

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**COMPARACIÓN DE 2 CRITERIOS (NIVELES CRÍTICOS Y ELEVAR Y
MANTENER EL NIVEL DE NUTRIENTES) Y 2 SISTEMAS DE
FERTILIZACIÓN (VARIABLE Y UNIFORME) EN CULTIVOS DE SOJA Y
SORGO**

por

**Camila María BONILLA CEDREZ
Andrés Daniel FEUER JASO**

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

**MONTEVIDEO
URUGUAY
2011**

Tesis aprobada por:

Director:
Ing. Agr. (Ph.D.) José Alfredo Terra Fernández

.....
Ing. Agr. (Ph.D.) Guillermo Siri-Prieto

.....
Ing. Agr. (MSc.) José Martín Bordoli Rodríguez

Fecha: 30 de junio de 2011

Autor:
Camila María Bonilla Cedrez

.....
Andrés Daniel Feuer Jaso

AGRADECIMIENTOS

Al tutor de tesis Ing. Agr. (Ph.D.) José Terra y al co-tutor Ing. Agr. (Ph.D.) Álvaro Roel por el apoyo, la atención y los conocimientos brindados.

Al personal del laboratorio de física de suelos y riego del INIA Treinta y Tres por su disposición y colaboración en el trabajo de campo.

A la Universidad de la República y muy particularmente a la Facultad de Agronomía, por haber posibilitado nuestra formación profesional y contribuido a nuestra formación personal.

A nuestras familias y amigos por el apoyo brindado y habernos acompañado durante todo el proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN.....	3
2.1.1 <u>Monitores de rendimiento</u>	3
2.1.2 <u>Manejo sitio específico</u>	4
2.1.2.1 Muestreo de suelos: método de medición discreto..	4
2.1.2.2 Mapas de rendimiento: método de	
muestreo continuo.....	5
2.1.3 <u>Variabilidad espacial del suelo</u>	5
2.1.3.1 Medidas de variabilidad.....	6
2.2 GEOESTADÍSTICA.....	7
2.2.1 <u>Autocorrelación espacial</u>	7
2.2.1.1 Índices de autocorrelación espacial.....	8
2.2.2 <u>Interpolación espacial</u>	9
2.2.2.1 Técnicas de caracterización de distribución de	
datos de interpolación espacial.....	9
2.2.2.2 Variograma.....	11
2.2.2.3 Kriging.....	12
2.3 CRITERIOS DE FERTILIZACIÓN.....	13
2.4 NIVELES DE NUTRIENTES EN URUGUAY.....	17
2.5 TECNOLOGÍAS DE APLICACIÓN VARIABLE (VRT).....	20
2.5.1 <u>Expectativas acerca de las VRT</u>	21
2.5.2 <u>Antecedentes</u>	21
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	26
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL.....	26
3.2 TRATAMIENTOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL.....	26
3.3 DETERMINACIONES Y REGISTROS.....	30
3.3.1 <u>Pre-siembra</u>	30
3.3.2 <u>En cultivo</u>	31
	IV

3.3.2.1	Implantación.....	31
3.3.2.2	Contenido de agua gravimétrico.....	31
3.3.2.3	Altura y biomasa.....	31
3.3.2.4	Actividad clorofiliana (SPAD).....	32
3.3.2.5	Contenido de N-NO ₃ en suelo.....	32
3.3.3	<u>Cosecha y post-cosecha</u>	32
3.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS.....	33
3.4.1	<u>Estadística descriptiva</u>	33
3.4.1.1	Box-plots.....	33
3.4.2	<u>Análisis estadístico</u>	34
3.4.2.1	Análisis de varianza (ANAVA).....	34
3.4.2.2	Contrastes ortogonales.....	35
3.4.3	<u>Variogramas</u>	36
4.	<u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	37
4.1	CONTENIDO DE NUTRIENTES EN SUELO Y FERTILIZANTE AGREGADO.....	37
4.2	DETERMINACIONES.....	41
4.2.1	<u>Precipitaciones y desarrollo de los cultivos</u>	41
4.2.2	<u>Sorgo – rotación corta</u>	43
4.2.2.1	Implantación.....	43
4.2.2.2	Altura de planta.....	43
4.2.2.3	Actividad clorofiliana (SPAD).....	45
4.2.2.4	Materia seca (MS).....	46
4.2.2.5	Rendimiento muestreado.....	46
4.2.2.6	Rendimiento monitor.....	46
4.2.2.7	Análisis químico de granos.....	51
4.2.3	<u>Soja – rotación corta</u>	52
4.2.3.1	Implantación.....	52
4.2.3.2	Altura de planta.....	52
4.2.3.3	Actividad clorofiliana (SPAD).....	53
4.2.3.4	Materia seca (MS).....	54
4.2.3.5	Rendimiento muestreado.....	54
4.2.3.6	Rendimiento monitor.....	54
4.2.3.7	Análisis químico de granos.....	57
4.2.4	<u>Sorgo – cultivo continuo</u>	58
4.2.4.1	Implantación.....	58

4.2.4.2	Altura de planta.....	58
4.2.4.3	Actividad clorofiliana (SPAD).....	58
4.2.4.4	Materia seca (MS).....	59
4.2.4.5	Rendimiento muestreado.....	59
4.2.4.6	Rendimiento monitor.....	59
4.2.4.7	Análisis químico de granos.....	65
4.2.5	<u>Resumen de resultados para la variable rendimiento</u>	65
4.2.6	<u>Variogramas para la variable rendimiento</u>	66
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	69
6.	<u>RESUMEN</u>	71
7.	<u>SUMMARY</u>	72
8.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	73

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Rango de valores de coeficientes de variación para propiedades del suelo seleccionadas y propiedades de los cultivos.....	7
2. Variación en el rango para semivariogramas de algunas propiedades del suelo.....	12
3. Niveles críticos de N, P y K para los cultivos de sorgo y soja.....	17
4. Concentración objetivo de N, P y K en suelo, según criterio de fertilización y equivalente fertilizante para soja y sorgo.....	29
5. Matriz de contrastes con los coeficientes para cada tratamiento...	36
6. Concentración de P y K en suelo en pre-siembra, según potrero y bloque.....	37
7. Fertilizante agregado según tratamiento y bloque en el Sg-RC.....	38
8. Fertilizante agregado según tratamiento y bloque en la Sj-RC.....	38
9. Fertilizante agregado según tratamiento y bloque en el Sg-CC.....	38
10. Nivel de N-NO ₃ en suelo (0-15 cm) al estado de V6 de sorgo y dosis de N agregado como urea para los ensayos de sorgo.....	40
11. Contenido de agua gravimétrico (%) en suelo, según profundidad y bloque en 3 estados del cultivo.....	44
12. Altura de plantas (cm) según estado fenológico y días desde implantación, y diferencias en altura de plantas entre grupos de tratamientos.....	44
13. Diferencias en SPAD entre grupos de tratamientos según días de ciclo del cultivo.....	45
14. Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento, de los tratamientos fertilizados y del testigo.....	48

15. Media y coeficiente de variación de rendimiento (kg/ha), según tratamiento y bloque.....	51
16. Altura de plantas (cm) según estado fenológico y días desde implantación, y diferencias en altura de plantas entre grupos de tratamientos.....	53
17. Diferencias en SPAD en valores absolutos entre grupos de tratamientos según días de ciclo del cultivo.....	53
18. Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento según tratamiento.....	55
19. Medición de SPAD, media general según días de ciclo de cultivo..	58
20. Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento según tratamiento.....	61
21. Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento de los tratamientos fertilizados y del testigo.....	62
22. Contenido de N, P, K y S en grano, expresado como %.....	65
23. Comparación de rendimientos y CV entre grupos de tratamientos, según potrero.....	65
Figura No.	
1. Nivel crítico de suficiencia vs. elevar y mantener.....	16
2. Esquema de la disposición espacial de tratamientos en el experimento Sg-RC.....	27
3. Esquema de la disposición espacial de tratamientos en el experimento Sj-RC.....	27
4. Esquema de la disposición espacial de tratamientos en el experimento Sg-CC.....	28

5. Diagrama del diseño experimental en uno de los experimentos, mostrando los 5 tratamientos (fajas) y las celdas 2 y 4 de cada tratamiento (C2 y C4) en cada bloque.....	30
6. Diagrama de un box-plot.....	34
7. Dosis de P agregado, según experimento, criterio y sistema de fertilización.....	39
8. Dosis de K agregado, según experimento, criterio y sistema de fertilización.....	40
9. Dosis de N agregado en el estado de V6 del sorgo, según experimento y sistema de fertilización.....	41
10. Régimen de precipitaciones durante los experimentos comparado con registros históricos de campo experimental.....	42
11. Precipitaciones (mm) y estado de los cultivos, según Experimento y días a partir del 1º/12.....	42
12. Box-plot para el rendimiento de monitor, según tratamientos.....	47
13. Box-plot para el rendimiento de tratamientos fertilizados y testigo..	48
14. Mapa de rendimiento mostrando los promedios según celdas.....	49
15. Box-plot para el rendimiento de los tratamientos en el alto.....	50
16. Box-plot para el rendimiento, según tratamiento.....	55
17. Box-plot para el rendimiento de tratamientos fertilizados y testigo..	56
18. Mapa de rendimiento mostrando los promedios según celdas.....	57
19. Rendimiento obtenido según criterio y sistema de fertilización.....	60
20. Box-plot para el rendimiento, según tratamiento.....	61
21. Box-plot para el rendimiento de tratamientos fertilizados y testigo..	62
22. Mapa de rendimiento mostrando los promedios según celda.....	63

23. Rendimiento según bloque y repetición.....	64
24. Variograma de rendimiento del Sg-RC.....	67
25. Variograma de rendimiento de la Sj-RC.....	67
26. Variograma de rendimiento del Sg-CC.....	68

1. INTRODUCCIÓN

La fertilización de los cultivos se ha realizado generalmente en función de los niveles críticos promedio de las chacras. Sin embargo, la fertilidad dentro de una chacra es raramente uniforme, y la aplicación uniforme de fertilizantes puede resultar en áreas de sub y sobre aplicación (Borgelt et al., 1997). Asimismo la aplicación de tasas uniformes de insumos resulta en reducidas eficiencias de uso (Mulla y Schepers, citados por Plant, 2001).

Surge de este modo un interés creciente por tecnologías de precisión que logren determinar la variabilidad espacial de propiedades de suelo y de niveles de nutrientes para un manejo más eficiente de los cultivos. La agricultura de precisión incluye tres procesos básicos: recopilación de información de los insumos, tales como mapas de rendimiento; procesamiento de dicha información y en función de ello efectuar recomendaciones para la aplicación de insumos como pueden ser los fertilizantes (Intarapapong et al., 2003).

La tecnología de tasas variables (Variable Rate Technologies) para el uso de fertilizantes puede ser utilizada para variar la fertilización dentro de una misma chacra (Wittry y Mallarino, 2004). La aplicación variable de fertilizantes puede proveer beneficios tanto ambientales como económicos cuando se utiliza en cultivos como soja, algodón y maíz (Intarapapong et al., 2003). Sin embargo, a pesar de los intuitivos y posibles beneficios, la falta de consistencia en el impacto económico positivo de esta práctica de manejo, genera dudas acerca de la adopción de la misma (Sawyer, 1994).

La fertilización racional de los cultivos se puede hacer en base a los niveles críticos de suficiencia para los cultivos o mediante el criterio de elevar y mantener los niveles de fertilidad en el suelo considerando niveles óptimos de nutrientes y extracción de los cultivos previos. Para este último, es necesario saber cuál es la extracción de nutrientes realizada por los cultivos para poder reponerlos. Para tal fin son de gran utilidad los mapas de rendimiento.

A nivel nacional no existe información publicada en referencia a la aplicación de VRT para la fertilización de cultivos. Es por esto que el objetivo del presente trabajo es evaluar la respuesta vegetal de sorgo y soja a distintos criterios y sistemas de fertilización (N, P y K) dentro de una misma chacra (agricultura de precisión) manejados en sistemas contrastantes de siembra directa (agricultura continua o agricultura en rotación con pasturas).

Debido a que los ensayos se encuentran sobre un sistema estabilizado de rotaciones, con altos niveles de nutrientes en suelos y por ser el primer año de implementación de estos ensayos en las rotaciones de la unidad experimental, la hipótesis del trabajo plantea que si bien no se espera alto impacto productivo debido a los diferentes sistemas y criterios de fertilización (principalmente en altos niveles de fertilización), los beneficios de identificar y fertilizar según zonas de manejo, redundarán en un uso más eficiente de los nutrientes aplicados, del punto de vista ambiental y/o económico.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 AGRICULTURA DE PRECISIÓN

La combinación de suelos, los atributos del terreno y las diferentes prácticas de manejo realizadas en las chacras, resultan en una alta variabilidad espacial en las propiedades de los suelos y por lo tanto en los rendimientos de los cultivos dentro de las mismas (Roel y Terra, 2006).

La agricultura de precisión es la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal asociada con todos los aspectos de la producción agrícola con el propósito de mejorar la performance de los cultivos y la calidad ambiental (Pierce y Nowak, 1999).

Las tecnologías que permiten el desarrollo de la agricultura de precisión se pueden agrupar en 5 grandes categorías: computadoras, sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográficos (GIS), sensores y controles de aplicación (Pierce y Nowak, 1999).

Formalmente un GIS es una colección organizada de hardware, software, datos geográficos diseñados para capturar, actualizar, guardar, manipular, analizar y visualizar, eficientemente todas las formas de información geo-referenciada (Environmental System Research Institute, citado por Pierce y Nowak, 1999).

2.1.1 Monitores de rendimiento

Los monitores de rendimiento son dispositivos que periódicamente miden la tasa de masa o flujo del material cosechado y basado en estas medidas computa un rendimiento estimado del cultivo. A partir de estas estimaciones se construyen mapas de rendimiento. Estos hacen posible la agricultura de precisión ya que permiten estimar el rendimiento de los cultivos en secciones menores al m² y exhibirlas en mapas coloreados (Plant, 2001).

Los mapas de rendimiento proveen información para el manejo de las decisiones en agricultura de precisión. La información del rendimiento brinda la base necesaria para determinar los efectos de los insumos manejados, como ser: fertilizantes, semillas, fitosanitarios y otras prácticas culturales.

2.1.2 Manejo sitio específico

El manejo sitio-específico es el manejo de los cultivos agrícolas a escalas espaciales menores que toda la chacra. Para que el mismo sea justificado se deben cumplir 3 principios básicos: debe existir suficiente variabilidad espacial en factores que afecten el rendimiento, la/s causa/s de esa variabilidad deben ser identificadas y medidas, y por último la información surgida de esas medidas debe poder ser usada para modificar el manejo de los cultivos para incrementar las ganancias o para disminuir el impacto ambiental (Plant, 2001).

Los componentes esenciales del manejo sitio-específico son: medición de la variabilidad espacial, análisis de los datos obtenidos de tales mediciones, uso de la información obtenida de esos análisis para efectuar cambios en las prácticas de manejo y determinar si los beneficios resultantes superan los costos (Plant, 2001).

Para la estimación o cuantificación de la variabilidad espacial de los suelos y cultivos en las chacras, existen métodos de medición: discretos (ej: muestreo de suelos y plantas en grilla), continuos (ej: monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica del suelo) y remotos (ej: imágenes satelitales) (Roel y Terra, 2006).

2.1.2.1 Muestreo de suelos: método de medición discreto

Según Mallarino y Wittry (2006), el insumo más determinante para el uso efectivo de las tasas de fertilización variable (VRF), es el muestreo de suelos y el mapa de suelos en el cual el primero debe estar basado.

El método más tradicional para obtener información acerca de las condiciones del suelo y el estado de los cultivos, es el muestreo discreto de puntos (Plant, 2001). A partir de las muestras colectadas, se cuantifican las condiciones promedio de la chacra. Este método se aplica por ejemplo, cuando se decide fertilizar un cultivo en función del promedio de las muestras realizadas en suelo o plantas (Roel y Terra, 2006).

La variabilidad existente en las chacras implica que los muestreos tengan un error sistemático asociado. Con el fin de minimizar este error, se utilizan distintos métodos de muestreo, los cuales se diferencian en la disposición espacial de los puntos a ser relevados. Algunos de los diseños más conocidos son: muestreo al azar simple, muestreo al azar estratificado, muestreo sistemático estratificado, muestreo sistemático estratificado

desalineado, muestreo por juzgamiento, muestreo adaptativo, muestreo de búsqueda, muestreo geoestadístico, muestreo dirigido, entre otros (Wollenhaupt et al., Mulla y McBratney, citados por Roel y Terra, 2006).

2.1.2.2 Mapas de rendimiento: método de muestreo continuo

Los mapas de rendimientos son herramientas que permiten visualizar la variabilidad espacial del rendimiento de una chacra. A partir de una serie de mapas de una misma chacra, se pueden delinear zonas de manejo que presenten comportamientos productivos contrastantes (Roel y Terra, 2006).

Sin embargo, se debe tener en cuenta que los cultivos además de tener una alta variabilidad espacial presentan una variación temporal. En consecuencia una zona de alto rendimiento puede pasar a ser de bajo rendimiento de una zafra a otra (Roel y Terra, 2006).

La comparación de mapas de rendimiento de diferentes zafras no es correcta, debido a que un valor de rendimiento puede ser alto en una zafra y bajo en otra de mayor potencial productivo. Para no cometer este error, se utilizan los valores de los desvíos de rendimiento con respecto a la media de cada zafra obteniendo así mapas normalizados. En los mismos, se reformulan los mapas de rendimiento llevándolos a un índice relativo con respecto al promedio de la chacra (Roel y Terra, 2006).

2.1.3 Variabilidad espacial del suelo

La productividad de los cultivos está definida por factores del suelo y clima que varían en el espacio y el tiempo (Plant, 2001).

La variación en las propiedades del suelo ocurre a lo largo del terreno y en respuesta a cambios regionales de clima y plantas y el tiempo en que interactúan estos factores sobre el material parental (Mulla y McBratney, 2002).

Las propiedades del suelo varían a nivel de Orden de suelos, frecuentemente a lo largo de un gradiente climático u orográfico. A su vez, dentro de un mismo campo y a través de cortas distancias, las propiedades de suelo varían significativamente, incluso en lugares donde exista un único Orden de suelo. Esta variabilidad a nivel de series de suelo, es causada por cambios pequeños en la topografía que afectan el transporte y almacenaje de agua a lo largo y dentro del perfil del suelo (Mulla y McBratney, 2002).

La pendiente de un campo puede dividirse en distintas posiciones topográficas las cuales están relacionadas con los patrones de transporte y almacenamiento de agua. Las mismas a su vez tienen influencia en el desarrollo del suelo. Es por esto que la variación en las propiedades del suelo a lo largo de la pendiente están frecuentemente controladas por la posición topográfica y el comportamiento del flujo de agua (Mulla y McBratney, 2002).

La variación espacial de las propiedades del suelo como el contenido de materia orgánica y nutrientes (P, K, Ca, Mg), la textura, pH y conductividad eléctrica, ha sido estudiada y relacionada con el rendimiento de los cultivos (Kravchenko et al., Cox et al., Terra et al., Parent et al., Marquez da Silva y Silva, citados por Pravia, 2009). A su vez, propiedades del terreno que se encuentran asociadas a la capacidad de almacenaje de agua en el perfil del suelo se encuentran relacionadas con el rendimiento de cultivos de secano y su variabilidad espacial (Kravchenko y Bullock, Fríase et al., Kaspar et al., Terra et al., Parent et al., Marquez da Silva y Silva, citados por Pravia, 2009).

A la variabilidad de suelos antes mencionada se suman errores en las unidades de los mapas de suelo debido a escalas de mapeo. Esto lleva a que se incluyan diferentes tipos de suelos en una misma unidad. A nivel de chacra distintas actividades de manejo como son fertilización, rotación de cultivos, prácticas de riego, laboreo y drenaje, aplicación de abonos orgánicos llevan a la variabilidad local (Mulla y McBratney, 2002).

2.1.3.1 Medidas de variabilidad

Las medidas clásicas de tendencia central incluyen determinar la media, mediana y la moda. Por su parte las medidas de distribución de la población incluyen calcular el desvío estándar y la varianza. Para una población con distribución normal, aproximadamente el 95% de la misma, tendrá un valor igual a la media más o menos 2 desvíos estándar (Mulla y McBratney, 2002).

Otras medidas de distribución incluyen el rango, los cuartiles y el coeficiente de variación (CV). En la medida que aumentan el rango, el desvío estándar y el coeficiente de variación, también lo hace la variabilidad de la población (Mulla y McBratney, 2002).

Según Wilding, citado por Mulla y McBratney (2002), en función del valor del CV, se puede identificar el grado de variabilidad de las propiedades de suelo. Rangos de valores de CV de 0 – 15, 16 – 35 y > 36, indican baja, moderada y alta variabilidad respectivamente.

Cuadro 1: Rango de valores de coeficientes de variación para propiedades del suelo seleccionadas y propiedades de los cultivos.

Propiedad del suelo	CV (%)	Magnitud de la variabilidad
pH	2 – 15	Baja
Densidad aparente	3 – 26	Baja a moderada
Rendimiento	8 – 29	Baja a moderada
Capacidad de campo	4 – 20	Baja a moderada
Punto de marchitez permanente	14 – 45	Moderada a alta
MO	21 – 41	Moderada a alta
Contenido de N-NO ₃ en suelo	28 – 58	Moderada a alta
Tasa de infiltración de agua	23 – 97	Moderada a alta
Disponibilidad de K en suelo	39 – 157	Alta
Disponibilidad de P en suelo	39 – 157	Alta
Conductividad eléctrica del suelo	48 – 352	Alta

Fuente: Mulla y McBratney (2002)

2.2 GEOESTADÍSTICA

En agricultura de precisión, además del conocimiento de la media y la desviación estándar de una muestra poblacional, es fundamental conocer la estructura y la correlación espacial de la población muestreada (Roel y Terra, 2006).

La geoestadística es una rama aplicada de la estadística que cuantifica la dependencia y estructura espacial de una propiedad medida. A su vez utiliza esa estructura espacial para predecir valores de esa propiedad en zonas no muestreadas. Estos 2 pasos incluyen típicamente, la modelación espacial (variografía) e interpolación espacial (kriging o krigeado) (Mulla y McBratney, 2002).

2.2.1 Autocorrelación espacial

El mapeo de los datos es uno de los procedimientos de mayor importancia en agricultura de precisión. Para representar las variables de interés en dichos mapas, se deben transformar datos puntuales, y por lo tanto discretos, en variables continuas. El método que hace posible tal transformación es la interpolación de los datos. A su vez, para que la interpolación de la información sea posible, es necesario que los valores de la variable en estudio se encuentren asociados espacialmente, fenómeno que se denomina autocorrelación.

Según Best y León (2006) la autocorrelación puede ser definida como la “correlación de una variable con respecto a si misma a través del espacio”. En geoestadística, los objetivos de la determinación de la autocorrelación para las variables en estudio corresponden a: 1) medir la fuerza de la autocorrelación espacial dentro de un mapa; y 2) probar el supuesto de independencia o aleatoriedad en los datos.

Muestras de suelo más cercanas presentan frecuentemente valores más similares, que aquellas que presenten mayor espaciamiento. Esto determina que los valores de una determinada propiedad de suelo en muestreos cercanos estén espacialmente correlacionados, mientras que muestreos más alejados son típicamente disímiles y no están correlacionados (Burgess y Webster, citados por Mulla y McBratney, 2002).

2.2.1.1 Índices de autocorrelación espacial

Los índices de autocorrelación espacial se utilizan para cuantificar si una variable en un mapa, presenta o no autocorrelación espacial (Best y León, 2006).

Índice “I” de Moran

Este índice se aplica a zonas o puntos con variables continuas asociadas dentro de estas zonas. Una de las particularidades de éste índice es que compara el valor de la variable en cualquier punto, con el valor de todas las otras posiciones (Best y León, 2006).

$$I = \frac{N \sum_i \sum_j W_{i,j} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{(\sum_i \sum_j W_{ij}) \sum_j (X_i - \bar{X})^2}$$

Donde:

- N: número de casos;
- X_i : valor de la variable en una posición particular;
- X_j : valor de la variable en otra posición;
- \bar{X} : media de la variable; y
- $W_{i,j}$: peso aplicado a la comparación entre la posición i y la posición j.

El índice I varía entre -1 y +1. Si existe correlación espacial, entonces los valores estarán cercanos a la unidad (positiva o negativa) mientras que si no

existe correlación espacial, los valores de I serán próximos a 0 (Best y León, 2006).

Índice de “C” de Geary

En este índice la interacción no es el producto cruzado de las desviaciones de la media (como lo es en el I de Moran) sino que utiliza la desviación en intensidades de cada observación/posición con el valor de otra (Best y León, 2006).

$$C = \frac{\left[(N-1) \sum_i \sum_j W_{ij} (X_i - X_j)^2 \right]}{2 \sum_i \sum_i W_{ij} (X_i - \bar{X})^2}$$

Donde:

- X_i : valor de la variable en una posición particular;
- X_j : valor de la variable en otra posición;
- \bar{X} : media de la variable; y
- W_{ij} : ponderación aplicada a la comparación entre la posición i y la posición j.

Este índice varía entre 0 y 2. Si el valor de una zona en particular, está espacialmente no relacionado con el valor en cualquier otra zona, entonces el valor del indicador será 1 (Best y León, 2006).

El indicador “C” es más sensible a las diferencias en zonas adyacentes, en comparación al indicador “I” (Best y León, 2006).

2.2.2 Interpolación espacial

Luego que, a través de los índices de autocorrelación, se ha determinado la existencia de asociación espacial en los valores de la variable en estudio, se pueden aplicar técnicas de modelaje superficial a través de la interpolación espacial.

2.2.2.1 Técnicas de caracterización de distribución de datos de interpolación espacial

Entre los factores que más afectan el mapeo de las propiedades del suelo se encuentran: el número de muestras tomadas, la distancia entre ellas y

el método de interpolación utilizado para convertir muestreos discretos en continuos (Kravchenko, 2003).

Generalmente a mayor número de muestras se logra mayor precisión en el mapeo (Wollenhaupt et al., Mueller et al., citados por Kravchenko, 2003). Sin embargo, el costo de muestreo y análisis del suelo puede exceder fácilmente cualquier beneficio potencial derivado del manejo sitio-específico. Si el número de muestreos requeridos para construir mapas precisos de las propiedades del suelo es prohibitivamente grande, los productores optarán por el manejo basado en los valores promedio que se encuentran en el campo.

Algunas de las técnicas de interpolación que permiten la caracterización de la distribución de los datos en un mapa son: el vecino más próximo (nearest neighbor), distancia inversa a una potencia ponderada (inverse distance to a power-weighted –IDW-), método de Shepard modificado (modified shepard's method), función de base radial (radial basis function), vecino natural ponderado (natural neighbor weighted), método de triangulación y regresión polinomial (Best y León, 2006).

Los 2 métodos más comúnmente usados en prácticas agrícolas son: IDW y kriging (Franzen y Peck, Weisz et al., citados por Kravchenko, 2003).

La precisión alcanzada en el mapeo de las propiedades del suelo depende de la estructura espacial. Cuanto más fuerte sea la correlación espacial, más preciso será el mapa. Propiedades del suelo con fuerte o media estructura espacial, con independencia de la variabilidad total, pueden ser mapeadas con exactitud incluso con un bajo número de muestras. Mapas precisos de propiedades con débiles estructuras espaciales pueden ser obtenidos solamente con un muestreo denso. La exactitud de los datos colectados dependerá de los criterios de aleatorización utilizados. Por lo tanto, varios conjuntos de datos serán necesarios para efectuar decisiones acerca de cuál será el plan de muestreo y de interpolación óptimos. Cuando los parámetros del variograma son conocidos, debido a muestreos previos o gracias a información auxiliar, entonces el método de kriging es preferido con respecto al método IDW ya que su performance es mejor para los diversos tamaños de grillas y estructuras espaciales. El método de kriging con parámetros de variograma estimados se comporta de manera similar que al método de IDW para conjuntos de datos con suficientes puntos. Sin embargo, el método IDW es más preciso cuando los variogramas obtenidos no son confiables debido a, un número insuficiente de puntos muestreados o a largas distancias entre dos puntos. Incluso cuando la distancia entre dos puntos muestreados excede el rango de la correlación espacial; IDW continúa siendo

un correcto método de interpolación sobre todo para propiedades del suelo con mediana o fuerte estructura espacial. Es por esto, que IDW es recomendado para ser usado en pequeños conjuntos de datos para los cuales los parámetros de los variogramas no son conocidos (por lo que son estimados) y para conjunto de datos para los cuales existen grandes distancias entre dos puntos de la grilla (Kravchenko, 2003).

2.2.2.2 Variograma

El variograma es una descripción matemática de la relación entre la varianza entre pares de observaciones (puntos de datos) y la distancia que separa esos puntos (Best y León, 2006).

La semivarianza es estimada por:

$$y(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z_i - z_{i+h}]^2$$

Donde:

- $Y(h)$ = semivariograma
- h = distancia
- n = número de observaciones pares separadas por h

$z_i z_{i+h}$ = pares de muestras observadas separadas por h

Si la dependencia espacial es función no sólo de la distancia pero también de la dirección, se denomina anisotrópica. Si únicamente depende de la distancia, se denomina isotrópica. La dependencia espacial puede ser cuantificada y modelada utilizando semivariogramas (Burgess y Webster, citados por Mulla y McBratney, 2002).

Los semivariogramas frecuentemente aumentan en valor a medida que la distancia aumenta y alcanzan una constante a separaciones a grandes distancias. En tales casos, los semivariogramas son caracterizados por 3 parámetros principales, rango, asíntota (“meseta”) y ordenada en el origen (“pepita”) (range, sill and nugget). El rango es la distancia a partir de la cual la propiedad evaluada en las muestras de suelo deja de ser espacialmente dependiente. Es por esto que de ser conocido el rango, debería ser la máxima distancia a la cual muestrear el suelo (ver ejemplos en el cuadro No. 2). El valor que toma el semivariograma en el rango es conocido como “meseta” (sill). Su valor es frecuentemente igual a la varianza del muestreo. A medida que las

distancias se acortan el valor del semivariograma disminuye. Sin embargo, no siempre que las distancias se hacen cero, el valor del semivariograma disminuye a cero, esto se debe al efecto “pepita” (nugget). Este efecto representa la varianza debida a la variabilidad de muestreos a menores distancias que los muestreos más cercanos, y a la variabilidad debida a errores analíticos y de muestreo (Wollenhaupt et al., 1997).

Cuadro 2: Variación en el rango para semivariogramas de algunas propiedades de suelo.

Propiedad	Rango (m)		Dependencia espacial	
			Rango	Clase
pH	20 – 260	> 182	Corto a largo	Fuerte
Rendimiento	70 – 700		Moderado a largo	
N-NO ₃ en suelo	40 – 275	73	Moderado a largo	Media
K disponible en suelo	75 – 428	55	Moderado a largo	Media
P disponible en suelo	68 – 260	59	Moderado a largo	Media
MO	112 – 250	> 182	Largo	Fuerte

Fuente: Cambardella y Karlen (1999) (columna izquierda), Mulla y McBratney (2002) (columna derecha).

La tasa N/S (nugget/sill) define la proporción de la variabilidad, en el corto rango, que no puede ser explicada por el modelo geoestadístico. El rango de la correlación espacial, define la distancia a lo largo de la cual los valores de la propiedad en estudio están correlacionados entre ellos. Pequeñas tasas N/S y amplios rangos usualmente indican que gran precisión puede ser lograda en el mapeo de la variable (Isaaks y Srivastava, citados por Kravchenko, 2003).

Una tasa elevada de N/S, por ejemplo 0,6, corresponden a una débil estructura espacial ya que significa que el 60% de la variación de los datos se debe a variaciones aleatorias inexplicables de corta distancia. Estructuras espaciales medianas y fuertes presentan valores de N/S de 0,3 y 0,1 respectivamente.

2.2.2.3 Kriging

La técnica de interpolación de kriging se basa en la idea de que se pueden desarrollar inferencias considerando una función aleatoria $Z(x)$, dados los puntos $Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)$ (Best y León, 2006).

El kriging consiste en una combinación lineal ponderada de los valores muestreados. La diferencia que presenta respecto a otros métodos de

interpolación radica en que los “pesos” asignados a cada valor muestreado, derivan de un modelo estadístico. Los mismos son determinados usando la semivarianza entre dos estaciones de muestreo (Best y León, 2006).

Los pesos necesarios para el kriging son derivados de 2 criterios estadísticos. El primero requiere que la interpolación sea insesgada, por lo cual en promedio, las predicciones coinciden con lo que se trata de predecir. Es decir, los “pesos” asignados a los valores utilizados para predecir otro, deben sumar una unidad. El segundo criterio es elegir dentro de los predictores lineales e insesgados, el mejor de ellos. En sentido estadístico el mejor predictor es aquel que minimiza la varianza del error de predicción. Es por esto que el kriging es llamado el mejor, lineal e insesgado predictor (BLUP, por su sigla en inglés) (Wollenhaupt et al., 1997).

2.3 CRITERIOS DE FERTILIZACIÓN

Existen 2 filosofías básicas para realizar las recomendaciones de fertilización basadas en el análisis de suelos. Estas son elevar y mantener la fertilidad del suelo y niveles de suficiencia.

El objetivo del criterio de fertilización de elevar y mantener es manejar los valores de nutrientes en el suelo como una variable controlable (Leikman et al., 2003). Este programa promueve la aplicación de altas tasas de nutrientes poco móviles, como P y K, para elevar los niveles de suelo en uno o dos años, seguido de aplicaciones anuales equivalentes a las cantidades removidas por los cultivos. La intención es evitar cualquier eventual pérdida de rendimiento debido a una deficiencia de nutrientes (Dahnke y Olson, 1990) manteniendo los niveles de nutrientes en el suelo por encima del nivel crítico (Leikman et al., 2003).

Si el aspecto de mantenimiento de esta filosofía de fertilización siguiera sus preceptos, habría necesidad de realizar una recomendación para reponer todos los nutrientes que serán absorbidos por el cultivo y no únicamente N, P y K. Un seguimiento estricto de esta filosofía, eliminaría la necesidad de futuros análisis de suelo una vez logrado los niveles óptimos, ya que las fertilizaciones posteriores que se realizarían en función de la extracción de los cultivos, mantendrían los niveles de fertilidad del suelo (Dahnke y Olson, 1990).

Los programas de elevar y mantener no intentan proveer óptimos retornos económicos en un determinado año, sino que intentan reducir al mínimo la posibilidad de que los valores de nutrientes en suelo limiten el crecimiento del cultivo a la vez que proporciona la posibilidad de lograr los

rendimientos máximos posibles. La desventaja de esta metodología se encuentra cuando los valores de los análisis de suelo están por debajo de los niveles críticos y se requieren entonces tasas de fertilización mayores que las recomendadas cuando se emplea el criterio de nivel crítico (Leikman et al., 2003).

Aplicando estos conceptos a la agricultura de precisión, la meta sería elevar la fertilidad del suelo mediante la fertilización o disminuirla mediante la remoción (en caso de un suelo de muy elevada fertilidad natural) por parte de los cultivos hasta alcanzar los niveles de mantenimiento y luego fertilizar en base a los mapas de rendimiento (Pierce y Nowak, 1999).

El impacto en el largo plazo de esta filosofía es homogeneizar los niveles de fertilidad del suelo y eliminar la necesidad de muestreos posteriores (Goedeken et al., citados por Pierce y Nowak, 1999).

En el manejo por niveles críticos de suficiencia, los fertilizantes son aplicados en función de las probabilidades de respuesta en rendimiento, la cual varía en función de la localidad y del cultivo (Dahnke y Olson, 1990). El objetivo de este manejo es aplicar la cantidad suficiente, de P y/o K, que permita maximizar la rentabilidad en el año de aplicación, pero minimiza la aplicación de nutrientes y el costo en fertilizante. Cuando este enfoque de fertilización es adoptado; a menos que el nivel inicial de nutrientes en el suelo sea alto y por lo tanto el mismo sea capaz de suministrar todos los nutrientes requeridos por el cultivo, va a existir poca flexibilidad en la aplicación de nutrientes ya que año a año la misma será necesaria con el fin de eliminar el efecto “beneficio-robo” de nutrientes (Leikman et al., 2003).

Las recomendaciones por niveles críticos son basadas en los datos de análisis de suelo, obtenidos a largo plazo, con la calibración a campo (etapa de validación). Para enfrentar el cambiante retorno marginal de la inversión en fertilizante en el año de aplicación, las recomendaciones son realizadas para lograr el 90-95% del máximo rendimiento. Para esta filosofía de manejo, los valores de nutrientes en los análisis de suelo no son vistos como una variable de manejo y se le presta poca atención a los futuros valores de los análisis (Leikman et al., 2003).

Los resultados de análisis de suelo son clasificados en bajo, medio y alto con su consecuente probabilidad de respuesta en rendimiento asociada a la aplicación de fertilizante (Dahnke y Olson, 1990). Para el nivel alto o muy alto (que se ubica por encima del nivel de respuesta) la recomendación es no fertilizar; el nivel medio recibe una recomendación pequeña porque las

respuestas en esta categoría son infrecuentes; de hecho la recomendación para esta categoría es usualmente más o menos igual a la recomendación realizada para el mantenimiento en la filosofía “elevar y mantener. La cantidad de fertilizante recomendado para las categorías bajo y muy bajo generalmente es mayor al mantenimiento, resultando en una lenta elevación de los niveles de nutrientes en suelo (Dahnke y Olson, 1990).

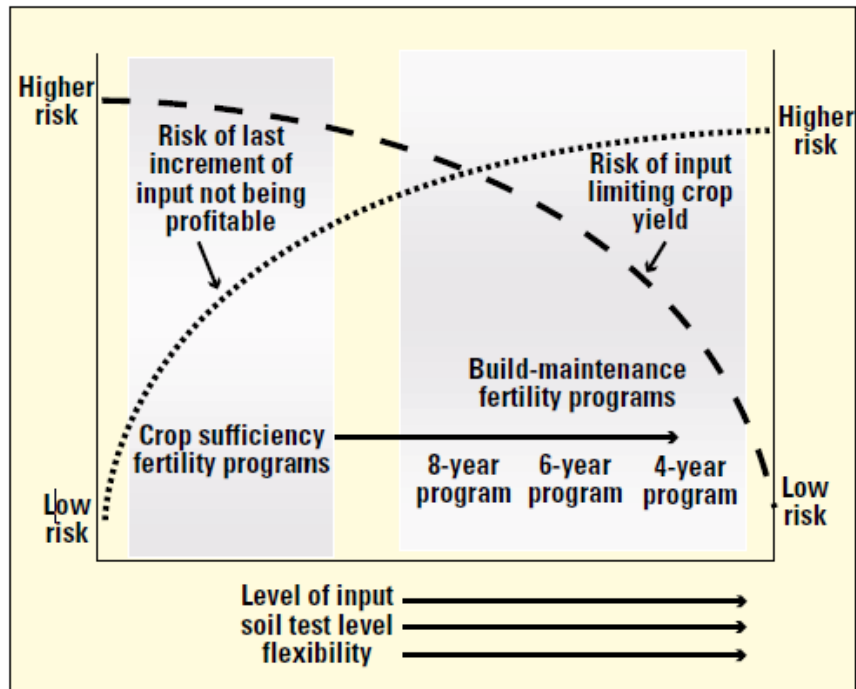
De lo anterior se deduce que la filosofía de niveles de suficiencia es similar a la de elevar y mantener con las siguientes 2 excepciones: i) la tasa a la cual se eleva el nivel del suelo es mucho más lenta y ii) el nivel de fertilidad del suelo al que se llega es mucho más bajo (Dahnke y Olson, 1990).

Mientras que la filosofía de elevar y mantener se centra en la fertilización del suelo, el nivel de suficiencia enfatiza en los distintos niveles para los distintos cultivos considerados (Dahnke y Olson, 1990).

No hay fundamentos para pensar que los procedimientos derivados de la interpretación de los niveles de suficiencia constituyan una filosofía netamente extractiva, de hecho la fertilización de suelos de acuerdo con la probabilidad de respuesta del cultivo prevé el aumento gradual de los valores de análisis de suelo hasta niveles de suficiencia (Dahnke y Olson, 1990).

Los dos enfoques proveen a los productores la posibilidad de elegir entre un sistema que recomienda tasas menores de aplicación de nutrientes pero que requiere de fertilizaciones anuales (criterio de nivel crítico) o invertir en tasas más altas de aplicación por 4 a 8 años con el fin de obtener la flexibilidad y ahorrarse el costo potencial de realizar aplicaciones de fertilizantes todos los años (criterio de elevar y mantener). Mientras que en el corto plazo la diferencia económica entre los dos criterios puede ser considerable, el beneficio de la flexibilidad, las reducciones en los costos de aplicación y el tiempo ahorrado pueden hacer que el criterio de elevar y mantener valga la pena (Leikman et al., 2003).

Existen razones y argumentos que apoyan a los dos enfoques. La figura 1 proporciona una representación conceptual de las características de los dos enfoques.



Fuente: Leikman et al. (2003)

Figura 1: Nivel crítico de suficiencia vs. elevar y mantener.

Se pueden observar dos riesgos que afectan la decisión en la cantidad de fertilizante a aplicar y el criterio de fertilización a utilizar. 1) el riesgo de que la cantidad de fertilizante aplicado sea mayor que la requerida ese año por el cultivo, y por lo tanto se limite la rentabilidad; 2) el riesgo de que la cantidad de fertilizante aplicado en ese año sea menor a la requerida y por lo tanto se vea limitado el rendimiento y la rentabilidad.

Con bajos niveles de nutriente en suelo, existe una alta posibilidad de que el cultivo responda a la fertilización y que a su vez la aplicación de fertilizante sea rentable en ese año. Sin embargo, la probabilidad de que los nutrientes en suelo limiten el rendimiento y la rentabilidad en cualquier otro año es también alta. Con altos niveles de nutriente en suelo, es baja la probabilidad de que existan limitantes en el rendimiento y que la aplicación de fertilizante sea rentable en ese año. Por lo tanto, el productor deberá evaluar cómo manejar los riesgos antes mencionados y que importancia le da a cada uno de ellos (Leikman et al., 2003).

El método de suficiencia es más conservador y menos fertilizante es recomendado. Sin embargo, la recomendación por niveles de suficiencia hace

que el suelo alcance eventualmente los niveles de mantenimiento ya que la fertilidad de suelo pobres tiende a aumentar y la de suelo ricos en nutrientes tiende a disminuir.

Aparentemente la única diferencia entre los dos criterios de fertilización sería cuánta cantidad y cuánto tiempo se requiere para llegar a los niveles de mantenimiento.

En última instancia si la agricultura de precisión se basa en análisis de suelo y fertilización, a través del tiempo las tasas de aplicación variables redundarán en análisis de suelo con resultados óptimos en toda la chacra y por lo tanto serán necesarias aplicaciones variables basadas en la remoción por los cultivos y la fijación de nutrientes en el suelo para mantener la fertilidad.

Las consideraciones previamente expuestas asumen que ninguno de los nutrientes se pierde hacia el ambiente. Esto se puede asemejar más al comportamiento del P y K pero la dinámica del N es muy diferente, por lo que este nutriente no se podría manejar por estos criterios (Pierce y Nowak, 1999).

2.4 NIVELES DE NUTRIENTES EN URUGUAY

La historia de fertilización en el Uruguay comienza de manera masiva en la década del 70'. Junto con la adopción comercial de esta tecnología también comienza la investigación nacional en esta área. Actualmente el manejo de la fertilización en cultivos de verano se basa fundamentalmente en el análisis de suelo, con el fin de evaluar la capacidad de aporte del suelo. Los análisis de suelo comúnmente utilizados en el país son: contenido de nitratos (N-NO₃), fósforo disponible (P-Bray 1) y potasio intercambiable (K intercambiable). El cuadro 3 resume los niveles críticos desarrollados (y propuestos) para los suelos típicos del litoral agrícola-ganadero para los cultivos de sorgo y soja (Quincke et al., 2008).

Cuadro 3: Niveles críticos de N, P y K para los cultivos de sorgo y soja.

Cultivo	N-NO ₃ (ppm)	P (Bray 1; ppm)	K intercambiable (meq/100g de suelo)
Sorgo	A siembra: 25 A V6: 16 - 20	14 – 16	Texturas medias a pesadas: 0,3
Soja	No se recomienda fertilizar con N	10 – 12	Textura FAr o más liviana: 0,25

Fuente: adaptado de Quincke et al. (2008)

El potasio generalmente en Uruguay no ha demostrado ser limitante para la producción vegetal, ya que la mayoría de sus suelos poseen importantes valores de disponibilidad de K (K intercambiable). Sin embargo, el rango encontrado en distintos suelos es muy amplio; de 0,11 a 1,5 meq/100 g de suelo (Hernández, citado por Terra y García Préchac, 2001).

Generalmente, la determinación del contenido de K en forma intercambiable es el parámetro utilizado para estimar el nivel de K asimilable de un suelo y la necesidad de fertilización con K. Muchos estudios relacionan este tipo de evaluación con la respuesta al K agregado.

Las fertilizaciones con potasio deben ser ajustadas de acuerdo con los niveles de K intercambiable en suelo, considerándose los valores superiores a 0,25 meq/100 g de suelo como suficientes. En suelos de textura arenosa incluso se pueden fijar niveles superiores a 0,15 meq/100 g de suelo como adecuados sin necesidad de fertilización (Casanova, 1996).

No existen en Uruguay estudios suficientes como para establecer cuál puede ser un valor crítico de disponibilidad para diferentes cultivos y pasturas (Terra y García Préchac, 2001). Estudios recientes en el país han sido realizados por Barbazán et al.¹, analizando información de diversos experimentos de respuesta a la fertilización potásica, incluyendo información de cultivos de cebada, trigo, maíz, soja, sorgo y girasol entre los años 2004 al 2010. Considerando todos los sitios y cultivos, se establece un nivel crítico de K intercambiable de 0,34 meq/100 g de suelo. Dicho valor debería considerarse como indicador provisorio de suelos deficientes en K.

Para el caso del contenido de N en suelo, para el cultivo de maíz, Perdomo y Ciganda, citados por Terra y García Préchac (2001), indican que el nivel crítico estaría alrededor de 18 ppm.

En Uruguay el método más utilizado para evaluar el P disponible es el método Bray 1. Dicho método se adapta a la mayoría de los suelos de uso agrícola del país, como son los suelos de texturas medias y pesadas del sur y

¹ Boutes, C.; Beux, L.; Bordoli, M.; Cano, J.; Ernst, O.; García, A.; García, F.; Quincke, A. Fertilización potásica en cultivos bajo siembra directa en Uruguay. *In*: Reunión Técnica; Dinámica de las Propiedades del Suelo bajo Diferentes Usos y Manejos (2010, Colonia). 1 disco compacto.

del litoral oeste (Bordoli, citado por Hernández, 2004). Sin embargo, en suelos arenosos y para suelos con alta actividad de carbonatos de calcio, los resultados obtenidos por este método tienen una interpretación diferente, por lo que sería necesaria una calibración diferente de los valores obtenidos y su significado en términos de niveles críticos y dosis de fertilización. Asimismo, en suelos ácidos de basamento cristalino probablemente exista un problema similar. Por su parte, en suelos de lomadas del este, si bien no se han realizado estudios específicos para evaluar el poder predictivo del método, no es de esperar diferencias muy marcadas respecto a suelos de texturas medias del sur del país (Hernández, 2004). Sin embargo, según Castro et al., citados por Morón (1996) el método Bray 1 ha presentado limitaciones para su utilización en suelos sobre planosoles del este.

Para pasturas de trébol blanco sembradas mayormente en Argisoles y Brunosoles de la Unidad Alférez se encontró que el método de análisis de P disponible que mejor asociación presentó con el contenido de P en planta, fue el método del ácido cítrico (Morón, 2004).

En suelos que se inundan se establecen condiciones reductoras (anaerobiosis) y uno de los fenómenos que puede ocurrir es la reducción del hierro. Los compuestos que forma el hierro con el P en condiciones normales de oxidación son altamente insolubles, mientras que la reducción del hierro trae como consecuencia la liberación del fosfato a la solución. Por lo tanto, al establecerse condiciones de anaerobiosis en suelo, aumenta la disponibilidad de P. Este proceso es muy importante en cultivos inundados por un período prolongado de tiempo como el arroz, y también en suelos no inundados en la medida que factores de suelo, topografía y clima determinen períodos durante los cuales ocurran excesos de agua en el perfil y por lo tanto condiciones temporarias de anaerobiosis (como pueden ser algunos Planosoles). Respecto al contenido de P disponible en los suelos de planicies del este, se dispone de evaluaciones de varias metodologías, entre las cuales surge el método del ácido cítrico como uno de los más aptos para estimar la disponibilidad de P (Hernández, 2004).

Para el cultivo de sorgo, Ernst y Siri (2004), establecen que en suelos con más de 15 ppm (Bray 1) no se espera respuesta al agregado de P. Por su parte Perdomo y Cardellino (2006), en un experimento que evaluó la respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación, también establecieron un nivel crítico de P de 15 ppm. Para el caso del K el ajuste de fertilización se basó en un valor de nivel crítico de K intercambiable de 0,3 meq/100 g de suelo para suelos de textura más finas que franco arenoso y

de 0,25 meq/100 g de suelo para texturas iguales o más gruesas (Zamalvide y Hernández, citados por Perdomo y Cardellino, 2006)

Para el cultivo de soja, García Lamothe et al. (2009), sitúan el nivel crítico de P disponible en suelo en torno a 10 – 12 ppm (P-Bray 1). Para el K, señalan que existen en el país suelos de texturas medias, antes ricos en K, que en la actualidad presentan valores significativamente más bajos. El nivel crítico se sitúa en 0,3 meq/100 g de suelo. Estos autores encontraron que no hubo respuesta a la fertilización potásica cuando el nivel de K intercambiable era de 0,45, 0,75 y 0,90 meq/100 g de suelo para la zafra 07-08 y encontraron respuesta negativa a la fertilización potásica para la zafra siguiente cuando los niveles en suelo eran de 0,9 meq/100 g de suelo.

2.5 TECNOLOGÍAS DE APLICACIÓN VARIABLE (VRT)

En las tecnologías de aplicación variable (VRT), los insumos para la producción son aplicados a distintas tasas dentro de una misma chacra en función de factores que afectan la tasa óptima de aplicación. Esto se debe a que los factores que afectan el rendimiento no son siempre uniformes dentro de la misma y es por esto que no permiten obtener una eficiencia o rentabilidad óptima en aplicaciones uniformes (Sawyer, 1994).

La premisa de la tecnología VRT es que las tasas uniformes de aplicación dentro de una chacra no maximizan la eficiencia de los insumos o la rentabilidad. Los principios básicos para el funcionamiento de la VRT son: i) la variabilidad espacial de factores importantes que afectan el rendimiento existe dentro de la chacra; ii) tal variación influye en el rendimiento; iii) la variación puede ser identificada, medida y delineada (mapeada); iv) modelos precisos de respuesta están disponibles para determinar las tasas variables de insumos apropiadas; v) procedimientos para procesar la información y equipos de aplicación están disponibles y efectivamente pueden aplicar insumos de manera variable (Sawyer, 1994).

Según Plant (2001) cuando se ha identificado un único factor como limitante del rendimiento, y ese factor puede ser ajustado de manera continua, entonces alguna forma de VRT puede ser empleada. Sin embargo, en el caso que se identifique más de un factor como influyente del rendimiento, incluso actuando cada uno en distintas partes del terreno, la situación es más compleja. En tal caso se debería identificar el factor o factores más importantes en limitar el rendimiento. Éstos son siempre más o menos continuos, siendo el resultado del análisis un conjunto de áreas que subdividen el campo en regiones definidas por los factores limitantes del rendimiento. Estas regiones son

comúnmente llamadas zonas de manejo (McCann et al., citados por Plant, 2001).

2.5.1 Expectativas acerca de las VRT

El uso de tecnologías de tasas variables se justifica siempre que exista variabilidad dentro de la chacra. Es por lo antedicho que si no existe variación en factores que influyan sobre el rendimiento, entonces el retorno económico de las VRT será negativo. Los factores que limitan la eficacia de las VRT son i) el costo de implementación (equipos, personal, muestreos, mapeos) ii) falta de expectativa en el aumento del rendimiento (poca variación respecto al rendimiento actual, incorrecta evaluación de la variación o baja precisión en el mapeo, o baja precisión en la función de respuesta del cultivo a los insumos) iii) falta de ahorro en los insumos (Sawyer, 1994).

Si la variación está presente, aumentos en el rendimiento, disminución en el uso de insumos o ambos, son posibles pero no están garantizadas por la implementación de las VRT. Una aplicación uniforme podrá resultar en sub o sobre aplicaciones, y por lo tanto redundará en menores rendimientos o eficiencias de uso de los insumos (Sawyer, 1994).

Se puede esperar de las VRT un impacto ambiental positivo. Esto generalmente implica menor utilización de insumos en el campo, aplicaciones sólo realizadas cuando son necesarias y un aumento en la eficiencia (Sawyer, 1994).

2.5.2 Antecedentes

Existen varios antecedentes de ensayos que comparan fertilización variable y uniforme. Anderson y Bullock (1998), trabajando con fertilización potásica y fosfórica en Illinois, encontraron que ni el rendimiento de soja, ni el de maíz fueron afectados por el método de fertilización (variable vs. uniforme). Sin embargo, el testigo sin fertilizante no fue diferente de ninguno de los tratamientos, incluso tampoco se detectaron diferencias en ciertas zonas del campo donde los niveles sí limitaban los rendimientos. Estos resultados fueron consecuencia de que los niveles promedio de nutrientes estaban muy por encima del óptimo recomendado y que en realidad existe algún tipo de seguro incorporado en las recomendaciones debido a la variabilidad en los niveles de análisis de suelo. Es por esto que concluyen que en áreas con muy bajos niveles de análisis de suelo, sí es esperable observar diferencias entre tratamientos uniforme o variablemente fertilizados. Asimismo concluyen que

algunos campos serían más apropiados para el empleo de VRT que otros y que esa decisión debiera realizarse para cada campo.

Mallarino y Wittry (2004), compararon fertilizaciones variables y uniformes para rotaciones de maíz-soja. Se utilizaron muestreos en grilla, (de 0.2 a 1.7 ha por celda), sistemas de posicionamiento globales diferenciales (DGPS) y monitores de rendimiento en ensayos en fajas en 6 chacras distintas y 2 años de evaluación. Los resultados del experimento concluyen que si bien la fertilización fosfatada produjo un incremento del rendimiento sólo en las chacras donde el nivel de P en suelo se ubicaba por debajo del óptimo (maíz en 3 chacra-año y soja en 2 chacra-año), no hubo diferencias entre las aplicaciones uniformes y variables (UR vs. VR). Tampoco se detectaron diferencias en el peso seco de las plantas ni en la absorción de P a los 15-20 cm de altura, debidas al método de aplicación. Sin embargo, la fertilización variable permitió un mejor manejo del P, porque no sólo se aplicó de un 12 a un 41% menos P que en el tratamiento de fertilización uniforme, sino que también disminuyó la variabilidad del nivel de P en suelo en la post cosecha de los cultivos.

Yang et al. (2001), en Texas compararon aplicaciones de dosis uniformes y variables de N y P en cultivo de sorgo durante 2 años, en 3 chacras distintas. Los monitores de rendimiento indicaron una superioridad del tratamiento de aplicación variable respecto al uniforme en los 2 años evaluados, además de mostrar menor variabilidad del rendimiento dentro de una misma chacra. Sin embargo, si los costos adicionales del muestreo de suelos (36 muestras cada 14 há), así como del equipamiento y del análisis de la información, son considerados dentro del sistema de fertilización variable, el ingreso por ha de este sistema resulta considerablemente menor o incluso negativo.

Lowenberg-DeBoer y Aghib, citados por Mallarino y Wittry (2004), comparando fertilizaciones uniformes y variables de P y K en 6 chacras en el Medio Oeste de Estados Unidos, en cultivos de maíz, soja y trigo, encontraron que a pesar de que la fertilización variable aumentaba los rendimientos, raramente aumentaba el ingreso neto. Esto se debió al aumento en los costos asociados a la fertilización variable, es decir mayor costo de análisis de suelo, y de la propia aplicación. En estos ensayos si bien existían zonas de chacra donde el nivel de nutrientes en suelo limitaba el rendimiento, todos los niveles promedio se ubicaban por encima del óptimo.

Mallarino et al. (1998), evaluaron la respuesta de maíz y soja a la fertilización fija y variable de fósforo para adaptar tecnologías de agricultura de precisión. Se encontró respuesta en rendimiento a la fertilización con fósforo en

función del sitio y del método de aplicación. El método de fertilización variable redujo el total del fósforo aplicado en 2 de los 4 campos evaluados y aumentó el rendimiento en uno de ellos. Los beneficios de la fertilización variable varían según el campo. Sin embargo, el uso de tasas variables de fertilización siempre resultaría en una mayor eficiencia y menor impacto ambiental cuando la aplicación está basada en estimaciones confiables del nivel de nutrientes en suelo y cuando los mismos varían de deficiente a óptimo. El uso de análisis estadísticos que incorporan la correlación espacial, permite reducir el error experimental y aumentar la sensibilidad del análisis estadístico para detectar diferencias entre tratamientos. Los resultados de este experimento mostraron que la combinación de los tradicionales ensayos en fajas, las tecnologías de precisión y los métodos estadísticos que incluyen la correlación espacial de los rendimientos, puede ser usada para obtener mejores comparaciones de las prácticas de manejo.

Mallarino y Wittry (2006), realizaron un experimento basado en un denso muestreo de suelo con el objetivo de evaluar el máximo potencial posible de la tecnología VRF (variable rate fertilization). Se condujeron 11 ensayos en fajas, evaluados de 1 hasta 3 ciclos de la rotación maíz-soja. Los tratamientos de fertilización fueron: control sin fertilizar; variable basado en una grilla densa de muestreo; y uniforme basado en el promedio de los valores arrojados por el muestreo de suelo. Los nutrientes en suelo mostraron una gran variación a lo largo de las celdas de muestreo en la mayoría de los campos. Esto justifica el uso de la tecnología VRT, ya que la misma permite la aplicación de los nutrientes a las tasas necesarias, siempre y cuando la variación de los nutrientes del suelo sea correctamente identificada. Hubo poca diferencia significativa en el rendimiento en grano entre los métodos de fertilización uniforme y variable. Sin embargo, las diferencias en los métodos fueron balanceadas ya que la tasa uniforme aumentó el rendimiento más que la variable en la mitad de las instancias y en la otra mitad se observó el resultado opuesto. La cantidad de P y K aplicados por cada método varió considerablemente entre campos, pero a menudo fue menor para el método de fertilización variable. En promedio, la tasa variable aplicó 10 kg de P_2O_5 /ha menos que la uniforme. Para el caso del K, la tasa variable aplicó 17 kg de K_2O /ha menos que la uniforme. Análisis de suelo realizados luego de la cosecha, mostraron que el método de aplicación variable disminuyó la variabilidad de P en suelo dentro del campo. Es por esto que a pesar de no aumentar los rendimientos, el uso de la fertilización variable VRF permite un mejor manejo de los nutrientes P y K. Los resultados sugieren que las tasas variables de aplicación pueden reducir la pérdida de P y redundar en una mejor calidad del agua.

La mayoría de los campos agrícolas presentan una alta variabilidad en el nivel de fósforo en suelo. Las VRT facilitan la aplicación de diferentes dosis de fósforo a lo largo del campo y pueden mejorar el rendimiento en grano. Bermúdez y Mallarino (2007), en ensayos en fajas, en 6 campos de Iowa, compararon durante 4 años fertilizaciones variables y fijas de fósforo para la rotación maíz-soja. Las fertilizaciones variables se basaron en los niveles de fósforo en suelo derivados de un muestreo en grilla de 0,06 a 0,08 ha. Por su parte las fertilizaciones fijas se basaron en el promedio del muestreo de suelos. Además de los tratamientos uniformes y variables, en los campos había un tratamiento control no fertilizado. El fósforo incrementó el rendimiento en 13 sitios-año de un total de 24 sitios-año y el método de aplicación (variable vs uniforme) solamente difirió en 1 sitio-año, siendo el uniforme superior al variable. En promedio el método variable aplicó un 12,4% menos de fósforo, y redujo la variación del mismo en los análisis de suelo, en 5 de los 6 campos evaluados. Los semivariogramas y el desvío estándar mostraron que la fertilización, especialmente la metodología variable, reduce la variabilidad del rendimiento. Las elevadas variaciones de nivel de fósforo en suelo, en pequeña escala y/o las recomendaciones de fósforo que buscan maximizar el rendimiento y elevar el nivel del nutriente en suelo, cuando los valores de fósforo en suelo son bajos, pueden ser las causas que expliquen la ausencia de diferencias entre los métodos de aplicación.

Según Mallarino y Wittry (2006) diversas razones pueden explicar la infrecuente, pequeña e inconsistente diferencia observada entre métodos de fertilización uniforme y variable, incluso para áreas con bajos niveles de nutrientes. Una de las causas podría ser la inadecuada evaluación de la variabilidad de los nutrientes en suelo dentro de un campo, incluso para muestreos tan densos como los que se obtienen en una muestra compuesta por 12 submuestras extraídas de una superficie aproximada de 84 m² cada 0,2-0,4 ha. Otra posible razón podría ser que, a pesar de que exista respuesta a la fertilización, en muchos campos las respuestas pueden ser pequeñas debido a que los productores tratan de mantener los niveles de nutrientes en suelo en el óptimo o por encima del mismo. Es por esto que diferencias en áreas pequeñas podrían verse diluidas por la no respuesta o por diferencias aleatorias en áreas mayores. Sin embargo, la razón más probable para la falta de respuesta entre los distintos métodos, es el uso de recomendaciones de P y K para niveles bajos de suelo que están diseñadas para maximizar el rendimiento y lentamente elevar la fertilidad del suelo a niveles óptimos a lo largo de unos pocos años.

En síntesis: las mejores respuestas al uso de las VRT se observan con niveles de nutrientes en suelo por debajo del óptimo, en general no se observa diferencias en el rendimiento respecto a las fertilizaciones uniformes pero sí

permite una disminución en el fertilizante aplicado que redundaría en un beneficio económico y ambiental. Sin embargo, debido al aumento en los costos de muestreo de suelo para la implementación del VRF, los retornos económicos pueden ser menores que con fertilizaciones uniformes. Por último la tecnología VRF, permite reducir la variabilidad tanto del rendimiento, dentro de una chacra, como del nivel de nutrientes en suelo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

Los experimentos fueron realizados durante la zafra 2009-2010 en la Unidad Experimental “Palo a Pique” (UEPP) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), sede Treinta y Tres (33°:15'36"S, 54°:29'26"W, 60-m de altitud). Los suelos se encuentran sobre la Unidad Alférez (Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay) e incluyen Argisoles Subeútricos Melánicos como suelos dominantes y Planosoles Subeútricos Melánicos como suelos asociados correspondientes al grupo CONEAT 10.7.

Los cultivos de los experimentos forman parte de las rotaciones de largo plazo que se llevan a cabo en Palo a Pique. El experimento de larga duración consiste en 4 cultivos continuos (CC) (potrero 11) y rotaciones cortas (RC) que implican 2 años de agricultura y 2 de pasturas (potreros 9 y 10).

El experimento de CC combina los cultivos de soja-trigo-sorgo-avena. Por su parte RC incluye 2 años de una pastura bianual (mezcla de *Lolium multiflorum* y *Trifolium pratense*) y 2 años de agricultura que comprenden 1 cultivo de sorgo, cobertura invernal con *Lolium multiflorum* y 1 cultivo de soja seguido por un cultivo de trigo consociado.

En el potrero 10, de rotación corta se sembró soja (Sj-RC), mientras que en los potreros 9 y 11 se sembró sorgo (Sg-RC y Sg-CC respectivamente).

3.2 TRATAMIENTOS Y DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizaron 3 ensayos en fajas, siendo cada una de ellas de 11m de ancho y 100m de largo. A excepción del Sg-CC donde las fajas eran de 10m de ancho y 80m de largo.

Cada experimento consistió en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones (1 por bloque), salvo en el Sg-CC donde habían 2 repeticiones por bloque. Los bloques se ubicaron de acuerdo a 3 posiciones topográficas; alto, ladera media y ladera baja.

Los tratamientos en cada bloque fueron los resultantes de la combinación de 2 criterios de fertilización (nivel crítico; y elevar y mantener) y 2 sistemas de fertilización (uniforme y variable), más un testigo sin fertilizar. Los tratamientos resultantes fueron: Testigo (T), nivel crítico uniforme (NC-U), nivel crítico variable (NC-V), elevar y mantener uniforme (EM-U) y elevar y mantener

variable (EM-V). Los tratamientos fueron dispuestos en el terreno al azar, quedando dispuestos en cada experimento como muestran las figuras 2, 3 y 4.

Bloque Faja	Alto		Ladera media		Ladera Baja
1	NCU		EMU		EMV
2	Testigo		NCV		NCU
3	NCV		Testigo		EMU
4	EMV		NCU		NCV
5	EMU		EMV		Testigo

EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico variable; NCV: nivel crítico variable.

Figura 2: Esquema de la disposición espacial de tratamientos en el experimento Sg-RC.

Bloque Faja	Alto		Ladera media		Ladera Baja
1	EMU		EMU		Testigo
2	EMV		NCU		NCU
3	Testigo		NCV		EMU
4	NCV		Testigo		EMV
5	NCU		EMV		NCV

EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico variable; NCV: nivel crítico variable.

Figura 3: Esquema de la disposición espacial de tratamientos en el experimento Sj-RC.

Bloque Faja	Alto		Ladera media		Ladera Baja
1	NCV		EMV		Testigo
2	NCU		Testigo		NCV
3	EMU		NCV		EMU
4	Testigo		EMU		NCU
5	EMV		NCU		EMV
6	EMV		EMU		NCV
7	NCU		NCV		EMV
8	NCV		EMV		Testigo
9	Testigo		Testigo		NCU
10	EMU		NCU		EMU

EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico variable; NCV: nivel crítico variable.

Figura 4: Esquema de la disposición espacial de tratamientos en el experimento Sg-CC.

La fertilización según el criterio de “niveles críticos de suficiencia” consideró la concentración de nutrientes en suelo, el cultivo a fertilizar y un equivalente de fertilizante (cuadro 4).

Por su parte, el criterio “elevar y mantener” consideró la concentración de nutrientes en suelo, un equivalente fertilizante y el nivel de nutriente en suelo objetivo para P y K (cuadro 4).

Los tratamientos fueron fertilizados uno a uno al inicio del ensayo con una fertilizadora de chorrillo.

Para el caso de la fertilización nitrogenada, todos los tratamientos excepto los testigos, fueron fertilizados al estado de V6 según un único criterio, el de nivel crítico, pero según el sistema correspondiente (uniforme o variable). Para la fertilización en V6 el fertilizante nitrogenado utilizado fue urea. La fertilización se realizó celda por celda de manera manual.

En el sistema de fertilización uniforme, para el cálculo de aplicación de nutrientes se promedió el valor de nutriente en suelo de los 3 bloques.

En el caso del sistema de fertilización variable, las aplicaciones fueron realizadas en función del contenido de nutriente en suelo del bloque, de modo

que para cada ensayo el sistema variable determinó 3 niveles de fertilización por criterio.

Cuadro 4: Concentración objetivo de N, P y K en suelo, según criterio de fertilización y equivalente fertilizante para soja y sorgo.

Nutriente		N (ppm NO ₃) en V6	P cítrico (ppm)	K (meq/100 g suelo)
Criterio	Nivel crítico de suficiencia	20	12	0,25
	Elevar y mantener	20	20	0,30
Equivalente fertilizante (kg N, P ₂ O ₅ , K ₂ O)		3,22	10	1170

La siembra de los ensayos de sorgo se realizó entre los días 15/12 y 17/12, utilizándose el cultivar DOW MS 109. La densidad de siembra fue de 12 a 13 semillas por metro lineal con un 80% de germinación y una distancia entre hileras de 0,4 metros. La semilla fue curada con imidacloprid. El Sg-CC debió ser resembrado el día 5 de enero por excesos hídricos.

Por su parte, el cultivo de soja fue sembrado el 18/12 y resembrado el 5/1 debido a problemas de implantación causados por exceso hídrico. Se utilizó la variedad AGT 6000 a una densidad de 81 kg/ha y en una distancia entre hileras de 0,4 m con el objetivo de obtener entre 400.000 y 450.000 plantas/ha.

La fertilización basal fue en todos los tratamientos de 42 kg/ha de 15-30-15 (N-P-K) para los ensayos con sorgo y 42 kg/ha de 9-40-13 para el ensayo de soja. Adicionalmente cada tratamiento fue fertilizado de acuerdo a los valores que le correspondían a cada uno de ellos.

Las fertilizaciones con fósforo se realizaron en los 3 experimentos el 11/12 con superfosfato triple 0-46/46-0 y la potásica fue entre los días 14/12 y 15/12 con KCl (60% de K₂O). Las fertilizaciones con N fueron realizadas a la siembra (fertilización basal) y la re-fertilización en V6 para el caso del sorgo.

La refertilización al estado de V6 consideró como nivel crítico 20 ppm de N-NO₃ en suelo y un equivalente de fertilizante de 3,22 kg de N (7 kg de urea por cada ppm por debajo del nivel crítico) (cuadro 4).

3.3 DETERMINACIONES Y REGISTROS

Cada una de las fajas fue segmentada en celdas de 20 metros de largo, obteniéndose 5 celdas por tratamiento en cada bloque de los experimentos Sg-RC y Sj-RC, y 4 celdas en Sg-CC.

Las celdas fueron numeradas del 1 al 5 en cada tratamiento (en el caso del Sg-CC hasta el 4) desde la zona topográfica más alta hacia la más baja. Las determinaciones se realizaron en los centroides de las celdas 2 y 4.

Al momento de la cosecha fueron cosechados los 5 metros centrales del ancho de cada faja, por la totalidad de su longitud.

Zona topográfica (bloques)														
Faja	Alto				Ladera media				Ladera baja					
1		C2		C4			C2		C4			C2		C4
2		C2		C4			C2		C4			C2		C4
3		C2		C4			C2		C4			C2		C4
4		C2		C4			C2		C4			C2		C4
5		C2		C4			C2		C4			C2		C4

Figura 5: Diagrama del diseño experimental en uno de los experimentos, mostrando los 5 tratamientos (fajas) y las celdas 2 y 4 de cada tratamiento (C2 y C4) en cada bloque.

3.3.1 Pre-siembra

Se determinaron los contenidos de P cítrico y K intercambiable en la primera década de octubre. Se realizaron 5 muestras por celda (0 – 15 cm de profundidad), en los centroides de todas las celdas, de cada faja en cada bloque, obteniéndose muestras compuestas por bloque.

Para la fertilización con P en el Sg-CC, en los tratamientos EM, se consideró además la extracción de este nutriente por parte del cultivo previo (trigo) ya que al momento del muestreo, el cultivo estaba en floración y continuaría absorbiendo P. Esto implica que el valor reflejado por el análisis de suelo era mayor al que existiría al momento de sembrar el sorgo. La corrección por extracción de este nutriente por parte del trigo se realizó en función del rendimiento obtenido y una estimación de concentración en grano de P de 0,4%.

3.3.2 En cultivo

Las determinaciones realizadas durante el ciclo del cultivo fueron: implantación, contenido de agua del suelo en etapas vegetativas y reproductivas, biomasa y altura de plantas en estados vegetativos y reproductivos, actividad clorofiliana (SPAD), rendimiento medido en la cosechadora y sus componentes.

3.3.2.1 Implantación

La implantación de los cultivos se determinó a los 15 días post-emergencia. Se contó el número de plantas emergidas en 2 metros lineales, ubicados en las zonas cosechables, de 3 filas seleccionadas al azar, en el centroide de cada celda de muestreo.

3.3.2.2 Contenido de agua gravimétrico

En el cultivo de sorgo las determinaciones fueron realizadas desde el estado fenológico V6 a V10, embuche y floración.

Por su parte, en el cultivo de soja, el agua gravimétrica fue determinada durante la fase vegetativa y en los estados reproductivos de R1-R5.

Los muestreos fueron realizados con calador y se extrajeron muestras de suelo a 0-15, 15-30 y 30-45 cm de profundidad. Las mismas fueron colectadas en una entrefila de la zona cosechable seleccionada al azar.

Las muestras fueron pesadas antes y después de colocarlas en las estufas a 100 °C durante 72 horas, obteniéndose por diferencia el contenido de agua.

3.3.2.3 Altura y biomasa

La biomasa se determinó mediante el corte de 2 metros lineales de cada fila inmediata a la zona cosechable. Las muestreas fueron secadas en estufas de 45°C por 72 horas y posteriormente pesadas.

En soja, las muestras fueron tomadas en los estados de R2-R3 y en R5-R6. Por su parte, en el cultivo de sorgo se muestreó en el estado de V6.

La altura del cultivo se midió cada 15 días, en 5 plantas seleccionadas al azar dentro de la zona cosechable. Simultáneamente a la medición de la altura, se determinó el estado fisiológico del cultivo.

3.3.2.4 Actividad clorofiliana (SPAD)

La actividad clorofiliana en soja fue determinada en los estados de R1-R5. En sorgo, la misma fue determinada en V6, V10, V14, embuche y hoja bandera. Para esto, se muestrearon 5 plantas seleccionadas al azar y se utilizó un medidor de clorofila Minolta SPAD 502 (Spectrum Technologies, Inc.; Plainfield, Illinois, USA).

La medición de SPAD se realizó en la mitad de la última hoja totalmente desarrollada de las plantas elegidas.

Durante el estado de hoja bandera de los cultivos de sorgo, se midió la actividad clorofiliana a 10 hojas banderas de plantas seleccionadas al azar ubicadas en las zonas cosechables de cada uno de los tratamientos.

3.3.2.5 Contenido de N-NO₃ en suelo

En el cultivo de sorgo, durante el estado de V4-V5 fue determinado el contenido de N-NO₃ en suelo. Posteriormente se realizó la re-fertilización del cultivo en el estado de V6.

Para el mismo, se muestreó una entrefila de cada centroide de cada tratamiento, obteniendo una muestra compuesta en cada bloque. Para el muestreo se utilizó un calador. Las muestras fueron tomadas de 0 a 15 cm de profundidad.

3.3.3 Cosecha y post-cosecha

Los experimentos fueron cosechados los días 16/4 (Sg-RC), 12/5 (Sj-RC) y 17/5 (Sg-CC).

Para la cosecha de las fajas se utilizó una cosechadora equipada con un monitor de rendimiento Ag Leader PF3000 (Ag. Leader Tech. Inc., Ames, IA) y un DGPS (Trimble AgGPS® 132), lo que permitió el mapeo de rendimiento (software ArcView GIS 3.2) y determinar la variabilidad espacial del mismo.

El rendimiento real de cada faja fue pesado con una balanza de campo. También se obtuvo la humedad del grano en tiempo real derivada del monitor

de rendimiento de la cosechadora y a nivel del laboratorio de submuestras obtenidas del grano cosechado.

El peso de granos real medidos en cada faja así como la humedad medida en laboratorio, permitieron corregir en función de humedad y del propio peso, la información del monitor.

Para la variable rendimiento se presentan 2 valores, uno derivado del muestreo y otro obtenido a través monitor de rendimiento. Los valores obtenidos en ambos casos, fueron estandarizados en función del contenido de humedad en grano. Para la soja 12% y 14% para el sorgo.

Para el muestreo de rendimiento en el Sg-RC se muestrearon 2 metros lineales en 2 filas inmediatas a la zona cosechable en las celdas 2 y 4. En la Sg-RC y en el Sg-CC la metodología utilizada fue la misma, pero cada fila muestreada fue de 4 metros lineales.

El monitor generó un valor de rendimiento cada 2 segundos a medida que transcurría la cosecha. Los datos correspondientes a cada celda fueron promediados. Estos fueron utilizados para el análisis de varianza, construcción de box-plots y mapas de rendimiento.

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS DATOS

3.4.1 Estadística descriptiva

Con el programa estadístico InfoStat 2008, para cada variable evaluada, se determinaron las medias de los ensayos, así como de cada tratamiento y de cada factor. Además se determinaron los desvíos estándares, varianzas, coeficientes de variación, máximos y mínimos.

3.4.1.1 Box-plots

Se utilizó el programa estadístico JMP (2001), para realizar un análisis complementario para la variable rendimiento. Con el mismo se elaboraron los "box-plots".

Los “box plots” son una representación gráfica de la distribución de las observaciones de la variable basada en cuantiles. Los mismos suministran información sobre los valores mínimos y máximos, los cuantiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos (“outliers”) y la simetría de la distribución.

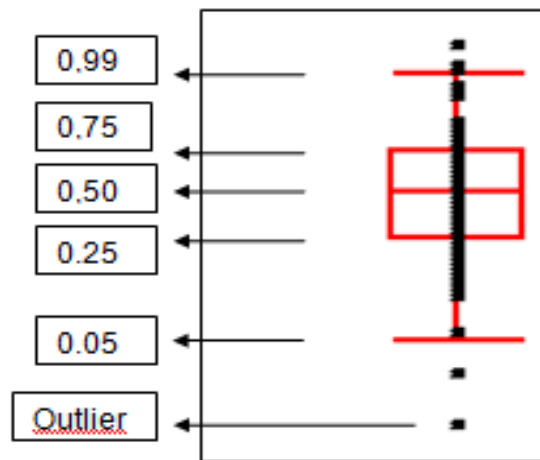


Figura 6: Diagrama de un box-plot.

3.4.2 Análisis estadístico

3.4.2.1 Análisis de varianza (ANAVA)

Mediante el programa InfoStat 2008, se realizó un análisis de varianza. El mismo es sensible a las propiedades estadísticas de los términos de error aleatorio del modelo lineal.

Los supuestos tradicionales del ANAVA implican errores independientes, normalmente distribuidos y con varianzas homogéneas para todas las observaciones. Además, para diseños involucrando estructuras de parcelas en bloque se supone que existe aditividad bloque-tratamiento. Esto es, los bloques tienen un efecto aditivo sobre todos los tratamientos y no interactúan con estos. La verificación de los supuestos subyacentes se realiza en la práctica a través de los predictores de los términos de error aleatorio que son los residuos aleatorios asociados a cada observación (Balzarini et al., 2008).

Para el análisis de las variables medidas se utilizó el siguiente modelo:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} representa la variable evaluada (por ejemplo, rendimiento); μ la media general del ensayo; τ_i el efecto del tratamiento ($i=1, 2, 3, 4, 5$); β_j el efecto del bloque ($j= 1$: alto, 2 : ladera media, 3 : ladera baja); ε_{ij} el error experimental asociado a cada observación.

Para el caso del potrero Sg-CC, que incluyó repeticiones de los tratamientos en cada bloque, en el modelo estadístico se determinaron las interacciones entre: bloque y tratamiento, repetición y tratamiento y bloque y repetición. La repetición 1 de cada tratamiento en cada bloque se ubicó entre las fajas 1 a 5 y la repetición 2 se ubicó entre las fajas 6 a 10.

Cuando el análisis de varianza determinó el rechazo de la hipótesis nula se procedió a la comparación múltiple de medias mediante el test de Tukey.

Es importante señalar que en todos los casos en que se determinaron diferencias entre tratamientos o grupos de tratamientos, las mismas se realizaron con un 95% de confianza ($p = 0,05$).

3.4.2.2 Contrastes ortogonales

Un contraste es definido como una combinación lineal de los parámetros del modelo, en los que se cumple que la suma de los coeficientes que los afectan es 0 (Montgomery, citado por Balzarini et al., 2008).

Los contrastes permiten hacer comparaciones entre medias, planeadas previamente al análisis de la varianza.

Si se desea plantear más de un contraste, para que las comparaciones sean independientes unas de otras, los contrastes deberán ser ortogonales. Dos contrastes son ortogonales si la suma de los productos de los coeficientes de ambos es 0. Tres o más contrastes son ortogonales si todos los pares de contrastes son ortogonales (Balzarini et al., 2008).

Los contrastes realizados permitieron la comparación entre grupos de tratamientos. Se contrastaron los criterios de fertilización (nivel crítico vs. elevar y mantener), los sistemas (uniforme vs. variable) y los tratamientos fertilizados vs. testigos (para determinar si existió efecto del fertilizante). Asimismo se determinó si existió interacción entre los criterios y los sistemas. Las 4 comparaciones realizadas son independientes ya que, todos los pares de contrastes cumplen con la ortogonalidad (cuadro 5).

Cuadro 5: Matriz de contrastes con los coeficientes para cada tratamiento

Contraste	Tratamiento				
	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅
Ψ_1 : Elevar y mantener vs. nivel crítico	+1	+1	-1	-1	0
Ψ_2 : Uniforme vs. variable	+1	-1	+1	-1	0
Ψ_3 : Interacción criterio*sistema	+1	-1	-1	+1	0
Ψ_4 : Testigo vs. fertilizados	+1	+1	+1	+1	-4

T₁: Tratamiento elevar y mantener uniforme T₂: Tratamiento elevar y mantener variable T₃: Tratamiento nivel crítico uniforme T₄: tratamiento nivel crítico variable T₅: Tratamiento testigo

3.4.3 Variogramas

Para determinar si existía correlación espacial entre los datos de rendimiento se utilizó la herramienta de los variogramas. El programa utilizado fue GS+ 5.1.

Los datos de rendimiento utilizados fueron los residuales. Al valor original del rendimiento se le sustrajo el valor de la media del tratamiento. El objetivo de este procedimiento fue quitar el efecto del tratamiento al valor de rendimiento y así poder establecer si existía correlación espacial.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CONTENIDO DE NUTRIENTES EN SUELO Y FERTILIZANTE AGREGADO

Se observó mayor contenido de P menores variabilidades del nutriente en el experimento instalado sobre CC probablemente debido a un mayor agregado de fertilizantes debido a una mayor frecuencia de cultivos en la rotación. En las RC, la mayor variabilidad observada, entre bloques, es debida a la presencia de animales en la fase de pasturas, que redistribuyen el P con las heces. A su vez, la fosforita utilizada para la fertilización fosfatada de las pasturas es móvil.

Los niveles de K intercambiable en todos los experimentos se encontraron por debajo de los contenidos del nutriente reportados en situaciones pastoriles (0,35 meq/100 g suelo; Terra, com pers) (cuadro 6). Esto puede ser debido a que durante los primeros 10 años de la rotación, los cultivos no fueron fertilizados con fuentes potásicas.

Cuadro 6: Concentración de P y K en suelo en pre-siembra, según potrero y bloque.

Nutriente	Sorgo-Rotación Continua			Soja-Rotación Corta			Sorgo-Cultivo Continuo		
	Alto	L. media	L. baja	Alto	L. media	L. baja	Alto	L. media	L. baja
P(ppm)	25	17	12	20,4	15,3	10,1	24,2	21,1	19,8
K (meq/100 g suelo)	0,20	0,21	0,20	0,19	0,20	0,20	0,17	0,20	0,19

L.media = ladera media; L.baja = ladera baja

Se aplicó mayor cantidad de P en el sistema variable que el uniforme en los experimentos de Sg-RC y Sj-RC, mientras que no hubo diferencias entre los tratamientos del Sg-CC (cuadro 7, 8 y 9). Este resultado era esperable ya que los niveles promedio de P en suelo de los potreros de Sg-RC y Sj-RC se encontraban por debajo del óptimo establecido según el criterio elevar y mantener, mientras que para el Sg-CC se ubicaron por encima (cuadros 5 y 6).

Cuadro 7: Fertilizante agregado según tratamiento y bloque en el Sg-RC.

Sistema de fertilización	Criterio de fertilización	Bloque	P (kg P ₂ O ₅ /ha)	K (kg K ₂ O/ha)
Uniforme	Nivel crítico	Todos	-	60
	Elevar y mantener	Todos	24	113
Variable	Nivel crítico	Alto	-	60
		Ladera media	-	48
		Ladera baja	-	60
	Elevar y mantener	Alto	-	113
		Ladera media	32,2	108
		Ladera baja	80	113

Cuadro 8: Fertilizante agregado según tratamiento y bloque en la Sj-RC.

Sistema de fertilización	Criterio de fertilización	Bloque	P (kg P ₂ O ₅ /ha)	K (kg K ₂ O/ha)
Uniforme	Nivel crítico	Todos	-	60
	Elevar y mantener	Todos	46	113
Variable	Nivel crítico	Alto	-	68
		Ladera media	-	60
		Ladera baja	24	60
	Elevar y mantener	Alto	-	127
		Ladera media	46	110
		Ladera baja	97	113

Cuadro 9: Fertilizante agregado según tratamiento y bloque en el Sg-CC.

Sistema de fertilización	Criterio de fertilización	Bloque	P (kg P ₂ O ₅ /ha)	K (kg K ₂ O/ha)
Uniforme	Nivel crítico	Todos	-	68
	Elevar y mantener	Todos	33	127
Variable	Nivel crítico	Alto	-	98
		Ladera media	-	60
		Ladera baja	-	68
	Elevar y mantener	Alto	34	148
		Ladera media	33	120
		Ladera baja	35	128

Cabe señalar que a excepción del P aplicado por el sistema variable en la Sj-RC, las aplicaciones de P se debieron al criterio EM (figura 7).

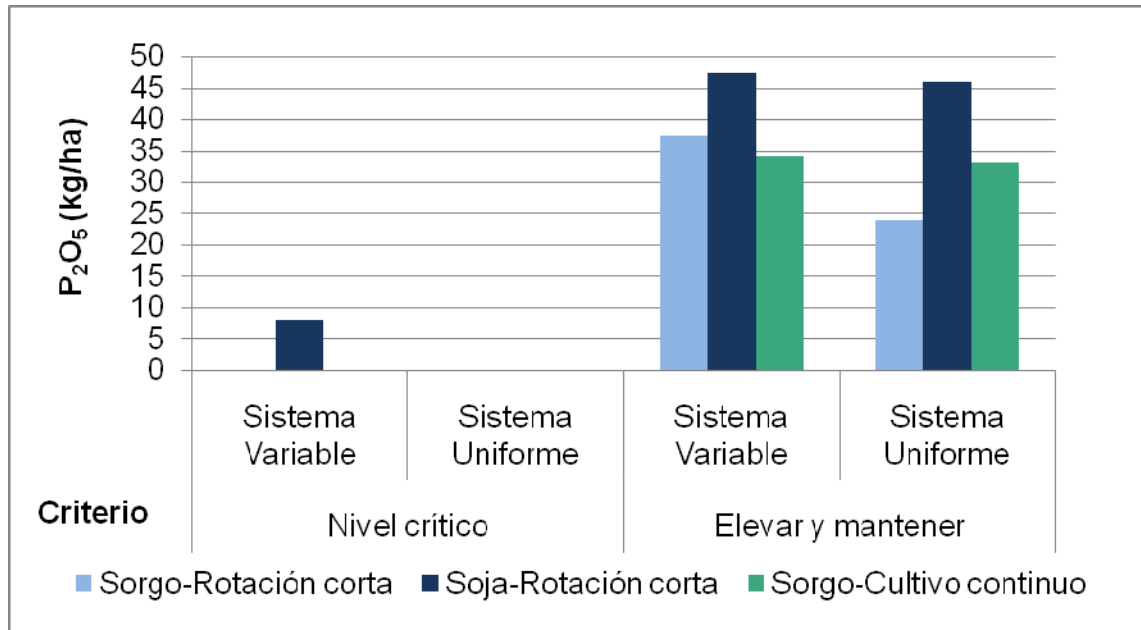


Figura 7: Dosis de P agregado según experimento, criterio y sistema de fertilización.

Para el caso del K prácticamente no hubo diferencia entre los sistemas, ni entre los potreros debido a que los valores iniciales de K intercambiable en suelo fueron similares no sólo entre potreros sino también entre bloques (cuadro 6). Por esa razón, los valores absolutos de fertilizante aplicado también fueron similares (figura 8).

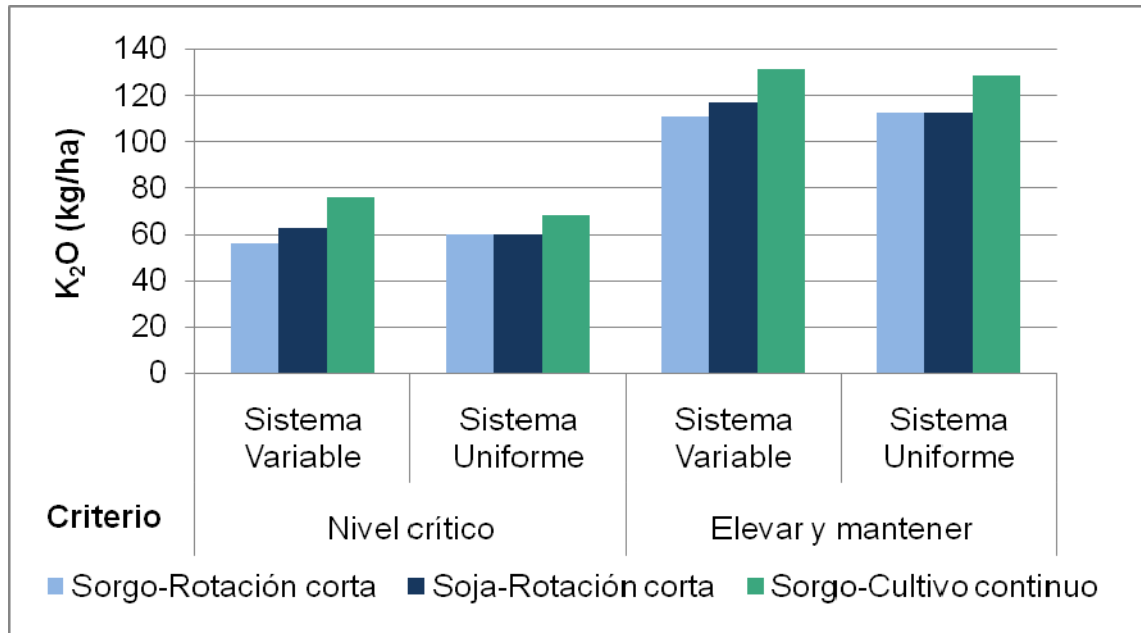


Figura 8: Dosis de K agregado según experimento, criterio y sistema de fertilización.

Cuadro 10: Contenido de N-NO₃ en suelo (0-15 cm) al estado de V6 de sorgo y dosis de N agregado como urea para los ensayos de sorgo.

Bloque	Tratamiento	Sorgo-Rotación corta		Sorgo-Cultivo continuo	
		N-NO ₃ (ppm) en suelo	Kg/ha urea aplicados	N-NO ₃ (ppm) en suelo	Kg/ha urea aplicados
1	Variable	8	84	10	70
2	Variable	13	49	10	70
3	Variable	12	56	9	77
Todos	Uniforme	11	65	10	73

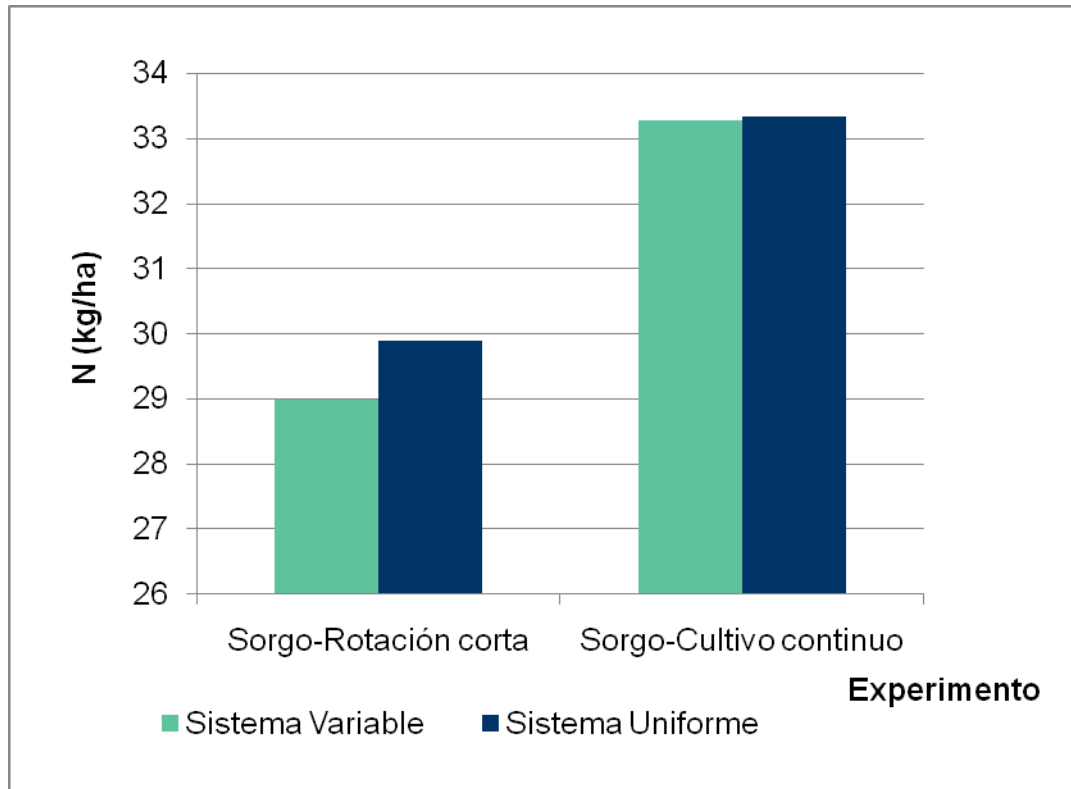


Figura 9: Dosis de N agregado en el estado V6 del sorgo, según experimento y sistema de fertilización.

4.2 DETERMINACIONES

4.2.1 Precipitaciones y desarrollo de los cultivos

Puede caracterizarse el inicio de la zafra como lluvioso ya que entre diciembre, enero y febrero llovieron 571 mm (figura 10).

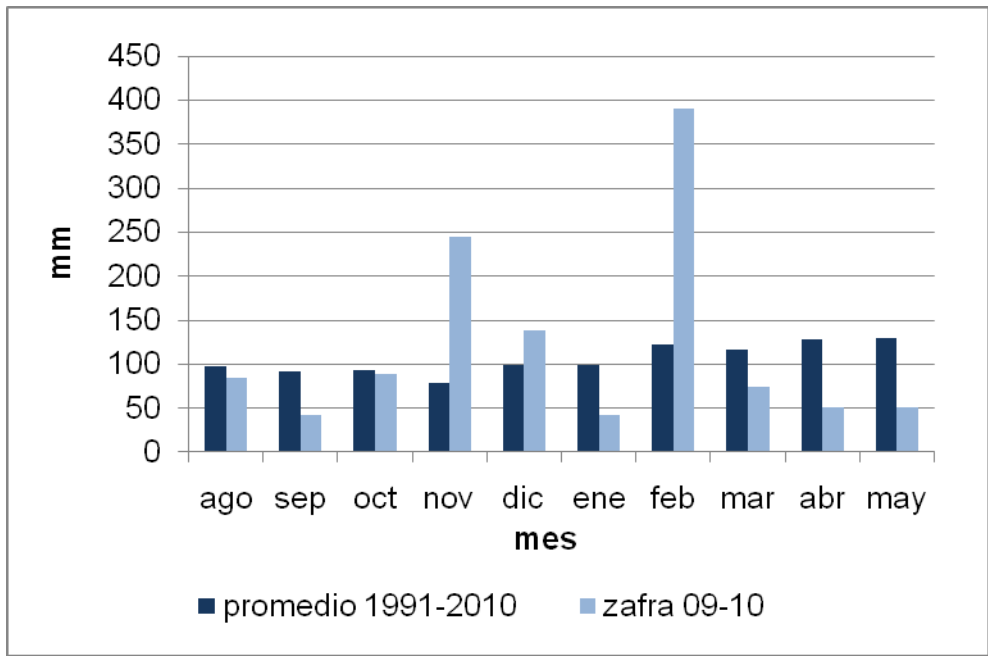


Figura 10: Régimen de precipitaciones durante los experimentos comparado con registros históricos del campo experimental.

Durante el mes de febrero se registraron lluvias de hasta 120 mm las cuales hicieron que los cultivos permanecieran con zonas inundadas perjudicando su desarrollo.

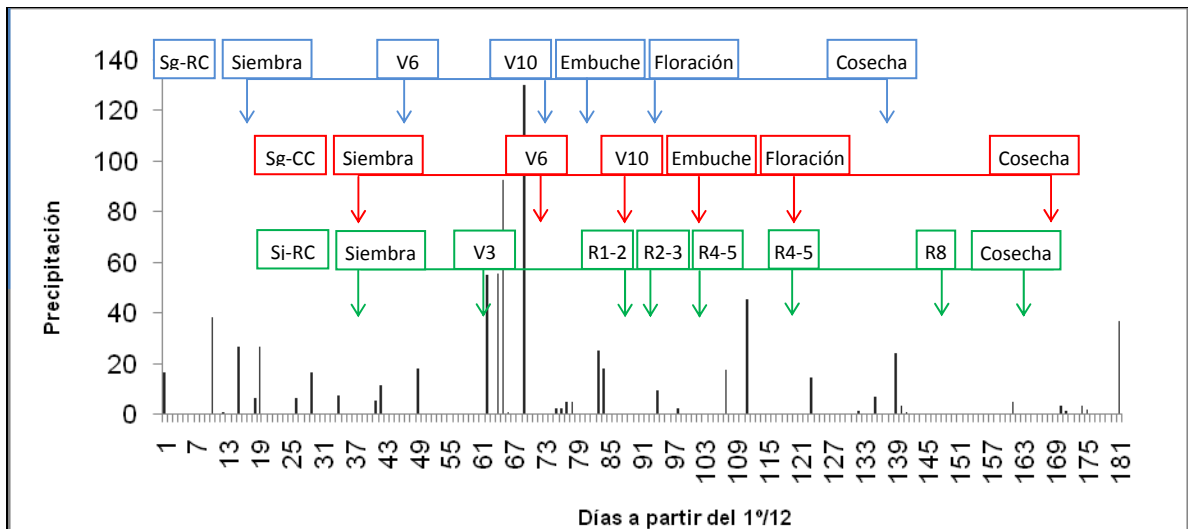


Figura 11: Precipitaciones (mm) y estado de los cultivos, según experimento y días a partir del 1º/12.

El régimen de precipitaciones durante noviembre fue un 213% mayor comparado con la serie histórica lo que imposibilitó la siembra de los cultivos en las fechas previstas. A su vez, las lluvias de diciembre que fueron 39% superiores a la media histórica, determinaron que se debieran resembrar los experimentos de Sj-RC y Sg-CC en el mes de enero.

4.2.2 Sorgo – rotación corta

4.2.2.1 Implantación

Se obtuvo una recuperación promedio de plantas de 58,5%. No se detectaron diferencias entre los bloques. Por otra parte, existieron diferencias entre algunos tratamientos obteniendo EM-V mayor implantación (66%) que el testigo y EM-U (52 y 51% respectivamente). Los valores de de la variable son relativamente bajos debido a que la intensidad de las lluvias perjudicaron la implantación (figura 11).

Se detectó interacción entre los criterios y sistemas de fertilización por lo cual no se puede concluir acerca de los efectos principales. En los tratamientos fertilizados la implantación fue 8 % superior al testigo sin fertilizar.

4.2.2.2 Altura de planta

Las plantas de los tratamientos de fertilización uniforme fueron más altas comparadas con las de fertilización variable hasta los 52 post siembra. Sin embargo, no hubo diferencias entre los criterios de fertilización. Comparando los tratamientos fertilizados con el testigo sin fertilizar, sólo se detectaron diferencias significativas a favor de los primeros en el estado de embuche (cuadro 12).

Diferencias en altura entre los tratamientos fertilizados se encontraron solamente hasta los 37 días del cultivo, siendo el tratamiento EM-U superior pero diferente solamente del tratamiento NC-V.

Se encontraron diferencias entre bloques a partir de los 37 días post siembra. En la ladera baja a partir de ese momento, siempre se registraron las mayores alturas de plantas. Estos resultados pueden explicarse debido a que no se detectaron problemas de enmalezamiento y anegamiento (como los encontrados en el alto) debido al mejor drenaje de la zona.

A pesar de que no existieron diferencias claras en el contenido de agua entre bloques y/o profundidades (cuadro 11), es probable que además de un

mejor drenaje, la ladera baja haya presentado mayor contenido de agua absoluto debido a una mayor profundidad de suelo.

Cuadro 11: Contenido de agua gravimétrico (%) en suelo, según profundidad y bloque en 3 estados del cultivo.

Estado	V6			Embucho			Floración		
Prof (cm)	0-15	15-30	30-45	0-15	15-30	30-45	0-15	15-30	30-45
Bloque									
Alto	16	20	20	17	15	20	16	20	24
Ladera media	20	17	22	18	17	24	18	18	25
Ladera baja	16	19	21	17	16	24	17	18	24

Los resultados antes mencionados fueron inconsistentes ya que no se mantuvieron a lo largo del ciclo del cultivo. Las diferencias entre los sistemas de fertilización (cuadro 12) pueden no haberse mantenido a lo largo del ensayo debido a cambios en el ambiente. En el alto, se detectó en la faja 5 (tratamiento U) y parte de la 4 (en las celdas 2 y 3) un importante enmalezamiento de *Digitaria sanguinalis* a partir del mes y medio de cultivo. Por su parte, en la celda 3 y 4 de la faja 1 (NC-U) del mismo bloque, el cultivo permaneció anegado desde las primeras etapas. Estos factores pueden haber determinado un menor crecimiento en la altura de las plantas en los momentos de mayor crecimiento del cultivo haciendo desaparecer las diferencias que se habían establecido inicialmente.

Cuadro 12: Altura de plantas (cm) según estado fenológico y días desde implantación, y diferencias en altura de plantas entre grupos de tratamientos.

Días post siembra	Estado fenológico	Media general	EM vs NC	U vs V	Fertilizados vs testigo
22	V3	11,9	n.s.	2,2	n.s.
37	V6	38,5	n.s.	5,7	n.s.
52	V10	67,3	n.s.	6,5	n.s.
65	Embucho	90,1	n.s.	n.s.	5,6
78	Floración	108,3	n.s.	n.s.	n.s.

EM: criterio elevar y mantener; NC: criterio nivel crítico; U: sistema uniforme; V: sistema variable.

Las diferencias observadas entre los tratamientos fertilizados y el testigo (sin fertilización en V6) en estado de embuche se deben a que, a partir de V10 se dan las mayores tasas de crecimiento (Vanderlip, 1993) y por lo tanto demanda de nutrientes. No fueron detectadas diferencias en floración. En las etapas previas probablemente las diferencias no se detectaron debido a las menores tasas de crecimiento y a que la fertilización basal (para todos los tratamientos) incluía nitrógeno.

Si bien las diferencias mencionadas son estadísticamente significativas, los valores absolutos que diferencian un grupo de tratamientos de otro, son pequeños (cuadro 12). Esto hace pensar que realmente no existieron diferencias biológicas.

4.2.2.3 Actividad clorofiliana (SPAD)

Se encontró efecto bloque en V6, V10 y floración. En estos dos últimos momentos los bloques 1 y 2 fueron superiores al 3 pero no difirieron entre sí. En estos estadios se encontraron diferencias a favor de los tratamientos fertilizados respecto al testigo sin fertilizar. En V6, el bloque 2 fue superior al 1 pero ninguno de éstos fue diferente del 3. Cabe señalar que en embuche no se encontraron diferencias entre bloques, ni entre tratamientos, ni entre grupos de tratamientos (cuadro 13).

Cuadro 13: Diferencias en SPAD entre grupos de tratamientos según días de ciclo del cultivo.

Días post siembra	Estado fenológico	Media general	EM vs NC	U vs V	Fertilizados vs testigo
30	V4 – 5	41,1	n.s.	n.s.	n.s.
57	V10	43,4	n.s.	n.s.	4,0
65	Embuche	44,3	n.s.	n.s.	n.s.
78	Floración	47,7	n.s.	n.s.	4,0

EM: criterio elevar y mantener; NC: criterio nivel crítico; U: sistema uniforme; V: sistema variable.

Se observó que la media de SPAD fue en aumento a lo largo del ciclo del cultivo. Los fertilizados mostraron superioridad respecto a los testigos en 2 oportunidades, explicado probablemente por la fertilización nitrogenada en V6.

4.2.2.4 Materia seca

No se observaron diferencias en acumulación de biomasa entre los tratamientos al estado fenológico V6. Sin embargo, la biomasa acumulada en el alto fue 48% inferior a la biomasa promedio de las otras 2 posiciones topográficas. La menor acumulación cuantificada en el alto pudo estar relacionada a los problemas de drenaje y malezas reportados anteriormente.

4.2.2.5 Rendimiento muestreado

No se encontraron diferencias entre tratamientos. El rendimiento en grano del cultivo determinado en los sitios de muestreo fue de 8500 kg/ha. El testigo sin fertilizar tuvo un rendimiento de 7570 kg/ha seguido por NC-U con 8415 kg/ha. El tratamiento NC-V fue el mayor con 9320 kg/ha. Sin embargo, las diferencias no fueron estadísticamente significativas. No hubo diferencias entre grupos de tratamientos ni bloques.

Una de las explicaciones a este fenómeno es el hecho de que los cultivos forman parte de un experimento de rotaciones de largo plazo. Esto implica fertilizaciones anuales, tanto a los cultivos como a las pasturas, y la fijación biológica de nitrógeno por parte de estas últimas. Además se suma una alta producción de residuos y manejos correctos de los barbechos, lo que lleva en el mediano y largo plazo al aumento de la fertilidad de los suelos. Reflejo de esta situación son los altos valores de P y K en la siembra y de N en V6 (magnificado por las precipitaciones registradas), así como también los altos rendimientos estimados del tratamiento testigo (superior a los 7500 kg/ha).

Diferencias a favor de los sistemas de fertilización variable respecto a los uniformes son esperables en chacras con varios años de fertilizaciones diferenciales. En los ensayos de rotaciones de la UEPP estos cultivos fueron los primeros en los que se evaluaban distintos sistemas de fertilización por lo que no se encontraron diferencias.

Si bien se esperaban diferencias entre los tratamientos fertilizados y el testigo, las mismas no fueron observadas.

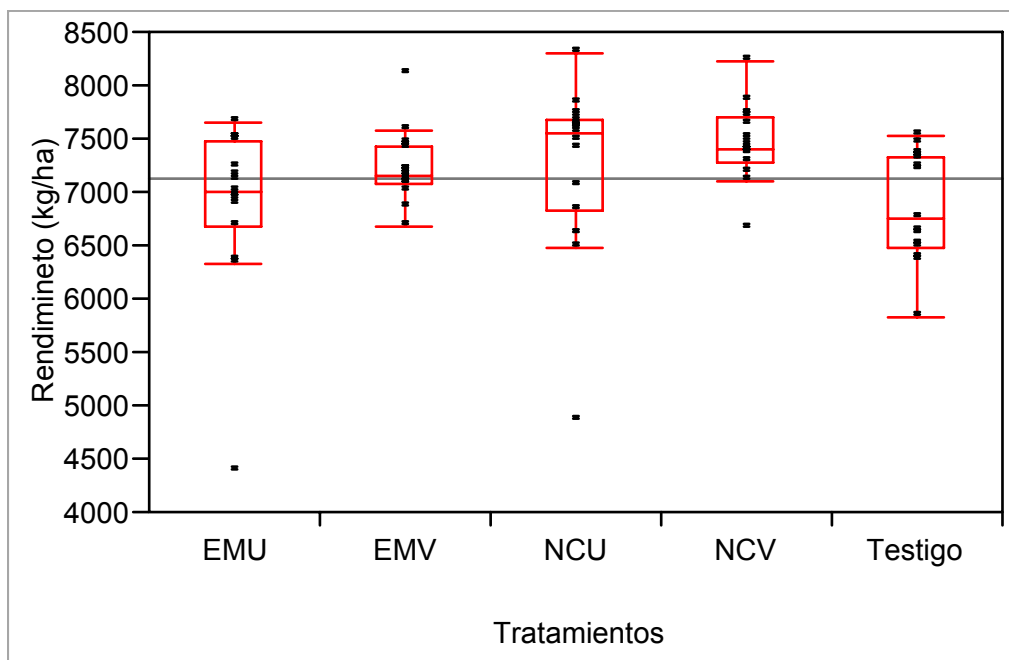
4.2.2.6 Rendimiento monitor

El tratamiento NC-V fue superior al tratamiento EM-U y al testigo. Sin embargo, no difirió de los otros 2 tratamientos. Cabe señalar que el tratamiento EM-U del bloque 1 fue afectado por un importante enmalezamiento de pasto blanco. Esto hizo disminuir el promedio del tratamiento. De hecho, el

rendimiento del tratamiento en el bloque 1 fue 6134 kg/ha, mientras que en el bloque 2 y 3 fue de 7039 y 7489 kg/ha respectivamente. En lo que respecta al análisis de box plot (figura 12), sin considerar los valores outliers, el testigo presenta el valor mínimo así como el menor máximo.

Comparando los criterios de fertilización, se observaron diferencias significativas entre ellos, logrando el NC rendimientos superiores al criterio EM (959 kg/ha superior). Los CV fueron similares; 11 y 10% respectivamente.

La comparación de los sistemas de fertilización mostró superioridad significativa de rendimientos para el sistema variable por sobre el uniforme (560 kg/ha superior). Además el primero presentó menor variabilidad (CV 8 y 13% respectivamente). La menor variabilidad en los sistemas de fertilización variable (figura 12), confirma algunos antecedentes citados, en los cuales los sistemas variables presentan menor variabilidad debido al manejo sitio específico.



EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico uniforme; NCV: nivel crítico variable.

Figura 12: Box-plot para el rendimiento de monitor, según tratamientos.

Los rendimientos de los tratamientos fertilizados fueron mayores al testigo (340 kg/ha superiores) (cuadro 14). Estas diferencias no habían sido detectadas por los datos de rendimiento muestreado (figura 13).

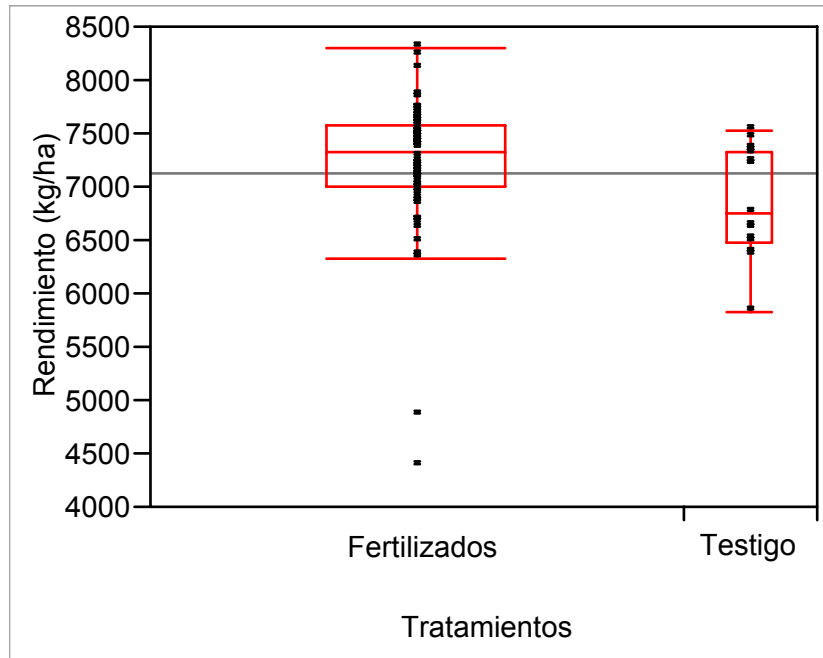


Figura 13: Box-plot para el rendimiento de tratamientos fertilizados y testigo.

Cuadro 14: Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento, de los tratamientos fertilizados y del testigo.

Tratamiento	10%	Mediana	90%	Media
Testigo	6156	6755	7496	6870
Fertilizados	6613	7327	7748	7210

Si bien los tratamientos fertilizados mostraron los menores mínimos y los mayores máximos, el 50% de los valores se concentraron en un rango de rendimiento más estrecho (figura 13).

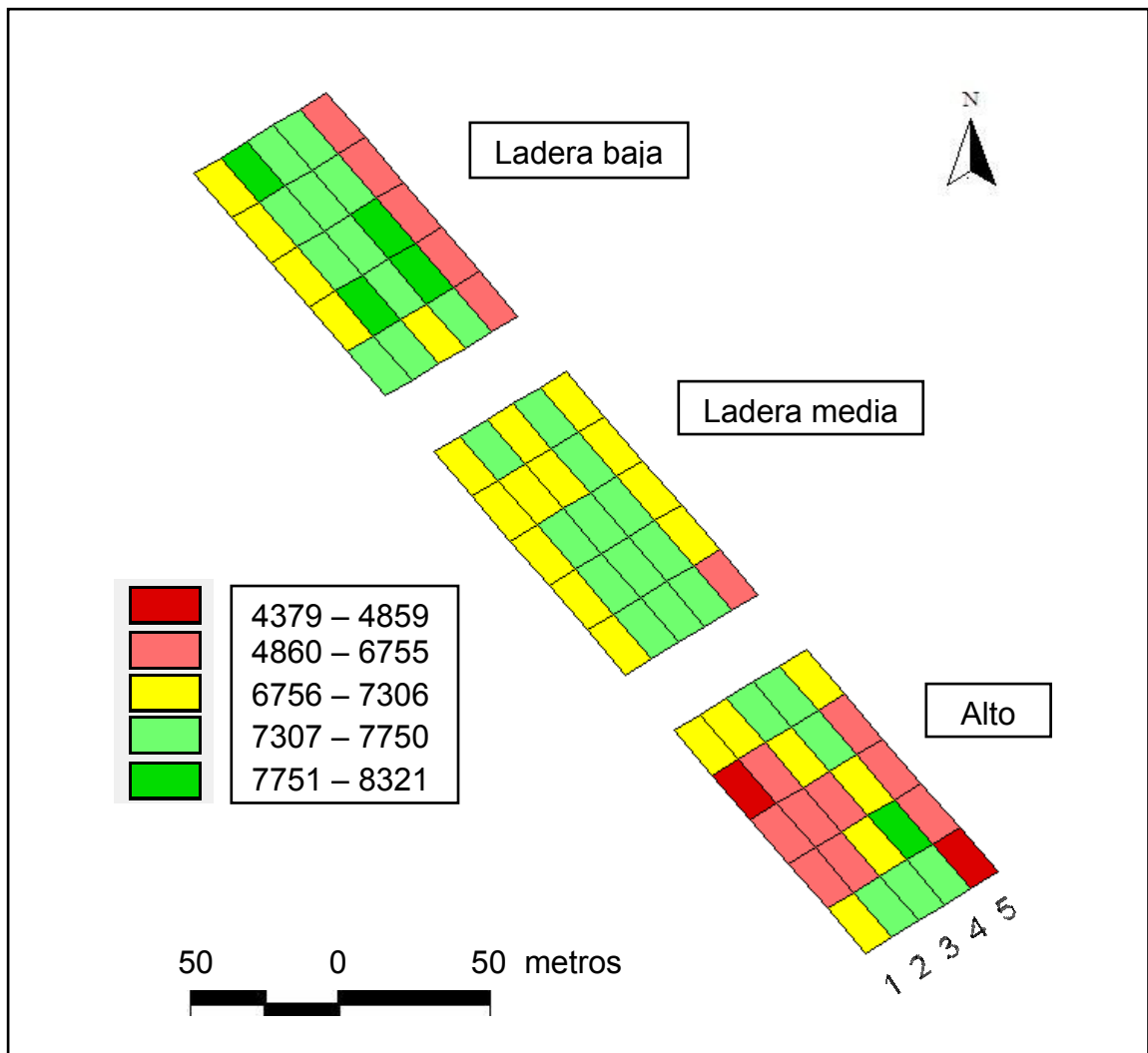
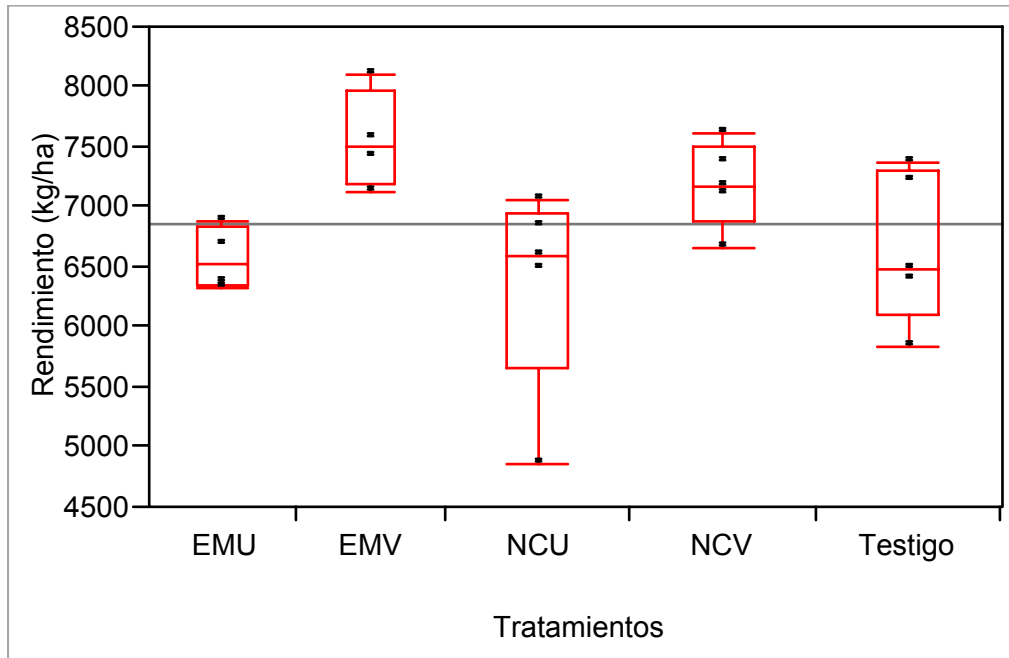


Figura 14: Mapa de rendimiento mostrando los promedios según celdas.

Se encontró efecto del bloque, resultando el alto (6782 kg/ha) menor que la ladera media (7307 kg/ha) y la ladera baja (7338 kg/ha).

El bloque 1 (alto) fue afectado por factores ambientales que perjudicaron el rendimiento del cultivo e incidieron sobre los resultados del ensayo. Tales factores fueron anegamiento en las celdas 2, 3 y 4 de las fajas 1 y 2; y enmalezamiento en las celdas 2 y 3 de la faja 5 (figura 14).



EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico uniforme; NCV: nivel crítico variable.

Figura 15: Box-plot para el rendimiento de los tratamientos en el alto.

En el alto el tratamiento EM-V, que no fue afectado por los factores ambientales antes mencionados, fue el que presentó menor variabilidad en sus datos (figura 15). A su vez fue el que logró la mayor media, siendo diferente significativamente del tratamiento EM-U que presentó el menor rendimiento.

En el bloque 3, los resultados parecen ajustarse más a los que se esperaba cuando se planteó el experimento. Este bloque no presentó problemas de anegamiento, por lo que el cultivo en los tratamientos fertilizados pudo absorber el N aplicado en V6. Los tratamientos fertilizados fueron similares entre sí y distintos del testigo. Este último presentó rendimiento bajo y homogéneo a lo largo de toda la faja (figura 14). Dentro de los tratamientos fertilizados, el NC-U (faja 1) fue estadísticamente igual al NC-V, y al EM-U. Estos 2 últimos tratamientos no difirieron de EM-V.

Cuadro 15: Media y coeficiente de variación de rendimiento (kg/ha), según tratamiento y bloque.

Tratamiento	Alto		Ladera media		Ladera baja	
	Media	CV	Media	CV	Media	CV
EM-U	6134	17	7039	2,3	7489	3,8
EM-V	7541	8,7	6968	5,6	7208	3,7
NC-U	6373	18,9	7654	2,8	7736	4,7
NC-V	7197	7	7507	9,4	7683	8,3
Testigo	6665	15,2	7370	6,2	6576	3,5

Los altos valores de los coeficientes de variación en el alto (cuadro 15) en particular de los tratamientos EM-U, NC-U y testigo, demuestran los tratamientos estuvieron afectados negativamente por los factores ambientales antes mencionados.

4.2.2.7 Análisis químico de granos

La media general del ensayo, respecto al contenido de N en grano, fue de 1,28%. No se detectó efecto del tratamiento, ni de bloque, ni diferencias entre grupos de tratamientos.

El contenido de P medido en grano mostró un valor promedio del ensayo de 2.82 mg/g (0,28%). Se encontró efecto del bloque. Los granos del bloque 2 fueron los de mayor contenido de P. Los del bloque 1 fueron intermedios y los del 3 los de menor contenido (3,05; 2,76 y 2,64 mg/g respectivamente).

El contenido de K en grano mostró diferencias entre bloques y tratamientos. Además se observaron diferencia a favor de los tratamientos variables sobre los uniformes. La media general fue 0,41%. Los bloques 1 y 2 (0,42 y 0,43% respectivamente) fueron superiores al 3 (0,38%). El tratamiento EM-V fue el superior (0,43%) pero sólo difirió del tratamiento EM-U.

Respecto al S no hubo diferencias entre bloques, ni grupos, ni tratamientos. La media general fue 1,18 mg/g.

4.2.3 Soja – rotación corta

4.2.3.1 Implantación

El promedio de recuperación de plantas en el experimento fue de 73%. No se detectaron diferencias significativas entre los bloques ni entre los tratamientos. Sin embargo, la media de implantación del bloque 3 fue la mayor (76%) siendo la del bloque 1 la menor (69%). Esto es debido a que el bloque 3 no sufrió anegamiento por lo que nacieron plantas de las 2 siembras, principalmente en los tratamientos variables, ubicados en las fajas 4 y 5.

4.2.3.2 Altura de planta

Se encontraron diferencias a favor de los tratamientos variables con respecto a los uniformes a los 51 días de cultivo (cuadro 16). Estas diferencias pueden deberse a la ubicación de los tratamientos en el potrero y no a los sistemas de fertilización en sí mismos (figura 18). Los tratamientos variables del bloque 3 se implantaron en la primera fecha de siembra debido a que esta zona no presentó problemas de exceso hídrico. Por otro lado, los tratamientos uniformes del bloque 2 se encontraban en una zona de anegamiento. Estas dos situaciones pueden haber afectado los promedios de los sistemas de fertilización respectivos, y pueden justificar las diferencias entre ellos.

Se encontró efecto bloque en todas las mediciones salvo en la realizada a los 30 días de cultivo. Las diferencias fueron a favor del bloque 3 (ladera baja) en todas las oportunidades, siendo los bloques 1 y 2 estadísticamente iguales. Además de las ventajas que implica esta posición topográfica, el bajo no sufrió anegamiento en ningún momento del ciclo y a su vez tuvo mayor disponibilidad hídrica, principalmente en los 30-45 cm de profundidad.

A su vez, en el estado de R2 el criterio de EM fue superior en altura que NC. Sin embargo, estos resultados son inconsistentes ya que estas diferencias no se mantuvieron en posteriores mediciones.

Las mediciones posteriores a R2 mostraron interacción entre criterios y sistemas, por lo que no se puede concluir acerca de los efectos principales del criterio o sistema sobre la altura de las plantas.

Comparando los tratamientos fertilizados con el testigo sin fertilizar, sólo se detectaron diferencias significativas a favor de los primeros en el estado de R2, pero de escasa magnitud e inconsistentes.

A partir de R2, el tratamiento EM-V fue el de mejor comportamiento.

Cuadro 16: Altura de plantas (cm) según estado fenológico y días desde implantación, y diferencias en altura de plantas entre grupos tratamientos.

Días post siembra	Estado fenológico	Media general	EM vs NC	U vs V	Fertilizados vs testigo
24	V3	10,7	n.s.	n.s.	n.s.
36	V5-6	23	n.s.	n.s.	n.s.
51	R2	41,3	7,2	- 4,0	1,9
65	R4-5	55,6	interacción criterio*sistema		n.s.
83	R6	64,6	interacción criterio*sistema		n.s.
111	R8	58,7	interacción criterio*sistema		n.s.

EM: elevar y mantener; NC: nivel crítico; U: uniforme; V: variable

4.2.3.3 Actividad clorofiliana (SPAD)

En el criterio de fertilización NC presentó mayor valor de SPAD que el criterio EM en el estado de R5-R6 (cuadro 17).

En el estado de R5-R6 se encontró efecto del tratamiento, siendo el testigo el de mayor SPAD, pero diferente únicamente del tratamiento EM-U.

Se encontró efecto bloque. Sin embargo, el mismo fue inconsistente ya que en R2-R3 el bloque 1 fue el que presentó mayor valor de SPAD y el bloque 3 fue el de menor valor. En mediciones realizadas en el estado de R5-R6 el bloque 2 fue el de mayor valor siendo los bloques 1 y 3 iguales entre sí.

Cuadro 17: Diferencias en SPAD en valores absolutos entre grupos de tratamientos según días de ciclo del cultivo.

Días post siembra	Estado fenológico	Media general	EM vs NC	U vs V	Fertilizados vs testigo
56	R2-3	39,7	n.s.	n.s.	- 0,9
77	R5-6	44,6	- 2,1	n.s.	n.s.

EM: elevar y mantener; NC: nivel crítico; U: uniforme; V: variable

4.2.3.4 Materia Seca

No se encontraron diferencias significativas en biomasa acumulada entre bloques, tratamientos o grupos de tratamientos. La media general del ensayo en R2 fue 1573 kg/ha, mientras que en R6 fue 4808 kg/ha. En ambas mediciones, el testigo fue el mayor en valor absoluto. Tales resultados no son llamativos si se tienen en cuenta los niveles iniciales de P y K en suelo y la fertilización basal (cuadro 5).

4.2.3.5 Rendimiento muestreado

El rendimiento muestreado mostró una media general de todo el ensayo de 2573 kg/ha sin diferencias significativas entre los tratamientos. Las mismas consideraciones realizadas para la materia seca, explican la falta de diferencias en rendimiento estimado.

No se detectó efecto del bloque, pero sí hubo interacción entre el criterio y el sistema de fertilización. A pesar de esto la comparación de los fertilizados y el testigo no mostró diferencias entre los grupos.

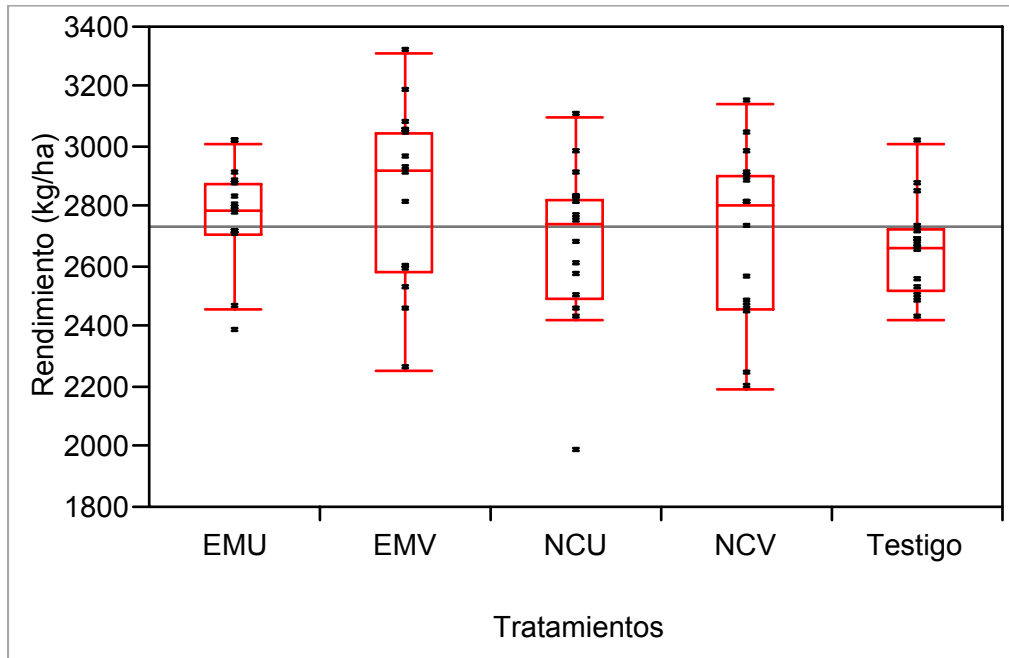
4.2.3.6 Rendimiento monitor

Para esta variable analizada se encontró efecto del bloque, siendo el bloque 3, superior al 1, aunque ninguno de estos fue distinto del 2.

El efecto de los tratamientos no fue significativo, siendo la media general de rendimiento de 2734 kg/ha.

Al contrastar los criterios de fertilización, se encontró superioridad significativa del criterio EM sobre el NC (241 kg/ha superior). Los coeficientes de variación fueron 13,5 y 14% respectivamente. Esta diferencia fue inversa a la del potrero Sg-RC, donde el criterio NC fue superior a EM.

La comparación entre grupos de los tratamientos uniforme y variable, determinó un coeficiente de variación menor para los tratamientos variables (12,8 vs. 14,9%; figura 16). Sin embargo, no existieron diferencias en el rendimiento obtenido entre los sistemas de fertilización (2726 y 2777 kg/ha respectivamente). Al igual que en el Sg-RC, la menor variabilidad de los tratamientos con sistemas de fertilización variable, coincide con la bibliografía citada.



EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico uniforme; NCV: nivel crítico variable.

Figura 16: Box-plot para el rendimiento, según tratamiento.

Cuadro 18: Cuantil 10%, mediana, 90 %, y media de rendimiento, según tratamiento.

Tratamiento	10%	Mediana	90%	Media
EM-U	2430	2792	3011	2776
EM-V	2376	2921	3233	2848
NC-U	2247	2747	3027	2678
NC-V	2221	2805	3083	2705
Testigo	2459	2664	2929	2665

Los tratamientos fertilizados no se diferenciaron del testigo. Los altos niveles de nutrientes en suelo, aún sin fertilización, determinaron altos rendimientos del tratamiento testigo (cuadro 18). Los coeficientes de variación fueron 13,9% y 10,6% para los tratamientos fertilizados y testigo respectivamente.

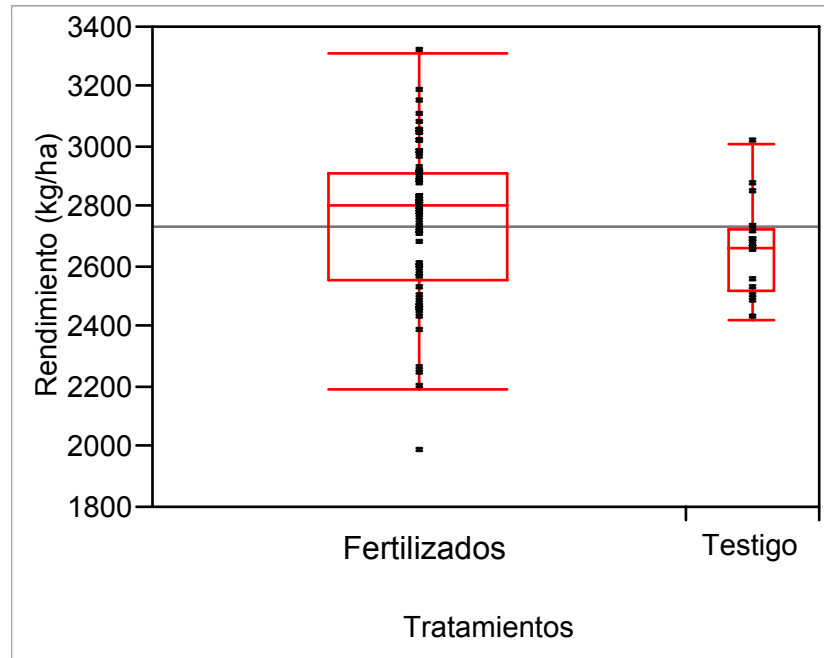


Figura 17: Box-plot para el rendimiento de tratamientos fertilizados y testigo.

En el bloque 1, se registraron varias zonas sin cultivo debido al anegamiento. Estas determinaron zonas de bajos rendimientos (figura 18).

Por su parte en el bloque 3, no se presentaron problemas de anegamiento y se detectó una mejor implantación (principalmente en las fajas 4 y 5) en la primera fecha de siembra lo que pudo contribuir a lograr mejores rendimientos y a explicar la superioridad de este bloque respecto al 1.

En el bloque 3 los tratamientos variables (fajas 4 y 5) fueron superiores a los uniformes en 435 kg/ha. Los tratamientos variables lograron una buena implantación en la primer fecha de siembra, estableciéndose antes y logrando mejor desarrollo y llenado de grano. Además en este bloque, dentro del criterio nivel crítico, el sistema variable determinó que se aplicara P logrando llegar al nivel crítico de suficiencia. Sin embargo, el sistema uniforme (debido a la ponderación realizada con el nivel de P de los otros bloques) determinó que no se aplicara P, quedando por lo tanto el nivel de P en suelo, para el tratamiento NC-U de ese bloque, por debajo del nivel de suficiencia. El tratamiento NC-V dentro del bloque 3 fue superior y diferente de los 2 tratamientos variables y del testigo.

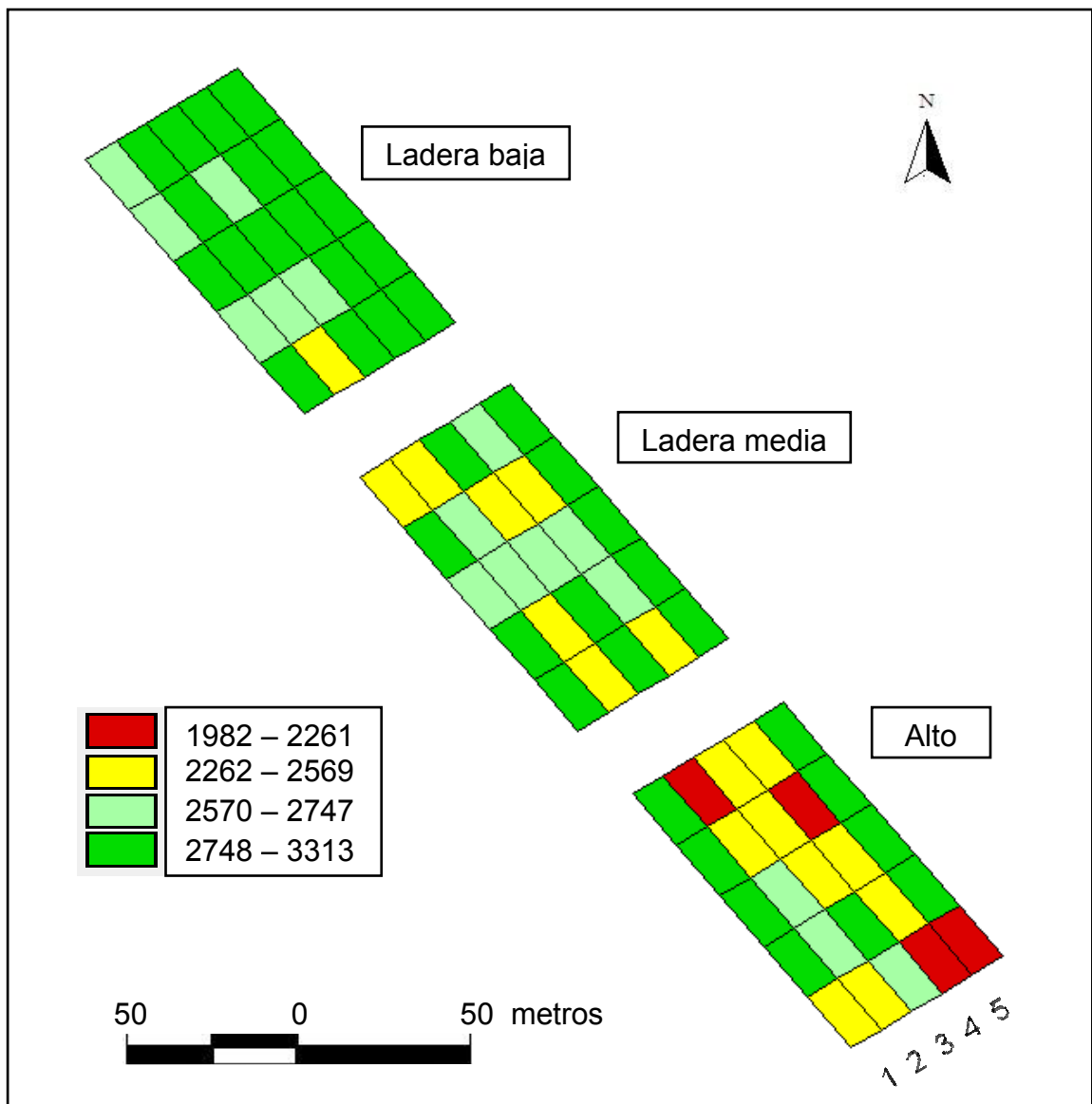


Figura 18: Mapa de rendimiento mostrando los promedios según celdas.

4.2.3.7 Análisis químico de granos

Respecto al contenido de N en grano, la media general fue de 6,33%. Fueron observadas diferencias entre los tratamientos fertilizados y el testigo, siendo éste último 0,15% superior al resto.

Sin embargo, respecto al K también hubo diferencias entre los fertilizados y el testigo, pero en este caso a favor de los fertilizados en 0,2%. La media general del ensayo fue de 1,8%.

El contenido de S en grano fue en promedio 0,30%. No se detectaron diferencias entre tratamientos.

4.2.4 Sorgo – cultivo continuo

4.2.4.1 Implantación

Se obtuvo una recuperación promedio de plantas de 73%. No se detectó efecto bloque.

4.2.4.2 Altura de planta

En todas las mediciones se encontró interacción entre el bloque y los tratamientos, así como interacción entre el bloque y la repetición y entre la repetición y el tratamiento, por lo que no se puede concluir acerca de los efectos principales de estos factores. Las interacciones demuestran que hubo efecto de la posición topográfica y de las condiciones ambientales, que afectaron el efecto de los tratamientos, sobre las variables medidas.

Diferencias entre los tratamientos fertilizados y el testigo se observaron en todas las mediciones realizadas a favor de los primeros.

4.2.4.3 Actividad clorofiliana (SPAD)

Se realizaron 4 mediciones en distintos momentos del cultivo (cuadro 19). En todas ellas, se detectó interacción entre el bloque y el tratamiento, así como interacción entre la repetición y el tratamiento. Asimismo, interacción entre el bloque y la repetición fue detectada en las primeras 3 medidas. El resultado de los contrastes mostró superioridad de los tratamientos fertilizados sobre el testigo a partir de la segunda medición. Esto pudo deberse al efecto del fertilizante aplicado a partir de V6.

Asimismo se encontró efecto del sistema en las 2 primeras medidas, e interacción entre el criterio y el sistema al inicio de floración.

Cuadro 19: Medición de SPAD, media general según días de ciclo del cultivo.

Días post siembra	Estado fenológico	Media general
36	V6	32,8
57	V14	39,9
73	Inicio floración	36,9
83	Floración	41,6

4.2.4.4 Materia Seca

Considerando la materia seca en torno a V6 no se detectaron diferencias entre tratamientos, bloques ni grupos de tratamientos. La media general del ensayo de MS fue de 208 kg/ha.

Los valores registrados fueron menores a los del Sg-RC en igual estado fenológico. Esto es debido a que las plantas del Sg-CC fueron re-sembradas en enero (fecha tardía) presentando desventajas en el desarrollo.

4.2.4.5 Rendimiento muestreado

Hubo diferencias entre tratamientos, siendo los fertilizados iguales entre sí y diferentes del testigo. Esto fue confirmado por los contrastes, que arrojaron una superioridad de los tratamientos fertilizados de 1379 kg/ha (cuadro 20). El promedio de los fertilizados fue de 5074 kg/ha y el del testigo 3695 kg/ha.

Se detectó interacción entre el bloque y la repetición.

4.2.4.6 Rendimiento monitor

Para esta variable se encontró efecto del bloque, sin interacción entre el bloque y los tratamientos. El bloque 3 fue inferior a los otros bloques. Respecto a los criterios y sistemas de fertilización se detectó interacción significativa entre los mismos (figura 19) por lo que no se puede concluir acerca de los efectos principales de los criterios o sistemas.

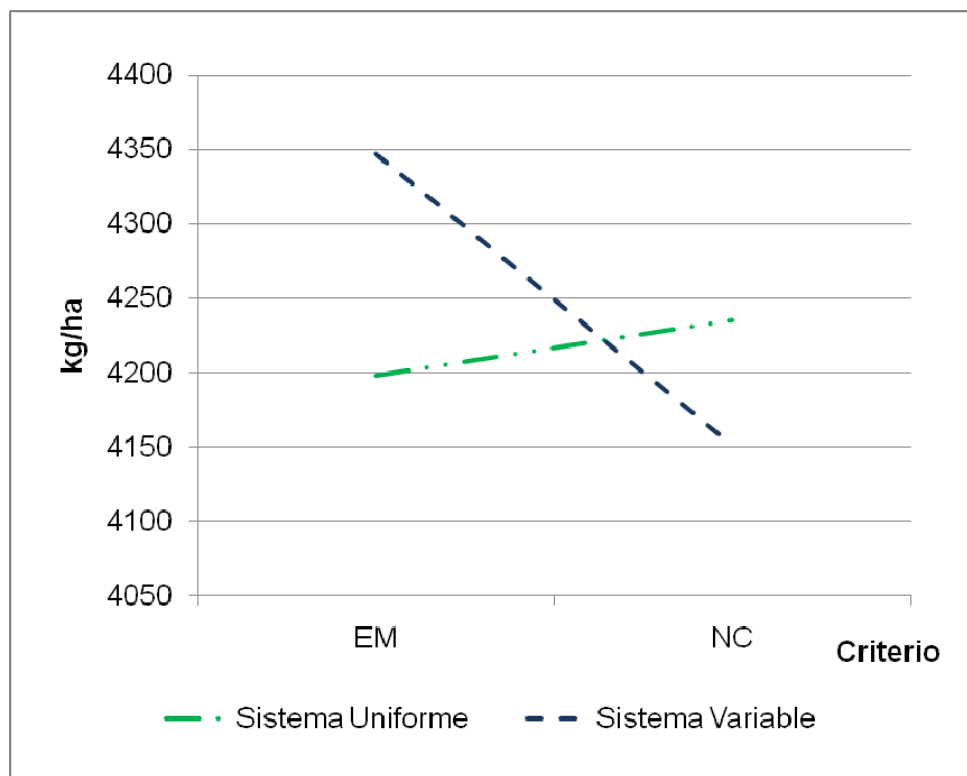
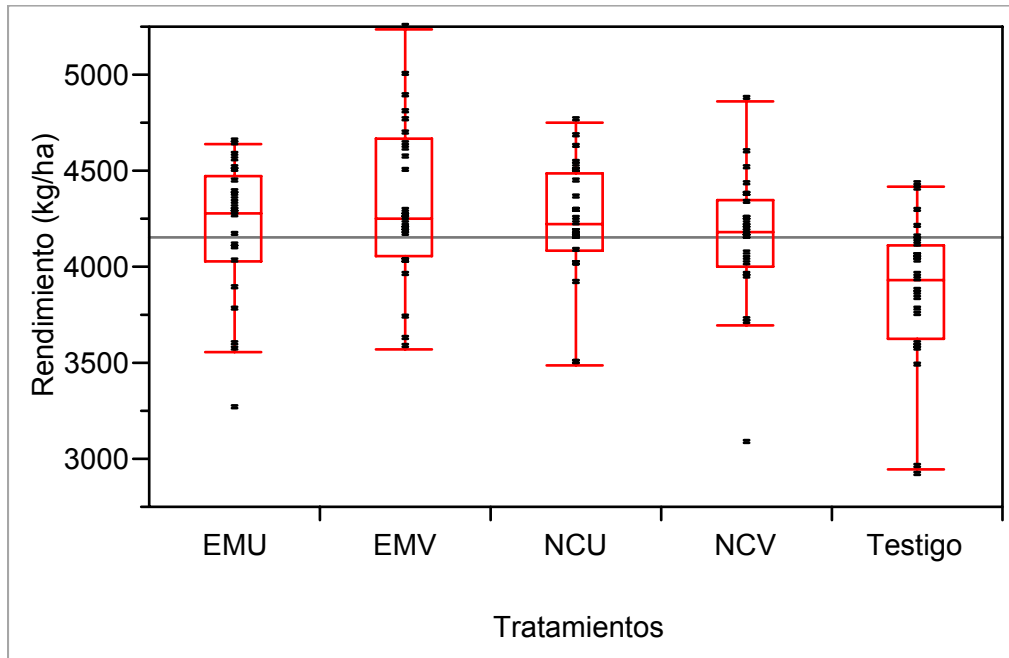


Figura 19: Rendimiento obtenido según criterio y sistema de fertilización.

Los tratamientos variables presentaron menor coeficiente de variación que los uniformes (11,8% y 12,4% respectivamente) al igual que en los experimentos anteriores. Respecto a los criterios, el coeficiente de variación del NC fue menor al criterio EM (11,7% y 12,4% respectivamente).

El tratamiento NC-V fue el que mostró la menor variabilidad, mientras que el tratamiento EM-V fue el que presentó la mayor variabilidad (figura 20). Todas las medias de los tratamientos fertilizados fueron mayores a la del testigo (cuadro 20).



EMU: elevar y mantener uniforme; EMV: elevar y mantener variable; NCU: nivel crítico uniforme; NCV: nivel crítico variable.

Figura 20: Box-plot para el rendimiento, según tratamiento.

Cuadro 20: Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento según tratamiento.

Tratamiento	10 %	Mediana	90 %	Media
EM-U	3573	4287	4603	4198
EM-V	3675	4260	4937	4347
NC-U	3698	4227	4646	4236
NC-V	3705	4183	4545	4151
Testigo	3214	3940	4338	3869

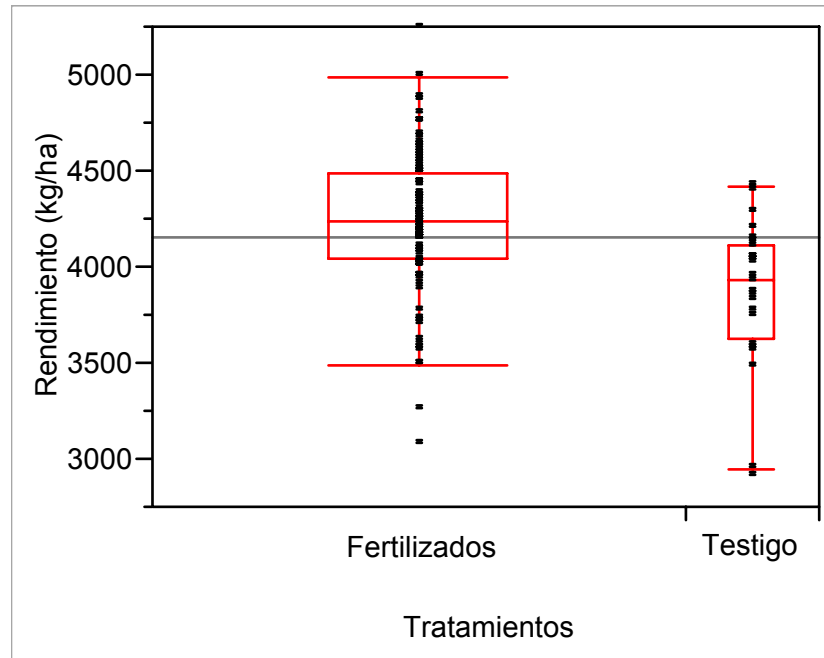


Figura 21: Box-plot para el rendimiento de tratamientos fertilizados y testigo.

Cuadro 21: Cuantil 10%, mediana, 90% y media de rendimiento de los tratamientos fertilizados y del testigo.

Tratamiento	10%	Mediana	90%	Media
Testigo	6156	3940	7496	3869
Fertilizados	6613	4243	7748	4233

La diferencias entre los tratamientos fertilizados y el testigo (364 kg/ha) fue similar a la observada en el Sg-RC (340 kg/ha) en valor absoluto, pero casi el doble expresada como porcentaje (cuadro 21). Una de las causas es el efecto de la rotación. En este potrero se practica la agricultura continua, mientras que en el Sg-RC se rotan cultivos y pasturas. En los sistemas mixtos, la entrada de N vía fijación simbiótica por las leguminosas es relevante, representando una fuente de suministro de N de magnitud para los cultivos posteriores (Sawchik, 2001).

Experimentos realizados anteriormente en esta estación experimental, encontraron que las rotaciones donde se incluían pasturas perennes tenían mayor contenido de carbono orgánico que las rotaciones de agricultura continua (Pravia, 2009). En 2005-2006 los promedios de carbono fueron 14,2 vs. 15,9 y 17,8 g.kg⁻¹ para agricultura continua, rotaciones con 2 años de pasturas y rotaciones con 4 años de pasturas respectivamente (Pravia, 2009).

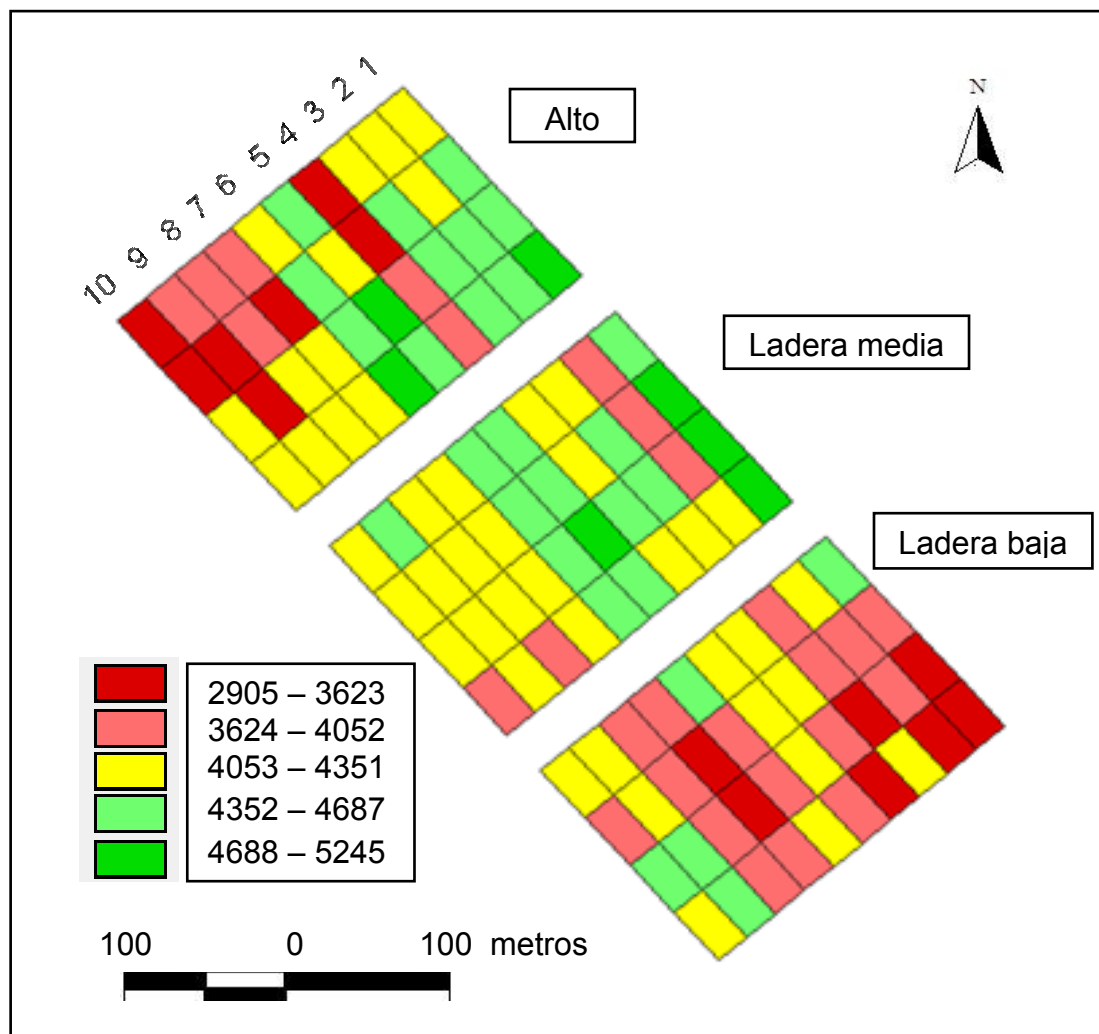


Figura 22: Mapa de rendimiento mostrando los promedios según celdas.

Se determinó interacción bloque y repetición (figura 23). La interacción se observa en el mapa de rendimiento ya que los tratamientos de la repetición 1 fueron mejores en el bloque 1 y 2. A la inversa se manifestó en el bloque 3, donde la presencia de blanqueales afectó el rendimiento de los tratamientos que se encontraban en la repetición 1. Estos resultados muestran que efectos de la posición topografía, y edáficos, tuvieron efecto en el rendimiento.

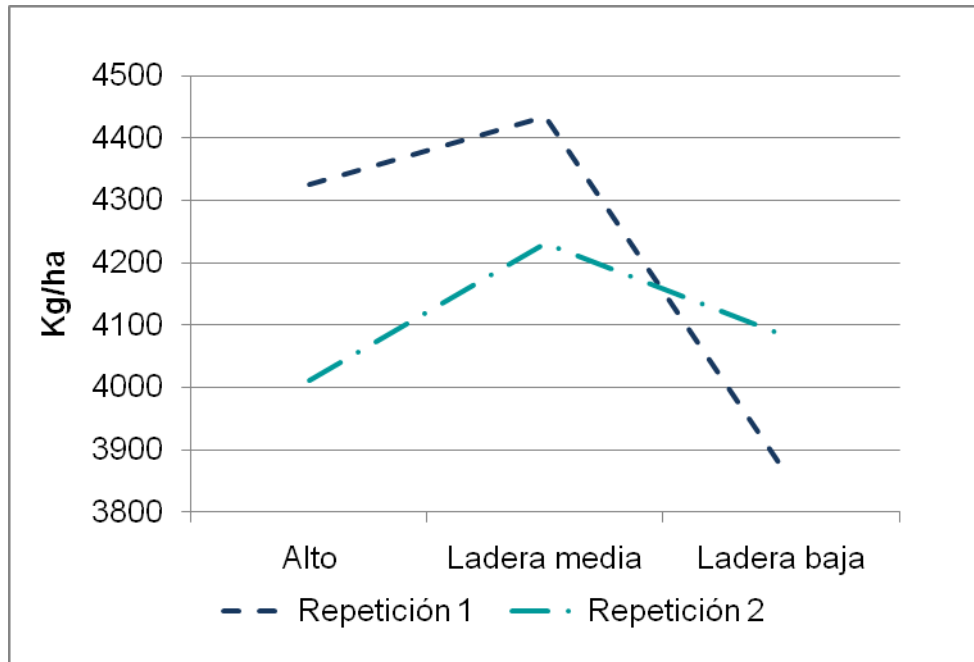


Figura 23: Rendimiento según bloque y repetición.

En las celdas 1 y 2 de las fajas 7, 8, 9 y 10 del bloque 1, el rendimiento fue afectado porque durante el ciclo de cultivo la zona permaneció anegada. Sin embargo, al tener repeticiones de los tratamientos, el efecto de los mismos podría analizarse en las fajas 1 a 5 las cuales no tuvieron problemas de exceso hídrico. En esa zona, el testigo tuvo un rendimiento significativamente más bajo que los tratamientos fertilizados (579 kg/ha). El mismo fue uniforme y bajo a lo largo de la faja (faja 4) (figura 22).

En la ladera media, los tratamientos fertilizados fueron significativamente superiores al testigo (fajas 2 y 9) en 247 kg/ha (figura 22).

Con respecto al bloque 3, el mismo presenta blanqueales en las celdas 3 y 4 desde la faja 1 a 4. Por esta razón, el rendimiento del cultivo se vio afectado y no permitió analizar el efecto de los tratamientos. Experimentos realizados en el mismo potrero para años anteriores, detectaron zonas de altos valores de conductividad eléctrica del suelo (Pravia, 2009). Existe una relación entre los valores de EC y la salinidad del suelo (Corwin y Lesch, citados por Pravia, 2009), lo que confirma la existencia de blanqueales en las zonas antes mencionadas.

4.2.4.7 Análisis químico de granos

El N fue el único nutriente que mostró alguna variación significativa (cuadro 22). Hubo efecto bloque, siendo el 3 superior al 2, pero el 1 no fue distinto de ninguno. A su vez, la comparación entre grupos mostró una superioridad de los del testigo por sobre los fertilizados de 0,08%.

Cuadro 22: Contenido de N, P, K y S en grano, expresado como %.

Nutriente	Contenido en grano (%)
N	1,01
P	0,30
K	0,42
S	0,11

4.2.5 Resumen de resultados para la variable rendimiento

Los tratamientos fertilizados rindieron más que los testigos salvo en la Sj-RC.

Con respecto a los criterios se encontraron diferencias inconsistentes. Los objetivos de los dos criterios es llegar al máximo rendimiento por medio de diferentes formas de manejo de los nutrientes del suelo (Dahnke y Olson 1990, Leikman et al. 2003). Por lo tanto, las diferencias encontradas podrían atribuirse a factores ambientales y/o topográficos.

El sistema de fertilización variable presentó menor coeficiente de variación en todas las ocasiones. Estos resultados, como ya fue mencionado, concuerdan con la bibliografía citada (Bermúdez y Mallarino, 2007).

Cuadro 23: Comparación de rendimientos y CV entre grupos de tratamientos, según potrero.

	Criterios		Sistemas		Fertilizado vs testigo
	Media	CV	Media	CV	Media
Sg-RC	NC > EM	=	V > U	U > V	F > T
Sj-RC	EM > NC	=	=	U > V	=
Sg-CC	Interacción criterio*sistema	EM > NC	Interacción criterio*sistema	U > V	F > T

EM: elevar y mantener; NC: nivel crítico; U: uniforme; V: variable; F: fertilizados; T: testigos

4.2.6 Variogramas para la variable rendimiento

Para los 3 potreros se confeccionaron los variogramas para la variable rendimiento. En los 3 casos se vio que los modelos ajustados no lograron una asíntota (un límite superior). Esto indica que la magnitud de la variación espacial no ha sido abarcada en esta escala de muestreo, al menos para los potreros Sg-RC y Sg-CC (figuras 24 y 26). Para el caso del potrero Sj-RC el variograma (figura 25) indica la ausencia de correlación espacial para la variable rendimiento.

Por otra parte para todos los potreros se encontró un valor de C_0 elevado, lo que indica que la varianza debida a la variabilidad de muestreos a menores distancias que los muestreos más cercanos, y la variabilidad debida a errores analíticos y de muestreo es elevada y explica gran parte de la variabilidad total.

Para el caso del potrero Sg-CC se encontró que los variogramas construidos en diferentes direcciones, sugieren que podría existir estructura espacial. Esto no ocurrió en el resto de los potreros. Estos resultados se explican principalmente por las dimensiones del potrero de Sg-CC, que era el doble de ancho que los otros 2, y no por la existencia de estructura espacial de la variable medida. Para los potreros Sg-RC y Sj-RC, se determinó que los variogramas que mejor se ajustaron fueron anisotrópicos, dependientes sólo de la distancia y no de la dirección.

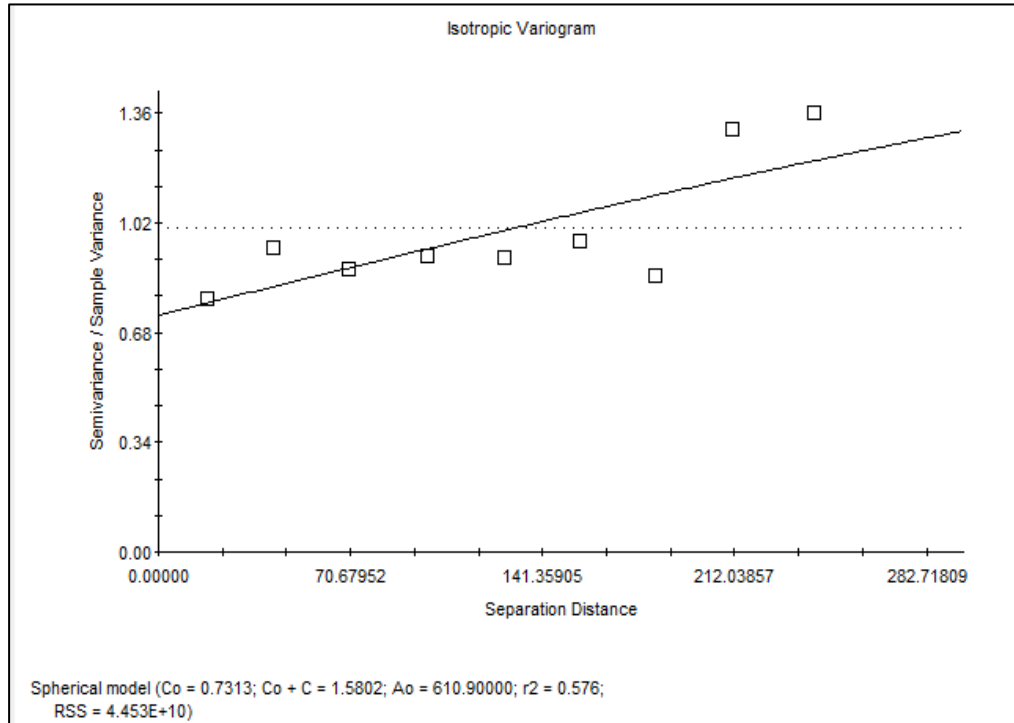


Figura 24: Variograma de rendimiento del Sg-RC

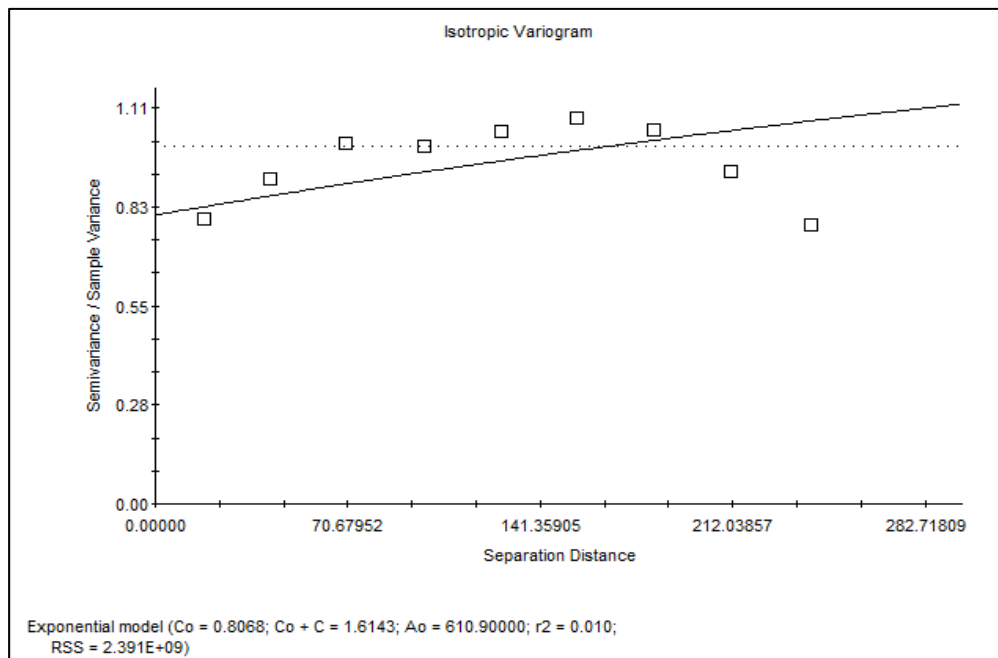


Figura 25: Variograma de rendimiento de la Sj-RC

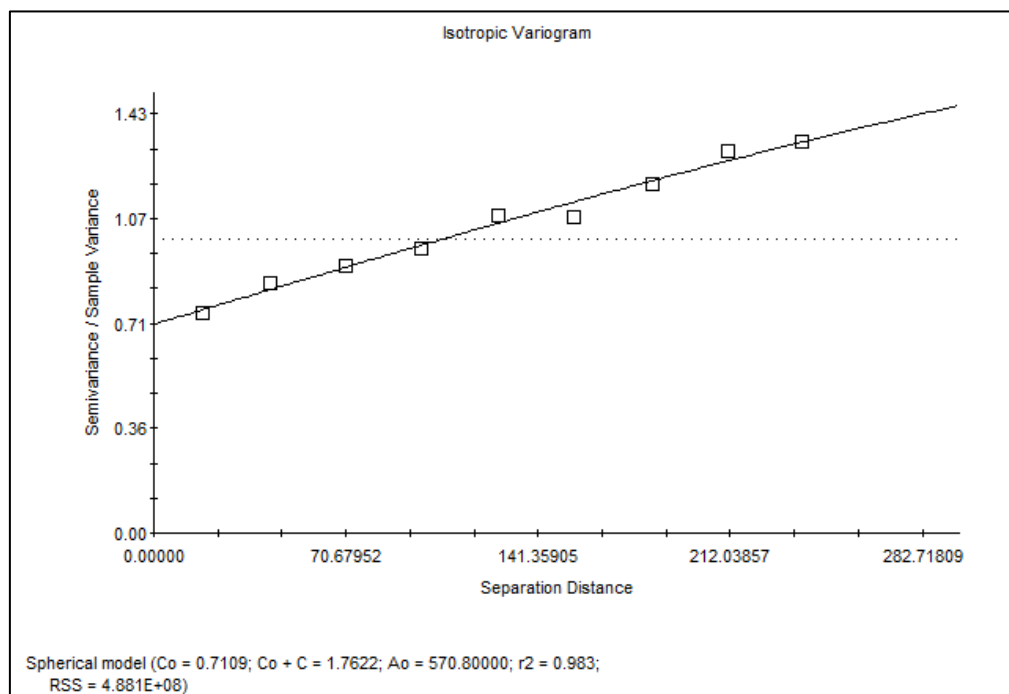


Figura 26: Variograma de rendimiento del Sg-CC

5. CONCLUSIONES

Debido a que la concentración de nutrientes en suelo se encontraba por debajo del nivel óptimo fijado según el criterio elevar y mantener (EM), en todos los casos, este criterio determinó mayores aplicaciones que el criterio de niveles críticos (NC). Comparando los sistemas, dentro del criterio EM, el sistema variable determinó mayores aplicaciones de P en el Sg-RC, donde el nivel promedio del suelo era elevado, pero con marcadas diferencias entre bloques. Cuando los niveles fueron elevados y similares entre bloques (Sg-CC), los 2 sistemas determinaron aplicaciones similares porque se realizaron en función del cultivo previo. Con niveles de P en suelo medios, pero estratificados según los bloques (Sj-RC) ambos sistemas determinaron aplicaciones similares. Según el nivel crítico, sólo fue aplicado fertilizante fosfórico por el sistema variable en el potrero Sj-RC, que identificó una zona con P por debajo del nivel crítico, para la cual el sistema uniforme no determinó fertilización alguna.

Con respecto al fertilizante potásico no se observaron diferencias ya que los niveles iniciales fueron bajos y similares para los 3 ensayos. Además dentro de cada potrero, los niveles de K intercambiable entre bloques, también fueron similares.

Al igual que se preveía en la hipótesis del trabajo no se encontraron diferencias consistentes entre los criterios ni sistemas de fertilización en ninguna de las variables medidas. Esto es lógico si se tiene en cuenta que los niveles críticos, al igual que el criterio elevar y mantener, se establecen para lograr rendimientos máximos. Las diferencias entre criterios de fertilización se observarían a mediano y largo plazo.

El sistema de fertilización variable fue superior o igual al sistema uniforme en rendimiento, cuando no hubo interacción criterio*sistema, y presentó menor CV. Estos resultados confirman los antecedentes citados que planteaban ventajas a favor del manejo sitio-específico, principalmente en la disminución de la variabilidad de los rendimientos.

En cuanto a los criterios de fertilización, las diferencias no fueron consistentes ya que en un caso el NC fue mayor a EM (Sg-RC), en otro caso fue a la inversa (Sj-RC) y en el último caso existió interacción criterio*sistema (Sg-CC). Las ventajas derivadas de la utilización del criterio elevar y mantener requieren varios años de implementación para ser notorias. Los ensayos que dieron lugar a este trabajo, constituyeron el primer año de aplicación de esta filosofía de fertilización en Palo a Pique. La falta de una respuesta clara a los

criterios de fertilización confirma la hipótesis del trabajo que planteaba no esperar un alto impacto productivo debido a los diferentes criterios o sistemas.

Como era previsible se encontraron diferencias en el rendimiento a favor de los tratamientos fertilizados con respecto a los testigos sin fertilizar.

La variabilidad espacial de las propiedades del suelo como la topografía, la conductividad eléctrica y la capacidad de almacenaje de agua pudieron afectar los resultados de los tratamientos. Además de los factores mencionados existieron condiciones ambientales (exceso hídrico y enmalezamiento) que también incidieron en los tratamientos.

6. RESUMEN

Este trabajo tuvo por objetivo evaluar 2 criterios y 2 sistemas de fertilización en los cultivo de soja y sorgo. Los criterios evaluados fueron: nivel crítico de nutrientes en suelo (NC) y elevar y mantener la fertilidad del mismo (EM). Por su parte los sistemas fueron: fertilización uniforme en toda la chacra o variable a lo largo de la misma, en función de la posición topográfica (bloques). Los ensayos se llevaron a cabo en la Unidad Experimental del INIA Treinta y Tres “Palo a Pique” durante la zafra 2009-2010. Los mismos fueron conducidos en 3 potreros distintos; en uno de ellos, donde se practican cultivos anuales de manera continua (CC) se evaluó un cultivo de sorgo (Sg-CC), en los otros 2 potreros se rotan cultivos y pasturas; 2 años como CC y 2 años con pastura (RC). En estos potreros se implantó un ensayo de soja (Sj-RC) y uno con sorgo (Sg-RC). El diseño experimental fue en bloques completos al azar, con 3 repeticiones para el Sg-RC y Sj-RC. El factor de bloqueo fue la posición topográfica (alto, ladera media y ladera baja). En el caso del potrero de Sg-CC, se realizaron también 3 bloques, pero se incluyeron en cada bloque 2 repeticiones por tratamiento. Se evaluaron 5 tratamientos, resultado de la combinación de los criterios y sistemas, más un testigo sin fertilizar. Las unidades experimentales fueron fajas en el terreno, ocupando cada tratamiento aproximadamente 100 m de largo x 10 m de ancho. Las variables evaluadas fueron implantación, altura de planta, actividad clorofiliana (SPAD) y estado fenológico cada 15 días aproximadamente, contenido gravimétrico de agua en el suelo, materia seca del cultivo en diferentes momentos, muestreo del rendimiento, rendimiento “on the go” medido con monitor de rendimiento, rendimiento según balanza y análisis químico de los granos. El criterio EM determinó mayores aplicaciones de P y de K que el NC. Asimismo el sistema variable determinó mayor aplicación de P (suelos con niveles iniciales medios a altos) que el sistema U. Para el K, prácticamente no hubo diferencias en el fertilizante aplicado entre sistemas porque los niveles iniciales fueron bajos y similares entre bloques. No se encontraron diferencias consistentes entre los criterios de fertilización en ninguna de las variables medidas, las diferencias entre los mismos se observarían a mediano y largo plazo. El sistema de fertilización variable fue igual o superior al sistema uniforme en rendimiento (cuando no hubo interacción entre criterios y sistemas de fertilización) y presentó menores coeficientes de variación.

Palabras clave: Soja; Sorgo; Criterio de fertilización; Sistema de fertilización; Fertilización variable.

7. SUMMARY

This study was aimed to compare 2 criteria and 2 systems of fertilization on soybean and sorghum crops. The criteria were: critical level of nutrients in soil (NC) and build up and maintain soil fertility (EM); whereas the systems were: uniform fertilization within the field or variable fertilization along it, varying depending on the topographic position. Experiments were conducted at the Experimental Unit of INIA Treinta y Tres "Palo a Pique" during the harvest 2009-2010 in three different paddocks. In one of them, continuous annual cropping is practiced (CC), in the others 2 paddocks rotations with pastures are practiced. They include 2 years like CC, and 2 years with pastures (RC). In these paddocks a soybean crop was assessed (Sj-RC) and a sorghum one (Sg-RC). The experimental design was a randomized complete block with 3 replications in the Sg-RC and Sj-RC. The blocking factor was the topographic position (high, medium slope and low slope). In the Sg-CC, there were also 3 blocks, but were included 2 replicates per treatment in each block. 5 treatments were evaluated, resulting from the combination of the criteria and systems, plus a control without fertilization. The experimental units were strips in the field, measuring 100 m long x 10 m wide approximately. The assessed variables were: implantation, plant height, chlorophyll activity (SPAD), and phenological status every 15 days approximately, gravimetric soil water content, crop dry matter at different times, sampled yield, yield on the go (measured with yield monitor), real weighted yield, and chemical analysis of the grain. The criteria EM determined more P and K being applied than the NC criteria. The variable system determined more application of phosphorus fertilizer (soils with initial medium to high P level) than the uniform system. Considering K, practically, there were no differences between systems in the potash fertilizer applied because initial levels were low and homogeneous between blocks. There were no consistent differences between the criteria of fertilization in any of the variables; the differences between them might be observed in the medium or long term. The variable system was equal or superior than the uniform in yield achieved (when there were no interaction between criteria and system of fertilization) and also showed lower coefficient of variation. riable fertilization system was always equal or superior than the one with the uniform system.

Keywords: Soybean; Sorghum; Fertilization criteria; Fertilization system; Variable fertilization.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. ANDERSON, L.L.; BULLOCK, D.G. 1998. Variable rate fertilizer application for corn and soybean. *Journal of Plant Nutrition*. 21 (7): 1355-1361.
2. BALZARINI, M.G.; GONZÁLEZ, L.; TABLADA, M.; CASANOVES, F.; DI RIENZO, J.A.; ROBLEDO, C.W. 2008. Infostat software estadístico; manual de usuario. Brujas, Córdoba, Argentina, s.e. 336 p.
3. BERMÚDEZ, M.; MALLARINO, A.P. 2007. Impacts of variable-rate phosphorus fertilization based on dense grid soil sampling on soil-test phosphorus and grain yield of corn and soybean. *Agronomy Journal*. 99 (3): 822-832.
4. BEST, S.; LEÓN, L. 2006. Análisis de datos. In: Bongiovanni, R.; Chartuni, E.; Best, S.; Roel, A. eds. *Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 145-170.
5. BORGELT, S.C.; WIEDA, R.E.; SUDDUTH, K.A. 1997. Geostatistical analysis of soil chemical properties from nested grids. *Applied Engineering in Agriculture*. 13 (4): 477-483.
6. CAMBARDELLA, C.A.; KARLEN, D.L. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture Journal*. 1 (1): 5-14.
7. CASANOVA, O. 1996. Potasio; consideraciones sobre su situación en el Uruguay. In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. *Manejo y fertilidad de suelos*. Montevideo, INIA. pp. 57-61 (Serie Técnica no. 76).
8. DAHNKE, W.C.; OLSON, R.A. 1990. Soil test correlation, calibration, and recommendation. In: Westerman, R.L. ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison, WI, SSSA. pp. 45-71.
9. ERNST, O.; SIRI, G. 2004. Fertilización. In: Siri, G. *Sorgo*. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 51-59.

10. GARCÍA LAMOTHE, A.; MORÓN, A.; QUINCKE, A. 2009. Requerimientos de fertilización en soja. In: Jornada de Cultivos de Verano (2009, Colonia). Memorias. Colonia, INIA. pp. 9-12 (Actividades de Difusión no. 583).
11. HERNÁNDEZ, J. 2004. Métodos para estimar la disponibilidad de fósforo en los suelos. In: Seminario de Actualización Técnica; Fertilización Fosfatada de Pasturas en la Región Este (2004, Treinta y Tres). Memorias. Treinta y Tres, INIA. pp. 11-19 (Actividades de Difusión no. 356).
12. INTARAPAPONG, W.; HITE, D.; HUDSON, D. 2003. Economic and environmental impacts; of variable rate fertilizer application in Mississippi. Mississippi State University. Bulletin no. 1129. 17 p.
13. KRAVCHENKO, A.N. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. Soil Science Society of America Journal. 67: 1564-1571.
14. LEIKMAN, D.F.; LAMOND, R.E.; MENGEL, D.B. 2003. Providing flexibility in phosphorus and potassium fertilizer recommendations. Better Crops. 87 (3): 6-10.
15. MALLARINO, A.P.; WITTRY, D.J.; DOUSA, D.; HINZ, P.N. 1998. Variable-rate phosphorus fertilization; on-farm research methods and evaluation for corn and soybean. In: International conference of precision agriculture (4th., 1998, St Paul, MN). Proceedings. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 687-696.
16. _____.; _____. 2004. Comparison of uniform and variable rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. Agronomy Journal. 96 (1): 26-33.
17. _____.; _____. 2006. Variable-rate application for phosphorus and potassium; impacts on yield and nutrient management. In: Integrated Crop Management Conference (18th., 2006, Ames, Iowa). Proceedings. Ames, Iowa, s.e. pp. 219-224.

18. MORÓN, A. 1996. El fósforo en los sistemas productivos: dinámica y disponibilidad en el suelo (I). In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, INIA. pp. 37-44 (Serie Técnica no. 76).
19. _____. 2004. Relevamiento del estado nutricional y fertilidad del suelo en cultivos de trébol blanco en la zona este del Uruguay. In: Seminario de Actualización Técnica: Fertilización Fosfatada de Pasturas en la Región Este (2004, Treinta y Tres). Memorias. Treinta y Tres, INIA. pp. 20-34 (Actividades de Difusión no. 356).
20. MULLA, D.J.; MCBRATNEY, A.B. 2002. Soil spatial variability. In: Warrick, A.W. ed. Soil physics companion. Boca Ratón, Florida, United States, CRC. pp. 343-373.
21. PERDOMO, C.; CARDELLINO, G. 2006. Respuesta de maíz a fertilizaciones definidas con diferentes criterios de recomendación. *Agrociencia*. 10 (1): 63-79
22. PIERCE, F.J.; NOWAK, P. 1999. Aspects of precision agriculture. In: Sparks, D.L. ed. Advances in agronomy. Newark, Delaware, Academic Press. pp. 1-85.
23. PLANT, R.E.; PETTYGROVE, G.S.; REINERT, W.R. 2000. Precision agriculture can increase profits and limit environmental impacts. *California Agriculture*. 54 (4): 66-71.
24. _____. 2001. Site-specific management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 30: 9-29.
25. PRAVIA, M.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 DSSAT v4

CERES-Rice. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.

26. QUINCKE, A; GARCÍA LAMOTHE, A; MORÓN, A. 2008. Manejo de la fertilización en cultivos de verano. In: Jornada de Cultivos de Verano (2008, Young, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1-3 (Actividades de Difusión no. 550).
27. ROEL, A.; TERRA, J. 2006. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Chartuni, E.; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 65-80.
28. SAWCHIK, J. 2001. Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo – pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. In: Díaz Rosello, R. ed. Siembra directa en el Cono Sur. Montevideo, Uruguay, PROCISUR. pp. 323-345.
29. SAWYER, J.E. 1994. Concepts of variable rate technology with considerations of fertilizer application. *Journal of Production Agriculture*. 7 (2): 195-201.
30. TERRA, J.A; GARCÍA PRÉCHAC; F. 2001. Efecto de la intensidad de uso y laboreo sobre el recurso suelo y su calidad; aporte y dinámica de nutrientes. In: Terra, J.A; García Préchac, F. eds. Siembra directa y rotaciones forrajeras en lomadas del este; síntesis 1995 – 2000. Montevideo, INIA. pp. 17-28 (Serie Técnica no. 125).
31. VANDERLIP, R.L. 1993. How a sorghum plant develops. Kansas State University. Contribution no. 1203. 19 p.
32. WITTRY, D.J.; MALLARINO, A.P. 2004. Comparison of uniform -and variable- rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *Agronomy Journal*. 96 (1): 26-33.
33. WOLLENHAUPT, N.C.; MULLA, D.J.; GOTWAY CRAWFORD, C.A. 1997. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial

variability of soil properties. In: Pierce, F.J.; Sadler, E.J. eds. The state of site-specific management for agriculture. Madison, WI, ASA/CSSA/SSSA. pp. 19-53.

34. YANG, C.; EVERITT, J.H.; BRADFORD, J.M. 2001. Comparisons of uniform and variable rate nitrogen and phosphorus applications for grain sorghum. American Society of Agricultural Engineers. 44 (2): 201-209.