 1290.

48. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2000b. Spatial variability, correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*. 92: 75 - 83.
49. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; CHARLES, W. 2000c. Spatial variability, joint multifractal analysis of crop yield and terrain slope. *Agronomy Journal*. 92: 1279 - 1290.
50. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2002. Spatial variability of soybean quality data as a function of field topography; i. Spatial data analysis. *Agronomy Journal*. 42: 804 - 815.
51. \_\_\_\_\_.; THELEN, K.; BULLOCK, D.; MILLER, N. 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross correlograms. *Agronomy Journal*. 95:1132-1139.
52. \_\_\_\_\_.; ROBERTSON, G.; THELEN, K.; HARWOOD, R. 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agronomy Journal*. 97: 514 - 523.
53. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; HAO, X.; BULLOCK, D. 2006. Management practice effects on surface total carbon; differences in spatial variability patterns. *Agronomy Journal*. 98:1559 - 1568.
54. LOZANO, Z.; BRAVO, C.; OVALLES, F.; HERNÁNDEZ, R.; MORENO, B.; PIÑANGO, L.; VILLANUEVA, J. 2004. Selección de un diseño de muestreo en parcelas experimentales a partir del estudio de la variabilidad espacial de los suelos. *Bioagro*. 16(1):1 - 17.

55. MALLARINO, A.; OYARZABAL, E.; HINZ, P. 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precision Agriculture*. 1(1):15 - 25.
56. \_\_\_\_\_. 2005. Criterios de fertilización fosfatada en sistemas de agricultura continúa con maíz y soja en el cinturón del maíz. *Informaciones Agronómicas*. no. 28: 9 - 15.
57. MARTINEZ, A. 1994. Experimentación agrícola. Métodos estadísticos. Chapingo, México, Universidad Autónoma de Chapingo. 341 p.
58. MARTÍNEZ, F.; GRACIELA CORDONE, G.; GUDELJ, V. 2006. Fertilización en soja. Situación actual y perspectivas en Argentina, Bolivia y Uruguay. (en línea). Buenos Aires, s.e. Consultado nov. 2008. Disponible en [http://www.acsoja.org.ar/mercosoja2006/Contenidos/Foros/fertilidad\\_04.pdf](http://www.acsoja.org.ar/mercosoja2006/Contenidos/Foros/fertilidad_04.pdf)
59. MIRAGLIA, M.; RIVAROLA, M.; REBORATTI, L.; GRAHAM, M.; GALVÁN, L. 2003. Manual del usuario ArcView 3.2. Adaptación para el aprendizaje independiente de principiantes en Arc View 3.2. (en línea). Buenos Aires, Universidad Nacional de General Sarmiento. Consultado jun. 2009. Disponible en <http://www.ungs.edu.ar/publicaciones/pdf/md11.pdf>
60. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_. 2007. Adaptación para el aprendizaje independiente de principiantes en Arc View 3.2 (en línea). Buenos Aires, Universidad Nacional de General Sarmiento. Consultado mar. 2009. Disponible en [http://www.ungs.edu.ar/publicaciones/resumen/res\\_md11.html](http://www.ungs.edu.ar/publicaciones/resumen/res_md11.html)



61. MONTOVANI, E.; CARVALHO PINTO, F.; MARÇAL DE QUEIROZ, D. 2006. Introducción a la agricultura de precisión. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 13 - 22.
62. MOORE, I.; GESSLER, P.; NIELSEN, G.; PETERSON, G. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Agronomy Journal*. 57: 443 - 452.
63. MUELLER, T.; PIERCE, F. 2003a. Soil carbon maps: enhancing spatial estimates with simple terrain attributes at multiple scales. *Agronomy Journal*. 67: 258 - 267.
64. \_\_\_\_\_.; HARTSOCK, N.; STOMBAUGH, T.; SHEARER, S.; CORNELIUS, P.; BARNHISEL, R. 2003b. Soil electrical conductivity map variability in limestone soils overlain by loess. *Agronomy Journal*. 95: 496 - 507.
65. MULLA, D.; MCBRATNEY, A. 2002. Soil spatial variability. In: Warrick, A. W. ed. *Soil physics companion*. Boca Raton, FL, CRC. pp. 343 - 373.
66. MUÑOZ, J.; MARTINEZ, L.; GIRALDO, R. 2006. Variabilidad de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana*. 24 (2): 355 - 366.

67. ORELLANA, J.; BEST, S.; CLARET, M. 2006. Sistema de información geográfica (SIG). In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 131 - 143.
68. PLANT, R. 2001. Site Specific Management; the application of information technology to crop production. Computers and electronics in agriculture. Agronomy Journal. 30: 9 - 29.
69. PRAVIA, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis M.Sc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
70. QUINTÍN, J.; QUINTERO, A.; ESTÉVEZ, E.; RAMIREZ, R. 1997. Elementos de Geoestadística. (en línea). Pinar del Río, Universidad de Pinar del Río. Consultado may. 2009. Disponible en [http://www.ciriongeo.co.cc/web\\_documents/Elementos%20de%20Geoestadística.pdf](http://www.ciriongeo.co.cc/web_documents/Elementos%20de%20Geoestadística.pdf)
71. ROEL, A.; PLANT, R. 2004. Spatiotemporal analysis of rice yield variability in two California fields. Agronomy Journal. 96 (1): 77 - 90.

72. \_\_\_\_\_.; FIRPO, H. 2006a. Adopción de la agricultura de precisión en el cono sur de América. Agricultura de precisión en Uruguay. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 236 - 242.
73. \_\_\_\_\_. 2006b. Análisis de datos. Análisis de cluster y cart. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 167 - 170.
74. \_\_\_\_\_.; TERRA, J. 2006c. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 65 - 79.
75. ROGOVSKA, N.; BLACKMER, A.; MALLARINO, A. 2007. Relationships between soybean yield, soil pH, and soil carbonate concentration. Soil Science Society of America Journal. 71(4): 1251 - 1256.
76. RUBIO, G.; GUTIÉRREZ BOEM, F.; CABELLO, M. 2008. ¿Cuanto fósforo hay que aplicar para alcanzar el umbral crítico de fósforo disponible en el suelo? I. Cálculo a partir de propiedades básicas del suelo. Informaciones Agronómicas. no. 37: 20 - 23.

77. SATORRE, E. 2003. El cultivo de la soja y la sustentabilidad de la agricultura argentina y sus empresas. In: AACREA; AAPRESID. El libro de la soja. Buenos Aires, Argentina, SEMA - Servicios y Marketing. pp. 6-14.
78. SAWCHIK, J.; MALLARINO, A. 2008. Variability of soil properties, early phosphorus and potassium uptake, and incidence of pests and weeds in relation to soybean grain yield. *Agronomy Journal*. 100: 1450 - 1462.
79. STEEL, R.; TORRIE, J. 1989. Bioestadística, principios y procedimientos. Bogotá, Colombia, McGraw-Hill. 622 p.
80. SUDDUTH, K.; KITCHENA, N.; BOLLERO, G.; BULLOCK, D.; WIEBOLD, W. 2003. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*. 95: 472.
81. SUÑER, L.; GALANTINI, J.; ROSELL, R. 2005. Cambios del fósforo en suelos bajo diferentes rotaciones de cultivos. *Informaciones Agronómicas*. no. 25: 5 - 8.
82. TERRA, J.; SHAW, J.; REEVES, D.; RAPER, R.; VAN SANTEN, E.; SCHWAB, E.; MASK, P. 2006a. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Agronomy Journal*. 70: 98 - 107.
83. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; VAN SATEN, E.; RAPER, R, BALKCOM, K.; SCHAWAB, E.; MASH, P. 2006b. Soil management practices and landscape attribute impacts on field-scale corn productivity. In: International Soil Tillage Research Organisation (17<sup>th</sup>., 2006, Kiel,

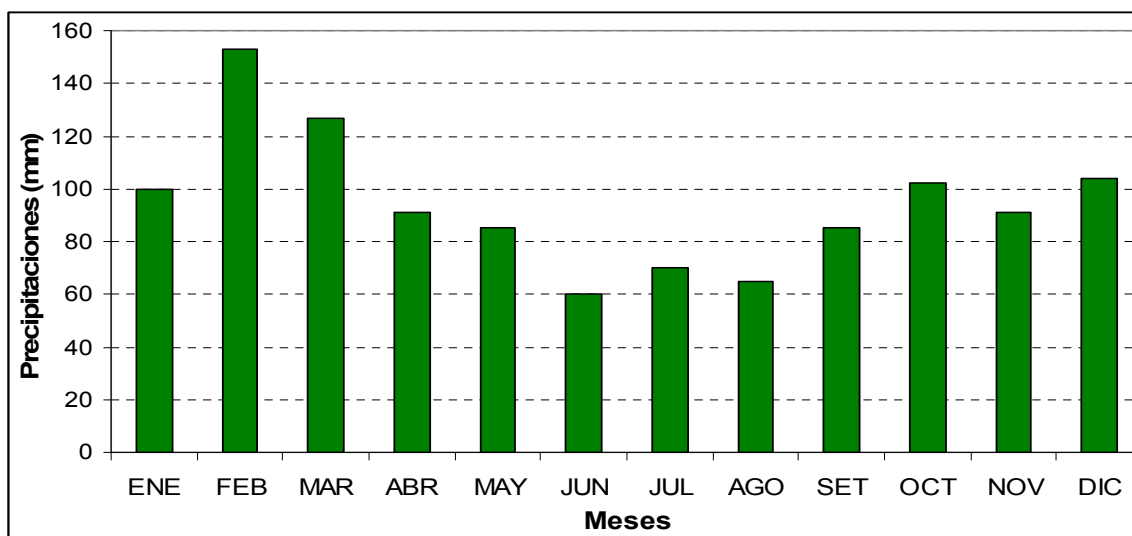
Alemania). Sustainability – its impact on soil management and environment. Kiel, Christian Albrechts Universität. pp. 1275 - 1281.

84. TIMLIN, D.; PACHEPSKY, Y.; SNYDER, V.; BRYANT, R. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. Soil Science Society of America Journal. 62 (3):764 - 773.
85. URUGUAY. MINISTERIO DE DEFENSA NACIONAL. SERVICIO GEOGRÁFICO MILITAR. 2005. Boletín no. 8. Montevideo. 156 p.
86. \_\_\_\_\_. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE SUELOS Y AGUAS. 1975. Protocolo de relevamiento de suelos. Montevideo. s.p.
87. \_\_\_\_\_. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE ESTADÍSTICA AGROPECUARIA. 2009. Anuario estadístico agropecuario 2009. Montevideo, Uruguay. 206 p.
88. VILLATORO, M.; HENRÍQUEZ, C.; SANCHO, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y kriging en la variación espacial de ph, Ca, CICE y P del suelo. Agronomía Costarricense. 32 (1): 5 - 105.
89. VIVAS, H.; ALBRECHT, R.; HOTIÁN, J.; GASTALDI, L. 2007. Residualidad del fósforo y del azufre. Estrategia de fertilización en una secuencia de cultivos. Informaciones Agronómicas. no. 35: 11 - 17.

## 9. ANEXOS

**Cuadro:** Secuencia de cultivos y pasturas desde el año 2003 hasta la realización de los experimentos.

	2003		2004		2005		2006		2007		2008
	Ver	Inv	Ver	Inv	Ver	Inv	Ver	Inv	Ver	Inv	Ver
<b>EXP.1</b>			Pradera		Soja 1 <sup>er</sup>	Trigo	Soja 1 <sup>er</sup>	Trigo	Maíz 2 <sup>da</sup>	Barb/Cob	Soja 1 <sup>er</sup>
<b>EXP.2</b>			Pradera							Barb/Quim	Soja 1 <sup>er</sup>



**Figura:** Régimen pluviométrico histórico mensual para el período 1961-1990 para la zona de influencia de los experimentos (Estación Meteorológica de Mercedes - DNM).

**Cuadro:** Estadística descriptiva de número de plantas por hectáreas a implantación y estado fenológico para cada faja del EXP.1.

	Nº de pl/ha			Moda	Estado fenológico*		
	Media	Desvío	CV		Media	Desvío	CV
<b>Faja 1</b>	313.816	104.884	33,4	4	4,2	0,5	12,2
<b>Faja 2</b>	340.936	97.467	28,6	4	4,1	0,6	15,4
<b>Faja 3</b>	344.737	100.059	29,0	4	4,3	0,2	4,4
<b>Faja 4</b>	351.462	92.771	26,4	4	4,2	0,5	11,0
<b>Faja 5</b>	393.567	107.437	27,3	4	3,8	0,7	18,3
<b>Faja 6</b>	349.708	85.925	24,6	4	3,8	0,2	5,1
<b>Faja 7</b>	386.316	110.155	28,5	5	3,6	0,7	20,3
<b>Faja 8</b>	369.591	126.365	34,2	4	3,3	0,5	15,9

\* Nº de hojas en estado vegetativo

**Cuadro:** Estadística descriptiva de número de plantas por hectáreas a implantación y estado fenológico para cada faja del EXP.2.

	Nº de pl/ha			Moda	Estado fenológico*		
	Media	Desvío	CV		Media	Desvío	CV
<b>Faja 1</b>	325.506	39.552	12,2	5	4,6	0,5	10,2
<b>Faja 2</b>	313.450	40.351	12,9	5	4,4	0,6	13,6
<b>Faja 3</b>	333.083	47.632	14,3	5	4,2	0,6	14,7
<b>Faja 4</b>	348.684	37.190	10,7	5	4,5	0,2	4,8
<b>Faja 5</b>	291.447	22.844	7,8	4	4,2	0,4	8,7
<b>Faja 6</b>	286.842	49.613	17,3	4	4,6	0,5	10,6
<b>Faja 7</b>	327.632	74.206	22,6	4	4,7	0,6	12,5
<b>Faja 8</b>	318.092	44.484	14,0	5	4,5	0,5	10,7

\* Nº de hojas en estado vegetativo

**Cuadro:** Correlaciones de Pearson para los diferentes componentes del rendimiento en el EXP.1.

	<b>Plantas/ha</b>	<b>Granos/m<sup>2</sup></b>	<b>Vainas/m<sup>2</sup></b>	<b>Vanas/m<sup>2</sup></b>	<b>Altura de Plantas (cm)</b>	<b>Peso 1.000 granos (gr)</b>
<b>Granos/m<sup>2</sup></b>	0,45 *	-	-	-	-	-
<b>Vainas/m<sup>2</sup></b>	0,44 *	0,99 *	-	-	-	-
<b>Vanas/m<sup>2</sup></b>	NS	0,56 *	0,60 *	-	-	-
<b>Altura de Plantas (cm)</b>	0,46 *	0,62 *	0,58 *	NS	-	-
<b>Peso de 1.000 granos (gr)</b>	NS	NS	NS	NS	NS	-
<b>Rendimiento (Kg/ha)</b>	NS	0,68 *	0,68 *	0,35 **	0,57 *	0,48 *

\* Diferencia significativa  $p \leq 0,01$ .

NS Sin diferencia significativa  $p \leq 0,05$ .



**Cuadro:** Correlaciones de Pearson para los diferentes componentes del rendimiento en el EXP.2.

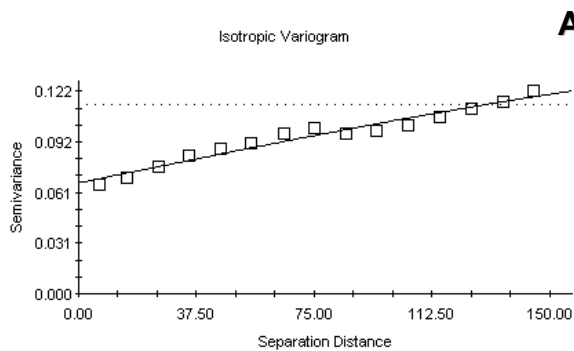
	Plantas/ha	Granos/m <sup>2</sup>	Vainas/m <sup>2</sup>	Vanas/m <sup>2</sup>	Altura de Plantas (cm)	Peso 1.000 granos (gr)
<b>Granos/m<sup>2</sup></b>	0,5 *	-	-	-	-	-
<b>Vainas/m<sup>2</sup></b>	0,54 *	0,97 *	-	-	-	-
<b>Vanas/m<sup>2</sup></b>	NS	NS	0,28 ***	-	-	-
<b>Altura de Plantas (cm)</b>	0,34 **	0,62 *	0,64 *	0,35 **	-	-
<b>Peso de 1.000 granos (gr)</b>	NS	0,34 **	0,3 ***	NS	0,28 ***	-
<b>Rendimiento (Kg/ha)</b>	NS	0,77 *	0,78 *	NS	0,72 *	0,59 *

\* Diferencia significativa  $p \leq 0,01$ .

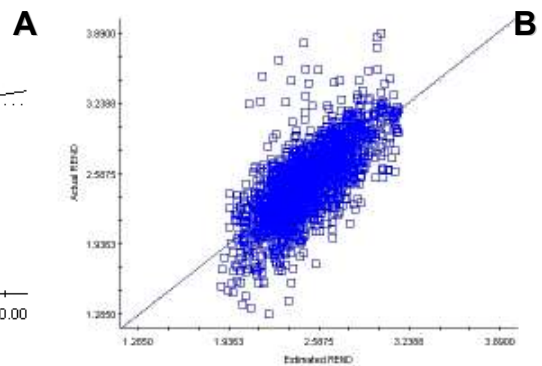
\*\* Diferencia significativa  $p \leq 0,05$ .

\*\*\* Diferencia significativa  $p \leq 0,10$ .

NS Sin diferencia significativa  $p \leq 0,05$ .

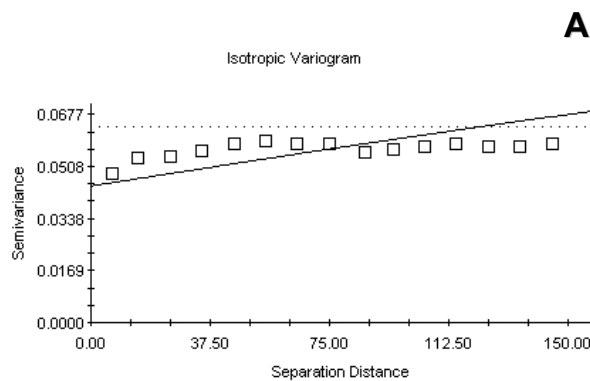


Spherical model ( $C_0 = 0.06700$ ;  $C_0 + C = 0.14600$ ;  $A_0 = 304.40$ ;  $r^2 = 0.958$ ;  
 RSS =  $1.554E-04$ )

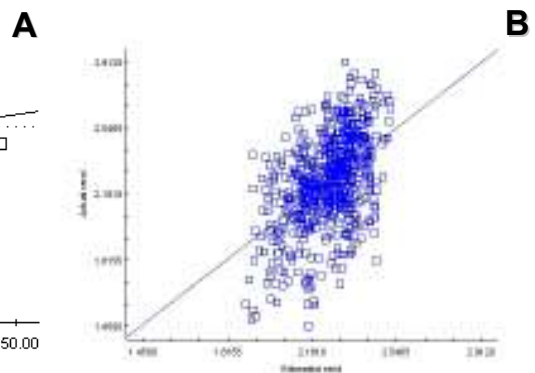


Regression coefficient =  $1.008$  (SE =  $0.019$ ),  $r^2 = 0.521$ ,  
 y intercept =  $-0.0164$ , SE Prediction =  $0.217$ )

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el EXP.1. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el EXP.1.

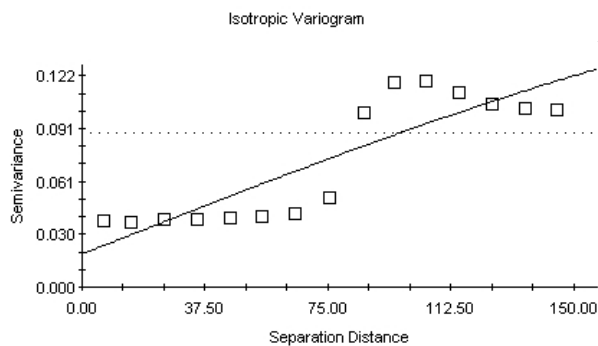


Spherical model ( $C_0 = 0.0444$ ;  $C_0 + C = 0.0889$ ;  $A_0 = 410.90$ ;  $r^2 = 0.376$ ;  
 RSS =  $4.582E-04$ )

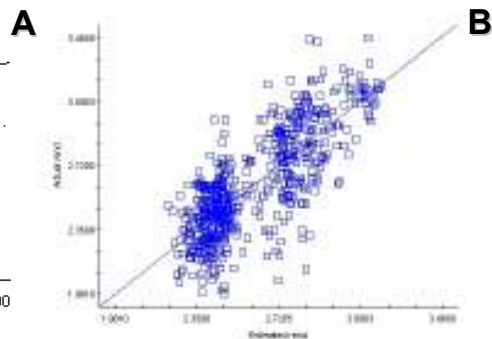


Regression coefficient =  $0.967$  (SE =  $0.071$ ),  $r^2 = 0.226$ ,  
 y intercept =  $0.2225$ , SE Prediction =  $0.225$ )

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 1 en el EXP.1. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 1 en el EXP.1.

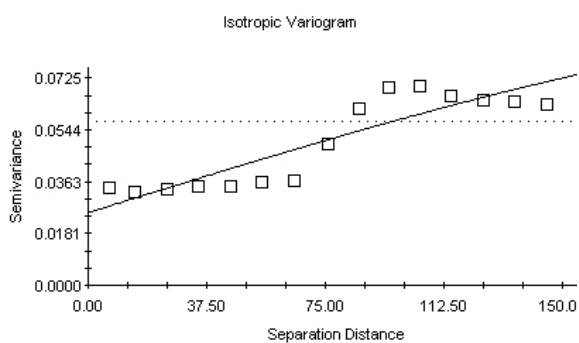


Spherical model ( $C_0 = 0.01910$ ;  $C_0 + C = 0.17120$ ;  $A_0 = 307.30$ ;  $r^2 = 0.751$ ;  
 RSS =  $4.378E-03$ )

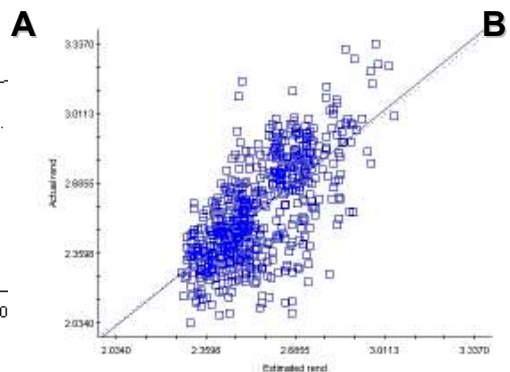


Regression coefficient = 1.006 (SE = 0.211,  $r^2 = 0.912$ ;  
 y intercept = -0.0012, SE Prediction = 0.198)

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 2 en el EXP.1. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 2 en el EXP.1.

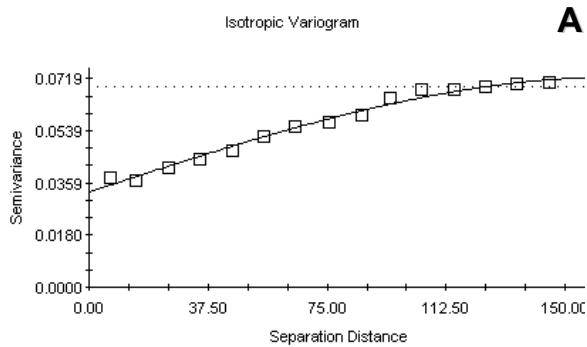


Spherical model ( $C_0 = 0.02540$ ;  $C_0 + C = 0.09250$ ;  $A_0 = 292.30$ ;  $r^2 = 0.803$ ;  
 RSS =  $6.778E-04$ )

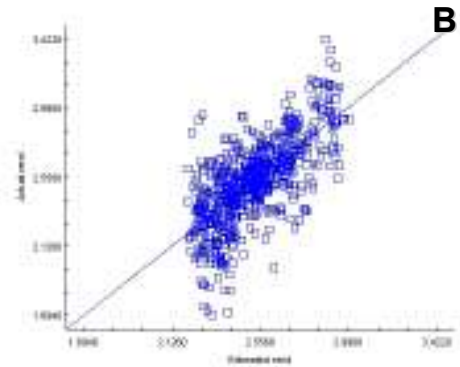


Regression coefficient = 1.031 (SE = 0.045,  $r^2 = 0.456$ ;  
 y intercept = -0.0746, SE Prediction = 0.177)

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 3 en el EXP.1. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 3 en el EXP.1.

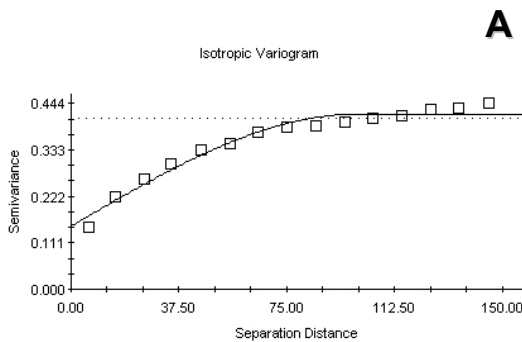


Spherical model ( $C_0 = 0.03280$ ;  $C_0 + C = 0.07240$ ;  $A_0 = 165.50$ ;  $r^2 = 0.986$ ;  
 RSS =  $2.865E-05$ )

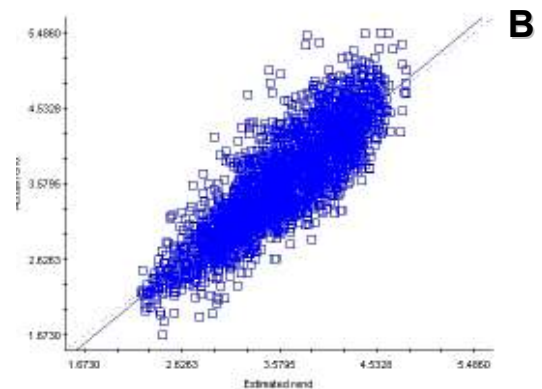


Regression coefficient =  $1.00678 \pm 4.841 \cdot 10^{-4}$ ;  
 y intercept =  $-0.04138$  Prediction =  $0.170$

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 4 en el EXP.1. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 4 en el EXP.1.

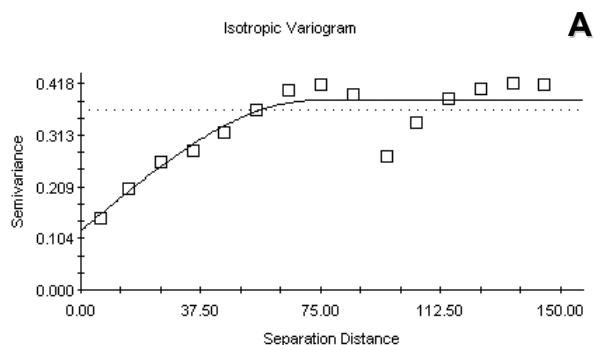


Spherical model ( $C_0 = 0.15030$ ;  $C_0 + C = 0.41860$ ;  $A_0 = 99.70$ ;  $r^2 = 0.968$ ;  
 RSS =  $3.255E-03$ )

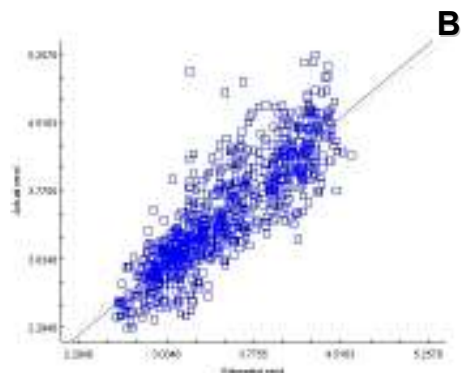


Regression coefficient =  $1.061$  (SE =  $0.012$ ,  $t^2 = 0.730$ );  
 y intercept =  $-0.1828$ , SE Prediction =  $0.381$

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el EXP.2. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados en el EXP.2

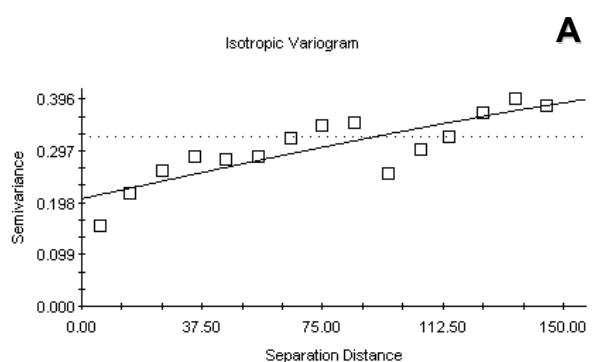


Spherical model (Co = 0.11980; Co + C = 0.38360; Ao = 73.00; r2 = 0.804; RSS = 0.0200)

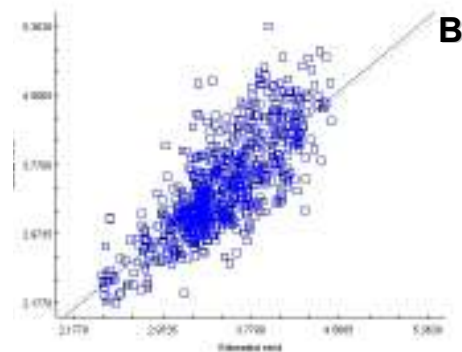


r2 = 0.804; RSS = 0.0200; Co = 0.11980; C = 0.26380; Ao = 73.00; r2 = 0.804; RSS = 0.0200

**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 1 en el EXP.2. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 1 en el EXP.2.

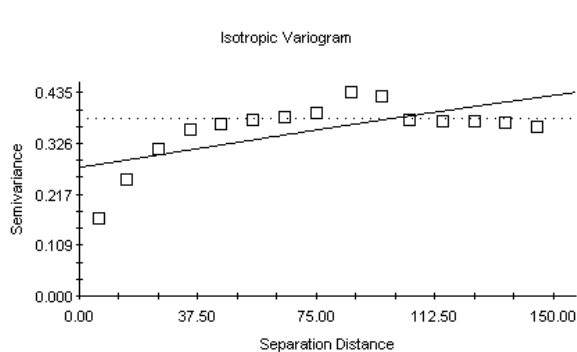


Spherical model (Co = 0.20520; Co + C = 0.46340; Ao = 288.40; r2 = 0.698; RSS = 0.0181)

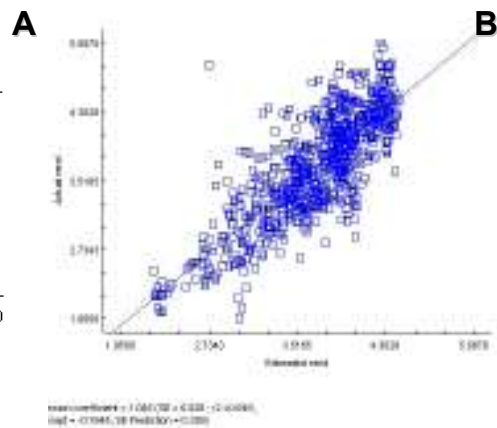


r2 = 0.698; RSS = 0.0181; Co = 0.20520; C = 0.25820; Ao = 288.40; r2 = 0.698; RSS = 0.0181

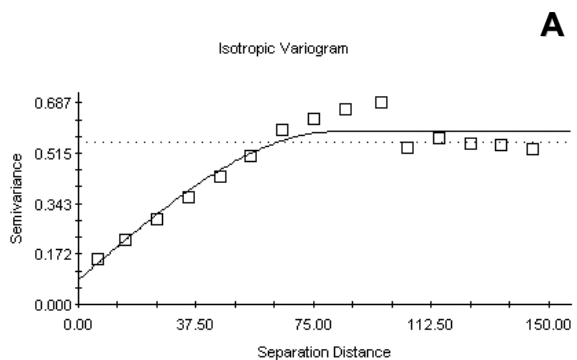
**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 2 en el EXP.2. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 2 en el EXP.2.



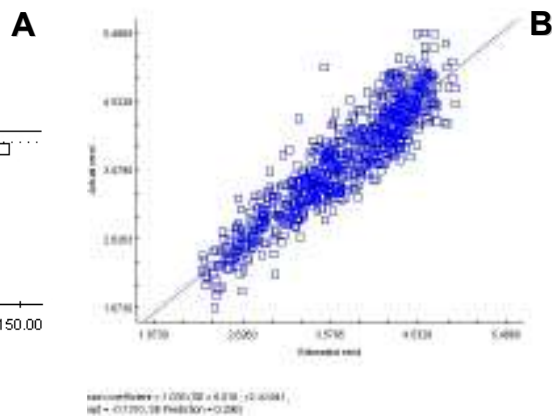
Spherical model (Co = 0.27450; Co + C = 0.55000; Ao = 361.20; r2 = 0.406; RSS = 0.0382)



**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 3 en el EXP.2. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 3 en el EXP.2.



Spherical model (Co = 0.08300; Co + C = 0.58900; Ao = 82.40; r2 = 0.912; RSS = 0.0317)



**Figura: A)** Semivariograma y sus parámetros de los puntos de rendimientos georreferenciados para el nivel de fertilidad 4 en el EXP.2. **B)** Validación cruzada y sus parámetros para los puntos de rendimiento georreferenciados estimados y observados para el nivel de fertilidad 4 en el EXP.2.