

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RESPUESTA A LA FERTILIZACIÓN CON FÓSFORO, POTASIO Y AZUFRE EN
TRIGO EN AMBIENTES CON DIFERENTE POTENCIAL DE PRODUCCIÓN
DENTRO DE UNA MISMA CHACRA

por

Javier COITIÑO LÓPEZ
Pedro MAZZONI BENTOS

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2011

Tesis aprobada por:

Director:

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. Dra. Mónica Cadenazzi

Ing. Agr. PhD. Guillermo Siri Prieto

Fecha:

25 de julio de 2011

Autores:

Javier Coitiño López

Pedro Mazzoni Bentos

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, hermanos, abuelos y amigos, por su apoyo constante durante el transcurso de la carrera, de la cual son partícipes muy importantes.

Al Ing. Agr. Oswaldo Ernst, nuestro tutor, por la dedicación a este trabajo.

A la Ing. Agr. Mónica Cadenazzi, quien contribuyó en el análisis de los datos.

A Fran, por el apoyo y motivación permanente.

A Edith y Darío por la colaboración en las tareas de campo y laboratorio.

Al Ing. Agr. Gonzalo Pereira y a Federico Pasó, los responsables de la chacra donde realizamos el ensayo, quienes estuvieron siempre dispuestos a colaborar.

A la Lic. Sully Toledo, por sus aportes en la corrección de los aspectos formales del trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGREDECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1 ZONAS DE MANEJO	2
2.2 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD	3
2.2.1 <u>Mapas de rendimiento</u>	5
2.3 VARIABILIDAD DE RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS Y SUS CAUSAS.....	6
2.4 RESPUESTA AL AGREGADO DE NUTRIENTES	8
2.4.1 <u>Potasio</u>	8
2.4.2 <u>Fósforo</u>	10
2.4.3 <u>Azufre</u>	11
2.4.4 <u>Interacción entre nutrientes</u>	12
2.5 ANÁLISIS DE DATOS ESPACIALES.....	14
2.5.1 <u>Etapas de un estudio geoestadístico</u>	16
2.5.1 Análisis exploratorio	16
2.5.2 Análisis estructural.....	16
2.5.3 Predicciones	17
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	19
3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO	19
3.1.1 <u>Descripción del sitio experimental</u>	19
3.1.2 <u>Ambientes de producción</u>	20
3.1.3 <u>Diseño experimental y tratamientos</u>	20
3.1.4 <u>Manejo del cultivo</u>	21
3.2 DETERMINACIONES	22
3.2.1 <u>Datos climáticos</u>	22
3.2.2 <u>Presiembra</u>	22
3.2.2.1 Análisis de nutrientes.....	22
3.2.3 <u>En cultivo</u>	22
3.2.3.1 Estadio fenológico	23

3.2.3.2 Producción de biomasa	23
3.2.3.3 Absorción de nitrógeno.....	23
3.2.3.4 Componentes del rendimiento	23
3.2.3.5 Mapa de rendimiento	24
3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	24
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	26
4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	26
4.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	27
4.3 AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMAS	28
4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO CLÁSICO DE DATOS OBTENIDOS POR MUESTREO.....	29
4.4.1 <u>Producción de biomasa y absorción de nitrógeno</u>	29
4.4.2 <u>Rendimiento y componentes del rendimiento</u>	30
4.4.3 <u>Análisis de árboles de clasificación y regresión</u>	32
4.4.4 <u>Análisis de correlaciones</u>	34
4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO CLÁSICO DE DATOS OBTENIDOS POR MONITOR DE RENDIMIENTO	34
4.5.1 <u>Rendimiento según tratamiento y ambiente</u>	34
4.5.2 <u>Análisis de conglomerados</u>	37
4.5.3 <u>Interacción tratamiento por ambiente</u>	42
4.5.4 <u>Análisis de árboles de clasificación y regresión</u>	43
4.6 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL DISEÑO Y METODOLOGÍA UTILIZADA.....	45
5. <u>CONCLUSIONES</u>	47
6. <u>RESUMEN</u>	48
7. <u>SUMMARY</u>	49
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	50
9. <u>ANEXOS</u>	59

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Descripción de los grupos de suelos CONEAT.....	19
2. Descripción de los tratamientos.....	20
3. Resumen de manejo agronómico	22
4. Análisis de suelo.....	22
5. Indicadores de localización y dispersión para las variables medidas.	28
6. Producción de MS, contenido y absorción de N según tratamiento.	29
7. Rendimiento, índice de cosecha y componentes del rendimiento.	30
8. Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas	34
9. Rendimiento en grano según tratamiento.....	36
10. Rendimiento en grano según ambiente de producción.	36
11. Tabla de contingencia para conglomerados (2) y ambiente.	38
12. Tabla de contingencia para conglomerados de residuo de rendimiento (2) según ambiente... ..	39
13. Tabla de contingencia para ambientes y conglomerados (4).....	39
14. Tabla de contingencia para ambientes y conglomerados de residuos de rendimiento (4)	40
15. Tabla de contingencia para ambientes y tratamientos.....	41
16. Tabla de contingencia para conglomerados y tratamiento según ambiente.	41

17. Análisis de varianza para rendimiento y ambiente mediante cuatro procedimientos.	43
18. P-valores de 8 experimentos generados a partir de simulaciones de rendimiento utilizando un tamaño de parcela de 25 m por 50 m.....	45
Figura No.	
1. Ejemplos de semivariogramas y sus parámetros	17
2. Mapa de ambientes y croquis con la disposición de los tratamientos.....	21
3. Temperaturas medias mensuales del período mayo-diciembre para el año en estudio y serie histórica 1961-1990, en Estación Meteorológica Paso de los Toros.....	26
4. Precipitaciones mensuales del período mayo-diciembre para el año en estudio y serie histórica 1961-1990, en Estación Meteorológica Grecco y Paso de los Toros, respectivamente. Línea verde etapas fenológicas del cultivo.....	27
5. Árbol de clasificación y regresión para rendimiento según muestreo con las variables materia seca a cosecha (MS Cosecha), espigas/m ² , granos por espiga, peso de mil granos (PMG), índice de cosecha (IC).	33
6. Mapa de rendimiento según monitor de rendimiento	35
7. Rendimiento en grano en kg/ha según ambiente de producción.	36
8. Rendimiento en grano en kg/ha según conglomerado (2).....	37
9. Residuo de rendimiento según conglomerado (2)	38
10. Rendimiento en grano en kg/ha según conglomerado (4).....	39
11. Residuo de rendimiento según conglomerado (4)	40

12. Rendimiento (kg/ha) según ambiente para el tratamiento Testigo y todos los fertilizados	42
13. Árbol de clasificación y regresión para rendimiento según monitor con las variables elevación, tratamiento y ambiente.	44

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los suelos agrícolas presentan variación en sus propiedades químicas, físicas y biológicas, siendo una parte variabilidad natural y otra resultante de las prácticas agrícolas (Bocchi y Castrignanó, 2007), constituyendo una situación típica de Uruguay (Ahunchain y Klaassen, 1990). En consecuencia el rendimiento de los cultivos varía espacialmente, consistiendo el desafío actual el predecir la forma y magnitud en que lo hacen y sus causas.

Sistemas agrícolas modernos buscan maximizar el uso del suelo e insumos, en respuesta a las condiciones imperantes de elevadas entradas de energía a los mismos, bajo la forma de mecanización y agroquímicos (Verhagen y Bouma 1997, Siqueira et al. 2007).

Mediante el conocimiento de la forma en que varían los rendimientos y el modo en que se relacionan con características intra-chacra, sería posible modificar el actual manejo uniforme de los cultivos hacia uno que considere los requerimientos específicos de cada sitio del campo. Así se realizaría lo necesario, en el lugar y momento cierto, en la forma adecuada; lográndose mejorar los beneficios económicos y/o reducir el impacto en el ambiente (Plant, 2001).

En este marco el manejo de nutrientes toma un papel prioritario al ser los fertilizantes uno de los principales costos de producción agrícolas, y por los potenciales riesgos de contaminación asociados a ellos.

Una alternativa más sencilla al manejo sitio-específico es la distinción de zonas más amplias dentro de las chacras (Ambientes) con potenciales productivos relativamente homogéneos, para manejarlas según sus características y limitantes.

El presente estudio se planteó con el objetivo de cuantificar la respuesta del cultivo de trigo a combinaciones de fertilización con fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) en ambientes con distinto potencial de producción definidos previamente dentro de una chacra comercial.

Las hipótesis planteadas en este trabajo experimental fueron: A) Es posible zonificar una chacra según el potencial de producción en base a herramientas de agricultura sitio-específica y datos de varias zafas y cultivos. Y estas zonas se asemejan a las determinadas mediante análisis de datos del cultivo en estudio B) Existe interacción entre las zonas determinadas y el agregado de diferentes combinaciones de los nutrientes P, K y S.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Una alta variabilidad climática y de ambientes edáficos caracteriza a la agricultura de secano en el Uruguay, determinando considerables variaciones en rendimientos entre años y a su vez importantes diferencias en la respuesta vegetal intra e inter chacras (Del Campo 2007, Terra et al. 2010a).

Ahunchain y Klaassen (1990) mencionan a la heterogeneidad del potencial del suelo, responsable de promedios de rendimientos bajos y las diferencias en potencial de producción estarían dadas principalmente por tipos de suelo y topografía.

A pesar de ello es generalizado el manejo uniforme de los cultivos, generando ineficiencias económicas y ambientales (Terra et al., 2010a).

Plant (2001) considera a la agricultura de precisión en un sentido amplio como el uso de tecnologías de información en la agricultura. Siendo posible por el uso herramientas entre las que se encuentran monitores de rendimiento, sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG), nuevos programas informáticos y múltiples sensores equipados con GPS. La agricultura sitio-específica o agricultura de precisión incluye el uso de información sobre la variabilidad en las chacras con el fin de delimitar zonas y realizar prácticas agronómicas adecuadas a ellas (Plant 2001, Roel y Terra 2006b, Gregoret et al. 2008). Para ello es necesario cuantificar la variabilidad y determinar sus posibles causas.

Los ensayos dispuestos en fajas junto a uso de monitores de rendimiento y herramientas de análisis geoestadístico y multivariado son una buena alternativa para la evaluación de efectos de tratamientos en diferentes zonas del campo en ensayos conducidos a escala de chacra (Mallarino et al., 2000), pero ello será posible siempre que los efectos de la variación en propiedades de la chacra puedan ser removidos de los resultados.

2.1 ZONAS DE MANEJO

La consideración de la variabilidad dentro de las chacras que permite delimitar diferentes ambientes productivos es una de las metas actuales de los agricultores innovadores. Ello posibilita manejar cada zona según sus características, dejando de lado los promedios, tratando de maximizar la productividad y rentabilidad en algunos casos y en otros priorizar la sustentabilidad (Bragachini, 2007).

Por su parte Terra et al. (2010a) define las zonas de manejo como sub-áreas dentro de la chacra donde se deberían expresar combinaciones relativamente similares de factores determinantes del rendimiento donde es apropiado un manejo homogéneo del suelo y los cultivos. Al respecto Webb y Loomis, Connor, citados por Otaño y Zarucki

(2010) indican que los métodos de análisis de datos de rendimiento para determinar zonas, por lo general asumen que las mismas son limitadas por algún factor primario.

Según Miller et al., citados por Plant (2001), existen tres criterios básicos para la realización de un manejo sitio específico de una chacra: existencia de variabilidad en factores determinantes del rendimiento de los cultivos; que dicha variabilidad pueda ser identificada y cuantificada; y que esta información pueda ser usada para modificar el manejo con el fin de reducir el impacto ambiental y/o mejorar el rédito económico. Se deduce que las diferencias en rendimiento entre zonas deben ser significativas y en ellas habrían combinaciones homogéneas de factores que influyen en el rendimiento.

Terra et al. (2010a) plantean algunas interrogantes sobre la construcción de zonas de manejo: qué información es necesaria, cómo se utiliza y procesa dicha información, cuál es la cantidad óptima de zonas, y su estabilidad frente a condiciones ambientales contrastantes y secuencias de cultivos. Menciona que se utilizan mapas de rendimiento, así como atributos del terreno estables vinculados a la dinámica del agua en el campo. Concluyen que para delinear zonas de productividad contrastante se deberían considerar los factores que influyen en variaciones sistemáticas de los cultivos y que las mismas pueden contener variantes según las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de los suelos utilizado, debiendo ser ajustadas en el tiempo.

2.2 MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA VARIABILIDAD

Existen diversas metodologías destinadas a cuantificar la variación espacial en atributos del suelo y los cultivos. Senay et al., citados por Plant (2001) clasifican las formas de medir en: continuas (monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica), discretas (muestreos de suelos y plantas) y remotas (fotografías aéreas y satelitales).

En los métodos de muestreo continuos se obtienen valores de las variables observadas para todas las ubicaciones dentro del campo. Mientras tanto en los métodos de muestreo discretos se recogen muestras en algunos sitios, debiéndose inferir los valores de la variable en lugares no muestreados, utilizando métodos estadísticos que consideran la distribución espacial de los puntos referidos en su análisis (Plant, 2001).

Las fuentes de información destacadas para la construcción de zonas de manejo son: mapas de suelos detallados, mapas de propiedades de suelos en base a muestreos e interpolaciones geoestadísticas, imágenes remotas desde satélites o aviones, mapas de rendimiento y atributos edáficos y topográficos estables en el tiempo (elevación, pendiente, textura, conductividad eléctrica) (Terra et al., 2010a).

Los mapas detallados de suelos poseen desventajas para su uso en la delineación de zonas de manejo, al presentar escalas que no reflejan la variabilidad real a

nivel de chacra. En general las unidades de mapeo no son homogéneas, además existe variación que no es considerada en la clasificación de suelos, dado que se basa en características de los horizontes subsuperficiales. Asociado a lo anterior se debe tener en cuenta que ciertas prácticas agronómicas pueden afectar propiedades de los suelos en la superficie. Estas características limitan el uso exclusivo de estos mapas en la delineación de zonas de manejo (Roel y Terra, 2006b).

Es frecuente el uso de imágenes aéreas y satelitales así como índices calculados a partir de las mismas en la conformación de zonas de manejo. Mediante ellos se consideran las condiciones de crecimiento para el cultivo al permitir estimar la producción de materia seca (Roel y Terra, 2006b).

Mapas de propiedades de suelo cuentan con la principal desventaja de la alta inversión necesaria en tiempo y dinero para la obtención y análisis del alto número de muestras requerido. A pesar de ello se podría justificar en propiedades estables temporalmente y poco afectadas por manejo como textura, conductividad eléctrica y CIC, por ser útiles al delinear zonas de manejo. En general se usan en combinación con atributos del terreno estáticos en el tiempo como elevación, pendiente, área de cuenca entre otros. Es frecuente que estas características estén correlacionadas con otras como profundidad del horizonte A, contenido de carbono orgánico y fósforo, pH, textura, contenido de agua del suelo, entre otros (Roel y Terra, 2006b). La confección de mapas de propiedades discretas como lo son la mayoría de las consideradas para el suelo y muchas características de los cultivos, es posible mediante interpolaciones geoestadísticas que dan lugar a datos continuos de la variable, para lo cual es indispensable conocer el lugar preciso donde fueron recolectadas las muestras.

Una metodología aplicada en la delimitación de zonas con comportamiento productivo diferente es el análisis de conglomerados o clusters. Esta técnica estadística consiste en algoritmos que agrupan datos en grupos (clusters) de forma de minimizar la varianza dentro de ellos y maximizarla entre los mismos (Roel, 2006a).

Otra herramienta estadística interesante en esta área es la construcción de Árboles de Clasificación y Regresión (CART). Esta herramienta es utilizada con frecuencia al buscar describir las relaciones entre variables de respuesta (rendimiento) y variables explicativas (factores que influyen el rendimiento) (Plant, 2001). Esta diseñado para trabajar con datos de múltiples estructuras a escalas espaciales y temporales, lo que lo hace útil en agricultura de precisión donde con frecuencia aparecen en una chacra diversas variables explicando la variabilidad del rendimiento en diferentes zonas dentro de la misma. Consiste en un método no-paramétrico ya que no se basa en supuestos distribucionales de las variables estudiadas. Los resultados se presentan mediante una estructura de árbol de decisión en que se despliegan las relaciones entre las variables explicativas y las de respuesta. La información se puede usar para delimitar zonas de respuesta diferente cuando las variables consideradas presentan patrones de

distribución espacial (Roel, 2006a). Plant et al., citados por Plant (2001) en estudios en trigo utilizó con éxito la metodología CART en la construcción de zonas de manejo a partir de los factores que influyen en el rendimiento.

En general no existen reglas para delinear zonas, siendo la tendencia el uso de más de una fuente de información, dependiendo de la facilidad de acceso, recursos disponibles y las habilidades de los usuarios al momento de usar la información. “La creación de zonas de manejo requiere de una dosis importante de sentido común y de habilidades, entre las que se destacan la capacidad de combinar los conocimientos agronómicos, el conocimiento del establecimiento, de la historia de la chacra y por último, las capacidades y limitantes del parque de maquinaria” (Roel y Terra, 2006b).

2.2.1 Mapas de rendimiento

Son una expresión gráfica de una serie de datos de rendimiento georreferenciados, siendo el formato más usual el mapa en código de colores para intervalos de rendimiento (Pierce et al., citados por Plant, 2001).

Cada dato de rendimiento es representativo de un área correspondiente al ancho de la plataforma de la cosechadora y a la distancia recorrida por ésta en un tiempo dado (Bragachini et al., 2006).

En el manejo sitio específico el mapeo de rendimientos toma un papel fundamental, ya que estas prácticas están enfocadas en la influencia de la variabilidad en propiedades del campo sobre los rendimientos (Plant, 2001).

En evaluaciones a escala de chacra, como por ejemplo ensayos en fajas donde los distintos tratamientos se disponen en bandas paralelas a lo largo del campo, los monitores de rendimiento y los mapas correspondientes consisten en una herramienta práctica, rápida y precisa, que permite cosechar en forma georreferenciada todos los tratamientos y repeticiones en una sola operación (Bragachini et al., 2000).

Diversos autores consideran que para la delimitación de zonas de manejo los mapas de rendimiento son la mejor herramienta, ya que el rendimiento es el indicador de productividad del suelo por excelencia en las distintas zonas dentro de una chacra (Roel y Terra, 2006b). En estas situaciones se necesitan datos de varias zafas climáticamente contrastantes debido a el riesgo que efectos de años opuestos se neutralicen (Terra et al., 2010a).

A pesar de esta afirmación, la utilidad de definir zonas de manejo a partir de mapas de rendimiento es discutida. Massigoea et al. (2009) trabajando en una chacra de cebada encontraron que además del mapa de rendimiento fue posible confeccionar mapas de proteína en grano y extracción de nitrógeno, siendo considerados un insumo

básico para una posterior definición de zonas y realización de manejo sitio específico de nitrógeno. En tanto, Bocchi y Castrignanó (2007) discuten sobre el uso de series de mapas de rendimiento para la definición de zonas de aptitud productiva en chacras de maíz, indicando que los mismos consisten en una alternativa promisorio al ser combinados con técnicas de análisis geoestadístico y GIS, permitiendo posteriormente mejorar la eficiencia de uso de los insumos. Otro trabajo en que se evaluó la posibilidad de realizar manejo sitio específico de N en maíz en EEUU, basado en datos de nitrato a presiembr y mapas de rendimiento anteriores demostró que lo mismos fueron insuficientes para cumplir el objetivo planteado (Katsvairo et al., 2003).

Por su parte Gregoret et al. (2009) en ambientes semiáridos de la región Pampeana en maíz destacan que para su situación, en que se definen zonas de manejo según pendiente, se llegó a un modelo de respuesta al N único, por lo que no se justifica un manejo diferencial de éste nutriente. Siendo las diferencias en el aporte de N inicial a 60cm entre zonas de 5 a 13 kg N/ha según el sitio, donde el valor mínimo en un sitio fue 21 y el máximo en otro 88 kg N/ha. En el mismo trabajo se mencionan estudios de Rufo en Illinois donde tampoco se encuentran beneficios al realizar fertilización según zonas. Mientras tanto Bonfil et al. (2008) al realizar fertilización variable de N en trigo duro, basándose en mapas de remoción de N previos, lograron ventajas económicas respecto a la aplicación uniforme al incrementar tanto los rendimientos como la calidad.

Se usen o no los mapas de rendimiento en la formación de zonas de manejo, son útiles para verificar la eficiencia de las zonas delineadas para detectar diferencias en productividad (Fraise et al., citados por Roel y Terra, 2006b).

2.3 VARIABILIDAD DE RENDIMIENTO DE LOS CULTIVOS Y SUS CAUSAS

Diversos autores afirman que la variación temporal es frecuentemente superior a la espacial, lo cual estaría cuestionando la validez de zonas de manejo determinadas en un año y un cultivo específico (Whelan y McBratney, citados por Pravia 2009, Terra et al. 2010a).

Existen a nivel nacional algunos trabajos que buscan definir los factores causantes de variaciones en rendimiento, resaltando que los mismos están vinculados a características topográficas y físicas del suelo y en algunos casos a aspectos químicos (Ahunchain y Klaassen 1990, Del Campo 2007, Pravia 2009, Otaño y Zarucki 2010, Terra et al. 2010a, Terra et al. 2010b).

Son frecuentes las investigaciones tanto nacionales como extranjeras que encuentran a los atributos del suelo y el terreno vinculados a la dinámica y acumulación de agua en la chacra fuertemente relacionados a la productividad en cultivos de secano

(Kravchenko y Bullock 2000, Timlin et al., Bongiovanni, citados por Roel y Terra 2006b, Otaño y Zarucki 2010, Terra et al. 2010a).

Del Campo (2007) en una chacra de 11 hectáreas de maíz con rendimiento entre 3200 y 7300kg/ha (C.V.= 15%), encontró que la variación de éste fue principalmente explicada por variables intrínsecas permanentes, como lo son topografía y textura; siendo las propiedades químicas poco eficientes en explicar la variación de rendimiento en un año con precipitaciones algo por debajo del promedio histórico y déficit hídrico marcado en el período crítico del cultivo. En el mismo sentido Pravia (2009) determinó que atributos edáficos y conductividad eléctrica explicaron 77% de la variación en rendimientos de sorgo, en una secuencia soja-sorgo durante 3 años, siendo el primer factor explicativo la variación temporal. Además las propiedades químicas no mostraron correlación espacial significativa, no siendo posible determinar mapas de zonas homogéneas para P, K y N.

La variación temporal fue el primer factor determinante de rendimiento en soja, seguido de atributos del terreno y el suelo (Terra et al., 2010b). Entre 24% y 93% del rendimiento de cultivos (maíz, soja y trigo) fue explicado por atributos edáficos y topográficos, siendo la elevación y conductividad eléctrica los más frecuentemente correlacionados (Terra et al., 2010a). La división de la chacra en tres zonas redujo la varianza en propiedades del suelo y rendimiento, pero en forma variable según el año evaluado, por lo que a priori no permitiría establecer una propuesta de manejo diferencial.

Por su parte Ahunchain y Klaassen (1990) al analizar rendimientos en una chacra de trigo de 20ha y rendimiento promedio de 4662kg/ha (C.V.= 17%) concluyen que la principal causa de variación de los mismos fueron aspectos químicos (43,5%), como la concentración de $\text{NO}_3\text{-N}$ en 0-20cm del suelo a macollaje y de fósforo a la siembra. El componente del rendimiento que explicó los resultados fueron los granos por espiga.

En ensayos en fajas de fertilización, Otaño y Zarucki (2010) concluyeron que atributos edáficos y topográficos fueron fuentes de variación de rendimiento más importantes que los diferentes niveles de fertilidad introducidos. En este trabajo mediante análisis de clusters fue posible definir para las chacras analizadas zonas con requerimientos de manejo diferenciales, considerando las variables edáficas y topográficas más correlacionadas con el rendimiento de soja. Los autores analizando datos de rendimiento de soja, maíz y trigo, encuentran que las variables que explican el rendimiento varían con el cultivo, indicando que las zonas de manejo para los mismos serían diferentes. Puntualmente para trigo las variables topográficas fueron las más correlacionadas con rendimiento, mientras que en soja fueron las edáficas y en maíz ambas.

Respecto a la distribución en el campo de P y K, Kravchenko y Bullock (2000) no encontraron correlación de los mismos con elevación y pendiente en la mayoría de los casos evaluados. Mallarino (1996) reporta en estudios en maíz en el cinturón maicero de EEUU que son frecuentes patrones de variación cíclicos a diferentes escalas en contenidos de P y K del suelo, adjudicándolos a historias previas de fertilización tanto al voleo como en banda. Esta variabilidad no podría ser usada en la formación de zonas de manejo. Cambardella y Karlen (1999) analizando diversos sistemas productivos demuestran que la historia de chacra incide en los patrones de distribución espacial de parámetros de fertilidad de los suelos, lo cual indica que la misma debería ser considerada al implementar manejos sitio específicos.

2.4 RESPUESTA AL AGREGADO DE NUTRIENTES

La obtención de elevados rendimientos en trigo está asociada a las condiciones climáticas, edáficas y de manejo del cultivo y del suelo. Siendo muy importantes entre las últimas las referidas al manejo nutritivo (García, 2005).

El diagnóstico de las necesidades de fertilización del cultivo requiere del conocimiento de las curvas de respuestas del cultivo al agregado de nutrientes, así como de su relación con características asociadas al manejo, climáticas y edáficas. Destacándose textura, mineralogía, estructura, contenido de agua, concentración de nutrientes.

En este marco cobra importancia la evaluación de la disponibilidad de nutrientes mediante análisis de suelo.

2.4.1 Potasio

El potasio es un macronutriente esencial utilizado en grandes cantidades por las plantas para su normal crecimiento y desarrollo (Kant y Kafkafi, 2000). En cantidad absorbida es el segundo luego del nitrógeno. Si bien por lo general se encuentra en abundancia en los suelos, solo una pequeña parte es asimilable para las plantas (Casanova, 1996).

Se relaciona con el mantenimiento de la condición hídrica dentro de la planta. Elevados contenidos de K colaboran aumentando la tolerancia y/o resistencia de la planta frente a enfermedades y plagas (Hirzel, 2004).

Los requerimientos de K en trigo para producir una tonelada de grano son de 19kg, presentando un índice de cosecha de 0,17 (García, 2005).

La máxima absorción del nutriente se da entorno a antesis, concentrándose principalmente en los tallos. De este máximo el 26% se encuentra en la espiga al final

del ciclo del cultivo. Luego de floración hay liberación de K hacia el suelo (González et al. 2000, Kant y Kafkafi 2000).

La alta variabilidad de los suelos del Uruguay se refleja en su capacidad de aporte de potasio, así como también en la capacidad de mantenerlo en el tiempo y en la respuesta a la fertilización. La variabilidad resulta del tipo de material generador, que incide a través de el contenido y tipo de arcilla presente (Hernández et al., citados por Núñez, 2010).

Hernández (1988) en un relevamiento de trece suelos de Uruguay encontró valores de K intercambiable que variaron entre 0,13 meq/100g en Brunosol de Colonia Palma, 0,36 meq/100g en Vertisol de Itapebí-Tres Árboles y 1,50 meq/100g en Brunosol de Béquelo.

Trabajos realizados por Barbazán et al. (2007) en *Lotus corniculatus* L. encontraron bajas concentraciones de K en planta en suelos sobre Planicies y Lomadas del Este y sobre cuaternario asociado a Basalto.

Barbazán et al. (2010) estudiando ensayos de respuesta a potasio de diversos autores nacionales en trigo, cebada, girasol, maíz y soja, en un total de 50 sitios encontraron respuesta en 15 de ellos ($P < 0,10$), presentando éstos niveles de K intercambiable en el rango de 0,15 a 0,44 meq/100g. Concluyeron que la posibilidad de respuesta al agregado de potasio es dependiente no solo del nivel de K intercambiable en el suelo, sino también de la textura y mineralogía predominante de la fracción arcilla.

Cano et al. (2007) encontraron en maíz respuesta al agregado de KCL en Argisoles de Unidad Constitución, con niveles de K intercambiable de 0,10 a 0,20 meq/100g.

García (2010) menciona que en investigaciones recientes se han apreciado situaciones de respuesta en trigo con valores de K intercambiable de 0,32 a 0,44 meq/100g en texturas franco arenosas a arenosas.

Otro factor a tener en cuenta en la disponibilidad de potasio para los cultivos es la concentración relativa de calcio y magnesio en el complejo de intercambio catiónico, como señalan Tisdale et al., citados por Bautes et al. (2009). Este último obtuvo respuesta al agregado de K en cebada en un sitio con 0,37 meq/100g de K intercambiable y relaciones Mg/K y Ca/K de 7 y próximas a 55 respectivamente. Barbazán et al. (2007) encontraron que la concentración de Mg en planta en Lotus se redujo con incremento de la relación Ca/Mg.

Además la absorción de K tiene relación con la humedad del suelo, por su incidencia en la absorción del nutriente. Así como también influye la aireación al

afectar la disponibilidad de oxígeno a nivel radicular, y la temperatura del suelo que se relaciona en forma directa a la absorción (Tisdale et al., citados por Hernández, s.f.).

Situaciones de elevada respuesta al agregado de K son más probables en sistemas extractivos como lo son el maíz y alfalfa para silo y suelos arenosos con baja CIC formados sobre materiales generadores pobres en K (Casanova, 1996).

Actualmente se maneja un nivel crítico tentativo, propuesto por Barbazán et al. (2010), para diversos cultivos y tipos de suelo de 0,34 meq/100g, coincidiendo con valores llamados óptimos en recomendaciones actuales en el cinturón maicero de EEUU, donde el rango para dicha categoría va de 0,33 a 0,43 meq/100g (Sawyer et al., 2008).

En cuanto a los componentes del rendimiento implicados en la respuesta al agregado de K, Bautés et al. (2009) en cebada encontraron incrementos en el número de tallos en un caso, respecto a calidad el porcentaje de 1^{era} y 2^{da} tuvo incrementos significativos.

2.4.2 Fósforo

El fósforo, luego del nitrógeno, es el nutriente que más frecuentemente afecta la producción de cultivos. Forma parte de enzimas, ácidos nucleicos y proteínas, estando involucrado en prácticamente todos los procesos de transferencia de energía. El contenido total de P en el suelo se relaciona a características del material parental y el clima (García y Picote, 2004).

Havlin et al., citados por Vivas (2001) nombran numerosos beneficios nutricionales del P en trigo, entre otros favorece el crecimiento radicular inicial, mejora la resistencia al vuelco y adelanta la etapa de madurez.

Los requerimientos del cultivo son de 5kg de P/Mg grano, mientras que la extracción toma valores de 4kg de P/Mg grano, lo que arroja un Índice de Cosecha de 0,8 (Ciampitti y García, 2007).

El P es absorbido por las plantas desde la solución del suelo, siendo los requerimientos del ciclo del cultivo mucho mayores a la cantidad presente en ésta, por lo que debe existir una reposición desde la fase sólida (Morón, 1996).

Tempranamente en la etapa de crecimiento la absorción de nutrientes es escasa, pero se debe disponer de una concentración elevada alrededor de las raíces (Almada, 2006).

La eficiencia de utilización del fertilizante fosfatado se relaciona negativamente a la capacidad de retención de P de un suelo. Encontrándose asociada esta última al contenido de óxidos de hierro libres y arcilla (Morón, 1996).

Según Morón (1996), la amplia mayoría de los suelos del Uruguay son carentes en este nutriente en su estado natural.

El análisis de suelo es la herramienta diagnóstica más importante para evaluar la disponibilidad de fósforo para los cultivos, siendo Bray I el método de análisis más utilizado en nuestro país. Estudios realizados muestran que el nivel crítico para el cultivo de trigo es de 13-14 ppm para 0-20cm de profundidad (Bordoli, 2001). Trabajando en suelos de Entre Ríos, Barbagelata y Melchiori (2008) encontraron una muy buena asociación entre la respuesta de trigo y la disponibilidad de P en 0-20cm a través de Bray I, situándose los niveles críticos entre 9 y 11 ppm. En tanto las actuales recomendaciones en Iowa, sitúan los niveles óptimos entre 20 y 25 ppm (Sawyer et al., 2008).

Estudios realizados en Argentina por Capurro et al. (2008) muestran una disminución en el peso de mil semillas cuando no se agrega P. En cambio, respecto al número de espigas no se detectó una clara asociación. Mientras tanto Vivas et al. (2010) encontraron efectos significativos del agregado de fósforo sobre el número de espigas/m², mostrando una relación lineal, incrementándose 2,9 espigas/m² por cada unidad de P agregado ($r=0,69$).

La concentración del nutriente en la planta puede no asociarse directamente a la disponibilidad en suelo, por la existencia de otros factores que pueden influir como humedad en suelo, aireación, compactación y relación con otros nutrientes (Morón, 1996).

2.4.3 Azufre

El azufre es un nutriente esencial para las plantas, requerido en cantidades similares al fósforo. Su carencia se asocia a pérdidas en el rendimiento, calidad y reducción en la eficiencia de uso de otros nutrientes N, P y algunos micronutrientes (Torres y Rodríguez, 2009).

Se encuentra sujeto a la dinámica de la materia orgánica, siendo que 90% del mismo se encuentra bajo estas formas (Watkinson y Kear, citados por Alfaro et al., 2006). Las plantas toman S como SO₄²⁻, producto de la oxidación microbiana (Cordone, citado por Martínez y Cordone, 2000).

La demanda de azufre por las plantas varía a lo largo del tiempo en respuesta a las condiciones ambientales y la etapa de desarrollo (Gutschick y Pushnick, citados por Vong et al., 2007).

Tradicionalmente la fertilización ha considerado N y P, que sumado a la intensificación agrícola, ha repercutido en la aparición con mayor frecuencia de situaciones de deficiencia de azufre, tanto a nivel local como regional (Reussi et al. 2006, García 2010).

Diversos autores han reportado que la frecuencia de respuesta al agregado de S se incrementa en situaciones de prolongada historia agrícola, siembra directa, alta frecuencia de cultivos extractivos, suelos pobres en materia orgánica, erosionados, compactados con pobre estructura (Reussi 2006, Gutiérrez Boem, citado por Torres 2009, García 2010). Se señala que los niveles de sulfato en suelo en que aparece respuesta probable son inferiores al rango de 6 a 10 ppm (Reussi 2006, Tysko y Rodríguez 2006, García 2010).

García (2010) en un resumen de los trabajos realizados por INIA en trigo en los últimos 12 años reporta que las dosis óptimas de S variaron entre 10 y 40kg/ha, siendo los incrementos en rendimiento obtenidos entre 6 y 15%, y la eficiencia entre 8 y 24kg de grano/kg de S aplicado.

Entre tanto Vivas et al. (2010) en un estudio que incluye datos de 4 ejercicios de trigo, encontraron que la respuesta en rendimiento se estabiliza para agregados de S superiores a 12kg/ha. Los incrementos en rendimiento oscilaron entre 329 y 407kg/ha, mientras que la eficiencia para la dosis 12kg S/ha fue de 27kg grano/kg S agregado. El componente de rendimiento espigas/m² siguió igual comportamiento que el rendimiento.

García (2005) en un período de estudio de 4 años con 9 ensayos en el Sur de Córdoba y Santa Fe, encontró incrementos de 431kg/ha (15%) en promedio frente al agregado de S.

FAO, citado por Torres (2009), menciona que en situaciones de deficiencia de S, el agregado de 5 a 20kg de S como SO₄²⁻ tiene respuestas en rendimiento de entre 200-500kg ha⁻¹ de trigo.

2.4.4 Interacción entre nutrientes

La interacción entre nutrientes se da cuando la respuesta a uno de ellos está condicionada por la cantidad agregada de otro nutriente (Black, Colwell, citados por Álvarez, 2009). La interacción puede ser positiva o negativa, generalmente se busca que sea positiva. Cuando no existe este tipo de respuesta, la misma es de forma aditiva (Álvarez, 2009).

Los estudios en los cuales se buscan datos sobre interacción no son muy frecuentes, siendo la información derivada de los mismos inconsistente. Ya que tanto aparecen situaciones en las que se detecta interacción, como otras en las que la misma no es significativa.

Así por ejemplo Vivas et al. (2001) en un ensayo de larga duración, en trigo, encontraron interacción P*S, siendo la influencia positiva del S mas notable en la dosis mayor de P (40kg de P/ha), con valores de P Bray I de 11 ppm, en condiciones de primavera benigna, con floración y llenado muy húmedos. Mientras que Vivas et al. (2005), Vivas et al. (2008), Vivas et al. (2010) trabajando en otras zafras en los mismos ensayos no encontraron interacción, con niveles de P Bray I inicial que fluctuaron entre 6 y 7,5 ppm, en condiciones de primavera seca para el segundo y óptimas para el cultivo en los restantes años, aunque si fueron significativos los efectos individuales de ambos nutrientes. Vivas (2007) menciona como causa de la ausencia de interacción las diferentes funciones de P y S en la planta (energética el primero y fisiológica el segundo).

Por otro lado Prystupa et al. (2004) trabajando en maíz en siete sitios no encontraron interacciones significativas entre P y S, pero si tendencias en algunos lugares.

Entre tanto Vivas et al. (2004) en suelos con 18 ppm de P Bray I y 9 ppm de S encontraron interacción significativa P*S, apreciándose importante respuesta a el azufre sin agregado de P, que desaparece cuando este nutriente se adiciona en 15kg.

Álvarez (2009) analizando datos de cinco redes experimentales de fertilización en la Pampa, no encontró interacciones significativas en las respuesta a N, P y S en ninguna de ellas, pero si posibles interacciones en ensayos puntuales. El autor menciona en su revisión que en los trabajos encontrados la interacción parece no tener incidencia importante en la respuesta de los cultivos a la fertilización. El estudio concluye que las respuestas a los distintos nutrientes son de naturaleza aditiva.

Por su parte García (2005) menciona que el efecto combinado de los nutrientes produce beneficios superiores a su aplicación individual, como consecuencia de efectos interactivos.

Se encuentran además citas referidas a que la absorción de un nutriente dado se relaciona a la disponibilidad de otro en el suelo, lo que estaría indicando la posible presencia de interacciones entre ellos. Ejemplos de ello serían la influencia de los niveles de S en suelo sobre la eficiencia de uso de N como fertilizante (Zia et al., citados por Alfaro, 2006) y la dependencia mutua en la absorción de S y P (Mora et al., citados por Alfaro, 2006).

Vivas et al. (2003) en una extensa revisión indican asociaciones entre fertilizaciones nitrogenadas y azufradas, por participar ambos nutrientes en similares procesos fisiológicos (síntesis proteica), citando relaciones óptimas de N/S en planta para trigo en el entorno de 15-17/1. A partir de ello se podría suponer que las respuestas serían interactivas en la medida que la relación se aleje de esos valores.

2.5 ANÁLISIS DE DATOS ESPACIALES

La presencia de variabilidad espacial en propiedades que afectan a los cultivos y en rendimientos es ampliamente reconocida (Ahunchain y Klaassen 1990, Kravchenko y Bullock 2000, Del Campo 2007, Massigoea et al. 2009, Pravia 2009, Terra et al. 2010a). Frente a esto, en experimentación, la estadística convencional basada en los propuestos de Fisher propone evitar o controlar la variación mediante la implementación de bloques homogéneos y repeticiones (Steel y Torrie, 1981). Dicha variabilidad espacial hace dificultoso el traslado de ensayos parcelarios a nivel de chacra.

En la mayoría de las variables, observaciones cercanas en el espacio son más semejantes entre sí que con aquellas más distantes, por lo que la distribución espacial de dichos atributos no es independiente (Plant 2001, Best y León 2006, Tobler, citado por Bocchi y Castrignano 2007). En ciencias naturales, esto ocurre frecuentemente y además, las variables relevadas en la producción de cultivos generalmente se distribuyen de forma continua (Moreno, 2006). Cuando se presentan ese tipo de situaciones, cada valor muestral es afectado por su posición y su relación con los vecinos (Moreno, 2009). En ensayos, cuando se encuentran variables con patrones espaciales y no son controlados, se reduce la precisión de las estimaciones de los efectos relativos de los tratamientos, por lo que la variabilidad debería ser cuantificada y eliminada del error experimental durante el procesamiento estadístico de los datos (Bhatti et al., Wu et al., citados por Pravia, 2009).

El conjunto de técnicas estadísticas que toman en cuenta en su estructura la ubicación espacial de los puntos estudiados se denomina análisis de datos espaciales. Las mismas incluyen la variabilidad espacial presente en el material experimental en el modelo descriptivo de los datos.

Una de las áreas del análisis de datos espaciales es la Geoestadística. Este término fue concebido por G. Matheron, surgiendo a partir de los años sesenta del siglo pasado en minas de oro de África del Sur, especialmente con el propósito de predecir valores de variables geológicas en sitios no muestreados (Moreno, 2009).

Esta área cuantifica la dependencia y estructura espacial de una variable muestreada, utilizando funciones para modelar dicha variación, las que posteriormente son usadas para predecir valores de la variable en sitios no muestreados mediante la técnica llamada Kriging (Moreno, 2009).

Un proceso espacial donde se tiene un conjunto de variables aleatorias se puede denotar de la siguiente forma:

$$\{Z(\mathbf{x}) : \mathbf{x} \in D \subset \mathbb{R}^d\} \quad (1)$$

Donde Z corresponde a la variable aleatoria estudiada, \mathbf{x} indica la ubicación en el espacio que pertenece al dominio (D), el cual corresponde al área estudiada y que es contenida en el plano \mathbb{R}^d (Cressie, 1993).

Los modelos geoestadísticos pueden ser aplicados tanto en experimentación como en muestreos, variando las estrategias a emplear según la situación. En el primer caso como ya se mencionó posibilita trasladar ensayos parcelarios a escalas mayores, al permitir remover los efectos espaciales y así mejorar la precisión de la estimación de efectos relativos de los tratamientos.

Al respecto Mallarino et al. (2000) discuten sobre las metodologías de análisis de datos de rendimiento en ensayos en fajas a escala de campo. Los mencionados autores plantean desde análisis estadístico clásico de los datos hasta otros más complejos en que se considera la correlación espacial de los rendimientos y se corrigen según ello las medias de tratamientos. Para corregir según efectos espaciales utilizaron análisis de medias de vecinos más cercanos y procedimientos geoestadísticos mediante el modelado de semivariogramas, trabajando en ambos casos con residuos del modelo ajustado por análisis de varianza. Uno de los resultados del trabajo fue que al considerar la correlación espacial de rendimientos en la matriz de varianzas-covarianzas de los errores del ANOVA, se mejoró la significancia estadística de las diferencias entre tratamientos, aunque las medias de los mismos se mantuvieron similares. Cadenazzi (2000) encontró diferencias tanto en la significancia como en el ranking de medias calculadas con y si modelaje espacial.

A su vez en el estudio anterior se proponen varios métodos de análisis para detectar en ensayos en fajas la existencia de interacciones entre los tratamientos y otras características relevadas en el campo.

En cuanto a las aplicaciones de geoestadística en muestreos el objetivo es analizar datos donde la variabilidad ya está presente, como lo es el procesamiento de datos de rendimiento para su posterior inclusión en esquemas de delineación de zonas.

2.5.1 Etapas de un estudio geoestadístico

En todo estudio geoestadístico se distinguen tres fases: análisis exploratorio de los datos, análisis estructural y predicciones (Cadenazzi 2000, Moreno 2009, Bosques Sendra, citado por Otaño y Zarucki 2010).

2.5.1.1 Análisis exploratorio

Durante el análisis exploratorio se estudian los datos muestrales sin considerar su ubicación en el espacio, aplicando estadística convencional. Se utilizan histogramas y verifica la distribución del conjunto de datos, ya que algunas herramientas trabajan sobre el supuesto de que los valores provienen de una distribución aproximadamente normal. Además son incluidas estadísticas de resumen como lo son medidas de localización (media, mediana y moda) que indican el centro de la distribución, medidas de dispersión (varianza, desvío estándar y rango intercuartil) que describen la variabilidad de los datos y medidas de forma (coeficientes de asimetría, curtosis y de variación) (Moreno, 2009).

2.5.1.2 Análisis estructural

En esta etapa se estudia la autocorrelación espacial de la variable, tomándosela como la correlación de la variable con respecto a si misma a través del espacio (Best y León 2006, Moreno 2009). Se dice que una variable está espacialmente autocorrelacionada cuando tiene patrones sistemáticos en la distribución espacial.

Para conocer que tan similares son los puntos en el espacio a medida que se encuentran más alejados, es decir conocer su dependencia espacial, se utiliza el semivariograma (Cressie, 1993). Dado un conjunto de datos es posible estimar la función semivariograma experimental $\gamma(h)$ a partir del siguiente cálculo:

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

Donde $m(h)$ es el número de parejas de datos separadas por una distancia h , $Z(x_i)$ corresponde a el valor de la variable (Z) para la ubicación (x_i), mientras que $Z(x_i + h)$ es el valor muestreado de la variable en un punto separado a la distancia h del anterior. Se incluyen en el cálculo de cada semivarianza todos los pares de datos posibles para cada distancia en todas las direcciones.

Una forma sencilla de presentar los datos es graficarlos situando en el eje de las abscisas a la distancia de separación h y en las ordenadas el valor de semivarianza para cada distancia de separación.

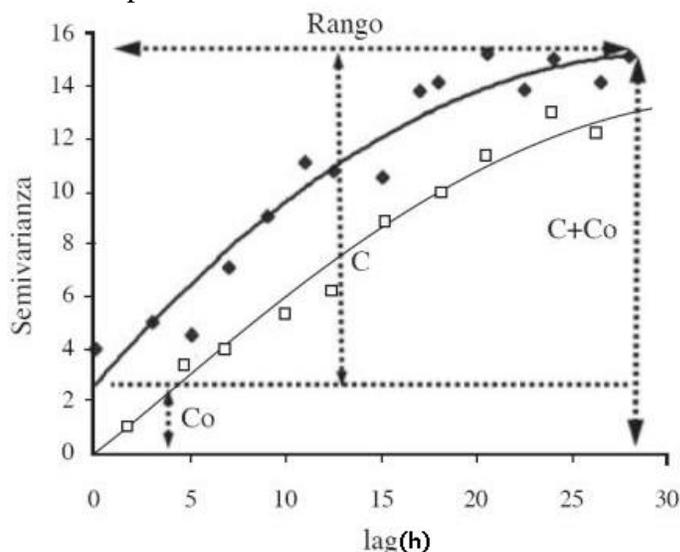


Figura No. 1: Ejemplos de semivariogramas y sus parámetros

En la figura No. 1 además del semivariograma experimental se encuentra el semivariograma teórico al cual han sido ajustados los datos. Allí aparecen los parámetros del semivariograma, siendo Co el efecto pepita, rango la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza y a partir de donde ya no existe correlación entre pares de puntos, mientras que $C + Co$ indica los valores de semivarianza alcanzados en el rango (Best y León, 2006). En el gráfico, en una situación donde existe autocorrelación, se aprecia que en la medida que se reduce h (sitios cercanos) los valores de la variable son más similares (valores reducidos en el semivariograma).

El semivariograma teórico es el que representa la modelación de la variación de los datos y se corresponde con algún modelo matemático, siendo los más frecuentes el esférico, exponencial, gaussiano y lineal. Posteriormente será utilizado para inferir valores de la variable en sitios no muestreados (Moreno, 2009).

2.5.1.3 Predicciones

Se estiman los valores de la variable en puntos no muestreados, considerando la estructura espacial de la población, representada por el semivariograma teórico y los valores muestrales observados en los vecinos. En este punto también se pueden realizar simulaciones, considerando los patrones de continuidad espacial. En geoestadística la predicción es llamada Kriging o Krigage (Best y León, 2006).

Existen muchos métodos de estimación, variando la elección en función de las características del problema a resolver. El krigage tiende a ser superior a los métodos tradicionales (Best y León, 2006), diferenciándose principalmente de estos en la forma en que otorga los pesos a los valores componentes de la predicción, al considerar tanto la distancia como la geometría de localización de las muestras (Moreno, 2009).

Luego de realizar las predicciones se utilizan técnicas para evaluar la bondad de ajuste del semivariograma teórico, donde la validación cruzada es la más empleada. Esto consiste en dejar fuera de la construcción del semivariograma algunos valores puntuales, para luego compararlos con los valores predichos mediante kriging correspondientes a dichos sitios, siendo calculados “errores de estimación” (Best y León, 2006).

Otra técnica relacionada es el co-kriging, a través del cual se puede obtener el valor de una variable a través de la estimación de otras. Se justifica en situaciones en que la correlación entre variables es superior a 0,70 y una de ellas presenta ventajas en su medición (ej. conductividad eléctrica y textura) (Best y León 2006, Roel y Terra 2006b).

En el caso que no exista autocorrelación espacial o esta se pobre y/o no sea viable la realización de muestreo intenso, es conveniente utilizar la media general de los datos (Kravchenko et al., 2003).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENSAYO

3.1.1 Descripción del sitio experimental

El ensayo fue realizado en el periodo de invierno de 2010, en una chacra a nivel comercial situada en el paraje Palma, departamento de Río Negro, Uruguay (32°45'1.61"S, 56°42'55.34"O, 84 m de elevación). El sistema se encuentra bajo agricultura continua desde hace cinco años, habiéndose recolectado información sistemáticamente sobre rendimientos georreferenciados, así como de otros parámetros.

El experimento se instaló sobre una loma y ladera, atravesando ambientes de producción de potencial diferente.

La chacra se sitúa sobre basaltos de la formación geológica Arapey según Carta Geológica de Uruguay, UDELAR (URUGUAY). FA (1998), que da origen a la unidad de suelos Itapebí – Tres Árboles según Carta de reconocimiento de suelos de Uruguay (URUGUAY. MAP. DSF, 1976). El grupo de suelos CONEAT predominante es el 12.22, estando presente en una menor proporción el 1.21 (Cuadro No. 1).

Cuadro No. 1: Descripción de los grupos de suelos CONEAT.

Unidad CONEAT	Unidad de suelos	Suelos dominantes	Suelos asociados
12.22	Itapebí-Tres Árboles	Vertisoles Háplicos y Brunosoles Éútricos Típicos.	Vertisoles Háplicos, Brunosoles Éútricos Típicos, ambos moderadamente profundos y Litosoles Éútricos Melánicos.
1.21	Curtina	Litosoles Éútricos Melánicos, Brunosoles Éútricos Típicos moderados y superficiales.	Litosoles Subéútricos Melánicos, muy superficiales.

Fuente: URUGUAY. MGAP. PRENADER (2010).

3.1.2 Ambientes de producción

El área de estudio consta con ambientes de producción definidos previamente a la instalación del ensayo. Los mismos fueron determinados por la empresa Agronegocios del Plata en base a una metodología que utiliza datos georreferenciados relevados en cultivos anteriores, referidos a índice de verde y mapas de rendimiento, así como también información sobre planimetría y altimetría del terreno (Sistemas de Información Geográfica).

El conjunto de esta información se resume en un mapa de zonas diferenciadas en cuanto al ambiente que ofrecen para el desarrollo de los cultivos (Figura No. 2), en el cual se distingue un ambiente B de potencial variable según año y cultivo y un ambiente A de alto potencial de producción independientemente del año y el cultivo.

3.1.3 Diseño experimental y tratamientos

El experimento incluyó cinco tratamientos que consisten en el agregado de diferentes combinaciones de nutrientes, en dosis que buscan hacerlos no limitantes, y un testigo sin fertilizar (Cuadro No. 2).

El diseño experimental fue completamente al azar, con dos repeticiones por tratamiento, excepto para el testigo que contó con tres repeticiones. Las parcelas consistieron en once fajas ubicadas en el sentido de la pendiente buscando ocupar los diferentes ambientes, contando con un ancho de 25m y un largo de 300m, siendo su superficie 0,75ha (Figura No. 2).

Cuadro No. 2: Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	N (kg N/ha)	P (kg P ₂ O ₅ /ha)	K (kg K ₂ O/ha)	S (kg S/ha)
Testigo	106	0	0	0
P	117	54	0	0
PS	117	54	0	11-24*
PKS	117	54	78	11-30*
PK	117	54	78	0

*Corresponde a la dosis aplicada en cada una de las repeticiones.

La diferencia en el agregado de nitrógeno entre tratamientos es consecuencia de que el fósforo a la siembra fue agregado como fertilizante binario. Problemas de regulación de la fertilizadora en la aplicación del azufre generaron las diferencias indicadas.

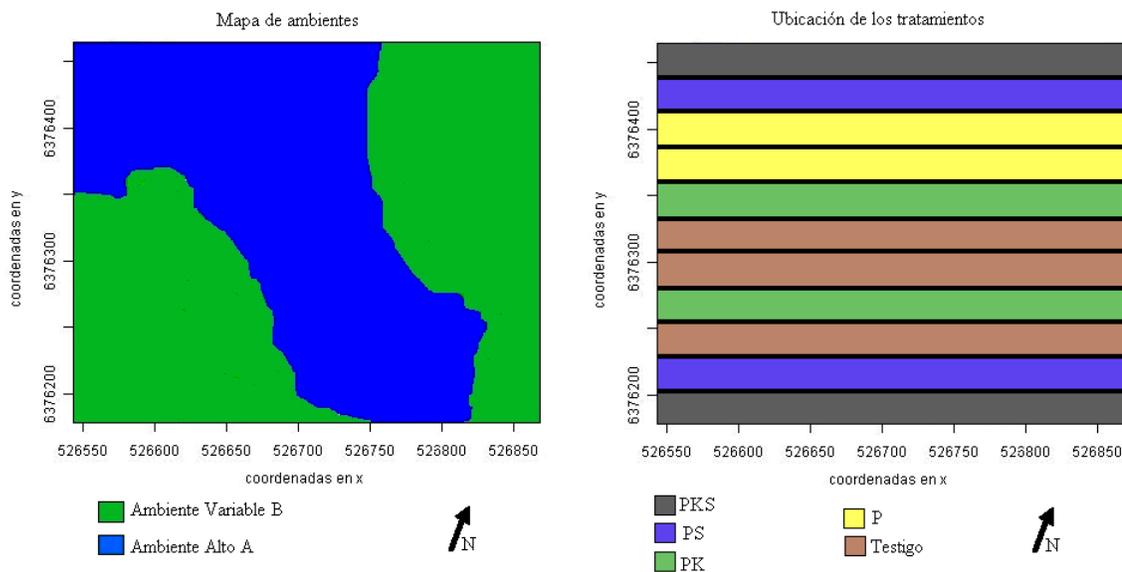


Figura No. 2: Mapa de ambientes y croquis con la disposición de los tratamientos.

3.1.4 Manejo del cultivo

El ensayo se realizó en trigo cultivar Nogal sembrado sin laboreo sobre rastrojo de maíz de primera, cosechado a principios de abril.

En la siembra se buscaron 30 plantas/m a una distancia entre hileras de 0,19m. Sin embargo la implantación del cultivo no fue buena, lográndose a Z 2.2 una población de 20 plantas/m.

A la siembra el fertilizante se aplicó en la línea, mientras que en cultivo fue al voleo, con una máquina de doble disco equipada con un banderillero satelital. Las aplicaciones de herbicidas fueron terrestres, excepto la última que fue aérea (Cuadro No. 3).

Cuadro No. 3: Resumen de manejo agronómico.

Fecha	Estadio	Actividad
07/04	---	Pulverización Glifosato Touchdown (2,7lt/ha)
15/05	---	Siembra 95kg semilla/ha + Curasemilla Pucara Pulverización Glifosato Panzer Gold (1,6lt/ha) Fertilización 11-52-0-0 (105kg/ha)
06/06	Z 1.2	Fertilización 0-0-60-0 (130kg/ha) 46-0-0-0 (130kg/ha) 0-0-0-19*
27/07	Z 2.5	Fertilización 46-0-0-0 (100kg/ha) Pulverización Merit OD (Pyroxsulam + Cloquintocet) (400cc/ha) Metsulfurón Aky (6g/ha)
26/11	Z 9.2	Cosecha mecánica

*Con las características mencionadas en el Cuadro No. 2.

3.2 DETERMINACIONES

3.2.1 Datos climáticos

Esta información fue obtenida por medio de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM), de la estación meteorológica más cercana al ensayo, ubicada en Paso de los Toros, correspondiente al periodo marzo – diciembre de 2010.

3.2.2 Presiembra

3.2.2.1 Análisis de nutrientes

Se contó con análisis de suelo de fósforo (Bray I) y potasio intercambiable (Fotometría llama) según ambiente de producción, cuyas muestras fueron obtenidas por el técnico que maneja el predio (Cuadro No. 4).

Cuadro No. 4: Análisis de suelo.

	Fósforo (ppm P)	Potasio int. (meq K/100g)
Ambiente A	9	0,40
Ambiente B	10	0,40

3.2.3 En cultivo

Para realizar las determinaciones durante el cultivo se tomaron una serie de estaciones que fueron aumentando con los sucesivos muestreos, intentando cubrir de

mejor forma la variabilidad presente en el ensayo. Los mismos fueron georreferenciados mediante un GPS Garmin Etrex Legend, que también fue utilizado cuando se regresó a los sitios en muestreos posteriores.

Las mediciones se hicieron en estados de desarrollo del cultivo elegidos previamente, siendo Z 2.5-Z 2.6, Z 3.0, Z 5.5, Z 9.0, tomándose como estado promedio del total del ensayo. En la primera evaluación se marcaron cuatro sitios de muestreo por parcela, salvo en dos parcelas (Testigos) en que solo se ubicaron dos en cada una; en la segunda se sumaron seis puntos nuevos de muestreo a el total del ensayo. En el tercer muestreo se aumentó el número de sitios llegándose a ocho por parcela.

3.2.3.1 Estadio fenológico

En todas las etapas en que se realizaron determinaciones se estimó el estadio de desarrollo promedio por estación de muestreo, mediante los criterios correspondientes a la Escala Zadok.

3.2.3.2 Producción de biomasa

Se evaluó en Z 2.5-Z 2.6, Z 3.0 y Z 9.0. En los primeros dos momentos por medio del método de doble muestreo con plato (Rising plate meter), mientras que en la tercera instancia se cortó toda la parte aérea del cultivo en cuatro metros lineales por sitio de muestreo, esta misma muestra se utiliza posteriormente para el cálculo de rendimiento y sus componentes.

3.2.3.3 Absorción de nitrógeno

En esta determinación la metodología fue cortar la biomasa aérea de diez plantas por punto de muestreo tomadas al azar. Tanto en Z 2.5-Z 2.6 como en Z 3.0.

En Z 5.5 se hizo un muestreo de hoja bandera, cortando la lámina de treinta plantas tomadas al azar, por punto de muestreo. Provenientes todas de individuos en igual estadio de desarrollo, preferentemente espiga totalmente visible.

Las muestras se secaron a 60°C durante 48hrs., siendo todos los análisis realizados por el Método de Nitrógeno Total Kjeldahl en el Laboratorio Analítico Agroindustrial de la ciudad de Paysandú.

3.2.3.4 Componentes del rendimiento

Cuando el cultivo se encontró en Z 2.5- Z 2.6, se contaron los macollos en cinco metros lineales por punto de muestreo.

Pasada la madurez fisiológica en Z 9.0 se cosecharon en forma manual dos metros lineales de plantas de dos filas contiguas por estación de muestreo, siendo procesadas en una trilladora estacionaria. A partir de esto fue posible determinar rendimiento y sus componentes: número de espigas/m², granos por espiga y peso de mil granos (PMG); así como también índice de cosecha (IC). Siendo los granos por espiga obtenidos por cálculo a partir de los otros componentes del rendimiento.

3.2.3.5 Mapa de rendimiento

La cosecha mecánica se realizó con una máquina John Deere 9750 equipada con monitor de rendimiento SFire 1 y GPS Greestar 1. Cada faja fue dividida en celdas de 25m de largo para cada una de las cuales se calcularon los rendimientos como promedio de los datos relevados dentro de ella.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para conocer características de la población muestreada se realizó un análisis de todas las variables mediante estadística descriptiva, utilizando el programa JMP 9. Fueron calculados los indicadores media, desvío estándar, coeficiente de variación, mínimo y máximo, así como también se construyeron histogramas de frecuencias relativas y se compararon con distribuciones normales.

La estructura espacial de las variables se estudió mediante el modelado de semivariogramas utilizando el programa R 2.12, para lo cual se trabajó con residuos del modelo ajustado por análisis de varianza.

Con el objetivo de evaluar el efecto de los tratamientos se realizaron análisis de varianza, mientras que la comparación de tratamientos se hizo mediante Test de Tukey, usando 0.05 y 0.1 como niveles de significancia dependiendo de la variable. En los análisis de varianza fue calculado el error de muestreo y el error experimental. En las variables registradas mediante muestreos manuales fue utilizado el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 2001), en tanto el rendimiento obtenido por monitor se procesó con el programa estadístico InfoStat/E (Grupo InfoStat, 2010).

Para describir relaciones entre las distintas variables evaluadas y el rendimiento obtenido se construyeron árboles de clasificación y regresión (CART) a través del programa JMP 8 (SAS Institute, 2008).

Se determinó el coeficiente de correlación de Pearson para establecer grados de asociación entre variables utilizando el método Pairwise en el programa JMP 8 (SAS Institute, 2008).

Mediante análisis de conglomerados se formaron grupos de datos diferentes entre sí y similares dentro ellos, para las variables rendimiento y residuo de rendimiento, siendo resultante la última de restar a los valores muestreados el efecto tratamiento correspondiente. Se construyeron dos y cuatro conglomerados, utilizando distancias euclidianas y método de agregación de Ward. A través de tablas de contingencia se estudió la concordancia entre los conglomerados y el potencial del ambiente, así como también entre conglomerados y tratamientos. Para estos procedimientos se utilizó el programa InfoStat/E (Grupo Infostat, 2010).

La presencia de posible interacción entre el efecto de los tratamientos y los ambientes con diferente potencial de producción definidos previamente a la instalación del experimento se estudió mediante cuatro procedimientos distintos. 1) Se consideró un diseño en parcelas divididas, donde la parcela mayor fue el ambiente y la menor la faja fertilizada. 2) Se planteó un diseño factorial, considerando que ambiente y fajas fertilizadas se distribuyen al azar. 3) Fueron realizados análisis de varianza por separado para ambos ambientes, como si fueran experimentos independientes. 4) Es similar al procedimiento anterior, diferenciándose por la realización de un contraste ortogonal entre el tratamiento Testigo y los fertilizados (P, PK, PKS y PS).

Fue realizada una simulación de las respuestas del análisis de datos según los tratamientos aplicados en el experimento. De los datos relevados por el monitor de rendimiento en las 11 fajas, se redefinieron parcelas de 25 m por 50 m mediante el promedio del rendimiento de las combinaciones de a dos unidades de información básica contiguas. Así, de las 12 o 13 unidades básicas de 25 m por 25 m, se construyeron 11 o 12 unidades de 25 m por 50 m, que reproducen los promedios de todas las parcelas contiguas que recibieron el mismo tratamiento. Estas parcelas fueron aleatorizadas dentro de cada faja que recibió un tratamiento, eligiéndose de a 11 de ellas para realizar 8 “experimentos simulados” dentro de los diferentes experimentos simulados potenciales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la Figura No. 3 se presentan las medias mensuales de temperatura en el período en que se desarrolló el cultivo para el año 2010 y la serie histórica 1961-1990. En los dos primeros meses las temperaturas fueron superiores (1°C) a las de la media histórica, ocurriendo lo mismo en septiembre, mientras que en el resto de los meses fueron similares.

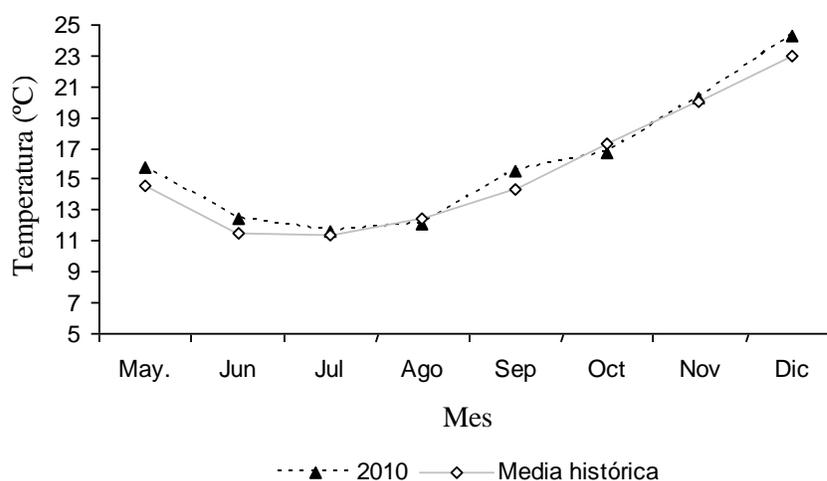


Figura No. 3: Temperaturas medias mensuales del período mayo-diciembre para el año en estudio y serie histórica 1961-1990, en Estación Meteorológica Paso de los Toros.¹

Las precipitaciones medias mensuales durante el experimento fueron comparadas con las medias correspondientes a la serie histórica 1961-1990 (Figura No. 4).

En los meses de junio a septiembre las precipitaciones se asemejaron a las históricas, mientras que en mayo (siembra) fueron superiores y en los últimos dos meses del cultivo (octubre-noviembre) los registros fueron menores a la mitad del promedio histórico, coincidiendo con la etapa de llenado de grano del cultivo.

¹ Pedocchi, R. 2010. Com. personal.

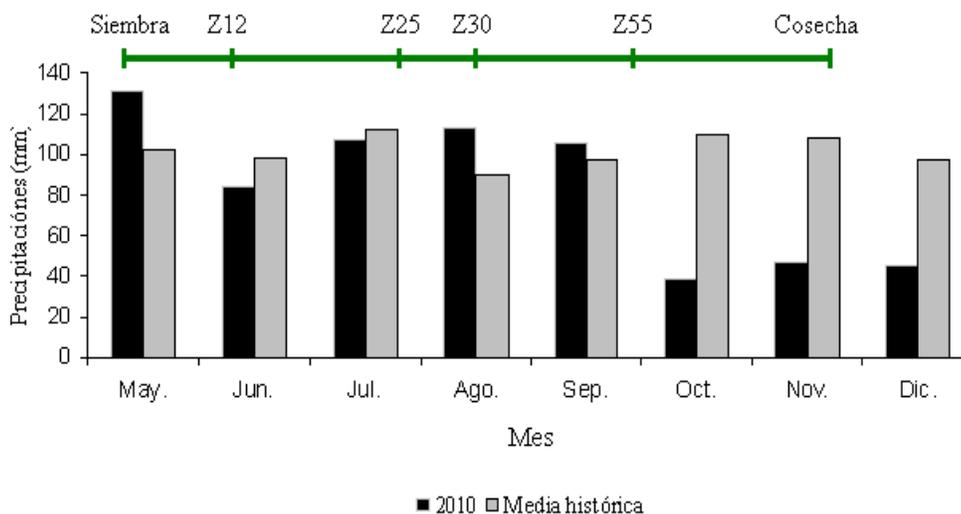


Figura No. 4: Precipitaciones mensuales del período mayo-diciembre para el año en estudio y serie histórica 1961-1990 en Estación Meteorológica Grecco y Estación Meteorológica Paso de los Toros, respectivamente. ¹ Línea verde etapas fenológicas del cultivo.

Considerando los registros de temperatura y precipitaciones el ambiente puede ser considerado como normal hasta floración y con déficit hídrico creciente en etapas posteriores.

4.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Los principales indicadores de dispersión de las variables registradas son presentados en el Cuadro No. 5. La variable materia seca a cosecha presentó una media de 10854 kg/ha que junto a un índice de cosecha intermedio (0,37) permitieron lograr un rendimiento promedio en el ensayo de 4584 kg/ha, considerado elevado.

Respecto a los componentes de rendimiento se registró una media de 405 espigas/m², 36 granos/espiga y 31,6g/mil granos, siendo valores inferiores a los indicados por Hoffman et al. (2010a) para el cultivar utilizado (Nogal) principalmente en los dos primeros componentes. El rendimiento estimado mediante el muestreo fue muy similar en cuanto a la media y desvío estándar a los registrados por el monitor de rendimiento, 4584 vs 4502 y 838 vs 972 respectivamente. Debido a la densidad de muestreo los valores correspondientes a máximo y mínimo fueron más extremos cuando se trabajó con monitor de rendimiento.

En cuanto al coeficiente de variación (CV%) se pueden formar dos grandes grupos uno en el cual los valores son próximos al 10% y otro con valores cercanos al 20%. En el primer grupo se incluyen las variables NZ25, NZ55, IC, granos/espiga y

PMG, mientras que al segundo pertenecen MS a Z25, N a Z25 (kg/ha), MS cosecha (kg/ha), rendimiento, macollos/m² y rendimiento según monitor, siendo donde es más posible que existan diferencias ocasionadas por los tratamientos.

Al analizar los histogramas de frecuencias (ver ANEXOS) resulta que todas las variables tienen una distribución aproximadamente normal, exceptuando MS a Z30, donde la misma es sesgada hacia las clases inferiores.

Cuadro No. 5: Indicadores de localización y dispersión para las variables medidas.

	Media	Desvío Estándar	Coefficiente Variación (%)	Mínimo	Máximo
MS a Z25 (kg/ha)	1051	192	18,3	746	1435
N a Z25 (%)	3,5	0,36	10,3	2,4	4,0
N a Z25 (kg/ha)	37	8,7	23,5	20,3	56,0
MS a Z30 (kg/ha)	1861	328	17,6	1403	2443
N a Z30 (%)	2,7	0,38	14	1,8	3,4
N a Z30 (kg/ha)	49,7	11,0	22,1	30,5	78,3
N a Z55 (%)	3,85	0,20	5,2	3,4	4,2
MSCOS (kg/ha)	10854	2309	21,3	6633	17833
Rendimiento (kg/ha) ¹	4584	838	18,3	2893	6719
IC de MS	0,37	0,03	8,1	0,29	0,42
Macollos/m ²	538	111	20,6	340	762
Espigas/m ²	405	54	13,3	271	527
Granos/espiga	36	3	8,3	26	43
PMG (g)	31,5	3,18	10	23,6	37,4
Rendimiento (kg/ha)*	4502	972	21,6	878	8233

*Rendimiento en base a monitor de rendimiento.

¹ Rendimiento corregido al 12% de humedad.

4.3 AJUSTE DE SEMIVARIOGRAMAS

En todas las variables relevadas se estudiaron las tendencias espaciales de los residuos del modelo ajustado en el análisis de varianza. Se calcularon los valores de semivarianza y graficaron los semivariogramas empíricos (ver ANEXOS). En ninguna de las variables existió un ajuste de los semivariogramas teóricos a los gráficos empíricos obtenidos, por lo que al no detectarse tendencia espacial los datos fueron analizados mediante métodos clásicos de análisis.

Estos análisis fueron posibles por la existencia previa de un estudio georreferenciado, ya que en caso contrario se confundirían los efectos de los tratamientos con los del ambiente del que fueron extraídos.

4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO CLÁSICO DE DATOS OBTENIDOS POR MUESTREO

4.4.1 Producción de biomasa y absorción de nitrógeno

En el Cuadro No. 6 se presentan los valores de materia seca producida (MS), contenido y absorción de nitrógeno (N) en distintas etapas del cultivo. En los análisis de varianza fue utilizado el error de muestreo dado que su diferencia en magnitud con el error experimental fue baja.

Cuadro No. 6: Producción de MS, contenido y absorción de N en trigo según tratamientos de fertilización.

	Testigo	P	PK	PS	PKS	Pr > F
MS a Z25 (kg/ha)	879b	978ab	1170a	1048ab	1180a	0.0024
N a Z25 (%)	3,2b	3,7a	3,7a	3,6ab	3,4ab	0.0206
N a Z25 (kg/ha)	28b	36ab	43,4a	37,4ab	40,6a	0.0026
MS a Z30 (kg/ha)	1632b	1702b	2046a	1695b	2169a	<.0001
N a Z30 (%)	2,4b	2,8ab	2,4b	2,9a	2,7ab	0.0067
N a Z30 (kg/ha)	39,5b	47,4ab	50,1ab	49,8ab	59,8a	0.0015
N a Z55 (%)	3,8b	3,9ab	4a	3,8ab	3,8ab	0.0187
MS a cosecha (kg/ha)	9600b	10487b	12515a	9675b	12617a	<.0001

Letras distintas en la fila indican diferencias significativas según Test de Tukey ($p < 0.05$).

Testigo: fertilización N; P: fertilización N y P; PK: fertilización N, P y K; PS: fertilización N, P y S; PKS: fertilización N, P, K y S.

En todas las variables se encontró significancia estadística ($p < 0.05$) del efecto tratamiento. En la producción de MS a Z25 los tratamientos que incluyeron potasio fueron superiores, no diferenciándose de P y de PS. Este efecto del potasio fue más claro en MS a Z30 y MS a cosecha, donde los tratamientos que lo incorporaron son distintos y superiores a los demás en términos estadísticos. Las reducidas diferencias encontradas en la primera determinación se podrían deber a: los niveles de K en suelo al momento de la siembra entorno al nivel crítico tentativo propuesto por Barbazán et al. (2010), el crecimiento del cultivo hasta Z25 y la proximidad entre este momento y la fertilización potásica (Z12).

Según González et al. (2000), Kant y Kafkafi (2000), la máxima acumulación de K se da en antesis, que junto a posibles deficiencias en el aporte del suelo, solucionadas por el agregado de K serían las causas de las respuestas contrastantes entre tratamientos en mediciones de producción de MS en Z30 y cosecha.

Respecto a la concentración de N, en Z25, Z30 y Z55 el tratamiento Testigo tuvo los valores más bajos aunque según el caso no se diferenció de algunos de los otros tratamientos. La concentración de N en Z25 y Z30 estaría indicando una sub-nutrición del cultivo respecto a este nutriente, al compararlos con el nivel crítico de N en planta a Z30 de 4,1% (Hoffman et al., 2010b). Ello podría estar vinculado al manejo del N y a las condiciones climáticas ocurridas en el período, donde hubo precipitaciones algo por encima de lo normal. En Z55 no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos en que se agregó alguno de los nutrientes estudiados pero si se observó superioridad del tratamiento PK no significativa estadísticamente; de todos modos los valores encontrados se ubicaron por encima del 2,7% de N en hoja bandera mencionado como adecuado por García, citado por Mazzilli (2004).

La absorción de N al ser calculada a partir de producción de MS y la concentración de N depende directamente de lo ocurrido en estas variables, destacándose únicamente que el Testigo siempre se presentó con los valores más bajos.

4.4.2 Rendimiento y componentes del rendimiento

Las medias de mínimos cuadrado, para rendimiento, índice de cosecha y los componentes del rendimiento espigas/m², granos/espiga y peso de mil granos se presentan en el Cuadro No. 7.

Cuadro No. 7: Rendimiento, índice de cosecha y componentes del rendimiento.

	Testigo	P	PK	PS	PKS	Pr > F
Rendimiento (kg/ha)*	4137b	4650ab	5227a	4187b	4943a	<.0001
ÍC de MS	0,38a	0,39a	0,37ab	0,38a	0,35b	<.0001
Macollos/m ²	465b	479ab	574ab	582ab	592a	0.0374
Espigas/m ²	372b	406ab	408ab	426a	430a	0.0035
Granos/espiga	36a	36a	38a	34a	36a	0,1289
PMG (g)	31,21b	31,57ab	34,19a	28,54c	32.16ab	<.0001

Letras distintas en la fila indican diferencias significativas según Test de Tukey (p<0.05). Macollos/m² Test de Tukey (p<0.1).

Testigo: fertilización N; P: fertilización N y P; PK: fertilización N, P y K; PS: fertilización N, P y S; PKS: fertilización N, P, K y S.

* Corregido al 12% de humedad.

Se encontró efecto tratamiento ($p < 0.05$) en rendimiento, índice de cosecha, macollos/m², espigas/m² y PMG, siendo no significativo para granos/espiga.

Para rendimiento se observó la superioridad en términos estadísticos de los tratamientos que recibieron fertilización con potasio, no diferenciándose de estos el que consistió solamente en el agregado de fósforo. Resultados similares fueron encontrados por García et al. (2009) quienes obtuvieron respuesta significativa ($p < 0,10$) al agregado de KCl, sobre suelos de textura franco arcillosa y contenidos de K int. de 0,44meq/100g y mayores. En Argentina son frecuentes ensayos de fertilización con respuesta a KCl, en presencia de elevados contenidos de K int., adjudicándose al efecto del Cloro, a través de una mejora en el comportamiento sanitario (Díaz Zorita et al., 2004).

El rendimiento del tratamiento PS llama la atención especialmente al compararlo con el tratamiento P, respecto al cual presentó diferencias importantes (10% menos) aunque no llegan a ser estadísticas. Esta situación no se esperaba previamente ya que las dosis agregadas de azufre son similares a las recomendadas para obtener la máxima respuesta, situadas entre 12 y 40kg de S/ha (García, 2010). Si bien estos suelos presentan elevado contenido de materia orgánica, tienen otras características que llevarían a esperar respuesta al agregado de S, como lo son una importante historia agrícola, bajo siembra directa y con cultivos de alta productividad (Reussi 2006, Gutiérrez Boem, citado por Torres 2009, García 2010); y tampoco se encontró escasez de restos vegetales en superficie y compactación, siendo ambos aspectos vinculados a situaciones de respuesta positiva en ensayos realizados en INIA La Estanzuela (García y Quincke, 2009). Al respecto García (2002) en una serie de ensayos encontró respuesta positiva en rendimiento al agregado de S en algunos casos, mientras que en otros la misma fue negativa, siendo explicada por un menor peso de grano. La mencionada respuesta al azufre podría ser la causante de las diferencias entre los tratamientos PK y PKS, que no llega a ser marcada debido a que prima la respuesta al agregado de potasio.

Las deficiencias iniciales en la nutrición nitrogenada del cultivo mencionadas pueden haber condicionado la ausencia de respuesta a azufre.

Al analizar la respuesta al fósforo en rendimiento, a través de la comparación del Testigo y P resulta que la misma no es significativa, si bien las diferencias en rendimiento son importantes (514kg/ha). Pudiendo ser consecuencia de concentraciones de este nutriente a siembra próximas al nivel crítico.

Respecto al Índice de Cosecha de MS el mismo se presentó inferior estadísticamente en el tratamiento PKS respecto a los demás, sin poseer diferencias con PK. Dicha situación se dio debido a que en ellos no fue posible transformar totalmente en grano la superioridad manifestada en producción de materia seca. Un déficit hídrico superior y más temprano en esos tratamientos, causado por mayor consumo de agua, pudo ser la causa de la situación presentada.

En cuanto al muestreo de macollos es posible apreciar una tendencia de respuesta a fósforo, ya que el número se incrementó en el grupo de tratamientos P, PK, PS y PKS respecto a Testigo. Siendo PKS el único tratamiento que se diferencia estadísticamente del Testigo, superándolo en 27%.

El componente del rendimiento espigas/m² presentó los menores valores en el Testigo siendo estadísticamente diferente frente a los tratamientos PS y PKS, consistiendo el motivo más importante del bajo rendimiento expresado.

No aparecieron diferencias significativas en espigas/m² entre los tratamientos en que se agrega fósforo, potasio y/o azufre. Pero es posible identificar una tendencia a que los tratamientos con agregado de azufre hayan producido más espigas; siendo este el componente de rendimiento más importante en explicar incrementos en grano producido en ensayos de respuesta a azufre realizados en Argentina por Vivas et al. (2010).

El PMG es el componente del rendimiento en que se encontraron diferencias significativas entre tratamientos más marcadas. En PS el mismo es inferior y distinto a los demás, consistiendo en la causa del bajo rendimiento obtenido, concordando con los resultados obtenidos por García (2002). El tratamiento PK presentó el peso más elevado, sin diferir estadísticamente de P y PKS; junto al componente granos/espiga, que si bien no se diferenció en términos estadísticos de los demás tendió a ser superior, colaboró en lograr el alto rendimiento apreciado.

4.4.3 Análisis de árboles de clasificación y regresión

Como se presenta en la Figura No. 5 el rendimiento estuvo influenciado en primer lugar por la materia seca producida a cosecha (MS Cosecha), donde por encima y por debajo de 10711 kg/ha se forman grupos de rendimientos contrastantes. En la rama de rendimientos menores (<10711 kg/ha de MS Cosecha) aparecen nuevas divisiones según MS Cosecha e índice de cosecha (IC), estando los rendimientos más altos cuando los valores de dichas variables se incrementan.

Por el lado de los rendimientos superiores (≥ 10711 kg/ha de MS Cosecha) los grupos que se destacan (por encima de 5500 kg/ha) son aquellos que tienen más espigas/m² (≥ 417 espigas) y más granos por espiga (≥ 36 Grano/esp). Los rendimientos mayores a 6000 kg/ha son aquellos que tienen más de 458 espigas/m². En esta rama el PMG influyó en los rendimientos menores (entorno a 5000 kg/ha), pero con elevada producción de MS (MSCOS ≥ 11255 kgMS/ha).

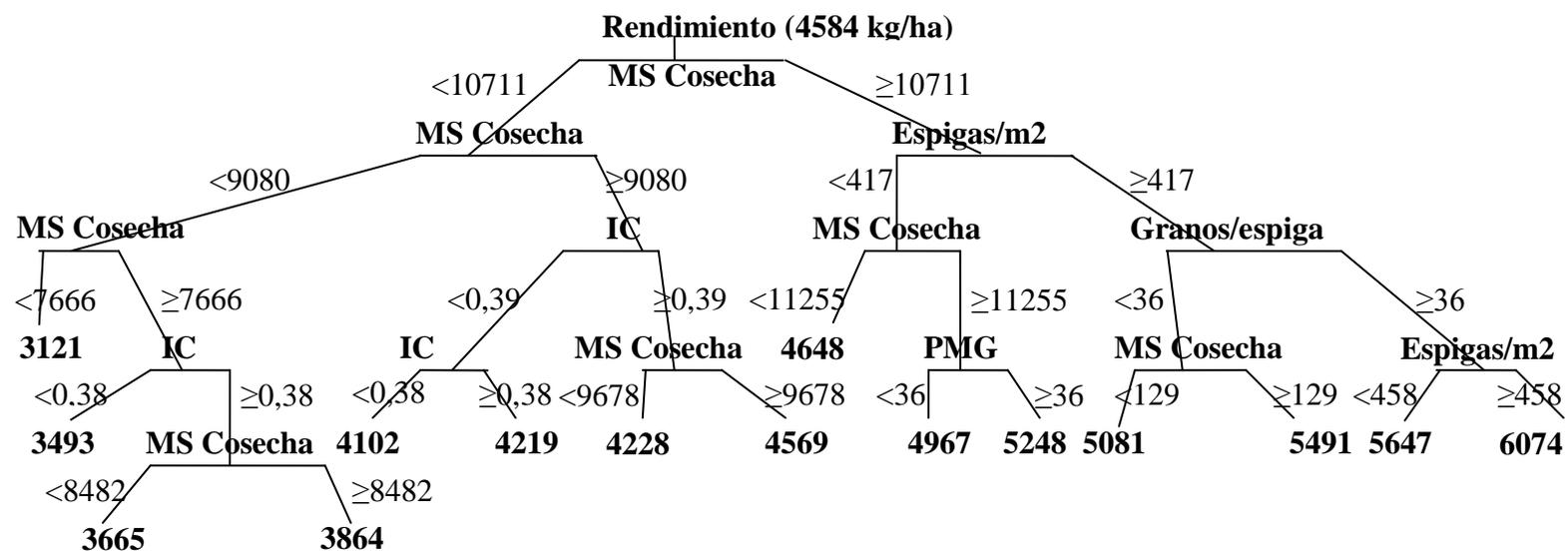


Figura No. 5: Árbol de clasificación y regresión para rendimiento según muestreo con las variables materia seca a cosecha (MS Cosecha), espigas/m², granos por espiga, peso de mil granos (PMG), índice de cosecha (IC).

4.4.4 Análisis de correlaciones

El rendimiento en grano presentó correlaciones positivas con casi todas las variables, significativas a niveles importantes (Cuadro No. 8). El valor de la correlación con MS a cosecha es elevado ($r = 0,93$) y el mayor de todos, siendo la causa de que al realizar el árbol de regresión y clasificación es la variable más importante en determinar el rendimiento. Los componentes registraron correlaciones medias a altas con rendimiento, presentando el mayor valor con peso de mil granos ($r = 0,64$).

Entre los componentes del rendimiento espigas/m² tiene la menor correlación a pesar de lo cual aparece primero en el CART, atribuible a que tiene mayor variación.

La materia seca a cosecha se correlacionó en forma negativa con índice de cosecha, mientras que con el resto de las variables fue positiva. En el análisis de varianza ya fue posible apreciar dicha asociación. El IC mostró con las demás variables correlaciones bajas y negativas en una mitad de los casos, y no significativas en la otra.

Cuadro No. 8: Coeficientes de correlación de Pearson para las variables evaluadas.

	N a Z55	MS cos	IC	Rend	Espigas	Gran/esp
N a Z55	-	-	-	-	-	-
MS cos	0.26*	-	-	-	-	-
IC	NS	-0.55***	-	-	-	-
Rend	0.27*	0.93***	-0.21*	-	-	-
Espigas	NS	0.39***	NS	0.48***	-	-
Gran/esp	0.23*	0.55***	NS	0.58***	-0.28**	-
PMG	0.21*	0.66***	-0.34**	0.64***	-0.23*	0.53***

N a Z55: N a Z55 %; MS cos: materia seca a cosecha; IC: índice de cosecha; Rend: rendimiento estimado por muestreo; Espigas: espigas/m²; Gran/esp: granos/espiga; PMG: peso de mil granos.

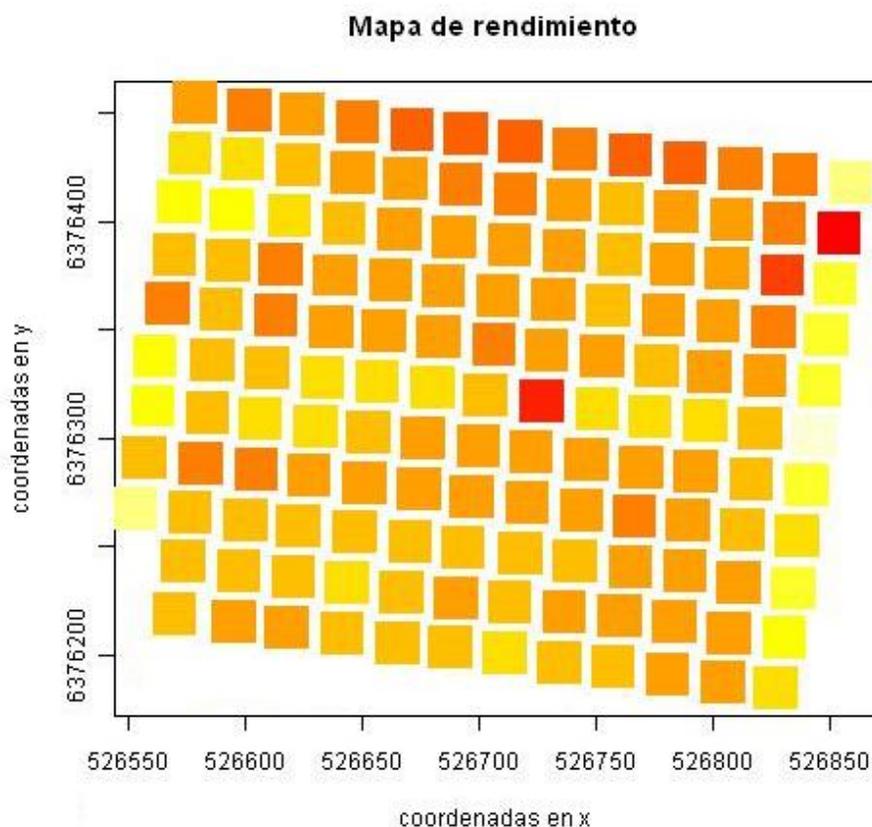
***: significativo $p \leq 0.001$; **: significativo $p \leq 0.01$; *: significativo $p \leq 0.05$; NS: no significativo $p \leq 0.05$.

4.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO CLÁSICO DE DATOS OBTENIDOS POR MONITOR DE RENDIMIENTO

4.5.1 Rendimiento según tratamiento y ambiente

Esta sección se realizó considerando los valores de rendimiento en grano obtenidos mediante el monitor de rendimiento de la cosechadora. A su vez se incluyeron los ambientes de producción definidos previamente a la realización del ensayo, donde A

corresponde a un ambiente de mayores rendimientos y B a uno de rendimientos variables.



*Colores más oscuros indican rendimientos más elevados.

Figura No. 6: Mapa de rendimiento según monitor de rendimiento.

En la Figura No. 6 se presentan los datos obtenidos por el monitor de rendimiento promedio para cada celda de las fajas. Existen fajas en las que los rendimientos tienden a ser elevados en todas las celdas, como lo son la primera, cuarta, quinta y octava, coincidiendo todas estas excepto la cuarta con algunas de las que recibieron agregado de potasio (ver Figura No. 2).

Cuadro No. 9: Rendimiento en grano según tratamiento.

Tratamiento	Medias		n	E.E.
PKS	4861	A	25	184.85
PK	4798	A	26	181.26
PS	4629	AB	25	184.85
P	4503	AB	26	181.26
Testigo	3992	B	39	148.00

Medias con una letra común no son significativamente diferentes según Test Tukey ($p < 0.05$). DMS=690.7

Testigo: fertilización N; P: fertilización N y P; PK: fertilización N, P y K; PS: fertilización N, P y S; PKS: fertilización N, P, K y S.

Al comparar las medias de rendimiento de los tratamientos mediante Test de Tukey ($p < 0.05$) resulta que los tratamientos PKS y PK aparecen como superiores, mostrando diferencias estadísticas únicamente frente al Testigo (Cuadro No. 9).

Cuadro No. 10: Rendimiento en grano según ambiente de producción.

Ambiente	Medias		n	E.E.
A	4749	A	71	111.84
B	4251	B	70	112.64

Medias con una letra común no son significativamente diferentes según Test Tukey ($p < 0.05$). DMS=315.4

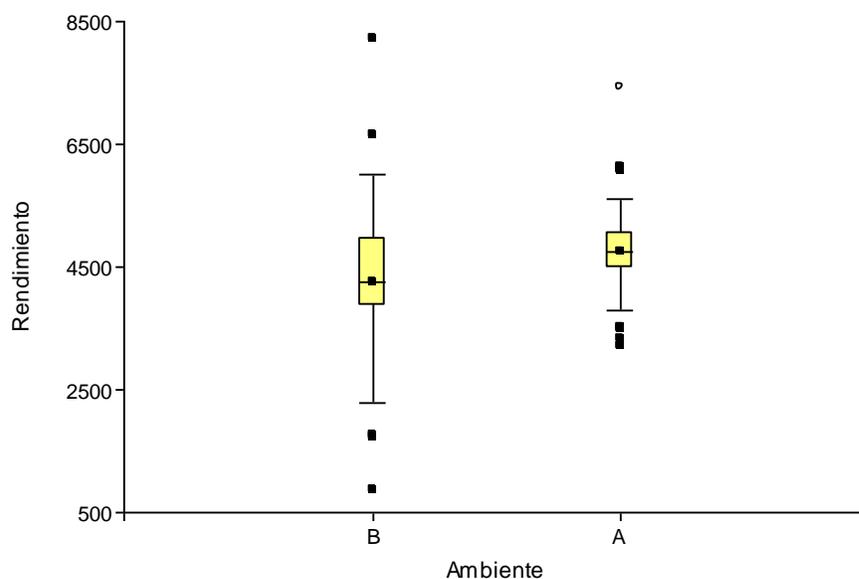


Figura No. 7: Rendimiento en grano en kg/ha según ambiente de producción.

El Cuadro No. 10 indica que los rendimientos obtenidos en los dos ambientes difieren estadísticamente entre sí ($p < 0.05$), aunque los valores correspondientes a ellos se superponen completamente como se ve en Figura No. 7. Es posible distinguir una variación entre ambientes respecto a la dispersión de los valores, siendo superior en el ambiente B, definido previamente como variable.

4.5.2 Análisis de conglomerados

Se realizó un análisis de conglomerados donde se determinaron dos grupos de datos (1 y 2) diferentes entre sí y similares dentro de ellos en cuanto al rendimiento obtenido (ver ANEXOS).

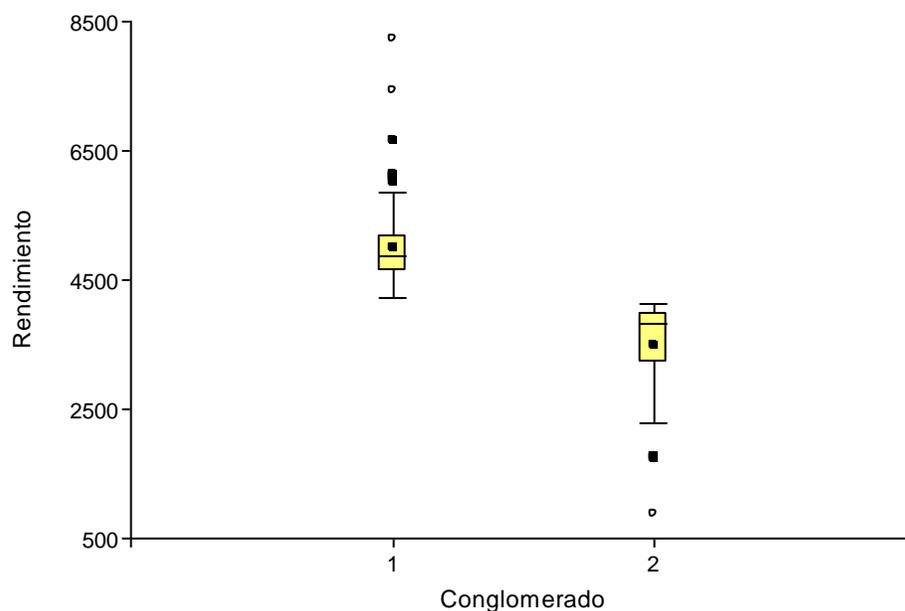


Figura No. 8: Rendimiento en grano en kg/ha según conglomerado (2).

Es posible separar los datos de rendimiento en dos grupos bien diferenciados (Figura No. 8). Ambos conglomerados presentan una amplitud de dispersión similar de los valores; el conglomerado 2 aparece como el de rendimientos bajos, con una media próxima a 3500 kg/ha y el conglomerado 1 como el de rendimientos altos, con una media cercana a 5000 kg/ha.

Cuadro No. 11: Tabla de contingencia para conglomerados (2) y ambiente.

Conglomerado	A	B	Total
1	59	37	96
2	12	33	45
Total	71	70	141

En columnas: Ambiente

El Cuadro No. 11 permite ver la asociación entre los ambientes y los conglomerados identificados. De las observaciones correspondientes al ambiente A, 83% pertenece a su vez al conglomerado 1, el de mayor rendimiento, mientras que las provenientes del ambiente B no se asocian a ninguno de los conglomerados en especial; situación que podría estar influenciada por el efecto de algunos tratamientos que colocan los rendimientos del ambiente B en estratos superiores.

El planteo realizado anteriormente es descartado al interpretar los resultados de un análisis similar realizado con los residuos de rendimiento, al quitar el efecto tratamiento (Figura No. 9 y Cuadro No. 11). Allí 92% de las observaciones del ambiente A están a su vez en el cluster de alto rendimiento, en tanto el ambiente B tiene 79% en dicho grupo. Ello muestra que al excluir el efecto de los tratamientos en el ambiente B se presentaron rendimientos elevados que no son resultado de los tratamientos, sino propios de dicho ambiente.

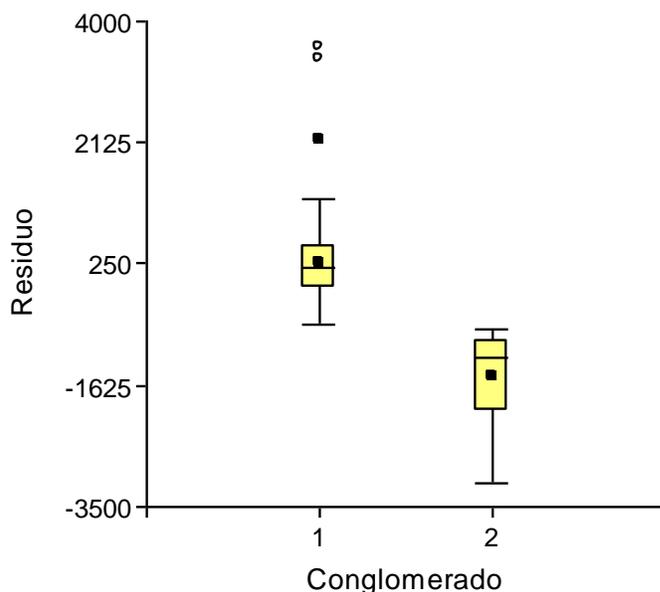


Figura No. 9: Residuo de rendimiento según conglomerado (2).

Cuadro No. 12: Tabla de contingencia para conglomerados de residuo de rendimiento (2) según ambiente.

<u>Conglomerado</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>Total</u>
1	65	55	120
2	6	15	21
Total	71	70	141

En columnas: Ambiente

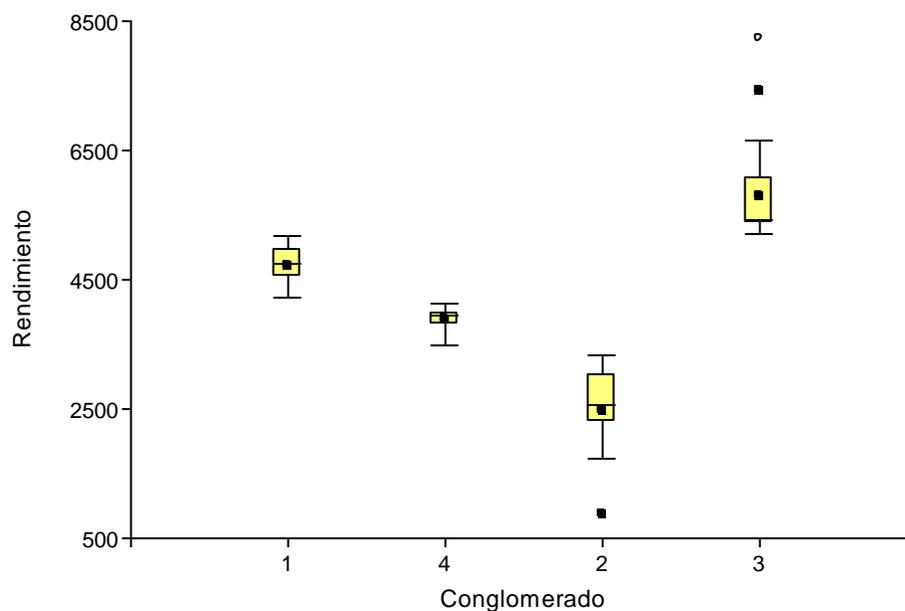


Figura No. 10: Rendimiento en grano en kg/ha según conglomerado (4).

Al formar 4 conglomerados (ver ANEXOS) aparece uno con rendimientos notoriamente bajos, con media cercana a 2500 kg/ha, uno de altos rendimientos, con media próxima a 5500 kg/ha y dos grupos intermedios (Figura No. 10).

Cuadro No. 13: Tabla de contingencia para ambientes y conglomerados (4).

<u>Ambiente</u>	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>Total</u>
A	46	2	13	10	71
B	27	11	10	22	70
Total	73	13	23	32	141

En columnas: Conglomerado

Al separar los datos en 4 conglomerados (Cuadro No. 13) el ambiente A sigue manteniendo una asociación importante con los grupos de alto rendimiento,

correspondiendo el 83% de las observaciones a los conglomerados 1 y 3. Por otro lado el ambiente B parece más similar a los conglomerados de rendimientos intermedios (1 y 4), situándose en estos 70% de las observaciones, siendo las restantes distribuidas en partes iguales ente los grupos de más altos y bajos rendimientos. Mientras tanto cuando se trabajó con los residuos la situación se mantuvo similar, el ambiente A siguió asociado a rendimientos altos (69% en cluster 2 y 3), así como el ambiente B lo estuvo con los intermedios (57% en cluster 1 y 2) (Figura No. 11 y Cuadro No. 14).

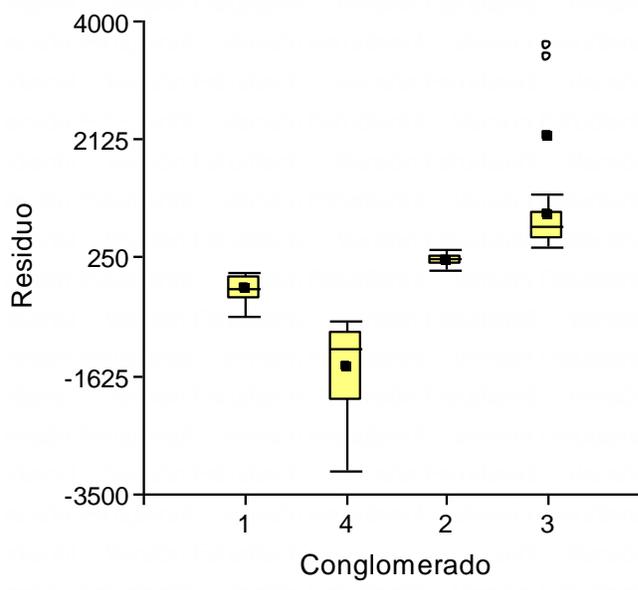


Figura No. 11: Residuo de rendimiento según conglomerado (4).

Cuadro No. 14: Tabla de contingencia para ambientes y conglomerados de residuos de rendimiento (4).

Ambiente	1	2	3	4	Total
A	16	25	24	6	71
B	29	11	15	15	70
Total	45	36	39	21	141

En columnas: Conglomerado

Cuadro No. 15: Tabla de contingencia para ambientes y tratamientos.

Tratamiento	1	2	3	4	Total
P	16	4	3	3	26
PK	19	1	5	1	26
PKS	10	1	10	4	25
PS	13	1	4	7	25
Testigo	15	6	1	17	39
Total	73	13	23	32	141

En columnas: Conglomerado.

Testigo: fertilización N; P: fertilización N y P; PK: fertilización N, P y K; PS: fertilización N, P y S; PKS: fertilización N, P, K y S.

Los tratamientos impuestos manifiestan un comportamiento diferencial respecto a su asociación con los distintos conglomerados (Cuadro No. 15). Por un lado se encuentra el grupo compuesto por los tratamientos P, PK, PKS y PS en que el 73%, 92%, 80% y 68% de las observaciones respectivamente se corresponde a los conglomerados con rendimientos más elevados (1 y 3). Allí resaltan los tratamientos con agregado de K, siendo en los que se observan rendimientos más elevados. En contrapartida el Testigo, posee solamente el 41% de las observaciones en los clusters 1 y 3, este tratamiento a su vez es el que tiene más observaciones (15%) en el cluster 2, el de menor rendimiento. Por otro lado al considerar solamente el cluster 3, el tratamiento PKS abarca el 43% de las mediciones, marcando nuevamente la superioridad del mismo.

Cuadro No. 16: Tabla de contingencia para conglomerados y tratamiento según ambiente.

Trat y Amb	1	2	3	4	Total
P-A	11	2	1	2	16
P-B	5	2	2	1	10
PK-A	10	0	3	0	13
PK-B	9	1	2	1	13
PKS-A	5	0	6	2	13
PKS-B	5	1	4	2	12
PS-A	8	0	2	3	13
PS-B	5	1	2	4	12
T-A	12	0	1	3	16
T-B	3	6	0	14	23
Total	73	13	23	32	141

En columnas: Conglomerado.

T: Testigo. A y B: ambientes de producción.

Testigo: fertilización N; P: fertilización N y P; PK: fertilización N, P y K; PS: fertilización N, P y S; PKS: fertilización N, P, K y S.

Según el Cuadro No. 16 la respuesta a los tratamientos con fertilización es mayor en el ambiente B que en A, sugiriendo la existencia de una interacción entre ellos. Así por ejemplo en Testigo en ambiente B hay sólo 13% de observaciones en clusters 1 y 3 (rendimientos más elevados), mientras que el 75% de las observaciones del tratamiento PKS del ambiente B están en los grupos 1 y 3. En tanto, en el Testigo ambiente A hay 81% de las observaciones en los grupos de alto rendimiento pasando a 85% en el tratamiento PKS.

En la Figura No. 12 se visualizan de otra forma los resultados, allí figuran las medias de rendimiento según ambiente para el tratamiento Testigo por un lado y todos los tratamientos fertilizados por otro.

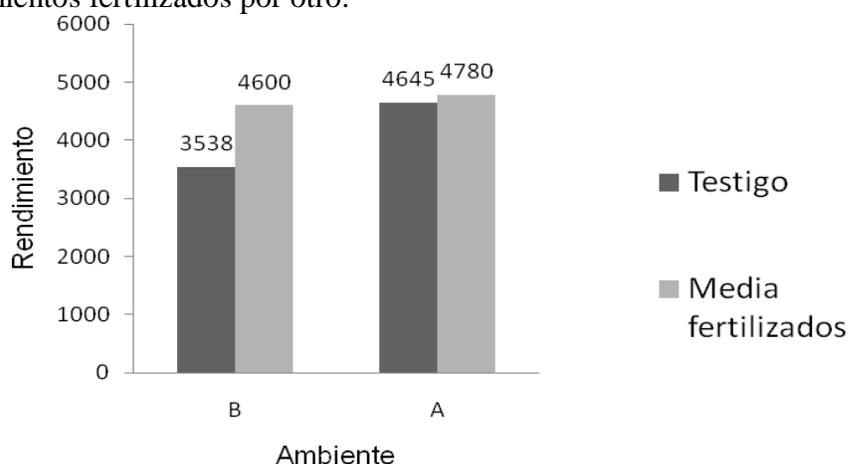


Figura No. 12: Rendimiento (kg/ha) según ambiente para el tratamiento Testigo y todos los fertilizados.

El agregado de nutrientes colocó los rendimientos en niveles superiores respecto a Testigo, contribuyendo a su vez a disminuir las diferencias entre ambientes, permitiendo que el ambiente B se equipare en rendimiento con el ambiente A. La respuesta a la fertilización fue mayor en el ambiente B que en el A, siendo 30% y 2% respectivamente, a pesar de los similares contenidos de nutrientes en suelo al momento de la siembra.

4.5.3 Interacción tratamiento por ambiente

La presencia de posible interacción entre el efecto de los tratamientos y los ambientes con diferente potencial de producción definidos previamente al ensayo se estudió mediante cuatro procedimientos distintos. En el Cuadro No. 17 se presentan las probabilidades de significancia ($P>F$) en el análisis de varianza para cada uno de los componentes en los respectivos análisis.

En los procedimientos de parcelas divididas y factorial se encontró efecto significativo ($p < 0,05$) del ambiente y tratamiento, mientras que la interacción no fue significativa, pero si se aprecia una tendencia en el factorial ($p = 0,0669$). En experimentos independientes el efecto tratamiento fue significativo en ambiente B, no siéndolo en el ambiente A aunque se ve una tendencia ($0,0769$).

En experimentos independientes cuando se incluyó un contraste entre el grupo de tratamientos fertilizados y el tratamiento Testigo, resultó que los mismos difieren estadísticamente entre sí en el ambiente B ($0,0002$) pero no en el A ($0,4173$), sugiriendo nuevamente la existencia de una interacción entre ellos.

Cuadro No. 17: Análisis de varianza para rendimiento y ambiente mediante cuatro procedimientos.

	Parcelas divididas	Factorial	Experimentos independientes		Experimentos independientes (c/contrastes)	
			A	B	A	B
$P > F$ Ambiente	0,0059*	0,0133*	-	-	-	-
$P > F$ Tratamiento	0,0360*	0,0056*	0,0769	0,0072*	-	-
$P > F$ Amb*Trat	0,2368	0,0669	-	-	-	-
$P > F$ Contraste	-	-	-	-	0,4173	0,0002*

* significativo

4.5.4 Análisis de árboles de clasificación y regresión

En la Figura No. 13 se presenta un árbol de regresión parcial para rendimiento considerando elevación, tratamiento de fertilización y potencial de producción del ambiente. La primera variable de clasificación que aparece es la elevación, diferenciando una rama de rendimientos bajos (media 3278 kg/ha) en niveles inferiores a 85m y otra de rendimientos elevados (media 4659kg/ha), para alturas superiores a 85m, perteneciendo a esta la mayor parte de las observaciones. Luego la rama de rendimientos elevados se divide según tratamiento en dos grupos que difieren en 679 kg/ha, situándose por un lado Testigo y por otro los tratamientos en que se agrega algún nutriente. Dentro del tratamiento Testigo se forman a su vez dos ramas de rendimientos contrastantes (3759 vs. 4639), correspondientes a los ambientes B y A. En tanto por la rama de los tratamientos que reciben fertilización no aparecen divisiones según ambiente de producción, indicando que los mismos redujeron su importancia en generar variaciones en rendimiento, consistiendo en otros indicios de la existencia de interacciones entre el ambiente y la fertilización. En niveles inferiores del árbol aparecen nuevamente segmentaciones según elevación y luego por tratamientos, en donde los rendimientos superiores están dados por la presencia de potasio en la fertilización.

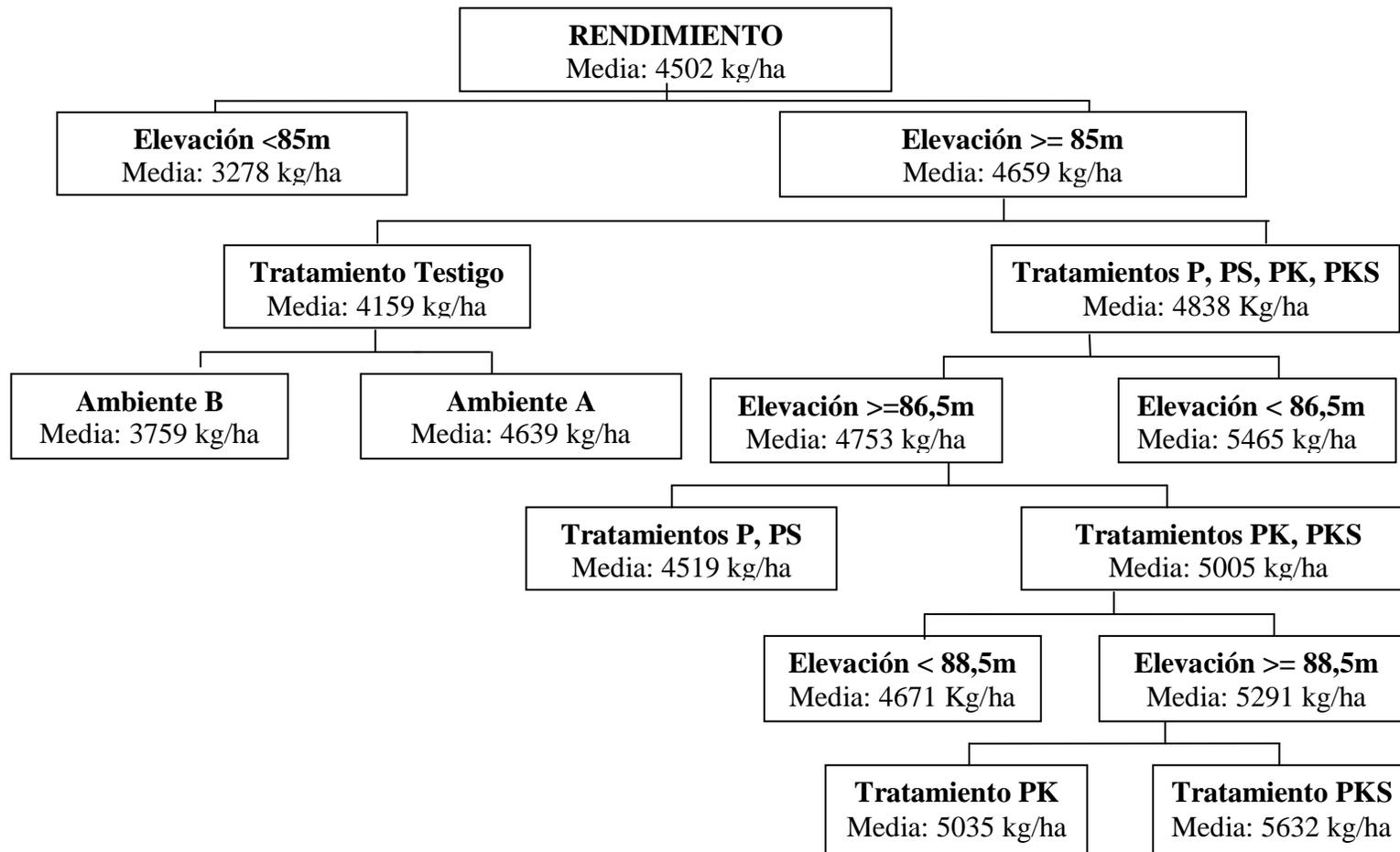


Figura No 13: Árbol de clasificación y regresión para rendimiento según monitor con las variables elevación, tratamiento y ambiente.

4.6 EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DEL DISEÑO Y METODOLOGÍA UTILIZADA

El resultado del análisis de experimentos simulados consigue diferenciar los tratamientos del testigo en el 75% de los casos, detectando las diferencias entre los tratamientos PKS y PK contra el testigo en un 50%.

Este índice de concordancia entre resultados debe ser estudiado con atención, ya que a pesar de la no detección de variabilidad espacial en el estudio, no se consiguió el 100% de concordancia (Cuadro No. 18).

Cuadro No. 18: P-valores de 8 experimentos generados a partir de simulaciones de rendimiento utilizando un tamaño de parcela de 25 m por 50 m.

Exp\	1	2	3	4	5	6	7	8
p-valor	0.0026	<0.0001	0.0115	0.0064	0.002	0.0005	0.1706	0.103
C.V(%)	13	11	14	13	15	13	15	16
MDS (kg/ha)	500	447	580	512	568	523	584	620
ranking	PKS a	PK a	PKS a	PK a	PS a	PKS a	ns	ns
	PK b	PKS a	P a	P a	PK a	PK a		
	PS b	P ab	PK a	PS a	PKS a	P a		
	P b	PS bc	PS a	PKS b	P b	PS ab		
	T b	T c	T b	T b	T b	T b		

El número de repeticiones utilizadas por franja fue 11, ya que con menor número de repeticiones, las diferencias resultaron no significativas al 5%.

Se repitió el proceso de simulación 100 veces, simulando 100 experimentos de igual número de repeticiones de 25 m por 50 m, determinándose en el 80% de los experimentos simulados diferencias entre el testigo y el grupo de los demás tratamientos.

Si la zona fuera homogénea, se obtendría un resultado repetible con pocas unidades de información dentro de cada faja, por lo que el resultado sería consistente y confiable. En el caso de este experimento, si se trabaja con menos de 11 unidades de información no hubiera sido posible detectar diferencias entre tratamientos, por lo que la variación en el rendimiento medio entre tratamientos hubiera sido asignada al azar. Si bien no fue posible detectar variación espacial del rendimiento asociada a atributos del suelo o del terreno, ésta siempre existe. Es posible que el tamaño de la unidad de información utilizada no haya sido suficiente para detectarla y, por lo tanto, para remover su efecto sobre los tratamientos. Al utilizar fajas de gran tamaño, si no se

dispone de un muestreo intenso, no será posible detectar diferencias significativas entre los tratamientos, ya que el mismo quedará asociado a un efecto lugar, perdiendo la capacidad de extrapolar conclusiones.

5. CONCLUSIONES

Fue posible cuantificar la respuesta al agregado de nutrientes, donde la más importante y significativa fue a potasio, habiéndose incrementado los rendimientos 1090kg/ha (26%) en el tratamiento PK y 806kg/ha (19%) en PKS, frente a Testigo. Mientras que los tratamientos P y PS no difirieron del Testigo. La mencionada respuesta estuvo asociada a la producción de materia seca a cosecha, dado la elevada correlación entre ésta y rendimiento ($r = 0,93$).

Los ambientes definidos previamente al experimento se asemejaron a los grupos de rendimiento obtenidos. Se encontró que el ambiente A se asoció a rendimientos elevados, mientras que en el ambiente B los rendimientos correspondieron tanto a grupos de alta como de baja productividad, coincidiendo con las características atribuidas a ambos.

La respuesta en rendimiento a la fertilización aparentó diferir según el ambiente, lo cual permitió suponer la existencia de interacciones entre ambos, aunque no es posible demostrarlo estadísticamente por el diseño utilizado. El incremento en rendimiento logrado al fertilizar fue mayor en el ambiente B que en el A (1062 kg/ha y 115 kg/ha, respectivamente) situándose ambos ambientes en rendimientos similares. Ello indica que dichos ambientes no difieren en la producción logable, sino en la existencia de limitantes (Ambiente B), que se pudieron levantar manejando los nutrientes.

Cuando se realizaron simulaciones de experimentos en base a los datos registrados no siempre se obtuvo el mismo resultado. La posibilidad de atribuir diferencias de rendimientos a los tratamientos aplicados utilizando un diseño en fajas es dependiente de la capacidad de detectar variabilidad espacial del rendimiento y removerla, para lo cual es necesario tomar un alto número de observaciones georreferenciadas por faja. Dicha capacidad también se ve limitada en situaciones en que, por la escala pequeña en la que ocurre la variabilidad espacial, esta no es detectable con la escala de muestreo realizada.

6. RESUMEN

En la mayoría de las chacras de la zona agrícola de Uruguay los atributos edáficos y topográficos varían espacialmente afectando el rendimiento de los cultivos. Esto exige ajustar las prácticas agronómicas en función de zonas con propiedades similares, siendo el manejo de nutrientes una de ellas. El objetivo del presente estudio fue cuantificar la respuesta del cultivo de trigo a combinaciones de fertilización con fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) en ambientes con distinto potencial de producción dentro de una misma chacra. En una chacra comercial se instaló un experimento donde los tratamientos fueron fajas de fertilización con combinaciones de P, K y S. Las fajas abarcaron dos ambientes de producción con potenciales diferentes, uno de alto potencial (A) y otro de potencial variable según año y cultivo (B), definidos previamente en base a herramientas de agricultura de precisión. Se determinó rendimiento en grano y materia seca, así como también componentes del rendimiento. En ninguna de las variables se presentaron tendencias espaciales definidas. Hubo respuesta al agregado de potasio en rendimiento en grano y materia seca cuando no se distinguió entre ambientes. Los ambientes captaron parte de la variación en rendimientos, mostrando la eficiencia de la metodología empleada para definirlos. Considerando el conjunto de tratamientos fertilizados la respuesta en rendimiento en grano al agregado de nutrientes difirió entre ambientes, siendo 30% en ambiente B (1062 kg/ha) y 2% (115 kg/ha) en ambiente A, lo cual situó a ambos en similares niveles de productividad y sugiere la existencia de interacciones entre ambiente y fertilización.

Palabras clave: Ambiente de producción; Variabilidad de rendimientos; Tecnologías de agricultura de precisión.

7. SUMMARY

In most of the fields in the agricultural zone of Uruguay, soil and topographic attributes vary spatially affecting crop yields. This requires adjusting the management practices in terms of areas with similar properties, nutrient management being one of them. The aim of this study was to quantify the response of wheat to combinations of fertilization with phosphorus, potassium and sulfur in zones with different production potential within a field. In a cash crops farm was installed a field scale experiment. Treatments were established in replicated fertilization strips traversing two areas of production with different potentials, a high potential (A) and a variable potential by year and crop (B), previously defined using precision agriculture technologies. There was measured grain yield and dry matter yield as well as yield components. None of the variables, defined spatial trends were presented. There was response to the addition of potassium in grain yield and dry matter when no distinction was made between production potential zones. The zones captured some of the variation in yield, showing the efficiency of the methodology used to define them. Considering all the fertilizer treatments, grain yield response to added nutrients differed between zones, with 30% in zone B (1062 kg/ha) and 2% (115 kg/ha) in zone A, which ranked both zones in similar levels of productivity and suggests the existence of interactions between zone and fertilization.

Key words: Productivity zones; Within field yield variability; Precision agriculture technologies.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. AHUNCHAIN, M.; KLAASSEN, M. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en Trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 165 p.
2. ALFARO, M.; BERNIER, R.; IRAIRA, S. 2006. Efecto de fuentes de azufre sobre el rendimiento y calidad de trigo y pradera en dos andisoles. *Agricultura Técnica (Chile)*. 66 (3): 283-294.
3. ALMADA, P. 2006. Fertilización P y K de maíz en tres suelos de Durazno. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 64 p.
4. ÁLVAREZ, R. 2009. Aditividad en la respuesta de los cultivos extensivos a la fertilización con distintos nutrientes en la Región Pampeana. *Informaciones Agronómicas*. 43: 8-11.
5. BARBAGELATA, P.; MELCHIORI, J. 2008. Diagnóstico de la fertilización fosfatada para trigo en siembra directa en Entre Ríos. *In: Congreso argentino de la Ciencia del Suelo (21º, 2008, Potrero de los Funes, SL, Argentina)*. Semiárido; un desafío para la ciencia del suelo. San Luís, Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. pp. 71-77.
6. BARBAZÁN, M.; FERRANDO, M.; ZAMALVIDE, J. 2007. Estado nutricional de *Lotus corniculatus* L. en Uruguay. *Agrociencia (Montevideo)*. 11 (1): 22-34.
7. _____; BAUTES, C.; BEUX, L.; BORDOLI, M.; CANO, J.; ERNST, O.; GARCÍA, A.; GARCÍA, F.; QUINCKE, A. 2010. Fertilización potásica en cultivos bajo siembra directa en Uruguay. *In: Reunión Técnica*. (1ª, 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 1-6.
8. BAUTES, C.; BARBAZAN, M.; BEUX, L. 2009. Fertilización potásica inicial y residual en cultivos de secano en suelos sobre areniscas cretácicas y transicionales. *Informaciones Agronómicas*. 41: 1-8.
9. BEST, S.; LEÓN, L. 2006. Geoestadística. *In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 147-161.

10. BOCCHI, S.; CASTRIGNANÓ, A. 2007. Identification of potential production areas for corn in Italy through multitemporal yield map analysis. *Field Crops Research*. 102 (3): 185–197.
11. BONFIL, D.; MUFRADI, I.; ASIDO, S.; LONG, D. 2008. Precision nitrogen management based on nitrogen removal in rainfed wheat. (en línea). In: International Conference on Precision Agriculture (9th., 2008, Denver, Colorado, Estados Unidos). Implementing precision agriculture in the 21st century. Denver, s.e. s.p. Consultado 3 ene. 2011. Disponible en http://www.agri.gov.il/download/files/ICPA9 ID156_2.pdf
12. BORDOLI, J. 2001. Fertilización de trigo en siembra directa. In: Seminario Técnico (5^o., 2001, Paysandú, Uruguay). Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno. Montevideo, Facultad de Agronomía. p. irr.
13. BRAGACHINI, M.; VON MARTINI, V.; MÉNDEZ, A. 2000. Potencialidad de la información de los mapas de rendimiento en la interpretación del manejo de factores de rendimiento y su respuesta sitio específica en el cultivo de soja. (en línea). Córdoba, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. 12 p. Consultado 18 dic. 2010. Disponible en <http://www.agriculturadeprecision.org/monrend/PotencialidadInformacionMapasRendimiento.pdf>
14. _____.; MENDEZ, F.; SCARAMUZZA, F.; PROIETTI, F. 2006. Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 43-60.
15. _____. 2007. La agricultura de precisión, presente y futuro. In: Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas (7^o., 2007, Manfredi, Córdoba, Argentina). Actualización técnica sobre los avances en agricultura de precisión. Manfredi, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. pp. 13-28.
16. CADENAZZI, M. 2000. A metodologia de analise de dados espaciais aplicada a plantas forrageiras. Tesis Doctorado. Porto Alegre, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 100 p.

17. CAMBARDELLA, C; KARLEN, D. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture*. 1 (1): 5-14.
18. CANO, J.; ERNST, O.; GARCÍA, F. 2007. Respuesta a la fertilización potásica en maíz para grano en suelos del noroeste de Uruguay. *Informaciones Agronómicas*. 36: 9-12.
19. CAPURRO, J.; MONTI, J.; GONZÁLEZ, C. 2008. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre sobre los rendimientos y la calidad comercial del trigo en Cañada de Gómez. *Trigo; para mejorar la producción*. 37: 42-45.
20. 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, Uruguay, INIA. pp. 57-61 (Serie Técnica no. 76).
21. CRESSIE, N. 1993. *Statistics for spatial data*. New York, Willey International. 900 p.
22. DEL CAMPO, B. 2007. Factores que afectan la variabilidad intra chacra del rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 77 p.
23. DÍAZ ZORITA, M.; DUARTE, G.; BARRACO, M. 2004. Effects of chloride fertilization on wheat (*Triticum aestivum* L.) productivity in the sandy pampas region, Argentina. *Agronomy Journal*. 96: 839-844.
24. GARCÍA, F.; PICONE, L. 2004. Fósforo; dinámica y manejo en sistemas de siembra directa. *Informaciones Agronómicas*. 55: 1- 4.
25. _____. 2005. Fertilización de trigo en la región pampeana; algunas consideraciones para la toma de decisiones. *Fertilizar*. abr.: 23-26.
26. GARCÍA, A. 2002. Respuesta a la fertilización con azufre en Trigo Pan. (en línea). INIA. Documentos Online. 3: 1-17. Consultado 19 feb. 2011. Disponible en <http://www.inia.org.uy/publicaciones/documentos/le/pol/2002/strigo.pdf>
27. _____.; QUINCKE, A. 2009. Respuesta a la fertilización con azufre en trigo y cebada. *In*: Jornada de Cultivos de Invierno (2009, La Estanzuela, Mercedes, Uruguay). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 9-12 (Actividades de Difusión no. 566).

28. _____. 2010. Más de 25 años de investigación en manejo de la fertilización en trigo. *In: Jornada Técnica (2010, Mercedes, Uruguay). El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos.* Montevideo, INIA. pp. 19-23 (Actividades de Difusión no. 605).
29. GONZÁLEZ, D.; ALCALDE, S.; ORTIZ J.; CASTILLO, A. 2000. Dinámica de acumulación de potasio por trigo cultivado en diferentes ambientes. *Agrociencia (México).* 34 (1): 1-11.
30. GREGORET, M.; DÍAZ ZORITA, M.; DARDANELLI, J.; BONGIOVANNI, R. 2009. Modelo regional de respuesta de maíz al nitrógeno con variables sitio-específicas en ambientes semiáridos. *Informaciones Agronómicas.* 43 (3): 12-15.
31. GRUPO INFOSTAT. 2010. Manual del usuario. Versión 2010e. Córdoba, Universidad Nacional de Córdoba. 336 p.
32. HERNÁNDEZ, J. s.f. Potasio. Montevideo, Facultad de Agronomía. 35 p.
33. HIRZEL, J. 2004. Fertilización del cultivo. *In: Rojas, C. ed. Manejo tecnológico de trigo.* Chile, INIA La Platina. cap.3, pp. 49-75.
34. HOFFMAN, E.; FAJARDO, M; BAETEN, A; CADENAZZI, M. 2010a. Caracterización de cultivares de trigo 2009. Paysandú, Facultad de Agronomía. 29 p.
35. _____.; PERDOMO, C; ERNST, O; BORDOLI, M; PASTORINI, M; PONS, C; BORGHI, E. 2010b. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas.* 46: 13-18.
36. KANT, S.; KAFKAFI, U. 2000. Absorción de potasio por los cultivos en distintos estadios fisiológicos. (en línea). *In: Internacional Potash Institute Annual Conference (5th., 2000, Rehovot, Israel). Potasio en plantas y animales.* Rehovot, s.e. pp. 263-279. Consultado 19 nov. 2010. Disponible en <http://www.ipipotash.org/udocs/Sesion%20V.pdf>
37. KATSVAIRO, T.; COX, W.; VAN ES, H.; GLOS, M. 2003. Spatial yield response of two corn hybrids at two nitrogen levels. *Agronomy Journal.* 95 (4): 1012-1022.
38. KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. 2000. Spatial variability; correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal.* 92 (1): 75-83.

39. _____.; THELEN, K.; BULLOCK, D.; MILLER, N. 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross correlograms. *Agronomy Journal*. 95 (4): 1132-1139.
40. MALLARINO, A. 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Science Society of America Journal*. 60 (5): 1473-1481.
41. _____.; BERMUDEZ, M.; WITTRY, D.; HINZ, P. 2000. Alternative data managements and interpretations for strip trials harvested with yield monitors. (en línea). In: International Conference on Precision Agriculture (5th, 2000, Bloomington, Minnesota, Estados Unidos). Precision resource conservation and management. Madison, s.e. s.p. Consultado 19 ene. 2011. Disponible en http://extension.agron.iastate.edu/faculty/mallarino/tech_pdf/StripTrialMethods_PrecAgConf_2000.pdf
42. MARTÍNEZ, F.; CORDONE, G. 2000. Avances en el manejo del azufre; novedades en respuesta y diagnóstico en trigo, soja y maíz. In: Simposio Fertilidad (3^o., 2000, Rosario, Argentina). Jornada de actualización técnica para profesionales. Santa Fe, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. pp. 28-30.
43. MASSIGOGEA, J.; MÉNDEZ, A.; VILLAROEL, D. 2009. Mapeo de rendimiento, proteína y exportación de nitrógeno en un lote de cebada cervecera. *Informaciones Agronómicas* 42: 1-4.
44. MAZZILLI, S. 2004. Efecto de la dosis de nitrógeno y fuentes alternativas a la urea sobre la absorción, crecimiento y rendimiento en grano de trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 68 p.
45. MELGAR, R.; GEARHART, M. 2004. Manejo del azufre y fertilizantes azufrados en siembra directa. (en línea). Santa Fe, INTA Rafaela. 5 p. Consultado 21 dic. 2010. Disponible en <http://www.fertilizando.com/articulos/Manejo%20de%20Azufre%20y%20Fertilizantes%20Azufrados%20en%20SD.asp>
46. MORENO, J. 2009. Introducción a la geoestadística y su aplicación. Tesis Licenciatura. Ciudad de México, México. Universidad Autónoma de Chapingo. 151 p.

47. MORÓN, A. 1996. El fósforo en los sistemas productivos. In: Morón, A.; Martino, D.; Sawchik, J. eds. Manejo y fertilidad de suelos. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 37-44 (Serie Técnica no. 76).
48. NUÑEZ, A. 2010. Situación del potasio en la agricultura uruguaya. In: Jornada Técnica (2010, Mercedes, Uruguay). El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Montevideo, INIA. pp. 11-14 (Actividades de Difusión no. 605).
49. OTAÑO, C.; ZARUCKI, I. 2010. Impacto de distintos niveles de fertilidad y atributos de terreno sobre la variabilidad de rendimiento del cultivo de soja a escala de chacra. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 107 p.
50. PLANT, R. 2001. Site-specific management; the application of information technology to crop production. *Computers and Electronics in Agriculture*. 30: 9-29.
51. PRAVIA, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espaciotemporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) Impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis M.Sc. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 102 p.
52. PRYSTUPA, P.; SALVAGIOTTI, F.; FERRARIS, G.; GUTIÉRREZ BOEM, F.; ELISEI, J.; COURETOT, L. 2004. Efecto de la fertilización con fósforo, azufre y potasio en cultivos de maíz en la pampa ondulada. *Informaciones Agronómicas*. 23: 1-4.
53. REUSSI, N.; ECHEVERRÍA, H.; ROZAS, H. 2006. Respuesta del cultivo de trigo al agregado de azufre en el sudeste bonaerense. *Ciencia del Suelo*. 24 (2): 115-122.
54. ROEL, A. 2006a. Análisis de cluster y CART. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds. Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 168-170.
55. _____; TERRA, J. 2006b. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. In: Bongiovanni, R.; Mantovani, E; Best, S.; Roel, A. eds.

Agricultura de precisión; integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Montevideo, PROCISUR/IICA/MERCOSOFT Consultores. pp. 65-80.

56. SAS INSTITUTE. 2001. SAS Users guide; versión 8.0. Cary, NC. 570 p.
57. SAS INSTITUTE. 2008. JMP Users guide; versión 8.0. Cary, NC. 280 p.
58. SAWYER, J.; MALLARINO, A.; KILLORN, R.; BARNHART, S. 2008. A general guide for crop nutrient and limestone recommendations in Iowa. Ames, Iowa, Iowa State University. 19 p. (Extension Publication)
59. SIQUEIRA, G.; VIEIRA, Z.; SOUZA, J.; DAFONTEL, A. 2007. Utilización de herramientas estadísticas y geoestadísticas para optimización del muestreo de propiedades físicas del suelo. In: Giradles, J.; Jiménez, F. eds. Zona no saturada del suelo. Santiago de Chile, s.e. v.8, pp. 173-178.
60. STEEL, R.; TORRIE, J. 1981. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. 2nd. ed. México, Mc Graw-Hill International. 633 p.
61. TERRA, J.; MELO, D.; SAWCHIK, J. 2010a. Atributos edáficos y topográficos relacionados a los patrones de variación de rendimiento de cultivos agrícolas en Uruguay. In: Reunión Técnica (1^a, 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 7-17.
62. _____; PRAVIA, V.; ROEL, A. 2010b. Impacto de la intensidad de uso de suelo y la variación del terreno sobre la productividad del cultivo de soja. In: Reunión Técnica (1^a, 2010, Colonia del Sacramento, Colonia, Uruguay). Dinámica de las propiedades del suelo bajo diferentes usos y manejos. Montevideo, Sociedad Uruguaya de Ciencias del Suelo/International Soil and Tillage Research Organization. pp. 18-27.
63. TORRES, M.; RODRÍGUEZ, M. 2009. Buenas prácticas de manejo de fertilizantes azufrados; propiedades de las fuentes azufradas y su efectividad agronómica. (en línea). In: Simposio de Fertilidad (10^o, 2009, Rosario, Argentina). Mejores prácticas de manejo para una mayor eficiencia en la nutrición de cultivos. Santa Fe, IPNI Cono Sur. s.p. Consultado 21 dic. 2010. Disponible en <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2009/11/30/129493>

64. TYSKO, M.; RODRÍGUEZ, M. 2006. Respuesta de trigo-soja en doble cultivo a la fertilización con azufre elemental pretratado. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 24 (2): 139-146.
65. UNIVERSIDAD (URUGUAY). FACULTAD DE AGRONOMÍA. 1998. Carta Geológica de Uruguay, escala 1:500.000. Montevideo.
66. _____. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE SUELOS Y FERTILIZANTES. 1976. Carta de reconocimiento de Suelos del Uruguay, escala 1:1.000.000. Montevideo.
67. _____. MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. PRENADER. 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Consultado 17 may. 2010. Disponible en <http://www.prenader.gub.uy/coneat>
68. VERHAGEN, J.; BOUMA, J. 1997. Modelling soil variability. In: Rogers, F.; Black, E. eds. *The state of site-specific management for agriculture*. Madison, Wisconsin, ASA/CSSA/SSSA. pp. 55–67. (Miscellaneous Publication)
69. VIVAS, H.; FONTANETTO, H.; ALBRECHT, R.; HOTIAN, J. 2001. Fertilización con fósforo y azufre para la producción de trigo en el Departamento San Jerónimo. (en línea). INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 94: s.p. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://rafaela.inta.gov.ar/publicaciones/trigo2001/misc94_12.htm
70. _____.; _____.; _____.; _____. 2003. Fertilización con nitrógeno y azufre y fuentes azufradas en la producción de trigo. Campaña 2001. (en línea). Santa Fe, INTA Rafaela. 5 p. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/Rafaela/info/documentos/anuarios/anuario2002/a2002_p133.htm
71. _____.; ALBRECHT, R.; HOTIÁN, J. 2004. Siembra directa y fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre en trigo. (en línea). INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 101: 31-38. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/101/trigo2004_n5.pdf
72. _____.; _____.; _____. 2005. Manejo del fósforo y el azufre en una secuencia de cultivos del centro de Santa Fe. Campaña 2003-04. (en línea). INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 103: 27-30.

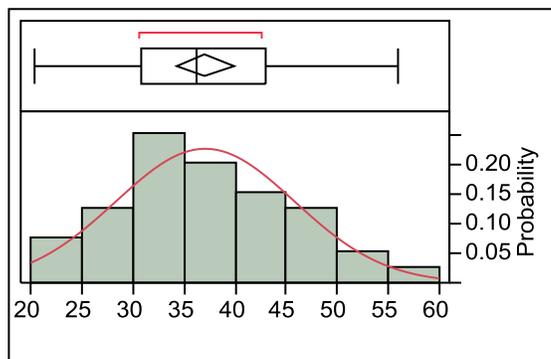
Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/103/trigo2005_27.pdf

73. _____.; _____.; _____.; QUAINO, O. 2007. Relación del Fósforo y del Azufre asociada a la respuesta del doble cultivo trigo/ soja en un suelo del centro de Santa Fe. (en línea). INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 108: 75-83. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/108/misc_108_75.pdf
74. _____.; _____.; VERA CANDIOTI, N. ; HOTIAN, J. 2008. Fertilización combinada de fósforo y azufre en una secuencia de cultivos. Región central de Santa Fe. (en línea). INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 112: 108-119. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/112/misc112_108.pdf
75. _____.; VERA CANDIOTI, N.; ALBRECHT, R.; MARTINS, L.; QUAINO, O.; HOTIÁN, J. 2010. Efecto aditivo de la fertilización con fósforo y azufre sobre trigo en una rotación. (en línea). INTA Rafaela. Publicación Miscelánea. no. 116: 61-67. Consultado 20 dic. 2010. Disponible en http://www.inta.gov.ar/rafaela/info/documentos/miscelaneas/116/misc116_61.pdf
76. VONG, P.; NGUYEN, N.; GUCKERT, A. 2007. Fertilizer sulphur uptake and transformations in soil as affected by plant species and soil type. *European Journal of Agronomy*. 27: 35-43.

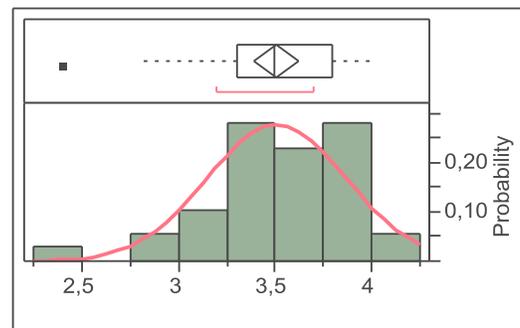
9. ANEXOS

HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA RELATIVA Y CURVA NORMAL AJUSTADA PARA LAS VARIABLES ANALIZADAS

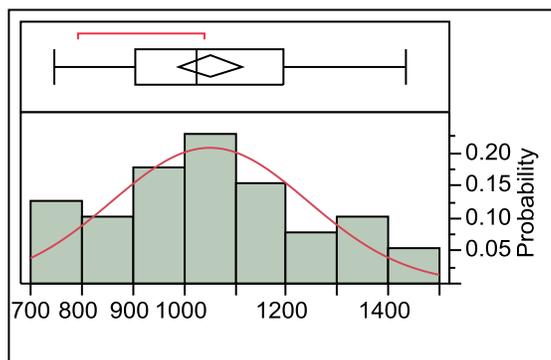
NZ25 (kg)



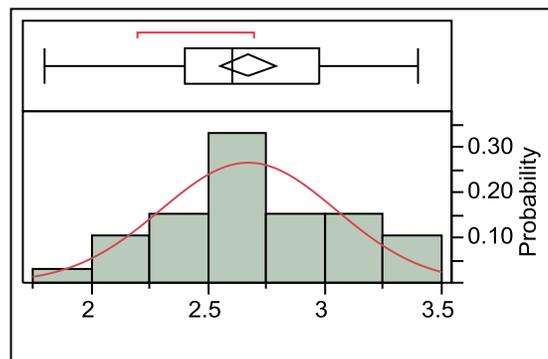
N a Z25%



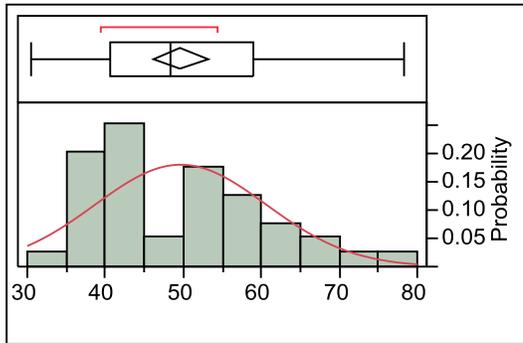
MSZ25



NZ30

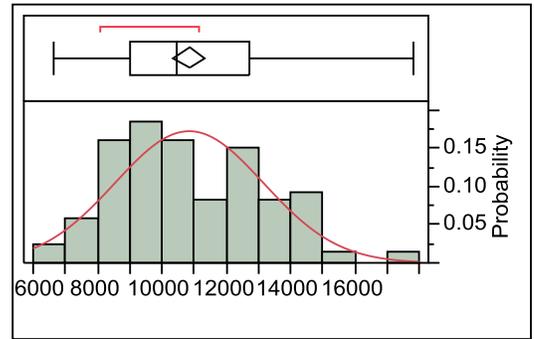


NZ30 (kg)



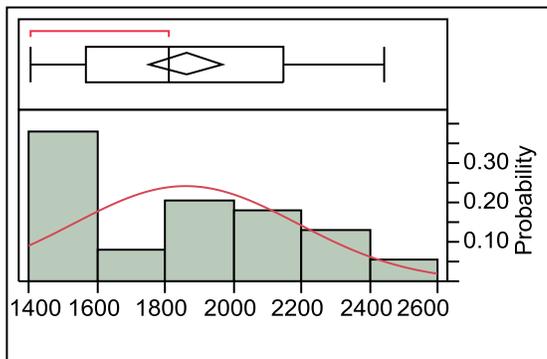
— Normal (49.6705,11.0048)

MSCOS



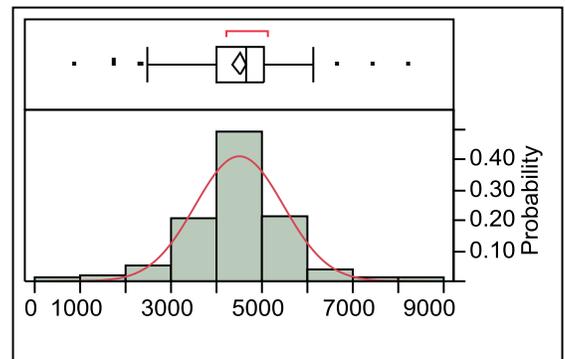
— Normal (10853.7,2309)

MSZ30



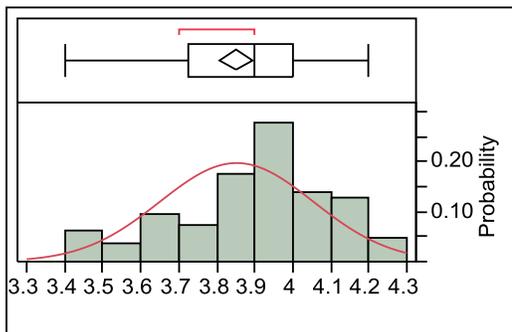
— Normal (1860.95,328.404)

Rendimiento Monitor



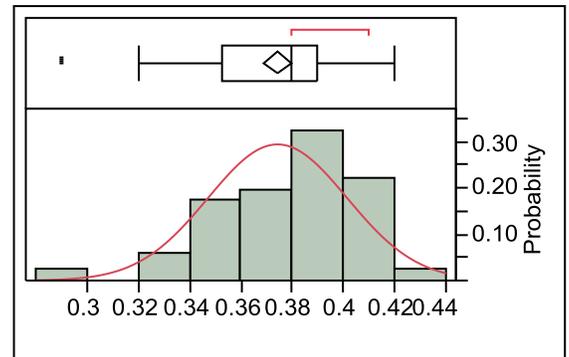
— Normal (4502.33,971.813)

NZ55



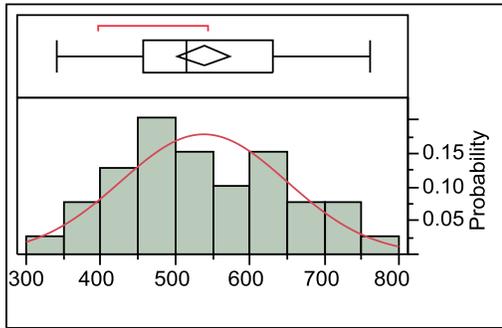
— Normal (3.85227,0.20227)

IC



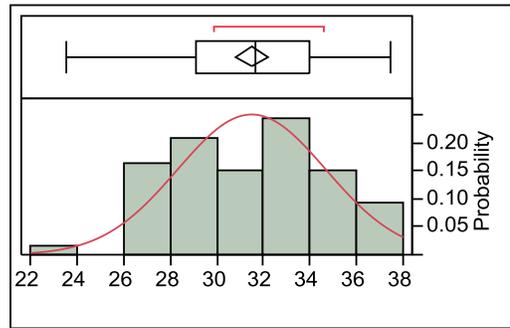
— Normal (0.37432,0.02711)

Macollos/m2



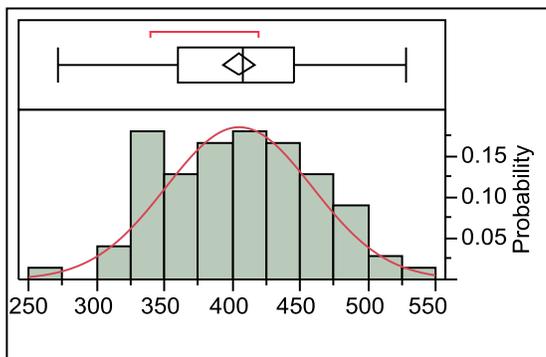
— Normal (538.225,111.476)

PMG



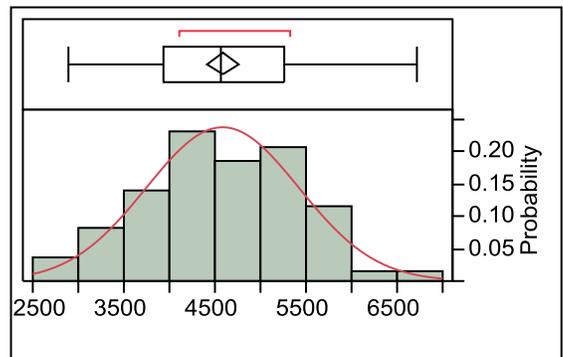
— Normal (31.502,3.18622)

Espigas



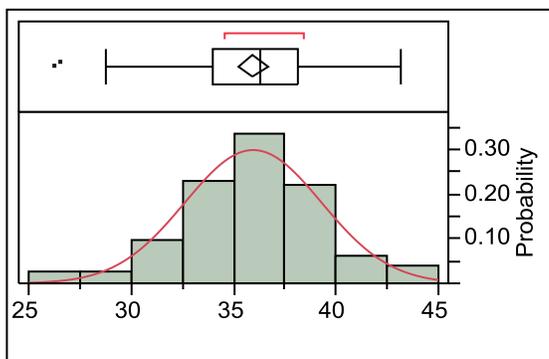
— Normal (405.263,53.8922)

Rendimiento muestreo



— Normal (4583.99,837.863)

Granesp



— Normal (35.9589,3.33292)

SEMIVARIOGRAMAS

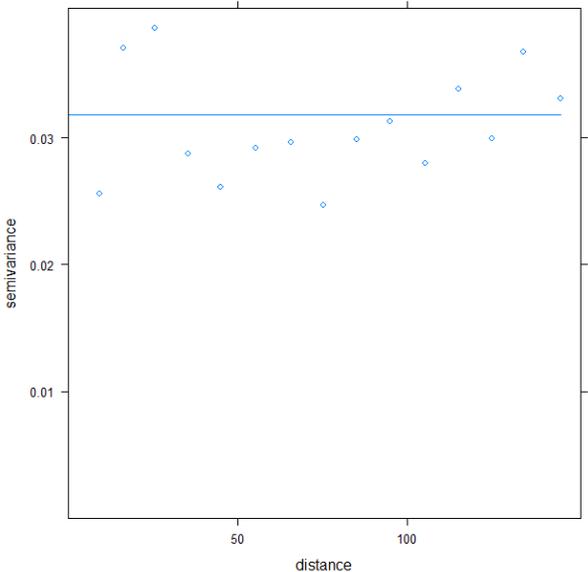


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (lineal) para N(%) en Z55.

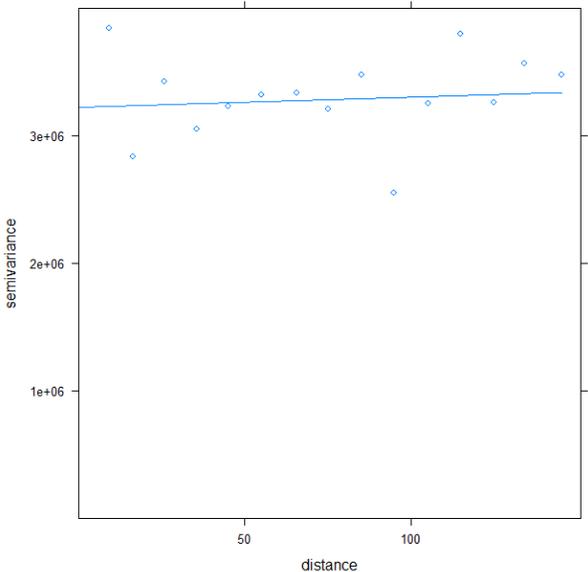


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (lineal) para MS a cosecha.

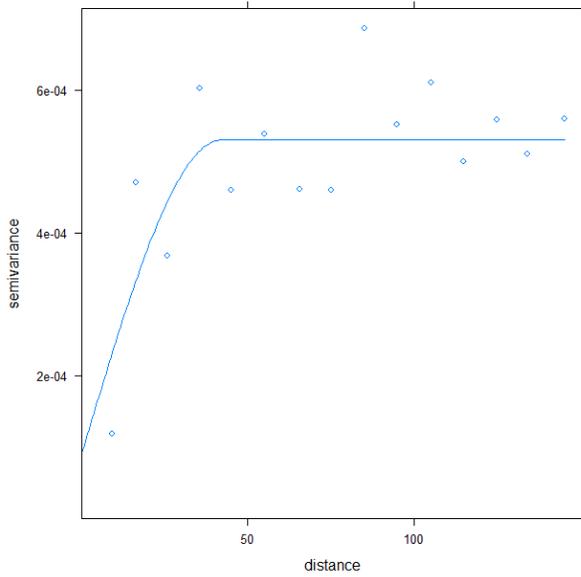


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (esférico) para índice de cosecha.

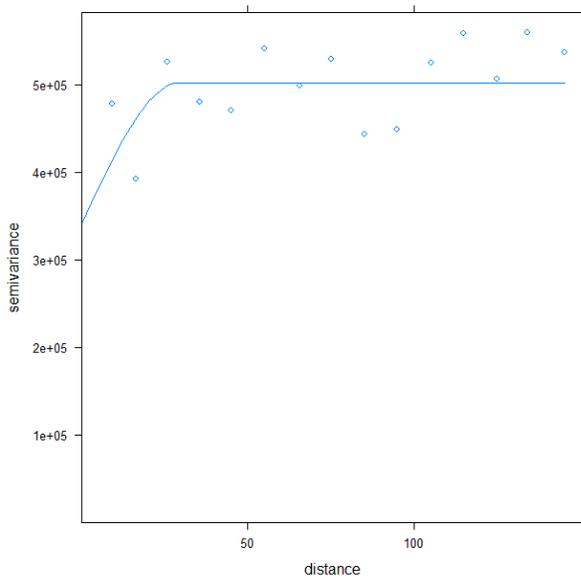


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (esférico) para rendimiento según muestreo.

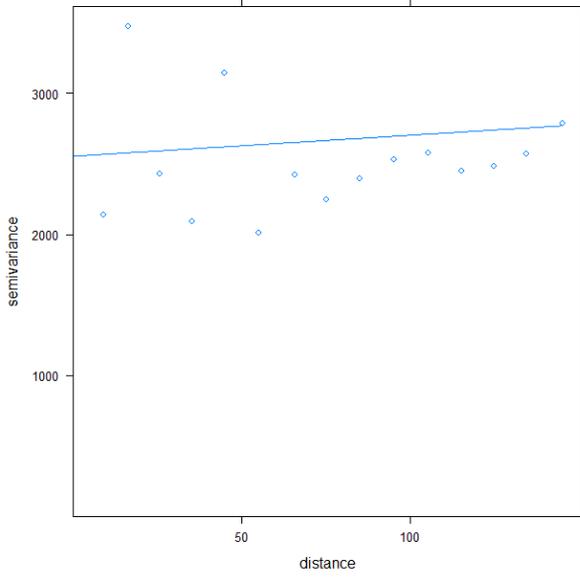


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (lineal) para espigas/m².

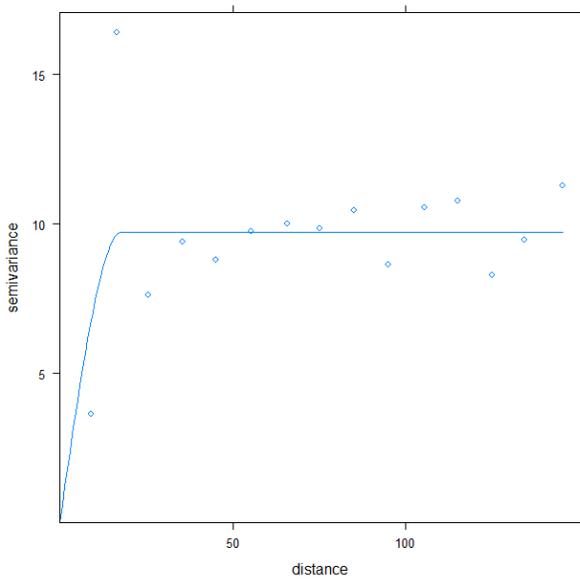


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (lineal) para granos/espiga.

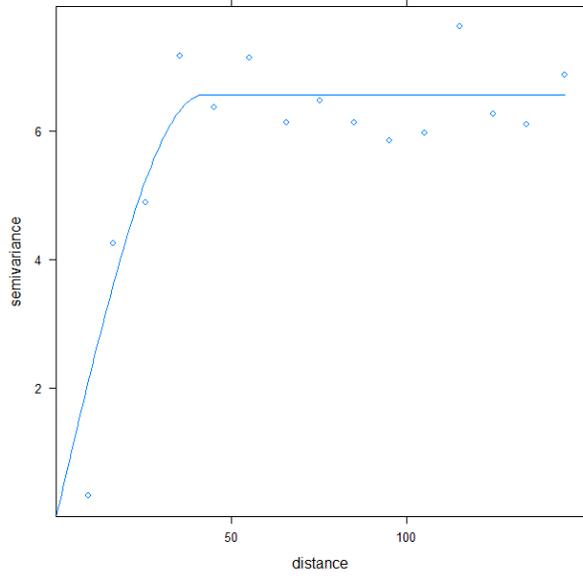


Gráfico: Semivariograma empírico y teórico (esférico) para peso de mil granos.

ANÁLISIS DE CONGLOMERADOS

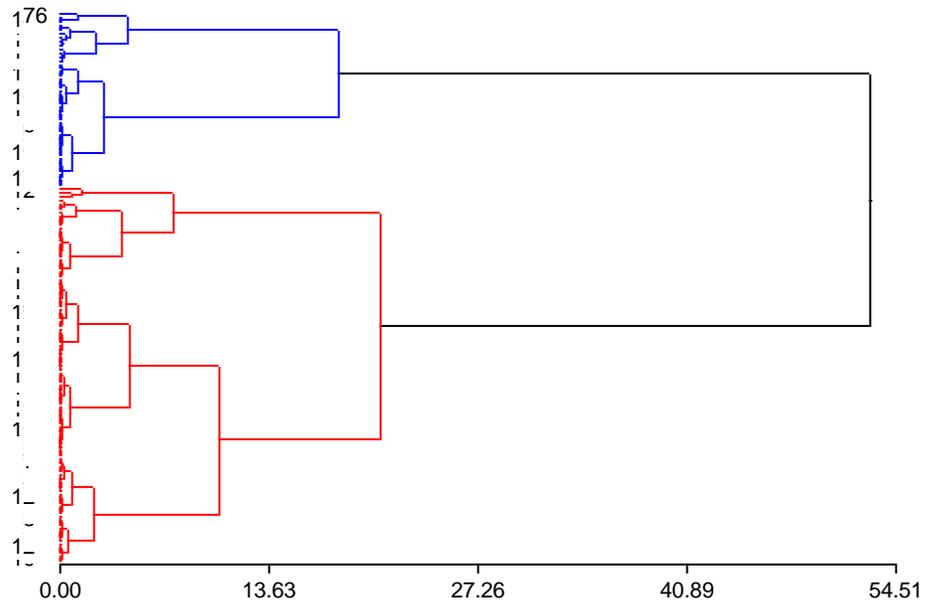


Figura: Análisis de conglomerados (2) para rendimiento en grano.

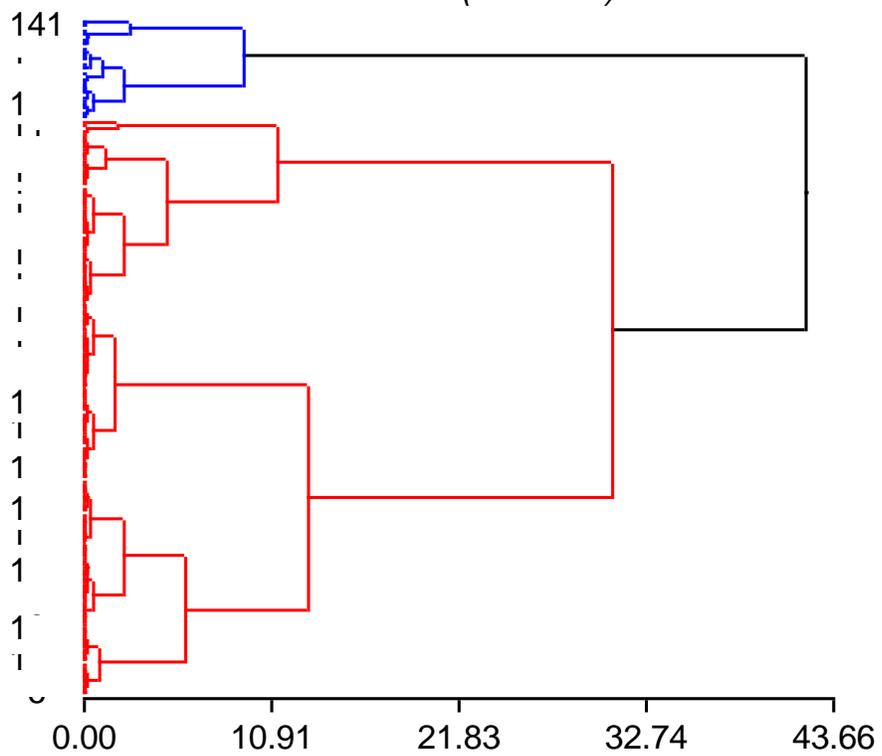


Figura: Análisis de conglomerados (2) para residuos de rendimiento en grano.

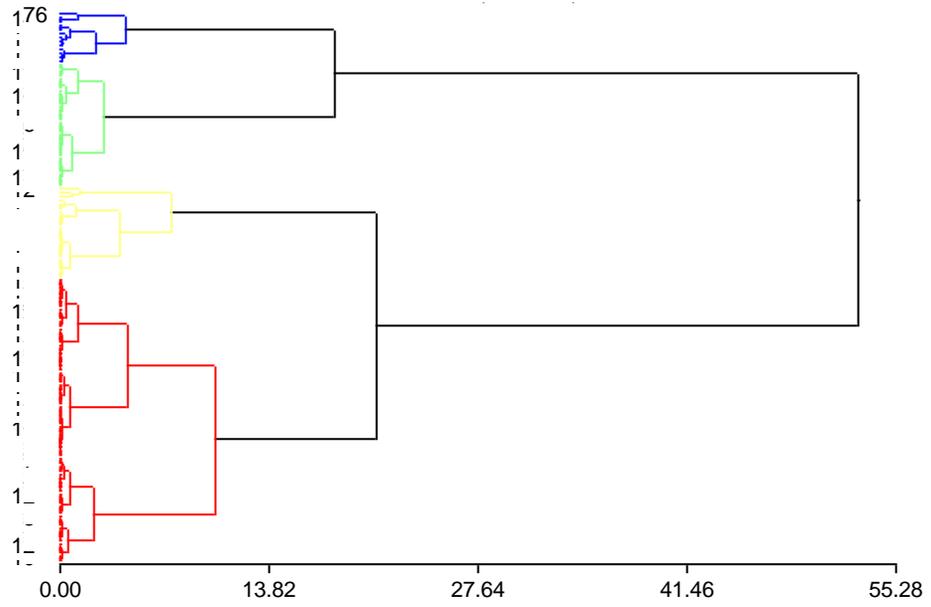


Figura: Análisis de conglomerados (4) para la variable rendimiento en grano.

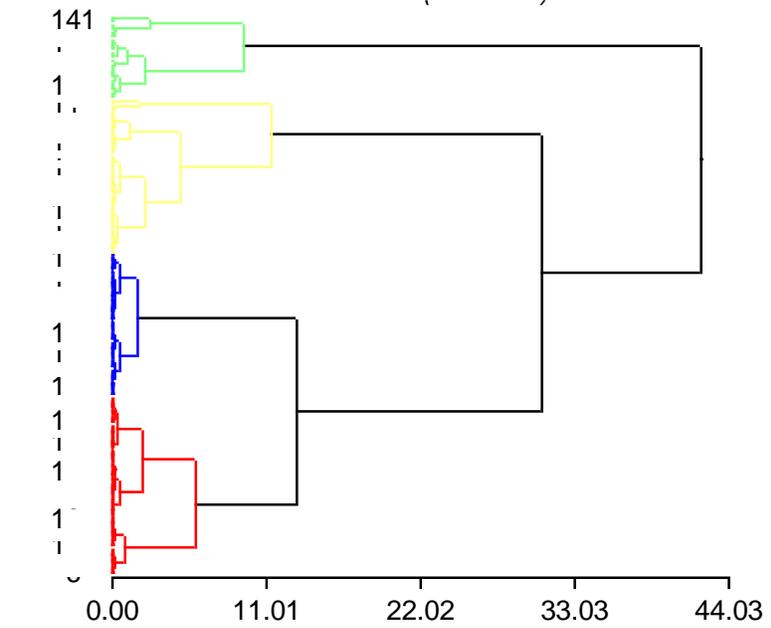


Figura: Análisis de conglomerados (4) para la variable residuos de rendimiento en grano.

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA PRODUCCIÓN DE BIOMASA Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO

MS a Z25 (kg/ha)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	35	5.09	0.0024

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT P		977.79	56.8773	35	17.19	<.0001
TRAT PK		1169.66	56.8773	35	20.56	<.0001
TRAT PKS		1180.39	56.8773	35	20.75	<.0001
TRAT PS		1047.77	56.8773	35	18.42	<.0001
TRAT Testigo		878.57	56.8773	35	15.45	<.0001

N a Z25 (%)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	35	3.33	0.0206

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT P		3.6625	0.1140	35	32.12	<.0001
TRAT PK		3.7000	0.1140	35	32.45	<.0001
TRAT PKS		3.4250	0.1140	35	30.03	<.0001
TRAT PS		3.5625	0.1140	35	31.24	<.0001
TRAT Testigo		3.1875	0.1140	35	27.95	<.0001

N a Z25 (kg/ha)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	35	5.04	0.0026

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	36.0500	2.6007	35	13.86	<.0001
TRAT	PK	43.4250	2.6007	35	16.70	<.0001
TRAT	PKS	40.6125	2.6007	35	15.62	<.0001
TRAT	PS	37.3500	2.6007	35	14.36	<.0001
TRAT	Testigo	28.0000	2.6007	35	10.77	<.0001

MS a Z30 (kg/ha)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	41	9.88	<.0001

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	1701.73	84.6453	41	20.10	<.0001
TRAT	PK	2046.48	84.6453	41	24.18	<.0001
TRAT	PKS	2168.90	72.1857	41	30.05	<.0001
TRAT	PS	1695.06	75.7090	41	22.39	<.0001
TRAT	testigo	1632.48	79.8043	41	20.46	<.0001

N a Z30 (%)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	40	4.14	0.0067

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT P		2.7625	0.1175	40	23.50	<.0001
TRAT PK		2.4375	0.1175	40	20.74	<.0001
TRAT PKS		2.7400	0.1051	40	26.06	<.0001
TRAT PS		2.9400	0.1051	40	27.96	<.0001
TRAT Testigo		2.4222	0.1108	40	21.86	<.0001

N a Z30 (kg/ha)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	40	5.38	0.0015

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT P		47.3875	3.4123	40	13.89	<.0001
TRAT PK		50.1000	3.4123	40	14.68	<.0001
TRAT PKS		59.8300	3.0520	40	19.60	<.0001
TRAT PS		49.8000	3.0520	40	16.32	<.0001
TRAT testigo		39.5000	3.2171	40	12.28	<.0001

N a Z55 (%)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	3.14	0.0187

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	3.9188	0.04825	83	81.21	<.0001
TRAT	PK	3.9625	0.04825	83	82.12	<.0001
TRAT	PKS	3.8438	0.04825	83	79.66	<.0001
TRAT	PS	3.8125	0.04825	83	79.01	<.0001
TRAT	Testigo	3.7667	0.03940	83	95.60	<.0001

MS a cosecha (kg/ha)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	10.52	<.0001

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	10487	481.45	83	21.78	<.0001
TRAT	PK	12515	481.45	83	25.99	<.0001
TRAT	PKS	12617	481.45	83	26.21	<.0001
TRAT	PS	9674.50	481.45	83	20.09	<.0001
TRAT	testigo	9600.87	393.10	83	24.42	<.0001

Análisis de varianza para rendimiento y componentes del rendimiento

Rendimiento (kg/ha)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	7.41	<.0001

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	4650.44	184.10	83	25.26	<.0001
TRAT	PK	5226.75	184.10	83	28.39	<.0001
TRAT	PKS	4943.06	184.10	83	26.85	<.0001
TRAT	PS	4186.56	184.10	83	22.74	<.0001
TRAT	Testigo	4136.83	150.31	83	27.52	<.0001

IC de MS

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	8.06	<.0001

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	0.3913	0.005889	83	66.43	<.0001
TRAT	PK	0.3694	0.005889	83	62.72	<.0001
TRAT	PKS	0.3475	0.005889	83	59.00	<.0001
TRAT	PS	0.3806	0.005889	83	64.63	<.0001
TRAT	testigo	0.3800	0.004809	83	79.02	<.0001

Macollos/m²

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	35	2.87	0.0374

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	479.25	36.1092	35	13.27	<.0001
TRAT	PK	573.63	36.1092	35	15.89	<.0001
TRAT	PKS	591.63	36.1092	35	16.38	<.0001
TRAT	PS	582.13	36.1092	35	16.12	<.0001
TRAT	Testigo	464.50	36.1092	35	12.86	<.0001

Espigas/m²

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	4.25	0.0035

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	405.81	12.5654	83	32.30	<.0001
TRAT	PK	408.81	12.5654	83	32.53	<.0001
TRAT	PKS	430.13	12.5654	83	34.23	<.0001
TRAT	PS	425.81	12.5654	83	33.89	<.0001
TRAT	Testigo	372.29	10.2596	83	36.29	<.0001

Granos/espiga

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	1.84	0.1289

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	36.1750	0.8168	83	44.29	<.0001
TRAT	PK	37.5313	0.8168	83	45.95	<.0001
TRAT	PKS	35.8813	0.8168	83	43.93	<.0001
TRAT	PS	34.4188	0.8168	83	42.14	<.0001
TRAT	Testigo	35.8625	0.6669	83	53.77	<.0001

PMG (g)

Type 3 Tests of Fixed Effects

Effect	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
TRAT	4	83	8.90	<.0001

Least Squares Means

Effect	TRAT	Estimate	Standard Error	DF	t Value	Pr > t
TRAT	P	31.5731	0.6822	83	46.28	<.0001
TRAT	PK	34.1881	0.6822	83	50.11	<.0001
TRAT	PKS	32.1556	0.6822	83	47.13	<.0001
TRAT	PS	28.5369	0.6822	83	41.83	<.0001
TRAT	Testigo	31.2050	0.5570	83	56.02	<.0001

Cuadro: Análisis de correlaciones de Pearson para variables registradas en muestreos

Variable by Variable	Correlation	Count	Lower 95%	Upper 95%	Signif Prob
MSCOS NZ55	0.2587	88	0.0521	0.4441	0.0150*
IC NZ55	-0.0689	88	-0.2744	0.1426	0.5237
IC MScos	-0.5476	88	-0.6791	-0.3820	<.0001*
Rend NZ55	0.2672	88	0.0612	0.4514	0.0118*
Rend MScos	0.9295	88	0.8941	0.9533	<.0001*
Rend IC	-0.2111	88	-0.4027	-0.0017	0.0483*
Espigas NZ55	0.0457	88	-0.1654	0.2527	0.6728
Espigas MScos	0.3885	88	0.1949	0.5529	0.0002*
Espigas IC	0.0591	88	-0.1522	0.2653	0.5844
Espigas Rend	0.4776	88	0.2980	0.6246	<.0001*
Granesp NZ55	0.2267	88	0.0181	0.4163	0.0337*
Granesp MScos	0.5468	88	0.3810	0.6785	<.0001*
Granesp IC	-0.1370	88	-0.3368	0.0746	0.2031
Granesp Rend	0.5799	88	0.4216	0.7038	<.0001*
Granesp Espigas	-0.2752	88	-0.4582	-0.0698	0.0095*
PMG NZ55	0.2140	88	0.0047	0.4053	0.0453*
PMG MScos	0.6602	88	0.5231	0.7640	<.0001*
PMG IC	-0.3421	88	-0.5147	-0.1429	0.0011*
PMG Rend	0.6379	88	0.4946	0.7475	<.0001*
PMG Espigas	-0.2329	88	-0.4218	-0.0247	0.0290*
PMG Granesp	0.5280	88	0.3582	0.6640	<.0001*

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RENDIMIENTO SEGÚN TRATAMIENTO Y AMBIENTE (MONITOR DE RENDIMIENTO)

Tratamiento

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	Tratamiento
Modelo	16040635	4	4010158.78	4.69	0.0014	
	16040635	4	4010158.78	4.69	0.0014	
Error	116178364	136	854252.68			
Total	132218999	140				

Ambiente

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8767333	1	8767333	9.87	0.0021
Ambiente	8767333	1	8767333	9.87	0.0021
Error	123451665	139	888141		
Total	132218999	140			

Interacción tratamiento por ambiente

Parcelas divididas

The GLM Procedure

Dependent Variable: Rendimiento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	46	59762169.6	1299177.6	1.69	0.0168
Error	94	72456829.7	770817.3		
Corrected Total	140	132218999.3			

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ambiente	1	6121944	6121944.85	7.94	0.0059
ambiente*obs	37	29705106	802840.71	1.04	0.4254
trat	4	8281638	2070409.62	2.69	0.0360
ambiente*trat	4	4346240	1086560.17	1.41	0.2368

Factorial

The GLM Procedure

Dependent Variable: Rendimiento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	9	30057063	3339673.7	4.28	<.0001
Error	131	102161936	779862.1		
Corrected Total	140	132218999			

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
ambiente	1	4917174	4917174.91	6.31	0.0133
trat	4	11937205	2984301.31	3.83	0.0056
ambiente*trat	4	7024055	1756013.86	2.25	0.0669

Serie de experimentos

Ambiente A

The GLM Procedure

Dependent Variable: Rendimiento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	3784433	946108.38	2.21	0.0769
Error	66	28205829	427361.05		
Corrected Total	70	31990262			

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trat	4	3784433	946108.378	2.21	0.0769

Ambiente B

The GLM Procedure

Dependent Variable: Rendimiento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	17505296	4376324.07	3.85	0.0072
Error	65	73956106	1137786.26		
Corrected Total	69	91461403			

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trat	4	17505296	4376324.07	3.85	0.0072

Serie de experimentos con contraste

Ambiente A

The GLM Procedure

Dependent Variable: Rendimiento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	3784433	946108.38	2.21	0.0769
Error	66	28205829	427361.05		
Corrected Total	70	31990262			

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trat	4	3784433	946108.378	2.21	0.0769

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
testigo vs fertilizado	1	284743	284743.9463	0.67	0.4173

Ambiente B

The GLM Procedure

Dependent Variable: Rendimiento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	4	17505296	4376324.07	3.85	0.0072
Error	65	73956106	1137786.26		
Corrected Total	69	91461403			

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
trat	4	17505296	4376324.07	3.85	0.0072

Contrast	DF	Contrast SS	Mean Square	F Value	Pr > F
testigo vs fertilizado	1	17234003	17234003.29	15.15	0.0002