

UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFEECTO RESIDUAL DE LA FERTILIZACIÓN EN TRIGO SOBRE SOJA DE
SEGUNDA EN ZONAS CON DIFERENTE PRODUCTIVIDAD DENTRO DE
UNA MISMA CHACRA

por

Nicolás BARÁIBAR PEDERSEN
Nicolás LAUDATO ASTOR

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2013

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Oswaldo Ernst Benech

Ing. Agr. Mónica Cadenazzi Pascual

Ing.Agr. Guillermo Siri Prieto

Fecha: 6 de agosto de 2013

Autor:

Nicolás Baráibar Pedersen

Nicolás Laudato Astor

AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias y amigos por su apoyo incondicional en el transcurso de toda la carrera.

A los ingenieros agrónomos Oswaldo Ernst y Mónica Cadenazzi por la dirección de esta tesis.

Al ingeniero agrónomo Gonzalo Ferreira quien nos ayudó en el trabajo de campo así como en el análisis de los datos.

A Ramiro Izaguirre por su ayuda en el trabajo de campo.

Al personal del establecimiento La Rinconada por dejarnos realizar este ensayo y brindarnos información.

Al personal de laboratorio de la E.E.M.A.C.

Al personal de biblioteca de la Facultad de Agronomía.

A la Lic. Sully Toledo por su colaboración en la corrección de los aspectos formales de la tesis.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO Y ZONAS DE PRODUCCIÓN.....	2
2.1.1. <u>Existencia de importante variabilidad espacial en factores que influyen la productividad de los cultivos</u>	3
2.1.2. <u>La identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores</u>	6
2.1.2.1. Medición de la variabilidad en forma continua	6
2.1.2.2. Medición de la variabilidad en forma discreta	7
2.1.2.3. Medición de la variabilidad a partir de sensores remotos.....	8
2.1.3. <u>El conocimiento científico-agronómico que permita utilizar información recolectada</u>	9
2.2. FERTILIZACIÓN RESIDUAL.....	10
2.2.1. <u>Fósforo</u>	10
2.2.2. <u>Potasio</u>	12
2.2.3. <u>Azufre</u>	14
2.3. GEOESTADÍSTICA	15
2.3.1. <u>Análisis exploratorio de los datos</u>	17
2.3.2. <u>Análisis estructural</u>	17
2.3.3. <u>Predicción</u>	18
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	21
3.1. LOCALIZACIÓN	21
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	21
3.3. MANEJO DEL CULTIVO	22

3.4.	DETERMINACIONES	23
3.4.1.	<u>Datos climáticos</u>	23
3.4.2.	<u>Determinaciones de variables continuas</u>	23
3.4.3.	<u>Determinaciones de variables discretas</u>	23
3.4.3.1.	Propiedades topográficas de la chacra	24
3.4.3.2.	Propiedades edáficas de la chacra.....	24
3.4.3.3.	Propiedades del cultivo	24
4.1.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	25
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	28
4.1.	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA.....	28
4.2.	ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ESPACIAL DEL RENDIMIENTO DE SOJA.....	29
4.3.	ANÁLISIS DEL EFECTO RESIDUAL DE LA FERTILIZACIÓN DE TRIGO SOBRE EL RENDIMIENTO DE SOJA Y CONTENIDO DE NUTRIENTES DEL SUELO	30
4.4.	RESPUESTA DE LOS TRATAMIENTOS PARA CADA ZONA	33
4.5.	ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS.	36
4.6.	CORRELACIÓN ENTRE ZONAS DE PRODUCTIVIDAD DE LA SOJA Y EL RENDIMIENTO DEL TRIGO ANTECESOR	39
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	42
6.	<u>RESUMEN</u>	43
7.	<u>SUMMARY</u>	44
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	45

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de los tipos de suelos.	21
2. Descripción de los tratamientos	22
3. Aplicaciones de herbicidas, insecticidas y fungicidas sobre el cultivo de soja.....	23
4. Datos del semivariograma realizado para el rendimiento de soja obtenido por la cosechadora	29
5. Rendimiento de soja a partir del monitor (Rend.monitor), rendimiento considerando “efecto sitio” como co-variable (Rend.cov.) y rendimiento corregido por el efecto sitio (Rend.corr) según tratamientos de fertilización aplicados en trigo	31
6. Nutrientes disponibles y humedad en el suelo a la siembra de soja según tratamiento de fertilización al trigo	33
7. Rendimiento de soja (Mg ha^{-1}) promedio de celdas de 30×30 en respuesta a tratamientos de fertilización aplicados al trigo previo particionado por zona de productividad	35
8. Prueba de T para las variables discretas medidas usando como variable de clasificación los ambientes de producción	36
9. Significancia (p-valor) del contrastes entre tratamientos fertilizados con potasio y sin potasio para componentes del rendimiento particionado por zona de productividad	37
10. Rendimiento de soja (Mg ha^{-1}) utilizando como variable de clasificación conglomerados	37
11. Análisis de la varianza de las variables del suelo con partición en conglomerados.	38
12. Tabla de contingencia para conglomerados y zonas de productividad	39
13. Tabla de contingencia para conglomerados y tratamientos	40
14. Tabla de contingencia entre grupos de rendimiento de trigo y soja.	41

Figura No.

1. Mapa de rendimiento de soja realizado a partir del rendimiento obtenido por la cosechadora 30

Gráfico No.

1. Precipitación mensual del período junio 2011-mayo 2012 y media histórica del 1980 al 2009 28

1. INTRODUCCIÓN

Una de las características de las chacras de Uruguay es su gran heterogeneidad espacial, asociada a tipos de suelos y atributos del terreno, lo cual se traduce en rendimientos promedios bajos (Ahunchain y Klaassen, 1990).

La agricultura de precisión consiste en la identificación de zonas dentro de una chacra las cuales se definen de acuerdo a los factores que limitan el rendimiento del cultivo. A estas zonas homogéneas se les realiza un manejo diferencial a efectos de optimizar la aplicación de insumos y las medidas de manejo para maximizar los ingresos (Roel y Terra, 2006).

Para optimizar la aplicación de insumos uno de los primeros factores a manejar es la fertilización. Según Bragachini (2007) una tecnología innovadora radica en la fertilización del sistema y no la nutrición puntual del cultivo, aprovechando mediante una secuencia de cultivos la residualidad física y química del suelo. Pero lo realmente innovador es el manejo de los factores que gobiernan la productividad, la calidad y la relación costo beneficio de cada uno de los ambientes definidos dentro de una chacra.

La aplicación de tecnologías de agricultura de precisión (GPS, sensores electrónicos y SIG) permite obtener información georeferenciada, estudiar su variabilidad espacial, incorporarla en el análisis estadístico de experimentos a escala de chacra y predecir sus efectos en el rendimiento de los cultivos utilizando modelos de simulación (Pravia, 2009).

En este marco se realiza esta investigación con el objetivo de determinar si levantando las restricciones nutricionales del cultivo de soja es posible eliminar la variabilidad de rendimiento que existe dentro de una chacra así como identificar los posibles factores que causan dicha variabilidad.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. VARIABILIDAD DEL RENDIMIENTO Y ZONAS DE PRODUCCIÓN

Una alta variabilidad climática y de ambientes edáficos caracteriza a la agricultura de secano en el Uruguay, determinando considerables variaciones en rendimientos entre años y a su vez importantes diferencias en la respuesta vegetal intra e inter chacras (Del Campo, 2007).

Los sistemas tradicionales de producción tratan a las propiedades agrícolas de forma homogénea, tomando como base la extensas áreas de producción para implementar las acciones correctivas de los factores limitantes (Mantovani et al., 2006).

Uno de los desafíos que enfrenta el sector agrícola en el mediano plazo es caracterizar de mejor forma los ambientes edáficos sobre los que se desarrolla la producción. Esto permitiría avanzar en el delineamiento de zonas de respuesta vegetal contrastantes dentro de chacras y permitiría el uso del conocimiento y de las tecnologías adecuadas para éstas. Así, es esperable que esta práctica genere ventajas desde el punto de vista físico, económico y ambiental (Van den Heuvel et al., citados por Del Campo, 2007).

El manejo sitio específico o agricultura de precisión es el manejo de cultivos agrícolas a una escala espacial menor que aquella de la chacra total (Plant, 2001).

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

Tres criterios básicos deberían cumplirse para justificar el manejo sitio-específico: a) la existencia de importante variabilidad espacial en factores

que influyen 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 (Miller et al., citados por Plant, 2001).

2.1.1. Existencia de importante variabilidad espacial en factores que influyen la productividad de los cultivos

En general las chacras agrícolas presentan cierta heterogeneidad que resulta de diferencias muy marcadas de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos determinando así ambientes con diferente aptitud productiva (Justo y Scianca, 2011).

El rendimiento del cultivo depende de su crecimiento vegetativo y en la mayoría de los cultivos también de su crecimiento reproductivo. En cualquier año dado el rendimiento en diferentes partes de la chacra puede ser limitado por varios factores que impactan en este proceso (Plant, 2001).

Los métodos para desagregar la información contenida en el rendimiento de un cultivo para transformarlos en datos manejables, generalmente comienza por asumir que en la mayoría de las zonas, existen algunos factores primarios que limitan el rendimiento (Webb, Loomis, Connor, citados por Plant, 2001).

Los factores más importantes incluyen: deficiencias en nutrientes minerales, deficiencias o exceso de humedad, pestes, plantas patógenas, acidez o alcalinidad del suelo, presencia de toxinas, exceso de salinidad o sodicidad, textura y tasa de infiltración e historia de manejo. La variabilidad espacial de estos factores puede ser influenciada por diferencias dentro de la chacra de topografía, estructura del suelo, propiedades del agua subterránea, microclima o puro azar. En cualquier chacra dada, la

importancia de los factores limitantes del rendimiento, pueden variar entre y dentro de la misma estación (Plant, 2001).

En cultivos extensivos de secano se ha encontrado que los patrones de disponibilidad de agua para los cultivos, resultante de la interacción entre las propiedades estáticas de los suelos, la topografía y la variabilidad temporal relacionada a factores climáticos, explican gran parte de la variabilidad de rendimiento de los cultivos a través de la fisiografía (Roel y Terra, 2006).

Trabajos como los de Kravchenko y Bullock (2000) conducidos durante cuatro años en ocho chacras ubicadas en los estados de Illinois y en el este de Indiana (EEUU), intentando determinar el grado en que la topografía y las propiedades del suelo explicaban la variabilidad del rendimiento de maíz y soja, encontraron que las propiedades del suelo y la topografía, explicaban cerca del 40% de la variabilidad en el rendimiento de los cultivos. Las propiedades del suelo explicaban cerca del 30% de la variabilidad del rendimiento (del 5 al 71% para distintas chacras), siendo el contenido de materia orgánica el factor de mayor impacto. Por otro lado el efecto acumulativo de las características topográficas explicaban un 20% de las variaciones del rendimiento, siendo la elevación el factor más importante.

Para el caso de Uruguay también existen trabajos que intentan determinar cuáles son estos factores y en qué magnitud están influenciando las variaciones del rendimiento. En este sentido, Ahunchain y Klaassen (1990), con el objetivo de cuantificar la variabilidad de los rendimientos de trigo dentro de una chacra, en una chacra de 20 hectáreas ubicada sobre la Unidad de Suelos Bequeló (Altamirano et al., 1976), encontraron la existencia de variabilidad en el rendimiento dado que el mismo se encontró comprendido en un rango de 2000 a 6000 kg/ha significando 17% de coeficiente de variación dentro de la chacra. Los factores que explicaron esta variabilidad corresponden a aspectos químicos; el conjunto de parámetros

de fertilidad de suelo evaluados explicaron el 43% de la variación de rendimiento, destacándose nitrato a macollaje y contenido de fósforo del suelo.

Del Campo (2007) en una chacra de maíz de 11 hectáreas ubicada sobre la Unidad de Suelos Risso y Bequeló (Altamirano et al., 1976) que sufrió un déficit hídrico alrededor de floración y rindió en promedio 5700 kg/ha (CV=15%), estudió las propiedades químicas, físicas, hídricas y topográficas de la chacra que podrían causar esta variación. Éste determinó que los principales factores que explicaron la variabilidad del rendimiento fueron la topografía y la textura asociada al tipo de suelo, siendo la elevación el factor que se relacionó mejor con el rendimiento ($r=0,65$).

Pravia (2009) evaluando el efecto de prácticas de manejo de suelos en el rendimiento de sorgo durante tres años determinó que los atributos del terreno y la conductividad eléctrica explicaban 77% de la variación observada en el rendimiento y que el primer factor determinante del rendimiento fue la variación temporal.

Con el objetivo de determinar 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, Coitiño y Mazzoni (2011) encontraron que en una chacra ubicada sobre la Unidad de Suelos Itapebí-Tres árboles (Altamirano et al., 1976) el factor que determinó las variaciones en rendimiento de un trigo que rindió 4600kg/ha en promedio (CV=20%) en un año considerado como normal hasta floración y con déficit hídrico creciente en etapas posteriores, fue la posición topográfica así como la fertilización con potasio. Por otra parte Otaño y Zarucki (2010) en un experimento de similares características encontraron para los cultivos de soja, maíz y trigo que las variables más correlacionadas con el rendimiento fueron para soja las edáficas, para trigo las topográficas y para maíz ambas presentaron similar importancia (edáficas y topográficas). En

este caso se logro predecir el 73, 41 y el 65% de la variación de rendimiento de soja, maíz y trigo respectivamente.

2.1.2. La identificación y cuantificación de las causas de la variabilidad de estos factores

Para identificar cuáles son los factores que limitan el rendimiento se debe identificar cómo varían los mismos a través de la chacra. Existen varias metodologías para lograr este objetivo. Senay et al., citados por Plant (2001) distingue tres formas de medir la variabilidad espacial existente en una chacra: en forma continua, en forma discreta y utilizando sensores remotos.

2.1.2.1. Medición de la variabilidad en forma continua

En los métodos de medición continuos, las medidas de la variable en observación son obtenidas en todas las localidades del campo experimental (Pravia, 2009).

El foco primario de la agricultura sitio-específica es la variabilidad espacial de las propiedades de la chacra que influyen en el rendimiento del cultivo, por lo tanto el monitoreo del rendimiento es parte fundamental de la misma (Plant, 2001).

Los monitores de rendimiento miden y graban el rendimiento y la humedad del grano a medida que se cosecha el cultivo. Los datos almacenados por hectárea son alrededor de 600 puntos dependiendo de la frecuencia con que son grabados los datos en la tarjeta. La superficie que abarcan los puntos de rendimiento está compuesta por el ancho de plataforma de la cosechadora y la distancia recorrida por ésta en el tiempo que tarda en guardar un dato y otro, lo cual puede ser manejado desde el monitor según necesidad. Si el monitor de rendimiento de la cosechadora se

conecta a un GPS se pueden georeferenciar estos puntos y por lo tanto obtener un mapa de rendimiento (Bragachini et al., 2006).

Muchos consideran que los mapas de rendimiento son la mejor herramienta para la delimitación de zonas de manejo o la delimitación de zonas donde muestrear los diferentes factores que afectan la producción, ya que el rendimiento del cultivo es el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra (Roel y Terra, 2006).

Otra herramienta útil es la conductividad eléctrica dado que está altamente correlacionada con el rendimiento del cultivo (Lund et al., citados por Plant, 2001).

En suelos de baja salinidad la conductividad eléctrica se correlaciona altamente con la arcilla y la humedad del suelo. Por la fuerte influencia del contenido de arcilla en otras propiedades del suelo como la tasa de infiltración de agua, medir la conductividad eléctrica es frecuentemente un excelente método para determinar zonas para la realización del muestreo de suelos (Plant, 2001).

2.1.2.2. Medición de la variabilidad en forma discreta

En los métodos de muestreo discretos, se colectan muestras en sitios predeterminados utilizando métodos destructivos (Pravia, 2009).

Los puntos de muestreo son la metodología más usada para la recolección de datos sobre la condición del suelo y el estado del cultivo. Ejemplo de éstos son el análisis de las propiedades físico-químicas del suelo así como características morfo-fisiológicas del cultivo (Plant, 2001).

Cuando el objetivo del muestreo es la obtención de un valor promedio para toda la chacra el criterio que se utiliza para determinar qué punto muestrear es el azar. La situación es muy distinta cuando el objetivo del

muestreo es la realización de un mapa que contemple el valor del factor estudiado en todos los sitios de la chacra (Plant, 2001).

En este caso, si los datos están correlacionados espacialmente, se pueden interpolar los valores entre los puntos de muestreo. De ahí que cada punto de muestra debe ser registrado individualmente y la precisa ubicación de ese punto es un factor importante en la interpolación (Plant, 2001).

Un inconveniente que puede surgir de este tipo de muestreo es la existencia de una particularidad en el lugar de muestreo como pueden ser vías de drenaje. Este inconveniente puede ser subsanado mediante la realización de un esquema de muestreo estratificado en el cual cada punto se localiza al azar dentro de los confines de una celda de la grilla (Plant, 2001).

2.1.2.3. Medición de la variabilidad a partir de sensores remotos

Datos monitoreados por satélites o avión que caracterizan la reflectancia y emitancia de la canopia del cultivo pueden proveer información detallada y espacialmente referenciada sobre las condiciones del suelo o del crecimiento y desarrollo de la planta (Plant, 2001).

Sellers, citado por Plant (2001) dice que la reflectancia de la canopia del cultivo en las zonas del rojo y cercanas al infrarrojo del espectro electromagnético proveen un medio para estimar el estado fotosintético del cultivo.

Los sensores remotos dan información sobre el estado del cultivo, y dado que el mismo es influenciado por todos los factores del ambiente, se debe suplementar la información provista por éstos con otra que permita determinar la fuente de estrés del cultivo (Plant, 2001).

2.1.3. El conocimiento científico-agronómico que permita utilizar información recolectada

El objetivo central de la agricultura de precisión es la obtención de zonas de manejo definidas por sus factores limitantes del rendimiento para ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas. La estrategia general consiste en la identificación de zonas en las chacras que puedan ser delineadas, agrupadas y manejadas similarmente a los efectos de optimizar la aplicación de insumos y las medidas de manejo para maximizar los ingresos (Roel y Terra, 2006).

Según Fraisse et al., Plant et al., citados por Roel y Terra (2006) los principales requerimientos que las zonas de manejo deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimiento entre zonas debe ser mayor que la diferencia dentro de la zona; y b) los factores limitantes del rendimiento dentro de la zona deben ser los mismos.

El número de zonas de manejo dentro de una chacra va a estar dado por la variabilidad natural de la chacra, el tamaño de la chacra y algunos factores prácticos de manejo (Roel y Terra, 2006).

El tamaño mínimo o la forma de una zona depende de la habilidad del productor de poder manejarla individualmente, esto depende de las dimensiones del parque de maquinaria, las características físicas de la chacra y la dirección o patrón de trabajo de la maquinaria (Roel y Terra, 2006).

Las zonas de manejo pueden ser bastante diferentes dependiendo de las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de suelos utilizado (Roel y Terra, 2006).

2.2. FERTILIZACIÓN RESIDUAL

La presencia de dos cultivos en un mismo ciclo agrícola genera interacciones que afectan a cada uno de ellos de forma diferente. En consecuencia, prácticas de manejo asociadas al primer cultivo afectan directa o indirectamente el cultivo de segunda (Salvagiotti et al., 2004).

El objetivo de la fertilización es satisfacer la necesidad de nutrientes del cultivo en las situaciones en que el suelo no puede proveerlos en su totalidad y así aumentar el rendimiento (Gutiérrez y Scheiner, 2006).

La fertilización residual se basa en que en una secuencia de cultivos los nutrientes aplicados que no son absorbidos por el primer cultivo luego pueden ser utilizados por él o los cultivos siguientes (Albrecht et al., citados por Vivas et al., 2001).

En Uruguay el área sembrada de cultivos de verano es mayor a 1.100.000 hectáreas (80% de la cual habría sido sembrada con soja en el verano 2011-12), donde el componente cultivo de segunda es muy elevado aunque variable entre años. En particular para el cultivo de soja, la relación del área de soja de primera/soja de segunda fue 40/60, 64/36 y 43/57 % para las zafas 2009-10, 2010-11 y 2011-12 respectivamente (Hoffman, 2012).

La aplicación de nutrientes en el trigo de mediana a baja movilidad en el suelo puede dejar remanentes aprovechables para la soja, debido a que la concentración en la solución está en equilibrio con la fase sólida y son absorbidos por las arcillas (Mengel, Kirby, citados por Salvagiotti et al., 2004).

2.2.1. Fósforo

El fósforo es un macronutriente esencial siendo un componente integral de importantes compuestos de las células, incluyendo intermediarios

azúcar-fosfato de la respiración y fotosíntesis y fosfolípidos que forman las membranas celulares. Es además componente de nucleótidos usados en el metabolismo energético de la planta y del ADN y ARN (Taiz y Zeiger, 2006).

Un cultivo de soja requiere 8 kg de fósforo para producir una tonelada de grano (Gutiérrez y Scheiner, 2006).

Dada la cantidad de fósforo presente en los campos naturales del Uruguay, el fósforo es el primer factor limitante nutricional para la siembra de cultivos y pasturas (Hernández, 2010).

En nuestro país el método más utilizado para evaluar el P disponible (P asimilable) es el método Bray No. 1. Dicho método se adapta a la mayoría de las situaciones de suelo del país (Hernández, 2010).

Los niveles críticos utilizados para el cultivo de soja en general, y sin considerar algunos valores extremos asociados a clima y textura de suelos no dominantes en Uruguay, se encuentran comprendidos en el rango entre las 11 y 15 ppm de P (Bray No. 1) en los primeros 20 centímetros de suelo (Amendola, Melgar et al., Díaz et al., Fontanetto et al., Salvagiotti et al., García, citados por Hoffman, 2012).

A medida que transcurre el tiempo el fósforo del fertilizante va reaccionando con constituyentes del suelo y formando compuestos insolubles de manera que su disponibilidad se va reduciendo (Hernández, 2010).

En experimentos realizados en INTA Balcarce por Barrado et al. se observó residualidad del fósforo en períodos de más de 8 años (Vivas et al., 2001).

Salvagiotti et al. (2004) en Argentina sobre suelos del norte de la región pampeana, utilizando como criterio de fertilización el balance de manera de fertilizar el trigo con lo que extrae el mismo así como con la

cantidad que extrae el cultivo de soja posterior o fertilizando cada cultivo por separado, no encontró diferencias entre la aplicación de todo el fósforo necesario para la secuencia trigo-soja sobre el cultivo de trigo o si se aplicaba por separado a ambos cultivos en cuanto al rendimiento de soja. Sin embargo Barrow, citado por Salvagiotti et al. (2004) encontró que el efecto del fósforo residual sobre la respuesta al cultivo es menor que el proveniente de aplicaciones directas al cultivo.

Hoffman y Ernst, citados por Hoffman (2012) evaluando información suministrada por cuatros empresas del litoral sur del Uruguay en el departamento de Colonia, en tres zafras agrícolas consecutivas a partir del verano 2004-05, encontraron que el P disponible en el suelo para los cultivos de soja de segunda en el verano 2006, no guardó relación entre P disponible en suelo a la siembra del cultivo de invierno previo más el P agregado. En el 35, 40, 36 y 49 % del área sembrada por las empresas estudiadas, los niveles de P disponibles en suelo fueron muy bajos (menores a 7 ppm), y a priori no esperables en base a los niveles de P previos y agregados a los cultivos de invierno anteriores, cuyos rendimientos fueron superiores a los 3500 kg/ha. Por lo que concluyen que la existencia de residualidad no es garantía de que el P disponible en suelo a la siembra de un cultivo de segunda asegure siempre niveles de suficiencia, aún cuando el P agregado al cultivo de invierno previo esté por encima de sus necesidades y contemple a ambos cultivos.

2.2.2. Potasio

El potasio es un macronutriente esencial que se encuentra bajo la forma catión K^+ dentro de la planta, este nutriente juega un rol importante en la regulación del potencial osmótico de las células. También activa varias enzimas involucradas en la respiración y fotosíntesis (Taiz y Zeiger, 2006).

La totalidad del potasio en suelo se encuentra bajo la forma inorgánica (Hernández, 2008).

La actividad agrícola en Uruguay se ha realizado tradicionalmente sobre suelos caracterizados por presentar niveles naturales medios a altos de K intercambiable (Hernández, citado por Barbazán et al., 2011).

Actualmente la expansión agrícola en Uruguay ha incluido suelos con restricciones para la agricultura con niveles de K considerados bajos para la producción de cultivos extensivos. Esto, sumado a la intensificación de la agricultura utilizando cultivos de mayor potencial productivo y produciendo 1,5 cultivos por superficie por año (MGAP. DIEA, 2010), puede producir cambios en la capacidad de reserva de K de los suelos del país que podrían llevar a un replanteo de estrategias a manejar en relación a las prácticas de fertilización potásica (Barbazán et al., 2011).

El cultivo de soja necesita absorber 33 kg de potasio para producir una tonelada de grano (Gutiérrez y Scheiner, 2006).

Hasta hace pocos años los niveles críticos manejados de K intercambiable en el suelo eran de 0,20-0,25 meq de K/100g para suelos de texturas medias y de 0,35 meq de K/100g para suelos de texturas más pesadas (Barbazán et al., 2011).

Estudios recientes en el centro del país, en el norte (Cano et al., 2007) y en litoral oeste (Bautés et al. 2009, Cano et al. 2009, García et al. 2009) reportan en algunos casos respuesta a K en suelos aún con niveles de K intercambiable considerados medios a altos (Barbazán et al., 2011).

Morón y Baethgen, citados por Nuñez (2010) encontraron en un relevamiento de cultivos de maíz que aproximadamente el 50% de los cultivos presentaban contenido de potasio en planta deficiente. Esto ocurrió aún en suelos con niveles medios a altos de potasio (0,60 y 0,44 meq de K/100g). Los autores aclaran que podría existir un efecto de competencia con otros nutrientes (como ser magnesio) en la absorción vegetal, aunque no descartan la posibilidad de revisar los niveles críticos utilizados.

Cano et al. (2007) trabajando en suelos del noroeste de Uruguay sobre Unidad Constitución encontraron respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano con niveles de K intercambiable de 0,10 a 0,20 meq de K/100g de suelo.

Bautes et al. (2009) observaron respuesta a la aplicación de K en cultivos de invierno y de verano, tanto en rendimiento en grano, parámetros de calidad como en K removido en suelos con valores entre 0,18 a 0,37 meq de K/100g de suelo. En este mismo experimento ellos observaron respuesta residual a la fertilización con potasio en cebada sobre el cultivo de soja, aumentando el contenido de K foliar así como el rendimiento.

2.2.3. Azufre

El azufre es un macronutriente esencial que se encuentra en dos aminoácidos (cisteína y metionina) y es un constituyente de varias coenzimas y vitaminas (Acetil coenzima A, S-adenosylmetionina, biotina, vitamina B1 y ácido pantoténico) esenciales para el metabolismo. Los síntomas de deficiencia son clorosis en hojas jóvenes, retrasos en el crecimiento y acumulación de antocianina (Taiz y Zeiger, 2006).

Es cada vez más frecuente encontrar deficiencias de azufre en nuestros sistemas agrícolas. Esto puede ser debido a cambios tanto en las entradas como en las salidas de este nutriente en el sistema (García y Quincke, 2011).

En cuanto a las entradas al sistema de este nutriente ha existido un cambio dado que se pasó de aplicar fósforo bajo la forma de superfosfato simple (contiene 13 kg de S por cada 100kg de fertilizante), a utilizar fuentes de P más concentradas o binarios (N-P) con poco o nada de azufre. Por otro lado ha existido un incremento en la extracción de S a causa de la intensificación del sistema explicado por el número de cultivos por año, aumento del potencial de rendimiento y un aumento en la concentración de

S en el grano cosechado, asociado a la dominancia del cultivo de soja (García y Quincke, 2011).

El cultivo de soja necesita absorber 7 kg de azufre para producir una tonelada de grano (Gutiérrez y Scheiner, 2006).

Se ha observado respuesta a la fertilización con azufre fundamentalmente en chacras con bajo nivel de materia orgánica, prolongada historia agrícola y con elevada respuesta al agregado de nitrógeno (García et al., 2001).

Salvagiotti et al. (2004) en Argentina en suelos del norte de la región pampeana, utilizando como criterio de fertilización el balance, al igual que el caso de fósforo, encontró respuesta residual a la fertilización con azufre, siendo la respuesta en rendimiento de soja de la misma magnitud si se aplicaba el azufre necesario para la secuencia trigo-soja sobre el cultivo de trigo o si se aplicaba por separado a ambos cultivos.

Vivas et al. (2010) en el departamento de San Gerónimo, Argentina, evaluando la influencia del P y del S en la producción de una secuencia de trigo/soja-maíz-soja y sus efectos residuales para una fertilización cada dos cosechas, encontraron que existió un efecto residual de la fertilización con azufre en el cultivo de trigo sobre la soja de segunda, aumentando los rendimientos en un 13,6%, 16,2% y 19,6% con fertilizaciones de 12, 24 y 36 kg/ha de S respectivamente.

2.3. GEOESTADÍSTICA

Para evitar o controlar la variación existente en el terreno la estadística convencional basada en los supuestos fisherianos propone la implementación de repeticiones de los tratamientos y de bloqueo en bloques homogéneos cuando sea necesario (Steel y Torrie, 2001).

La extensión de los experimentos clásicos parcelarios y de 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 siendo difícil la inferencia de los resultados (Piepho et al. 2001, Goovaerts, citado por Pravia 2009).

La mayor parte de las estimaciones en estadística clásica asumen que los valores de las observaciones para cada muestra son independientes unos de otros (Best y León, 2006).

Cuando se detectan patrones espaciales una de las suposiciones de los métodos estadísticos clásicos deja de ser válida: los errores experimentales no son independientes ni se encuentran idénticamente distribuidos (Bhatti et al., citados por Pravia, 2009).

La geoestadística se define como el estudio de variables aleatorias no independientes cuya dependencia está relacionada a la localización espacial (Cressie, 1993).

Es decir, cada valor observado perteneciente a una distribución, se encuentra asociado a una posición espacial. Por consiguiente, el cambio en los valores de la variable dependerá de su localización (Moreno, 2009).

A partir de esta dependencia la geoestadística puede estimar el valor de la variable en estudio en sitios no muestreados por medio de modelos de predicción espacial. Estos modelos integran en su proceso de estimación una cuantificación de la asociación entre valores que dependen de su localización siendo utilizadas semivarianzas o correlaciones en la modelación (Cressie, 1993).

Según Moreno (2009) en todo trabajo geoestadístico se distinguen tres etapas: análisis exploratorio de los datos, análisis estructural y predicciones.

2.3.1. Análisis exploratorio de los datos

En esta fase se estudian los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Se comprueba la consistencia de los datos, eliminándose aquellos que sean erróneos, y se identifican las distribuciones de las cuales provienen (Moreno, 2009).

2.3.2. Análisis estructural

En esta etapa se cuantifica la dependencia y la estructura espacial de una variable de muestreo (Goovaerts, citado por Pravia, 2009).

La dependencia entre los valores encontrados se puede calcular por medio de medidas estadísticas que expresan esta estructura de dependencia tales como covarianzas, correlaciones y semivarianzas (Ribeiro, 1995).

La semivarianza es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones y la distancia que separa esos puntos (Best y León 2006, Goovaerts, citado por Pravia 2009).

Los valores de la semivarianza se calculan mediante la siguiente expresión:

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

Donde $N_{(h)}$ es el número de pares de datos separados por la distancia h , que es la distancia que separa los puntos muestreados, $Z(x_i)$ son los valores de las variables observadas y x_i son las localizaciones donde son medidos los valores $Z(x_i)$.

La forma más fácil de desplegar los valores de la semivarianza es graficándolos. Poniendo en el eje de las abscisas la distancia de separación

entre las muestras y en la ordenada el valor de la semivarianza para cada distancia de separación, creándose el semivariograma (Moreno, 2009).

A continuación se presentan varias características o componentes relevantes de un variograma o semivariograma. Cuando los semivariogramas alcanzan cotas superiores a partir de las que $\gamma(h)$ permanece constante aún con el aumento de h , alcanza un máximo conocido como sill o meseta. Si el semivariograma alcanza el sill en un valor finito se dice que el semivariograma tiene rango. El rango es la distancia a la cual la autocorrelación se convierte en 0, esta distancia marca el límite de la dependencia espacial (Moreno, 2009). La varianza de nugget o efecto pepita existe cuando $\gamma(h)$, para $h=0$, presenta un valor distinto de 0 el cual es producido por varias fuentes de error desconocidas (como errores de medición) o variaciones generadas a escalas menores de las implementadas (Best y León, 2006).

La dependencia espacial puede ser clasificada como fuerte, moderada o débil de acuerdo a la relación nugget/sill. Los criterios de clasificación se basan en Cambardella et al. (1994) quienes sugieren que una relación nugget/sill menor a 0,25 indica fuerte dependencia, entre 0,25 a 0,75 dependencia moderada y mayor a 0,75 dependencia espacial débil (Pravia, 2009).

2.3.3. Predicción

Muchas propiedades podrían ser medidas en un número infinito de lugares pero en la práctica son medidas en pocos, principalmente por razones de economía (Moreno, 2009).

La autocorrelación espacial determinada en el análisis estructural, corresponde a información que es empleada para el proceso de estimación de zonas no muestreadas, lo cual corresponde a inferencia. Uno de los

métodos más empleados para esto es el kriging (Cressie 1993, Best y León 2006).

La idea fundamental del krigeado es consecuencia de los conceptos relacionados con la dependencia espacial, de tal manera que los lugares que disten menos entre sí tendrán valores de los atributos más semejantes que los correspondientes a los puntos o bloques que estén más separados (Moreno, 2009). Determinando el peso de los puntos vecinos usados para la interpolación de determinado punto a partir del grado de correlación espacial entre ellos (Plant, 2001).

La expresión matemática de la técnica de interpolación del kriging es:

$$Z(x) = m(x) + \gamma(h) + \varepsilon''$$

Dado $m(x)$ un componente estructural, $\gamma(h)$ un componente aleatorio correlacionado espacialmente y un error residual ε'' .

Para validar el kriging el método más empleado es el de validación cruzada, que consiste en excluir uno de los puntos muestrales y con los valores restantes y el modelo de semivarianza, predecir vía kriging el valor del punto que se excluyó. Si el modelo de semivarianza elegido describe adecuadamente la estructura de autocorrelación espacial, la diferencia entre el valor observado y el valor predicho debe ser pequeña (Moreno, 2009).

Luego de realizada la interpolación de los datos de las variables discretas muestreadas y de los datos de campo se debe analizar cómo el rendimiento se relaciona con las mismas. Para ello se usan comúnmente análisis de correlación y regresión lineal múltiple. Otra alternativa no paramétrica, es la clasificación y el uso de árboles de regresión CART (Plant, 2001).

Para poder usar la estadística clásica no puede existir correlación entre los datos. Para eliminar la correlación espacial se utiliza la siguiente ecuación (Bhatti et al., citados por Pravia, 2009):

$${}^{m+1}Y_{ij} = {}^mY_{ij} (1 - bx^{m+1} \hat{r}_0)$$

Donde ${}^{m+1}Y_{ij}$ es el rendimiento corregido para la interacción m+1, ${}^mY_{ij}$ es el rendimiento original para la ubicación ij, b es una constante (0,5) y ${}^{m+1} \hat{r}_0$ es el efecto sitio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN

El experimento se realizó en el departamento de Río Negro, Uruguay, en una chacra de 96 hectáreas pertenecientes al establecimiento “La rinconada” (32°47′18.94″S, 57°28′19.37″O, 63 metros de elevación). El sistema se encontraba bajo la modalidad de agricultura continua con siembra directa y la rotación de cultivos era soja 1°/trigo/soja 2°.

La chacra se encuentra en el padrón 5031 y se ubica sobre la formación Fray Bentos de la Carta Geológica del Uruguay, UDELAR (URUGUAY). FA (1998). Los suelos se corresponden con la Unidad de Suelos Young de la Carta de reconocimiento de suelos 1:1.000.000 (Altamirano et al., 1976) y con el grupo de suelos CONEAT 11.5 (Cuadro 1).

Cuadro 1: Descripción de los tipos de suelos

Unidad CONEAT	Formación geológica	Unidad de suelos	Suelos dominantes	Suelos asociados
11.5	Sedimentos limosos de la formación Fray Bentos	Young	Brunosoles Éutricos Típicos y Brunosoles Éutricos Háplicos	Brunosoles Éutricos Típicos moderadamente profundos y superficiales, Planosoles Éutricos Melánicos

Fuente: MGAP. PRENADER (2010).

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

El diseño experimental fue de boques completos al azar con cuatro tratamientos y tres repeticiones. Los tratamientos fueron tres distintas combinaciones de nutrientes y un testigo sin fertilizar (ver cuadro 2). La

fertilización se realizó sobre el trigo antecesor con el objetivo de evaluar el efecto residual de la misma sobre el rendimiento de la soja. El criterio de fertilización fue el de nutriente no limitante. Los tratamientos fueron dispuestos en fajas de 32 metros de ancho y 300 metros de largo las cuales fueron orientadas de manera de contemplar la mayor variabilidad de la chacra. El área total del ensayo fue 11,5 hectáreas.

Cuadro 2: Descripción de los tratamientos

Tratamiento	P (kg de P ₂ O ₅ /ha)	K (kg K ₂ O/ha)	S (kg S/ha)
Testigo	0	0	0
Fósforo	60	0	0
Fósforo+ Potasio	60	50	0
Fósforo+Potasio+ Azufre	74	57	40

3.3. MANEJO DEL CULTIVO

El ensayo se realizó sobre una soja de segunda sembrada bajo la modalidad de siembra directa cuyo antecesor fue trigo.

La siembra se realizó el día 27 de noviembre del 2011, el cultivar utilizado fue Don Mario 6.2. la densidad de siembra fue 102,5 kg/ha con semilla inoculada con Nitrasc y tratada con el curasemilla Metazin Plus (carbendazim + tiram + metalaxil), la implantación fue de 416.000 plantas por hectárea a V2, reduciéndose a 352.000 plantas por hectárea a cosecha.

El cultivo no se fertilizó, las aplicaciones de herbicidas, insecticidas y fungicidas se presentan en el cuadro 3.

Cuadro 3: Aplicaciones de herbicidas, insecticidas y fungicidas sobre el cultivo de soja

Fecha	Tipo de producto	Producto	Dosis
4 de enero	Herbicida	Roundap UltraMax	1.6 litros/ha
10 de marzo	Insecticida	Equus D (Tiametoxan + Deltametrina)	0.250 litros/ha
10 de marzo	Insecticida	Lorsban (Clorpirifos)	1 litro/ha
10 de marzo	Fungicida	Avatar (Azoxiestrobina + Ciprocomazol)	0.300 litros/ha
10 de marzo		Aceite Vegetal	0.500 litros/ha

3.4. DETERMINACIONES

3.4.1 Datos climáticos

Los datos pluviométricos diarios se obtuvieron de los registros del establecimiento donde se encontraba la chacra. La media histórica mensual de los años 1980 a 2009 se obtuvo de la estación meteorológica de Young.

3.4.2 Determinaciones de variables continuas

A partir de los puntos relevados por el monitor de la cosechadora se obtuvo un mapa de rendimiento con todos los datos provenientes de la cosechadora.

3.4.3 Determinaciones de variables discretas

Cada faja de fertilización contiene 10 puntos georeferenciados (se corresponden con el centro de cada celda) separados 30 metros entre sí y que forman una grilla regular donde se realizaron mediciones de variables relacionadas con las propiedades edáficas y topográficas de la chacra, así como determinaciones del cultivo.

3.4.3.1. Propiedades topográficas de la chacra

Se relevó el valor de elevación de cada uno de los puntos de la grilla a partir de un GPS.

3.4.3.2. Propiedades edáficas de la chacra

Al momento de la siembra se relevaron todos los puntos con calador tomándose una muestra de suelo compuesta de 0 a 20 centímetros, con esta muestra luego en el laboratorio se realizaron las determinaciones de humedad del suelo (H_2O), porcentaje de carbono orgánico (Co), pH en H_2O y en KCl, nitratos (NO_3), potasio (K_2O) y fósforo (P).

Las determinaciones de humedad se realizaron a partir del secado de una muestra de 100g aproximadamente en estufa a 100 °C. El porcentaje de carbono orgánico se realizó por el método Walkley-Black, los nitratos en suelo por la técnica de electrodo de actividad específica (método potenciométrico), el contenido de potasio bajo la forme de cloruro de potasio por la técnica de determinación de bases mediante extracción con acetato de amonio 1M a pH 7 y lectura por espectrofotómetro de absorción atómica, el pH se determinó tanto en H_2O como en KCl por el método potenciométrico y el fósforo se determinó por la técnica de Bray No. 1.

Se realizó un mapa de suelos del ensayo a partir del muestreo del mismo con taladro holandés en una grilla compuesta por 49 puntos georeferenciados, determinándose profundidad de los horizontes y textura del horizonte superficial.

3.4.3.3. Propiedades del cultivo

El 21 de enero se realizó la estimación de implantación (Imp.) del cultivo midiendo 10 metros lineales, así como la fenología en cada punto de la grilla.

El 24 de febrero se determinó la altura promedio de plantas (Alt.) midiendo 6 plantas en cada punto, y se determinó el estado fenológico.

El 26 de abril se estimó el rendimiento a partir del relevamiento de los componentes del mismo en 10 metros lineales (plantas/metro, número de chauchas/planta, granos/chaucha, peso de grano y humedad de grano).

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Se estandarizaron los datos de rendimiento provenientes del monitor de la cosechadora llevándolos a kilogramos por hectárea.

El efecto sitio y su distribución dentro de la chacra se determinó normalizando el rendimiento proveniente del monitor de la cosechadora y procesándolo en el programa ArcGis/10. El efecto sitio representa la diferencia del rendimiento en un punto con respecto a la media del tratamiento al cual corresponde.

A partir de la realización de semivariogramas se determinó si el rendimiento presentaba correlación espacial y se realizó un mapa continuo para esta variable por la metodología de kriging.

Se evaluó el efecto tratamiento mediante un test de Tukey usando 0,05 como nivel de significancia en el programa estadístico InfoStat/E para lo cual se utilizaron tres variables, el rendimiento original proveniente de la cosechadora, el rendimiento original usando como co-variable el efecto sitio y un rendimiento corregido por el efecto sitio.

La variable rendimiento corregido se obtuvo corrigiendo el rendimiento original por el efecto sitio por medio de la fórmula ${}^{m+1}Y_{ij} = {}^mY_{ij} (1 - bx^{m+1} \hat{r}_0)$. Esta fórmula también fue utilizada para corregir todas las variables discretas que presentaron correlación espacial.

Se realizó un análisis de varianza de las variables químicas del suelo con el programa InfoStat/E para lo cual se utilizó un test de Tukey con 0,05 de nivel de significancia y como co-variable el efecto sitio del rendimiento.

A partir del mapa de rendimiento se diferenciaron dos zonas, una de rendimiento por encima de la media y otra por debajo de la misma, donde se evaluó el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento en cada una de ellas. El rendimiento utilizado en este caso fue el promedio de datos comprendidos dentro de una celda de 30 metros de largo y 32 de ancho de manera de que cada faja de fertilización quedó compuesta por 10 celdas. Cabe destacar que para este análisis se utilizaron sólo 2 bloques de manera que todos los tratamientos presenten puntos en ambas zonas. Para este análisis se usó como co-variable el efecto sitio del rendimiento.

Las variables discretas medidas que podrían explicar la variación de rendimiento que da origen a las dos zonas se analizaron por un lado mediante la realización de un inferencia basada en dos muestras con la prueba T, además se les realizó un análisis de varianza particionando por zona de alto y bajo rendimiento y por último para todas la variables medidas en el suelo se realizó un análisis de conglomerados donde se agrupan puntos en tres grupos de acuerdo a la similitud que presentan.

Todos estos análisis fueron realizados con el programa InfoStat/E usando 0,05 como nivel de significancia.

Se determinó el grado de concordancia que hay entre los grupos de conglomerados con las zonas de distinta productividad y los tratamientos mediante la realización de un análisis de contingencia entre estas variables en el InfoStat/E.

La concordancia entre el rendimiento de trigo con el rendimiento de la soja así como con las variables discretas fue observada mediante la realización de tablas de contingencia en el programa InfoStat/E. Donde para

cada una de las variables se realizaron dos grupos (alto y bajo), uno por encima y otro por debajo de la media.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la Figura 1 se presenta la caracterización pluviométrica mensual del período comprendido entre junio del 2011 y mayo del 2012 y se lo compara con la media histórica del 1980 al año 2009.

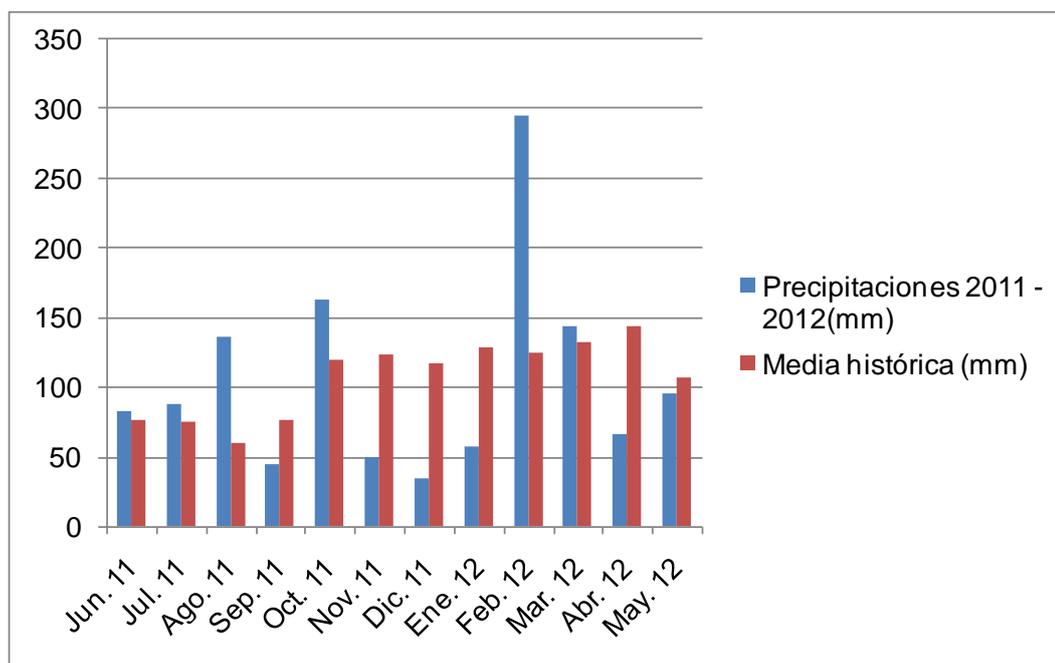


Gráfico 1: Precipitación mensual del período junio 2011-mayo 2012 y media histórica del 1980 al 2009

El año se caracterizó por ser muy seco en las etapas finales del cultivo de trigo y en los primeros meses de desarrollo del cultivo de soja, cambiando esta situación en los meses de febrero y marzo donde la precipitaciones fueron superiores a la media histórica.

4.2. ANÁLISIS DE LA CORRELACIÓN ESPACIAL DEL RENDIMIENTO DE SOJA

En el Cuadro 4 se muestra el resultado del análisis realizado para determinar la existencia de correlación espacial de los datos de rendimiento de soja obtenidos con el monitor de rendimiento geo-referenciado montado en la cosechadora.

Cuadro 4: Datos del semivariograma realizado para el rendimiento de soja obtenido por la cosechadora

Datos del semivariograma	
Número de datos utilizados	1633
Rango (metros)	48,6
Nugget	0,0168496
Sill	0,0504879
Relación Nugget/Sill	0,33

Dada la relación Nugget/Sill de 0,33 se puede afirmar que existió una correlación espacial moderada a fuerte (Cambardella et al., citados por Pravia, 2009) y que el rango o límite de la dependencia espacial fue de 48,6 m. Por tanto, a partir de esta distancia se perdió la correlación espacial para un par de datos determinados (Moreno, 2009).

A partir del semivariograma estimado, se interpoló el mapa de rendimiento de soja (Figura 1), y se ubicó sobre el mismo la localización de los tratamientos.

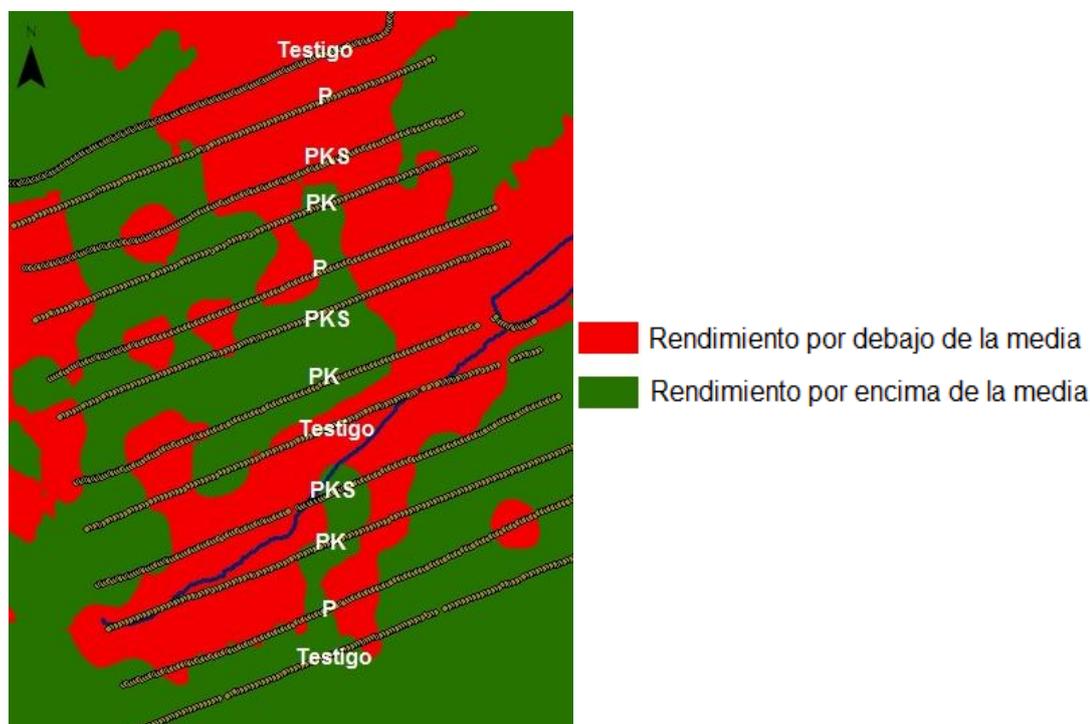


Figura 1: Zonas de productividad definidas a partir del rendimiento de soja después de removido el efecto tratamiento

Se identificaron dos zonas de productividad definidas como rendimiento inferior y superior a la media estimada luego de remover el efecto tratamiento. Esto implica que el rendimiento de soja en esas zonas fue aumentado o disminuido por un efecto sitio que a su vez, presentó correlación espacial. Las zonas cruzan toda el área experimental, por lo que es posible ubicar datos de rendimiento de todos los tratamientos en las dos zonas definidas y, por lo tanto, analizar el efecto residual de la fertilización al trigo sobre la soja en esas dos zonas de productividad diferencial.

4.3. ANÁLISIS DEL EFECTO RESIDUAL DE LA FERTILIZACIÓN DE TRIGO SOBRE EL RENDIMIENTO DE SOJA Y CONTENIDO DE NUTRIENTES DEL SUELO

En el cuadro 5 se presenta el resultado del análisis de varianza para rendimiento de soja realizado con los datos originales tomados con el monitor de rendimiento de la cosechadora, el rendimiento original utilizando

como co-variable un estimador del efecto sitio (con el fin de remover el mismo del error experimental) y el rendimiento corregido por el efecto sitio.

Cuadro 5: Rendimiento de soja a partir del monitor (Rend.monitor), rendimiento considerando “efecto sitio” como co-variable (Rend.cov.) y rendimiento corregido por el efecto sitio (Rend.corr) según tratamientos de fertilización aplicados en trigo

Tratamiento	Rend.monitor Original (Mg ha ⁻¹)	Rend.cov. (Mg ha ⁻¹)	Rend.corr (Mg ha ⁻¹)
Testigo	1,74a	1,74 ^a	1,67a
P	2,04ab	2,04b	1,99b
PK	2,04ab	2,04b	2,02b
PKS	2,11b	2,11c	2,07b
CV (%)	25,5	2,1	19,8

P: fertilización con fósforo, PK: fertilización con fósforo y potasio, PKS: fertilización con fósforo potasio y azufre, CV: coeficiente de variación.

Medias con letra común dentro de columnas no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

El primer factor a destacar es que el coeficiente de variación del análisis cuando se utilizó el Rend.monitor, fue cercano al 25% y descendió a 2% cuando se usó como co-variable el “efecto sitio”. Esto es el resultado de que al considerar el rendimiento original el “efecto sitio” está contenido en el error experimental. Esto es importante dado que cuanto menor sea el CV el experimento tendrá mayor sensibilidad para detectar efecto de los tratamientos.

Cuando se analiza Rend.monitor, el único tratamiento que se diferenció significativamente del resto fue PKS. Como era de esperar, al analizar la misma variable pero utilizando como co-variable el efecto sitio (Rend.cov.), fue posible mejorar la capacidad de identificar efecto residual de la fertilización al trigo. Nuevamente el rendimiento de soja fue

significativamente mayor sobre PKS, pero los tratamientos P y PK superaron significativamente al testigo. Por último al considerar la correlación espacial de los datos para corregir el efecto tratamiento (Rend.corr) el resultado muestra diferencias significativas solamente entre los fertilizados y el testigo sin fertilizar. La diferencia con Rend.cov. es la consideración de la distribución en el espacio de los datos y su correlación. Como se observa en la Figura 1, una proporción importante de las observaciones correspondientes a PKS se ubicaron en zonas de la chacra donde el efecto sitio fue positivo (Rendimiento por encima de la media).

Cabe destacar que el análisis de la variable rendimiento corregido es el que más se acerca a la realidad dado que no sólo corrige el efecto sitio sino que lo hace considerando la correlación espacial de los datos. Esto implica que el supuesto de independencia de los datos tomados, necesario para realizar un análisis estadístico convencional (Rend.monitor) no se cumplió, y que por lo tanto el efecto tratamiento real es el surgido del análisis Rend.corr. (Plant 2001, Best y León 2006, Goovaerts, citado por Pravia 2009).

Considerando el análisis de la variable Rend.corr, sólo existió efecto residual de la fertilización con fósforo, ya que el tratamiento P rindió significativamente más que el testigo y no se detectaron diferencias con los tratamientos que además, recibieron K o K y S.

Los análisis de suelo, realizados muestreando dentro de una grilla de 30*30 m, no presentaron correlación espacial (datos no mostrados), por lo que no fue posible interpolar los datos y construir un mapa de disponibilidad de nutrientes. Esto no significa necesariamente que no existe correlación espacial de los datos, sino que, con la intensidad de muestreo realizada no se pudo identificar. Los resultados del análisis de varianza para el efecto tratamiento de los datos sin corregir se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6: Nutrientes disponibles y humedad en el suelo a la siembra de soja según tratamiento de fertilización al trigo

Tratamiento	pH H ₂ O	pH KCl	P (ppm)	C (%)	H ₂ O (%)	NO ₃ ⁻ (ppm)	K ₂ O (meq)
Testigo	6,3a	5,5a	18 b	2,7a	19 a	8 a	0,28a
P	6,6a	5,4a	20 ab	2,5a	19 a	9 a	0,29a
PK	6,3a	5,6a	24 a	2,7a	19 a	9 a	0,33a
PKS	6.5a	5,8a	21 ab	2,6a	19 a	9 a	0,32a

Tratamientos: P: fertilización con fósforo, PK: fertilización con fósforo y potasio, PKS: fertilización con fósforo potasio y azufre. Variables discretas: pH_{H2O}: pH en agua, P: fósforo a la siembra, C: carbono orgánico, H₂O: humedad a la siembra, NO₃: nitrato a la siembra y K₂O: potasio a la siembra.

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

El único nutriente cuya disponibilidad a la siembra de soja fue modificada por la fertilización en trigo fue el fósforo (18 ppm contra 22 ppm para testigo y la media de los fertilizados con P respectivamente).

La respuesta en rendimiento de soja se corresponde con la diferencia en disponibilidad del nutriente, pero no es lo esperado para los valores absolutos de disponibilidad, ya que todos los tratamientos estuvieron por encima del valor crítico de respuesta manejado en Uruguay para el cultivo (10 a 12 ppm Bray I).

Por otro lado todos los tratamientos tuvieron bajos niveles de potasio, inferiores al valor crítico de respuesta. Si bien el rendimiento del cultivo no se diferenció entre tratamientos fertilizados, lo cual coincide con la falta de diferencias en el K intercambiable en el suelo, todos los tratamientos tuvieron un valor menor al crítico de respuesta a la fertilización (Barbazán et al., 2011).

Estos resultados podrían atribuirse a que, en el momento de tomar las muestras el K absorbido por el trigo aun estaba en el rastrojo. Estas situaciones han sido reportadas cuando entre la madurez de un cultivo y el muestreo de suelo no ocurren lluvias suficientes que laven el K retenido en los rastrojos (Scomberg y Steiner, citados por Maturana y Acevedo, 2013). En este caso entre la madurez fisiológica del cultivo (15 de noviembre del 2011) y el momento de muestreo (8 de diciembre del 2011) llovieron 15 mm.

Las lluvias posteriores al 8 de diciembre que sumaron 92 mm, podrían haber permitido “barrer” el K retenido en el rastrojo ubicado a todos los tratamientos con un aporte de K por encima del crítico y, por tanto, al quedar el K disponible, el cultivo respondió al agregado de K al trigo.

4.4. RESPUESTA A LOS TRATAMIENTOS SEGÚN ZONA

A continuación se realizó un análisis del rendimiento considerando la variación espacial del mismo. Para esto se realizó un análisis de varianza del rendimiento de celda particionado por zona de productividad.

Cabe destacar que cuando se promedió el rendimiento de cada celda se perdió la correlación espacial que fue cuantificada cuando se utilizaron todos los datos provenientes de la cosechadora. Esto implica que al promediar todos los datos dentro de la celda y referirlos a la coordenada del centro de cada celda, se perdió la capacidad de ajustar un nuevo semivariograma significativo. El resultado estaría indicando que la correlación espacial fuerte ocurrió a una distancia menor que los 30 m, lo cual coincide con la falta de correlación espacial de los muestreos discretos realizados en grillas de 30*30m.

Cuadro 7: Rendimiento de soja (Mg ha^{-1}) promedio de celdas de 30×30 en respuesta a tratamientos de fertilización aplicados al trigo previo particionado por zona de productividad

Zona	n	Tratamientos				CV %
		Testigo	P	PK	PKS	
A	25	2,01 a	2,22 a	2,39 a	2,35 a	8,1
B	31	1,37 c	1,84 a	1,65 b	1,91 a	14,47

A: rendimiento superior a la media; B: rendimiento igual o inferior a la media. Tratamientos: P: fertilización con fósforo, PK: fertilización con fósforo y potasio, PKS: fertilización con fósforo potasio y azufre.

Medias seguidas por la misma letra dentro de filas no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Si bien no es posible comparar las zonas, la soja presentó una respuesta residual a la fertilización al trigo según estuviera ubicada en una zona de rendimiento superior o inferior a la media de producción después de removido el efecto tratamiento. En la zona de alta producción no existió efecto residual a la fertilización, mientras que en la zona de baja producción los tratamientos P y PKS superaron significativamente al testigo y a PK.

Este comportamiento diferencial entre zonas de productividad puede ser atribuido a diferencias en la disponibilidad de nutrientes y agua a la siembra de soja (Cuadro 8).

Cuadro 8: Prueba de T para las variables discretas medidas usando como variable de clasificación los ambientes de producción

Variable	Grupo 1	Grupo 2	Media(1)	Media(2)	p-valor
Población	{A}	{B}	16	16	0,4730
Altura	{A}	{B}	38	36	0,1270
pHH ₂ O	{A}	{B}	6,65	6,55	0,5095
pHKCl	{A}	{B}	5,97	5,81	0,3911
P	{A}	{B}	22	19	0,1150
C	{A}	{B}	2,48	2,44	0,7333
H ₂ O	{A}	{B}	19	18	0,0633
NO ₃	{A}	{B}	8,30	8,37	0,8767
K ₂ O	{A}	{B}	0,34	0,29	0,0002

Variables discretas: pHH₂O: pH en agua, P: fósforo (ppm P Bray I) a la siembra, C: carbono orgánico (%), H₂O: humedad a la siembra, NO₃: nitrato a la siembra y K₂O: potasio a la siembra (meq K/100gr de suelo), altura: altura de planta en R1-R2 (cm), Población: número de plantas por metro lineal.

Tomando un nivel de significancia de 0,10, se observa que las zonas difirieron en el contenido de potasio y en la humedad a la siembra. Por tanto, la respuesta en rendimiento de la soja a la fertilización del trigo debería ser atribuida fundamentalmente a la disponibilidad diferencial de K entre zonas de la chacra. Mientras que en la zona A, el K intercambiable en los primeros 20cm del suelo fue superior al valor crítico de respuesta, en la zona B fue inferior a este.

Si bien no hubo efecto tratamientos sobre los componentes del rendimiento de soja, se realizó un contraste de los tratamientos con K contra la media de los sin K, el mismo dio significativo para granos por chaucha lo que explicaría la respuesta diferencial del cultivo entre zonas (Cuadro 9).

Cuadro 9: Significancia (p-valor) del contrastes entre tratamientos fertilizados con potasio y sin potasio para componentes del rendimiento particionado por zona de productividad

	p-valor		
	chauchas/planta	granos/chauchas	peso de granos
A	0,905	0,977	0,276
B	0,833	0,057	0.548

La fertilización potásica aumentó el número de granos por chaucha en la zona de baja productividad ($p \leq 0,07$), lo que estaría reafirmando la hipótesis de que podría ser éste nutriente el causante de las diferencias en rendimiento observado.

4.5. ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS

Como las variables discretas no presentaron correlación espacial, se realizó un análisis de conglomerados donde se agruparon los puntos muestreados con la finalidad de determinar cuáles de las variables del suelo determinaron las variaciones en el rendimiento. Cabe destacar que cada valor de la variable tiene contenido el efecto sitio así como el efecto tratamiento.

Cuadro 10: Rendimiento de soja (Mg ha^{-1}) utilizando como variable de clasificación conglomerados

Conglomerado	Medias	Test de Tukey
3	1.85	b
1	2.06	ab
2	2.08	a

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Se detectaron tres conglomerados cuyas medias de rendimiento, analizadas usando los conglomerados como variable de clasificación, mostraron diferencias significativas entre sí.

Para determinar cuáles son las variables que explican esta variación se realizó un análisis de varianza para las variables de suelo con partición por grupo de conglomerado.

Cuadro 11: Análisis de la varianza de las variables del suelo con partición en conglomerados

Cong.	P	pHKCl	pHH ₂ O	C	H ₂ O	K ₂ O	NO ₃
3	20a	5,3a	6,1a	2,8b	18,8ab	0,26a	9a
2	27b	5,2a	6a	3,1c	19,4b	0,33b	9a
1	18a	6,4b	7b	2,1a	18,6a	0,33b	8a

Cong.: Conglomerados. Variables discretas: pHH₂O: pH en agua, pHKCl: pH en cloruro de potasio, P: fósforo (ppm) a la siembra, C: carbono orgánico (%), H₂O: humedad a la siembra, NO₃: nitrato a la siembra y K₂O: potasio a la siembra (meq K/100gr de suelo), altura: altura de planta en R1-R2 (cm), Población: número de plantas por metro lineal.

Medias con letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$).

Para la variable fósforo disponible en el suelo, a pesar de que el conglomerado 2 presentó mayores niveles de este nutriente, la media de todos los conglomerados estuvo por encima del nivel crítico. En cuanto al pH en H₂O todos los conglomerados se encontraron dentro del rango crítico para la especie (Magra y Ausilio, 2004). En cuanto al carbono orgánico se diferenció el conglomerado 2, indicando que éste representa suelos con mayor fertilidad. En cuanto a la humedad a la siembra el conglomerado 2 se diferencia del 1 por presentar mayor contenido de agua, lo cual concuerda con el mayor contenido de carbono orgánico que presentó el mismo. Por

último, en cuanto al K intercambiable, el conglomerado 3 presentó menor disponibilidad, siendo el único que estuvo dentro de la zona de respuesta, los conglomerados 1 y 2 se encuentran en el límite de la zona de respuesta.

Por lo tanto el conglomerado 2, con mayor capacidad de aporte de K, así como mayor concentración de carbono orgánico, rindió más que el conglomerado 3. Al comparar el conglomerado 1 contra el 2 se ve que los mismos presentan igual nivel de potasio y a pesar de que el conglomerado 1 presentó menor cantidad de carbono orgánico ambos lograron el mismo rendimiento, por lo que, nuevamente, el K intercambiable aparece como asociado a la respuesta diferencial del cultivo de soja.

En el Cuadro 12 se analiza la concordancia entre la ubicación de los conglomerados y las zonas de productividad.

Cuadro 12: Tabla de contingencia para conglomerados y zonas de productividad

Conglomerado	A	B	Total
1	17	15	32
2	8	11	19
3	16	15	31
Total	41	41	82

A: rendimiento superior a la media; B: rendimiento igual o inferior a la media.

No existió relación entre las zonas delimitadas por la variación espacial de rendimiento con los conglomerados, por lo que se podrían concluir que éstos no estuvieron definidos por el efecto sitio, lo que sí sucedió al analizar la concordancia con los tratamientos de fertilización (Cuadro 13).

Cuadro 13: Tabla de contingencia para conglomerados y tratamientos

Conglomerado	Testigo	P	PK	PKS	Total
1	6	10	8	10	34
2	1	2	12	7	22
3	16	11	4	6	37
Total	23	23	24	23	93

Tratamientos: P: fertilización con fósforo, PK: fertilización con fósforo y potasio, PKS: fertilización con fósforo potasio y azufre.

Considerando el Chi cuadrado de Pearson ($p= 0,0004$) se deduce que los conglomerados estuvieron definidos fundamentalmente por los tratamientos de fertilización al trigo.

Cuando se analizan los tratamientos que integran los conglomerados 2 y 3, diferentes significativamente entre sí, el 73% de las observaciones que integran el conglomerado 3, corresponden a tratamientos que no recibieron fertilización potásica. Por otro lado en el conglomerado 2, con mayor rendimiento, el 86% de las observaciones corresponden a los tratamientos con fertilización potásica.

4.6. CORRELACIÓN ENTRE ZONAS DE PRODUCTIVIDAD DE LA SOJA Y EL RENDIMIENTO DEL TRIGO ANTECESOR

Con el objetivo de establecer si las zonas de productividad determinadas para el cultivo de soja se corresponden con las zonas de alto y bajo rendimiento del trigo antecesor (es decir que las zonas se mantuvieron en el tiempo), se realizó un análisis de contingencia entre el rendimiento de trigo y el de soja. Para esto se realizaron dos grupos definidos en función del rendimiento medio de cada cultivo (por encima y otro por debajo de la media (alto y bajo respectivamente)).

Cuadro 14: Tabla de contingencia entre grupos de rendimiento de trigo y soja

Rendimiento de trigo	Rendimiento de soja	n	Porcentaje
Alto	Alto	32	34
Alto	Bajo	11	12
Bajo	Alto	16	17
Bajo	Bajo	34	37
Total	Total	93	100

El análisis fue significativo (Chi cuadrado de Pearson 0,007), indicando que el comportamiento del trigo y la soja siguieron el mismo patrón. Los sitios en los que el rendimiento de trigo fue mayor, también lo fue el de soja de segunda. Por tanto, las zonas de productividad, definidas utilizando monitores de rendimiento de cultivo, presentaron repetitividad, por lo que podrían ser utilizadas para zonificar las chacras.

5. CONCLUSIONES

Existió variabilidad en el rendimiento de soja, y utilizando los datos provenientes del monitor de rendimiento, fue posible captar la correlación espacial. Cuando se promediaron estos datos de manera de obtener un dato por celda no fue posible captar correlación espacial.

Se distinguieron dos zonas de productividad, una por debajo y otra por encima de la media del rendimiento de soja, las que concordaron con las zonas de mayor y menor rendimiento del trigo previo.

El K intercambiable fue la variable estudiada que presentó concordancia con las zonas de productividad definidas.

En la zona de alta producción no existió efecto de la fertilización residual al trigo, mientras que sí existió en la zona de baja producción. El causante de esta respuesta diferencial a la fertilización fue el potasio, el cual afectó el número de granos por chaucha.

6. RESUMEN

Las chacras de Uruguay presentan una gran heterogeneidad espacial asociada a distintos tipos de suelos y atributos del terreno. La agricultura de precisión permite identificar zonas dentro de una chacra donde los factores que limitan el rendimiento del cultivo son los mismos permitiendo realizar prácticas de manejo diferentes para cada zona. Uno de los primeros factores a manejar es la fertilización. En este marco se realizó esta investigación con el objetivo de identificar si existe un efecto residual de la fertilización con fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) al trigo sobre el rendimiento de la soja de segunda, y su posible interacción con zonas dentro de una chacra en las que se identificó un comportamiento diferencial de los cultivos previos. Para esto en una chacra comercial se realizó un experimento con distintas combinaciones de P, K y S distribuidas en fajas de forma de abarcar la variabilidad existente en la chacra. A partir de la existencia de variabilidad en el rendimiento de soja y una correlación espacial del mismo de moderada a fuerte, se identificaron dos zonas de productividad, una por debajo y otra por encima de la media del rendimiento. En la zona de alta producción no existió efecto de la fertilización residual en el rendimiento, mientras que en la zona de baja producción sí existió. El causante de esta respuesta diferencial a la fertilización fue el potasio, el cual afectó el número de granos por chaucha.

Palabras clave: Soja; Fertilización residual; Variabilidad de rendimiento; Fósforo; Potasio; Azufre; Correlación espacial; Agricultura de precisión.

7. SUMMARY

The fields in Uruguay show a great spatial heterogeneity, associated to different types of soils and ground attributes. Site specific agriculture enables to identify areas within a same field where the yield limiting factors are the same, enabling to perform different management practices, for each area. One of the first management factors to consider is fertilization. This investigation aimed at identifying if Phosphorus (P), Potassium (K) and Sulfur (S) fertilization on wheat, had a residual effect on the following soybean crop yield; and the possible interaction with areas on the same field which showed a differential behavior in previous crops. To this effect, an investigation was carried out in a commercial field using different P, K and S combinations, distributed along strips, which enabled to consider the variability shown in the field. From the variability and a moderate to strong spatial correlation shown in the soybean yield, two different productivity areas were identified: one below media yield and other above. In the high yield area, there was no residual fertilization effect on yield, whereas in the low productivity area the effect of residual fertilization was significant. The cause of this differential response to fertilization was attributed to Potassium, which changed the number of grains per pod.

Key words: Soybean; Residual fertilization; Yield variability; Phosphorus; Potassium; Sulfur; Spatial correlation; Site specific agriculture.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Ahunchain, M.; Klaassen, M. 1990. Causas de variabilidad en rendimiento de trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.
2. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echevarria, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimientos de suelos del Uruguay; clasificación de suelos del Uruguay. Montevideo, MAP. DSF. t.1, 96 p.
3. Best, S.; León, L. 2006. 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. 147-161.
4. Barbazán, M.; Boutes, C.; Beux, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano sobre areniscas cretácicas y transicionales. IPNI. Informaciones Agronómicas del cono Sur. no. 41: 1-9.
5. _____.; _____.; _____.; Bordoli, M.; Cano, J.; Ernst, O.; Garcia, A.; Garcia, F.; Quincke, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelo. Agrociencia (Montevideo). 15 (2): 93-99.
6. Bragachini, M.; Méndez, A.; Scaramuzza, F.; Proietti, F. 2006. Monitor de rendimiento y elaboración de mapas; Cultivos tradicionales. 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. 45-52.

7. Cano, J.; Ernst, O.; García, F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. *Informaciones Agronómicas IPNI*. no. 36: 9-12.
8. Coitiño, J.; Mazzoni, P. 2011. Respuesta a la fertilización con fósforo, potasio y azufre en trigo en ambientes con diferente potencial de producción dentro de una misma chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 59 p.
9. Cressie, N. 1993. *Statistics for spatial data; Geostatistics*. New York, Wiley-Interscience. 900 p.
10. 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.
11. García, A; Quincke, A. 2011. El azufre en cereales de invierno; resumen de resultados experimentales y repaso de la teoría. *In: Jornada de Divulgación Aportes a la Zafra de Cultivos de Invierno (2011, Durazno, UY)*. Memorias. Montevideo, INIA. pp. 33-36 (Actividades de Difusión no. 646).
12. Gutiérrez, F.; Scheiner, J. 2006. Soja. *In: Echeverría, H.; García, F. eds. Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Buenos Aires, INTA. pp. 283-297.

13. Hernández, J. 2010. Fósforo. Montevideo, Uruguay, Facultad de Agronomía. 89 p.
14. Hoffman, E. 2012. Criterios y estrategias de fertilización que apunten a asegurar el suministro de fósforo en cultivos de soja de segunda. (en línea). In: ISTRO Conference (19th.), Encuentro de la Sociedad Uruguay de la Ciencia del Suelo (4º., 2012, Montevideo, UY). Trabajos presentados. Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado oct. 2012. Disponible en <http://istro2012.congresos-rohr.info/programa/programaExtendido.php?casillero=35094500&idioma=&sala =5&dia =3>.
15. Justo, C.; Sciana, C. 2011. Agricultura por ambientes. Estrategias de manejo de maíz en suelos con diferente aptitud productiva; memoria técnica. General Villegas, INTA General Villegas. pp. 11-14.
16. Kravchenko, A.; Bullock, D. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal*. 92 (1): 75-83.
17. Magra, G.; Ausilio, A. 2004. Corrección de la acidez de los suelos. (en línea). *Agromensajes*. no. 13: s.p. Consultado dic. 2012. Disponible en <http://www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/13/9AM13.htm>.
18. Mantovani, E.; De Carvalho Pinto, F. de A.; Marcal 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.

19. Maturana, M.; Acevedo, E. 2003. Cambios en la fertilidad del suelo asociados a cero labranza; descomposición del rastrojo y su destino. (en línea). Santiago de Chile, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. pp. 52-62. Consultado oct. 2012. Disponible en http://www.sap.uchile.cl/descargas/cero/Cambios_en_la_fertilidad_del_suelo_asociados_a_cero_labranza.pdf.
20. MGAP. PRENADER (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Proyecto de Manejo de los Recursos Naturales y Desarrollo del Riego, UY). 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 23 oct. 2012. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat>.
21. Moreno, J. 2009. Introducción a la geoestadística y su aplicación. Tesis Licenciatura. México, D. F., México, Universidad Autónoma de Chapingo. 151 p.
22. Núñez, A. 2010. El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos; situación del potasio en la agricultura uruguaya. In: Jornada Técnica el Efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización del Cultivo (2010, Mercedes, Soriano, UY). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 11-14 (Actividades de Difusión no. 605).
23. Otaño, C.; Zarucki, I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos de terreno sobre la variabilidad de rendimiento del

- cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 107 p.
24. Piepho, H.; Richter, C.; Spilke, J.; Hartung, K.; Kunick, A.; Thole, H. 2011. Statistical aspects of on-farm experimentation. *Crop and Pasture Science*. 62: 721-735.
25. Plant, R. 2001. Site-specific management; the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 30: 9–29.
26. 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.
27. Ribeiro, P. 1995. Métodos geoestadísticos no estudo da variabilidade espacial de parámetros do solo. Tesis M. Sc. San Pablo, Brasil. Universidade de San Pablo. Escola Superior de Agricultura. 99 p.
28. Roel, A.; Terra, J. 2006. Muestreos 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.

29. Salvagiotti, F.; Gerster, G.; Bacigaluppo, S.; Castellarín, J.; Galarza, C.; Gonzalez, N.; Gudelj, V.; Novello, O.; Pedrol, H.; Vallone, P. 2004. Efectos residuales y directos de fosforo y azufre en el rendimiento de soja de segunda. *Ciencia del Suelo*. 22(2): 92-101.
30. Steel, R.; Torrie, J. 1985. *Bioestadística; principios y procedimientos*. 2^a ed. Bogotá, Colombia, Presencia. 622 p.
31. Taiz, L.; Zeiger, E. 2006. *Plant physiology; mineral nutrition*. 4th. ed. Sunderland, England, Sinauer. pp 73-93.
32. Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Agronomía. 1998. *Carta geológica de Uruguay*. Montevideo. Escala 1:500.000.
33. Vivas, H.; Garcia, F.; Fontanetto, H. 2001. La fertilización del doble cultivo trigo-soja. (en línea). INTA Rafaela. Anuario 2001: s.p. Consultado 20 jul. 2012. Disponible en http://rafaela.inta.gov.ar/anuario2001/a2001_125.htm.
34. _____.; Vera Candiotti, N.; Albrecht, R.; Martins, L.; Quaino, O.; Hotián, J. 2010. Información técnica cultivos de verano; Fósforo y azufre en una secuencia de cultivos para una fertilización cada dos cosechas. INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 118: 86-92.