

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RIO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

“Trabajo Final presentado
para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo”

**Respuesta del rendimiento en maíces tardíos a la dosificación de
fósforo por zonas de manejo**

Alumno: Naville, Rafael Alejandro

DNI: 32.941.641

Director: Ing. Agr. Dr. Espósito, Gabriel

Co-director: Ing. Agr. MSc. Balboa, Guillermo

Río Cuarto - Córdoba

Abril de 2016

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

**Respuesta del rendimiento en maíces tardíos a la dosificación de
fósforo por zonas de manejo**

Alumno: Naville, Rafael Alejandro

DNI: 32.941.641

Director: Ing. Agr. Dr. Esposito, Gabriel Pablo

Co-Director: Ing. Agr. MSc. Balboa, Guillermo

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

Ing. Agr. MSc. Bongiovanni, Marcos. _____

Ing. Agr. Morla, Federico. _____

Ing. Agr. MSc. Dr. Esposito, Gabriel Pablo _____

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Aprobado por Secretaría Académica: ____/____/____

Secretario Académico

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	III
ÍNDICE DE TABLAS	IV
ÍNDICE DE FIGURAS	V
RESUMEN	VI
SUMMARY	VII
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. HIPÓTESIS.....	12
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo general:.....	12
1.2.2. Objetivos específicos:.....	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1 Sitios Experimentales.....	13
2.2 Clima.....	14
2.3 Suelos.....	14
2.4 Muestreo de suelo.....	15
2.5 Cultivo.....	15
2.6 Diseño experimental y tratamiento.....	15
2.7 Mediciones a cosecha.....	17
3.8 Análisis estadístico.....	18
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
3.1 Zonas de manejo.....	22
3.2 Indicadores químicos del suelo.....	24
3.3 Rendimiento.....	25
3.3.1 Mapas de Rendimiento.....	25
3.3.2 Elección del modelo estadístico.....	26
3.3.3 Relación entre fertilización fosforada y rendimiento de maíz.....	29
3.3.4 Optimización agronómica y económica de la fertilización fosforada.....	31
4. CONCLUSIONES	33
5. BIBLIOGRAFÍA	34
6. ANEXOS	40

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosis de fósforo evaluados en los distintos tratamientos en ambos ensayos.....	15
Tabla 2. Rendimiento (kg ha ⁻¹) promedios por zonas de manejos de las campañas 2007-2009-2010 y 2011 para Cuatro Vientos.....	23
Tabla 3. Rendimiento promedios por zonas de manejos de las campañas 2009-2010-2011 y 2012 para Chaján.....	24
Tabla 4. Resultado de análisis de suelo realizados a la siembra y cosecha por zonas de manejo en Chaján.....	25
Tabla 5. Resultado de análisis de suelo realizados a la siembra y cosecha por zonas de manejo en Cuatro Vientos.....	25
Tabla 6. Análisis de regresión espacial del rendimiento (kg ha-1) en función de dosis de fertilizantes y Zonas de manejo, para ambos modelos en Cuatro Vientos.....	27
Tabla 7. Análisis de regresión espacial del rendimiento (kg ha-1) en función de dosis de fertilizantes y Zonas de manejo, para ambos modelos en Chaján.....	28
Tabla 8. Función de respuesta del maíz al P, para cada sitio del ensayo.....	29
Tabla 9. Dosis óptima agronómica (DOA) y dosis óptima económica (DOE) de P para dos sitios experimentales (Córdoba).....	31
Tabla 10. Diferencia en pesos por hectárea entre la dosis de P mas frecuente utilizado por el productor del sur de Córdoba y la dosis óptima económica (DOE) de P para dos sitios experimentales (Córdoba).....	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de la Provincia de Córdoba e Imagen de la zona de estudio, con localización de los sitio del ensayo (Google Earth).....	13
Figura 2. Vista de los lotes de ensayo. Izquierda, Cuatro Vientos (relieve ondulado). Derecha, Chaján, (relieve plano) (Google Earth).....	13
Figura 3. Precipitaciones en mm decádicas de la campaña 2012/2013 en Azul y en Rojo promedio para el periodo 2002-2013.....	14
Figura 4. Matriz de ponderadores espaciales “Queen”(Bongiovanni, 2002 b)	19
Figura 5. Índices NCE (izquierda) y FPI (derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar para Cuatro Vientos.....	22
Figura 6. Índices NCE (izquierda) y FPI (derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar para Chaján.....	22
Figura 7. Mapas de Rendimiento (izquierda) y Zonificación mediante MZA (derecha) de Cuatro Vientos.....	23
Figura 8. Mapas de Rendimiento (izquierda) y Zonificación mediante MZA (derecha) de Chaján.....	23
Figura 9. Mapa de zonas, Rojo: Baja Producción; Verde: Alta Producción. Mapa de rendimiento de los ensayo en grilla superpuesta al mapa de zonas. Izquierda: Cuatro Vientos. Derecha: Chaján.....	26
Figura 10. Rendimiento del maíz, en función de distintas dosis de P aplicada a la siembra de Cuatro Viento.....	30
Figura 11. Rendimiento del maíz, en función de distintas dosis de P aplicada a la siembra de Chaján	30

RESUMEN

En los últimos años se ha incrementado el interés por la agricultura de precisión y la siembra de maíz tardío, no siendo ajeno a ello el deterioro del suelo a causa de la fertilización deficiente, cobrando mayor importancia en el caso del fósforo (P). Por esto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la conveniencia agronómica y económica de aplicar en forma variable P en maíz tardío, según zonas de manejo (ZM) intra lote. Para ello se realizaron dos ensayos a campo con un diseño en franja cruzando ZM en dos localidades. Los ensayos consistieron en siembra de maíz tardío con tratamientos de dosis creciente de P a la siembra. Se realizaron muestras de suelo a la siembra y cosecha. Los tratamientos se cosecharon con maquinas equipadas con monitor de rendimiento georeferenciados, lo que posibilitó realizar un análisis estadístico considerando la estructura espacial de los datos. Se zonificaron los lotes de ambas localidades encontrando en promedio 21,4% de diferencia de rendimiento entre ZM. El P extractable analizado mostro un incremento entre la siembra y la cosecha, explicado posiblemente por la aplicación de fertilizante y por la fecha de muestreo. Para los experimentos realizados no se encontraron diferencia estadística entre las ZM pero se observó respuesta a la aplicación de P, variando ésta en función de la localidad. El análisis económico realizado para cada lote indicó como dosis optima económica de fosforo (DOEP) 0 y 25,5 kg ha⁻¹ de P, respectivamente. Se concluye que la respuesta a la fertilización de maíces tardíos con P no varió entre ZM de un mismo lote, sin embargo sí difirió entre lotes. Por otro lado la combinación de dosis altas de P en banda con niveles muy bajos de zinc pueden limitar la respuesta al macronutriente.

Palabras clave: Fósforo, Zona de Manejo, Agricultura de Precisión.

SUMMARY

Within recent years, there has been an increasing interest of farm management and late corn planting, which have been partly responsible for soil depletion due to fertilizers deficiency, particularly in the case of phosphorous (P) which is more severe. Due to this situation, the main aim of this thesis was to evaluate if split P dressing was economically and agriculturally efficient in late corn, according to management zone (ZM) lots. Therefore, two strip cropping trials, alternating ZM, were held in two localities. The trials involved late corn planting that were treated with increasing P dosages. Soil samples of planting and harvest were done. They were harvested with farm machinery equipped with georeferenced performance monitors that allowed us to do a statistical analysis considering the spatial structure of the data. The lots of the localities were divided into zones and it was found 21.4% of differences between the ZM performances, on average. The soil analysis showed a zinc deficiency. A P sample was taken and it showed that there was an increment between the planting and the harvest, maybe this was due to the application of fertilizers and the date of the sample. The research showed no differences between ZM but it revealed a response to P application, which varied depending on the localities. For each lot, the economic analysis indicates that the correct P dosage (DOEP) is 0 and 25.5 kg ha⁻¹ of P, respectively. To conclude, the response of late corn fertilization with P did not vary between the management zone of the same lot, however, it did vary between different lots. Moreover, the combination of high P dosages in banded with low zinc levels can limit the response of the macro-nutrient.

Key words: Phosphorous, Farm management, Precision Agriculture.

1. INTRODUCCIÓN.

Maíz, arroz y trigo, son los cultivos más abundantes en el mundo, pero el maíz es el primero en cuanto a volumen. Desde hace cincuenta años, la extensión y producción del grano mesoamericano ha ido en aumento, convirtiéndose así en el grano más importante del planeta (COMAIZ, 2013).

Este cultivo es el insumo clave de una creciente variedad de industrias, que abarcan desde su uso como alimento humano y forraje de las producciones de carne o leche, hasta su procesamiento industrial en plantas de alta complejidad mecánica, química o biológica, cuyo producto final es una bebida, un alimento o un biocombustible. La cadena del maíz ocupa un lugar prioritario en el desarrollo de varios países del mundo debido a su capacidad de generación de empleo, inversión, desarrollo regional y a las innumerables oportunidades de crecimiento y progreso que ofrece (MAIZAR, 2006).

En la última década, en Argentina se han sembrado entre 2,5 y 4 millones de hectáreas de maíz con una producción total entre 12-19 millones de toneladas, ubicándose actualmente en el cuarto lugar en la producción mundial, luego de Estados Unidos, China y Brasil (FAO, 2011). La región de cultivo se extiende desde el NOA y NEA hasta el Sur de la Región Pampeana, existiendo a lo largo del país, distintos sistemas productivos y distintas tecnologías para su producción.

En la campaña 2011/2012 se registró una superficie cultivada de este cereal de 5.000.330 ha, de las cuales se cosecharon 3.696.300 ha, con una producción total de 20.955.117 t y un rendimiento promedio de 5.669 kg ha⁻¹. Por su parte, en la provincia de Córdoba, para el mismo ciclo productivo, se registró una superficie cultivada de 1.272.000 ha (886.100 ha cosechadas), de las cuales se dividieron en partes iguales siembras tempranas y tardías (Bolsa de Cereales, 2014), logrando una producción total de 4.761.380 de toneladas y un rendimiento promedio de 5.467 kg ha⁻¹ (SIIA, 2013). Se destaca además que el Departamento Río Cuarto es el de mayor área sembrada con maíz dentro de la Provincia de Córdoba, siendo en la actualidad el núcleo maicero provincial.

En la región Pampeana, la principal productora en los últimos cinco años, pueden distinguirse al menos dos fechas de siembra diferentes. Por un lado, la fecha tradicional de producción que usualmente se denomina “Maíz temprano”, donde el cultivo se siembra hacia fines del invierno-inicio de primavera. Por otro lado, el “Maíz tardío” en el que el cultivo se siembra a fin de primavera-inicio de verano. Además de estas alternativas, es posible ubicar al maíz como cultivo de segunda ocupación, luego de un cultivo de cosecha fina, maíz usualmente denominado como “maíz de segunda” (Bert y Satorre, 2012).

Los dos fechas de siembra empleadas en maíz exploran diferentes ambientes, ya sea por ubicar sus etapas fenológicas bajo distintas condiciones climáticas o por implantarse sobre condiciones de estado del suelo diferentes (ej. maíz de segunda). Así, cada fecha presenta ventajas y desventajas que se manifiestan en distintos rendimientos (BOLSA DE CEREALES, 2014).

Paralelamente al cambio en la fecha de siembra, cabe señalar que la región pampeana ha sufrido un progresivo deterioro en la fertilidad de sus suelos a lo largo de su historia agrícola. Para los rendimientos obtenidos, y de acuerdo con la extracción realizada por los cultivos de grano (García, 2000), el balance de nutrientes en términos físicos y económicos ha sido y es claramente negativo.

Este deterioro adquiere singular importancia en el caso del fósforo (P), ya que prácticamente la fertilización es su única vía de entrada al sistema (Vázquez, 2002). Adicionalmente, es un nutriente de elevada residualidad (Berardo, 2003), y baja eficiencia de recuperación cuando es agregado vía fertilización (Gutiérrez Boem *et al.*, 2002).

El fósforo es uno de los 17 nutrientes considerados esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Marschner, 1995). Junto con el nitrógeno (N), potasio (K), azufre (S), calcio (Ca) y magnesio (Mg) conforman el grupo de macro y meso nutrientes por las cantidades requeridas y la frecuencia con que se encuentran en cantidades deficientes para los cultivos (Ferraris, 2010).

Según Marschner (1995), las principales funciones del fósforo en la planta son:

- Transferencia y almacenaje de energía: constituyentes del ATP y otros esteres fosfatados.
- Constituyente de ácidos nucleicos ADN y ARN, transferencia de características genéticas.
- Constituyente de fosfolípidos de membranas celulares.
- Transporte y absorción de nutrientes.

Para lograr una alta eficiencia en el uso de la radiación y del agua, la cantidad de los nutrientes no provista por el suelo, debería ser cubierta por la fertilización. Por este motivo, la demanda de nutrientes del cultivo debe relacionarse directamente con el potencial de rendimiento del ambiente. Los nutrientes que con más frecuencia presentan deficiencias en los sistemas de agricultura continua de Argentina son el nitrógeno, el fósforo y el azufre, los cuales deben ser aplicados según un adecuado diagnóstico evaluado regionalmente (García, 2005).

Una de las formas de evaluar la correcta utilización de los fertilizantes es a través del estudio de las eficiencias de uso de los mismos. En este sentido, el manejo del cultivo y de la práctica de la fertilización tienen un importante efecto sobre la eficiencia de recuperación de

nutrientes, definiéndose esta, como la relación entre nutrientes absorbidos por el cultivo y los nutrientes disponibles (Cassman *et al.*, 2003; Doberman, 2007).

La eficiencia de recuperación tiende a disminuir con el incremento en su disponibilidad y cuando es mayor su oferta en relación con la demanda de los cultivos (Cassman *et al.*, 2002; Barbieri *et al.*, 2008). Por lo tanto, es importante considerar la importancia del diagnóstico, mediante análisis de suelo y de tejidos vegetales, para evaluar la disponibilidad de nutrientes y los requerimientos de fertilización.

La respuesta de los cultivos a la fertilización fosforada depende del nivel de P disponible en el suelo, pero también es afectada por otros factores del suelo, del cultivo y del manejo del fertilizante. Entre los factores del suelo, se destacan la textura, la temperatura, el contenido de materia orgánica y el pH; mientras que entre los del cultivo deben mencionarse los requerimientos y el nivel de rendimiento (García, 2003).

Las propiedades físicas y químicas del suelo pueden producir variabilidad tanto en rendimiento como en el P disponible para la planta, afectando la cantidad de P total y la fracción disponible para el cultivo (Mulla y Schepers, 1997).

Los suelos de la región pampeana presentan diferencias muy marcadas en cuanto a sus propiedades físicas y químicas (Alesso *et al.*, 2012). Por esta razón, se considera que para ser eficientes en el manejo de los recursos y producir a gran escala, es necesario caracterizar zonas de manejo (ZM) dentro de un lote o un establecimiento. La delimitación de una ZM consiste en dividir el lote en subunidades homogéneas de suelo sobre la base de características que sean estables en el tiempo (Roel y Terra, 2006).

Al momento de considerar la variabilidad espacial de los suelos, se destaca que la agricultura de precisión (AP) puede contribuir en varias formas a la sustentabilidad de la agricultura, confirmando la idea intuitiva de que la AP reduce la carga de agroquímicos sobre el ambiente, aplicando fertilizantes y productos fitosanitarios solamente donde y cuando se los necesita. Los beneficios provienen de un menor uso de insumos y consecuentemente, de una menor contaminación ambiental (Bongiovanni, 2001).

La AP y el manejo de sitio-específico proveen una oportunidad para mejorar el manejo del nitrógeno y fósforo en la agricultura logrando así una mayor eficiencia. El éxito del uso de la agricultura de precisión se basa en la habilidad de identificar áreas dentro de un lote que tengan probabilidad de respuesta diferencial a la aplicación de fertilizantes (Bongiovanni, 2002).

Para caracterizar correctamente la variabilidad espacial de la oferta nutricional, es necesario un intenso muestreo de suelos en cada lote de producción. Se han propuesto diversas técnicas de muestreo a los efectos de confeccionar mapas de oferta nutricional. Bermúdez (2011) señala al respecto que para describir la variabilidad espacial de N y P, a escala de lote, se recomienda realizar un muestreo dirigido por ambientes. No obstante, la

aplicación de P tradicionalmente se realiza con una dosis única y uniforme en todo el lote. Considerando la muy alta variabilidad de P que se puede encontrar en la mayoría de los suelos agrícolas, las aplicaciones uniformes pueden tender a sobre-fertilizar algunas áreas y sub-fertilizar otras.

En gramíneas, como es el caso del maíz, la fertilización es habitualmente realizada con fosfato amoniacales sólidos, aplicados en el surco o en bandas localizadas al costado de la línea de siembra (Ferraris *et al.*, 2011) y según Cisneros *et al.*, (2008) para el sur de Córdoba, la dosis más frecuente utilizada por los productores es de 23 kg ha⁻¹ de P usando como fuente fosfato diamónico.

La variabilidad del suelo emerge naturalmente a través de interacciones complejas entre factores naturales y de manejo (Bouma y Finke, 1993). En general, se encuentran lotes donde la variabilidad de P es muy alta aún dentro de campos que parecen ser uniformes en otras propiedades edáficas, y tiende a ser más variable en campos con varios años fertilización. Debido a esto, no se puede maximizar la eficiencia manejando la fertilidad para el promedio del lote y menos aún cuando se quieren aplicar dosis similares en diferentes lotes. Por el contrario se recomienda realizar una agricultura con manejo de nutrientes por ambiente y así obtener, mayor eficiencia en el uso de los recursos y/o un incremento en la rentabilidad de la producción. (Bermudez, 2011).

En la actualidad existen diversos trabajos de la respuesta del cultivo de maíz a fertilización fosforada a gran escala (Andrade *et al.*, 1996; Fontanetto, 1993, García *et al.*, 1997; Melgar y Caamaño, 1997; Gutiérrez Boem *et al.*, 2010; Ferraris y Mausegne, 2008) pero es escasa la información que existe a escala sitio específico o variable por zonas de manejo intra lote. Además y considerando el creciente interés en técnicas de manejo de cultivo para “maíces tardíos”, es necesario incrementar los estudios de respuesta al P en estas siembras tardías (Bert y Satorre. 2012).

Finalmente se destaca que el propósito del presente trabajo es analizar si el cultivo de maíz tardío presenta respuesta a la fertilización fosforada diferencial por zona de manejo en la región de Río Cuarto.

1.1 HIPÓTESIS.

En maíces tardíos, la función de rendimiento dependiente del fósforo, varía entre las distintas zonas de manejo intra lote, justificando agronómica y económicamente su aplicación variable.

1.2 OBJETIVOS.

1.2.1 Objetivo general:

Evaluar la conveniencia agronómica y económica de aplicar en forma variable fósforo en maíces tardíos, según zonas de manejo intra lote.

1.2.2 Objetivos específicos:

Caracterizar la variabilidad espacial de dos lotes de producción del sur de Córdoba mediante la determinación de zonas de manejo y la descripción de las propiedades químicas del suelo en cada ZM.

Determinar la función de producción de maíz tardío dependiente de la cantidad de fósforo aplicado como fertilizante en cada zona de manejo dentro de dos lotes de establecimientos agropecuarios de la zona de Río Cuarto.

Analizar agronómica y económicamente, la aplicación de P por zonas de manejo en comparación con la aplicación uniforme en dos lotes de producción de maíz tardío en Río Cuarto.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1 Sitios Experimentales

En la campaña agrícola 2012/13 se realizaron dos experimentos, ubicados uno en cercanías de la localidad de Chaján (Córdoba), sobre un lote con relieve plano ($33^{\circ} 35' 14''\text{S}$, $65^{\circ} 3' 23''\text{O}$). El otro ensayo se llevo a cabo en cercanías de la localidad de Cuatro Vientos (Córdoba) sobre un lote con relieve ondulado ($33^{\circ} 6'25.24''\text{S}$, $64^{\circ}35'7.90''\text{O}$) (Figura 1).

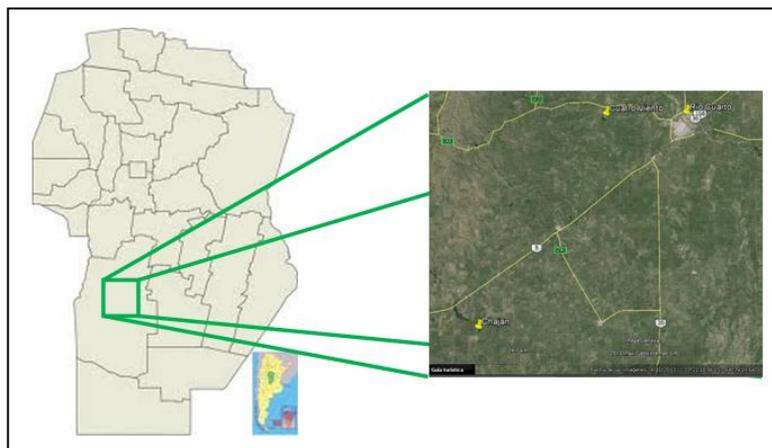


Figura 1. Mapa de la Provincia de Córdoba e Imagen de la zona de estudio, con localización de los sitios del ensayo (Google Earth).

Al evaluar dos lotes con relieve contrastante se trata de comparar la influencia de las zonas de manejo en cada uno. Cabe destacarse que el relieve es un factor formador del suelo de gran preponderancia en el sur de Córdoba y por lo tanto impactaría en la conformación de las zonas de manejo, por ello se justificaría comparar un lote plano y otro ondulado. En la Figura 2 se puede apreciar el perfil de elevación de Cuatro Vientos y Chaján. En el primero (relieve ondulado), la altura máxima observada es de 544 m.s.m. y una diferencia con la altura mínima de 8m, a una distancia de 370 m. (pendiente 2.1%). El segundo sitio (relieve plano), presenta una altura máxima de 484 m.s.m. y mínima de 482 msm, separados por 469m (pendiente 0.4%) (Google Earth).

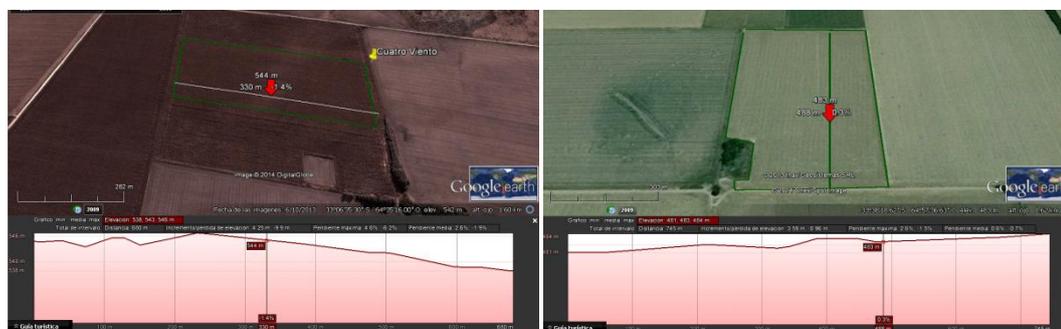


Figura 2. Vista de los lotes de ensayo. Izquierda, Cuatro Vientos (relieve ondulado). Derecha, Chaján, (relieve plano) (Google Earth).

2.2 Clima

El clima predominante de la zona es templado subhúmedo con invierno seco, presentando un régimen de precipitaciones monzónico, con una media anual de 775 milímetros. El período libre de heladas se extiende por aproximadamente 256 días, generalmente desde el mes de octubre a abril. El mes más frío del año es julio, con una temperatura media de 8,5 °C, mientras que el mes más cálido es enero con una temperatura media de 22 °C (Seiler *et al.*, 1995).

Las precipitaciones ocurridas en la campaña productiva 2012/2013 en la que se realizó el trabajo, registradas por pluviómetro manual en cada establecimiento, se muestran en la Figura 3, en la cual se puede apreciar que en ambas localidades los registros pluviométricos de septiembre octubre y noviembre superaron marcadamente a los valores medios. Esta situación explica que al momento de la siembra el perfil del suelo se encontraba con adecuado contenido de humedad (datos no presentados). En los meses de diciembre, enero, febrero y marzo (periodo de crecimiento del maíz tardío) las precipitaciones fueron inferiores a las históricas, aunque, no se detectaron evidencias visuales de estrés hídricos en las distintas visitas realizadas a los experimentos (cada 15 días).

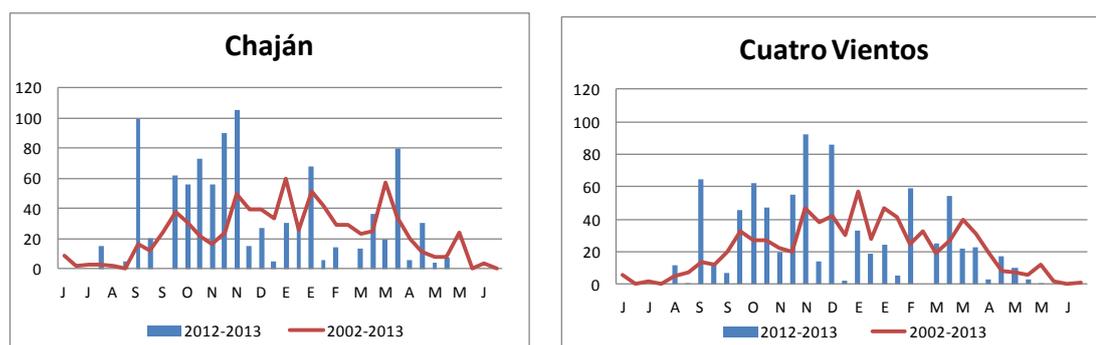


Figura 3. Precipitaciones en mm decádicas de la campaña 2012/2013 en Azul y en Rojo promedio para el periodo 2002-2013.

2.3 Suelos

Los suelos zonales de Chaján se caracterizan por ser profundos, excesivamente drenados con una capa arable u horizonte superficial (ócrico) de color pardo con moderado a pobre contenido de materia orgánica, estructura débil a masiva y poco desarrollo de horizontes genéticos. Han evolucionado a partir de materiales eólicos franco arenosos a arenosos, vinculados a la pampa medanosa cordobesa y bajo un régimen subhúmedo o semiárido (ústico). La secuencia de horizontes predominante en este tipo de suelos es la siguiente: A, AC, C. Se clasifican como Haplustol éntico (SAGyP-INTA, 1990).

Por otro lado, los suelos de Cuatro Vientos son clasificados en las lomas como Hapludoles énticos, franco arenosos, bien drenados y como Hapludoles típicos

predominantemente profundos y bien drenados en las zonas de bajos (Geointa, 2016). El lote se encuentra en un paisaje ondulado, con pendientes largas que alcanzan el 2 % de gradiente.

2.4 Muestreo de suelo.

En cada lote, se tomaron muestras de suelo, aleatoriamente distribuidas en cada ZM previo a la siembra y de manera georeferenciada por ZM en los tratamientos 1 y 4 luego de la cosecha. Los muestreos que se realizaron previo a la siembra del maíz, fueron en las profundidades de 0-20, 20-40 y de 40-60 cm. En cada muestra se evaluó, en los primeros 20 cm, materia orgánica (Walkley y Black, 1934), pH (Potenciometría 1:2,5), azufre de sulfatos (turbidimetría) (Pandey y Girish, 2007), fósforo disponible (Bray y Kurtz, 1945) y en todas las muestras nitrógeno de nitratos (reducción por Cadmio). Los realizados luego de la cosecha se analizó fósforo disponible en los primeros 20 centímetros del perfil.

2.5 Cultivo.

Los ensayos se llevaron a cabo en cultivo de maíz, el cual se implantó sobre un cultivo antecesor de Soja (*Glycine max*). El híbrido que se utilizó fue DK 190 MG RR provisto por el productor de cada establecimiento, a los efectos de emplear un material genético con probada adaptación a la fecha de siembra tardía y a las condiciones regionales de producción. Los ensayos se sembraron, bajo siembra directa con una máquina Agrometal TX Mega a placa de 16 surcos, distanciados a 0,525 m, con una densidad de 60.000 plantas por hectárea, dicha siembra se realizó a mediados del mes de diciembre bajo condiciones de secano. Los cultivos se mantuvieron libres de plagas, malezas y enfermedades, para una buena continuidad de los ensayos.

2.6 Diseño experimental y tratamiento.

Cada tratamiento se dispuso en franjas, cruzando ZM (ver anexo 2), de 8,4 metros de ancho (una maquinada) por 720 metros de largo, los tratamientos evaluados se presentan en la Tabla 1:

Tabla 1. Dosis de fósforo evaluados en los distintos tratamientos en ambos ensayos.

Tratamiento	Fosfato diamónico (FDA)	Fósforo
1	0 kg ha ⁻¹	0 kg ha ⁻¹
2	80 kg ha ⁻¹	16 kg ha ⁻¹
3	160 kg ha ⁻¹	32 kg ha ⁻¹
4	240 kg ha ⁻¹	48 kg ha ⁻¹

La fuente de fósforo utilizada fue fosfato diamónico (18:46:0), el cual se aplicó a la siembra por debajo y al costado de la línea de siembra.

El rango de dosis seleccionado permitió cubrir desde un testigo sin aplicación de nutrientes hasta la máxima disponibilidad de nutriente.

Para evaluar solamente el efecto del P sobre la producción de maíz, se realizó una fertilización nitrogenada a todos los tratamientos. Como fuente de nitrógeno se aplicó nitrato de amonio calcáreo (CAN) (0:32:0) llevando todos los tratamientos a la dosis final de 150 kg ha⁻¹, lo cual representa 48 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Esta refertilización se realizó al voleo en el estado ontogénico de 6 hojas totalmente desplegadas.

El ajuste de las dosis económicamente óptima fue determinado por zonas de manejo sectorizadas mediante análisis de la productividad espacial (Inman *et al.*, 2005). Por ese motivo, se realizó una zonificación ambiental a nivel de lote en ZM, empleando para ello mapas de rendimiento de tres campañas anteriores. Estos datos de rendimiento fueron recolectados con monitor de producción de granos georeferenciado mediante GPS.

La zonificación se realizó empleando el programa de computación Management Zone Analyst (MZA, Mizzou-ARS, 2000), el cual divide al campo en grupos naturales a partir de clasificaciones o número de zonas especificados mediante un análisis “cluster”. Este programa además de identificar a que ZM se corresponde cada punto dentro del lote, permite seleccionar la cantidad de zonas óptimas en las que se debe dividir un lote, de acuerdo a la variabilidad intra y entre zonas resultantes.

El MZA entrega sus resultados a través de la representación gráfica del desempeño de dos índices: el FPI (índice de borrosidad) y el NCE (clasificación entrópica normalizada) (Fridgen, 2000) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes.

El FPI da una medida del grado de dispersión entre ambientes y sus valores pueden variar de 0 a 1. Valores cercanos a 0 indican clases distintas con escasa pertenencia un mismo grupo mientras que los valores cercanos a 1 indican clases indistintas con un alto grado de pertenencia al mismo grupo. El NCE modela el grado de homogeneidad de las zonas. Valores bajos de este indican alto grado de organización y valores altos, bajo grado de organización. En la representación gráfica el número óptimo de ambientes se produce cuando ambos índices están en su mínimo. En caso de divergencia entre los números óptimos otorgados por cada índice, la decisión final sobre cuántas unidades ambientales delimitar, debe realizarse considerando agregar otras variables al análisis (Fridgen *et al.*, 2004).

2.7 Mediciones a cosecha

Las franjas correspondientes a cada tratamiento fueron recolectadas con cosechadora equipada con monitor de rendimiento y receptor GPS. El monitor de rendimiento debe tener una serie de sensores que van instalados en la maquina, y su objetivo es medir y grabar el rendimiento y la humedad del grano a medida que se cosecha el cultivo. Si a su vez se le adiciona un GPS se obtienen los datos de rendimiento geoposicionados a lo que se llama mapa de rendimiento (MR).

Concluida la cosecha se descargaron los datos de la cosechadora que realizó la labor en cada ensayo y por medio del procesamiento con un software específico se lograron obtener los MR en formato genérico (valores separados por coma o *.csv). Luego se analizaron los MR de ambos ensayos mediante el programa Quantum Gis Wroclaw (Quantum GIS Development Team, 2011). Dicho procesamiento consistió en la limpieza de los MR del lote completo, es decir, el filtrado de los datos outliers e inliers. Entre las fallas que dan origen a estos datos erróneos se encuentran: el incorrecto mantenimiento de los componentes del sistema que toma los datos (GPS, consola, sensores) o bien, pueden ser inducidos por el operario durante el proceso de cosecha, ejemplo: indebida calibración de peso y humedad, incorrecto ajuste del ancho de corte, entradas y salidas de la cabecera con el cabezal de trilla en funcionamiento, cosecha con más de una máquina, y a veces errores de GPS (Bragachini *et al.*, 2006).

Para realizar la limpieza de MR mediante los atributos con distribución normal se utilizó el análisis de Intervalo Intercuartil (IIQ) (Tukey, 1977). El enfoque del IIQ es un método de la estadística descriptiva, analítico, no paramétrico que identifica los valores extremos del atributo analizado, a través de una determinación estadística detallada de la distribución de datos. Los puntos extremos o valores atípicos se definen entonces como los valores de los datos que se encuentran más allá de una "valla interior", también llamados "outliers", definidos por la Ecuación 1:

$$x < Q1 - 1,5 * IIQ \quad \text{ó} \quad x > Q3 + 1,5 * IIQ \quad [1]$$

Donde: $Q1$: Cuartil 1.

$Q3$: Cuartil 3.

$$IIQ = Q3 - Q1$$

Luego de realizada la limpieza de outliers, se procedió con la limpieza inliers, siendo esta el filtrado de valores que por diferentes motivos son atípicos dentro del conjunto de datos que quedaron, es decir puntos que su valor de rendimiento tienen una gran distancia con los vecinos y que claramente no pertenecen al conjunto de datos. Esto se realizó

mediante diferentes atributos como, velocidad de cosecha, altura de cabezal de trilla, ancho de melga y humedad (Anexo 1).

Una vez limpios los mapas, se construyeron grillas con polígonos de lado igual al ancho de la maquina cosechadora. Luego fue superpuesta la grilla sobre la capa de mapa de rendimiento y se la rotó de modo que coincidiera la dirección de la cosecha con la dirección de los ejes de la grilla, para respetar la posición de cada dato de rendimiento en relación a sus vecinos.

Ya ubicada la grilla, para cada polígono de la misma se promediaron los atributos de todos los puntos del mapa de rendimiento que quedaran bajo su superficie.

Posteriormente, se identificaron los tratamientos en el mapa, se quitaron campos innecesarios y se agregaron otros con información requerida correspondiente a los siguientes parámetros:

P: Fósforo, cantidad de P aplicada a cada franja.

P²: Fósforo cuadrado, cuadrado de la cantidad de P aplicada a cada franja.

Z: zona de manejo.

Los campos considerados de interés para evaluar en el modelo (P y P²) toman valores sobre un rango continuo (variables cuantitativas), mientras que el último campo de interés (ZM) es una variable cualitativa con tantas categorías representadas como variables “Dummy”, indicadoras o dicotómicas, las cuales sirvieron para identificar categorías o clase a la que pertenecen las observaciones y observar el efecto de las zonas de manejo. Una restricción impuesta a las variables dummy es que su sumatoria debe ser igual a cero; lo que permite que la estimación del efecto de las diferentes ZM dentro del lote y de los términos de la interacción con la dosis P puedan ser comparados con la respuesta media (Bongiovanni, 2002). Finalmente, se incluyeron las interacciones entre las variables “zona de manejo”, “dosis de fósforo” y “dosis de fósforo cuadrado” de la siguiente forma:

ZxP

ZxP²

2.8 Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se utilizó el modelo de econometría espacial, especialidad dentro de la econometría que se ocupa del tratamiento de la interacción espacial (autocorrelación espacial) y de la estructura espacial (heterocedasticidad) en los modelos de regresión (Anselin, 1999). Esto es así porque uno de los problemas es que la estadística tradicional que se usa en el análisis de parcelas experimentales y de ensayos a campo asume que las observaciones son independientes y homocedásticas (varianza de los errores constantes). En el caso de los datos de rendimiento, este supuesto de independencia ya no es válido. Las observaciones recogidas con monitor de rendimiento están claramente

relacionadas con las observaciones vecinas. Por lo tanto los rendimientos del cultivo se deben a una respuesta a los insumos que se aplican, a las características predeterminadas del sitio, y a los factores climatológicos aleatorios (Bullock y Bullock, 2000).

Una de las herramientas usadas en Econometría es el análisis de regresión. Su objetivo primordial es estimar el valor de una variable aleatoria (la variable dependiente: por ej.: el rendimiento de un cultivo), dado que los valores de una o más variables asociadas (la o las variables independientes, por ej.: dosis de fertilizante N) son conocidos. La ecuación de regresión es la fórmula algebraica por la cual se determina el valor estimado de la variable dependiente o de respuesta (Anselin, 1999).

El análisis de regresión se realizó con un programa de computación especializado para el trabajo con datos espaciales georeferenciados OpenGeoDa 0.9.8.8 (GeoDa Center for Geospatial Analysis and Computation, Arizona State University.). El mismo, fue diseñado para análisis espacial y análisis multivariado exploratorio de datos (globales y locales) de autocorrelación espacial. Realiza regresión lineal básica incluyendo modelos espaciales como el modelo de retardo espacial y el modelo de error espacial, ambos estimados por máxima verosimilitud.

En primer lugar se usó el modelo clásico de mínimos cuadrados ordinarios (OLS, por sus siglas en inglés). La inclusión de dicho modelo, se efectuó con el fin de estimar y comprobar la dependencia espacial que, en el caso de los datos de rendimiento, se presenta como la similitud de valores para ubicaciones similares. En otras palabras, valores altos o bajos de rendimiento tienden a estar rodeados de observaciones vecinas con valores similares. Por lo tanto, y debido a que los valores de los factores de rendimiento en un punto del lote dependen de los valores en otros puntos del lote, los datos de este lote van a presentar autocorrelación espacial (Bongiovanni, 2006). Por lo tanto, para que la regresión sea estadísticamente significativa, se tiene que corregir esta autocorrelación espacial, de modo tal que los estimadores obtenidos permitan realizar cálculos económicos con precisión.

A los fines de corregir dicha dependencia espacial, cada observación fue ponderada a través de la confección de una matriz de ponderadores espaciales con una estructura “Queen” (W) de 8 vecinos con bordes y esquinas en común (Anselin, 1988), estandarizada por fila. La misma se esquematiza en la Figura 4.

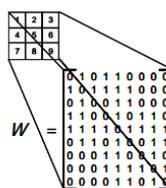


Figura 4. Matriz de ponderadores espaciales “Queen” (Bongiovanni, 2002 b)

Los parámetros estadísticos observados fueron:

- **R²**: coeficiente de determinación, proporción de la variabilidad en un conjunto de datos que se explica por el modelo estadístico. Determina una medida de qué tan bien los resultados futuros es probable que sean predichos por el modelo.

- **Criterio de información de Akaike (AIC)**, (Akaike, 1974) para cuantificar la validez de selección del modelo a aplicar. Dado un conjunto de modelos candidatos para los datos, el modelo preferido es el que tiene el valor mínimo de AIC.

- **Índice "I" de Moran** (Moran, 1950) para evaluar la autocorrelación entre los datos. El mismo asume valores entre -1 (que indica dispersión perfecta) y 1 (correlación perfecta). En valor de cero indica una distribución espacial al azar.

- **Multiplicadores de Lagrange (ML)**: procedimiento para encontrar los máximos y mínimos de funciones de varias variables sujetas a restricciones. Son estadísticas para las pruebas de dependencia espacial en los modelos lineales. Se evaluaron los ML simples y robustos tanto para la variable dependiente como para la dependencia del error.

El otro modelo denominado de error espacial autorregresivo (SAR), utiliza la metodología de máxima verosimilitud para la determinación de los campos de interés y parámetros estadísticos. Dicho modelo asume que la variable dependiente no está correlacionada por sí misma, sino que es el error de muestreo aleatorio el que está correlacionado. Matemáticamente se expresa según la ecuación 2:

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad [2]$$

donde Y es el vector (n por 1) de observaciones de la variable rendimiento, X es la matriz de observaciones de las variables independientes (dosis de P y ZM), β es el vector de parámetros estimados, y ε es el término de error espacial, obtenido mediante la Ecuación 3:

$$\varepsilon = \lambda W\varepsilon + \mu \quad [3]$$

donde μ es el error de muestreo aleatorio que sigue una especificación autoregresiva espacial (SAR) con un coeficiente autoregresivo λ (lambda), corregido también por la matriz de ponderadores espaciales (W).

La respuesta del maíz al P se modeló como un polinomio múltiple de segundo grado por cada ZM según la Ecuación 4:

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1P + \beta_2P^2 + \beta_3ZM + \beta_4P \times ZM + \beta_5P^2 \times ZM + \varepsilon_{ij} \quad [4]$$

donde Y_{ij} es el rendimiento del maíz (kg ha^{-1}) por cada punto ij del monitor de rendimiento, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , son los parámetros de la ecuación de regresión, P es la dosis de fertilizante fosforado (kg ha^{-1}), ZM se refiere a las variables “dummy” para cada zona de manejo, y ε_{ij} es el término de error de la regresión por cada ubicación (Gregoret *et al.*, 2011).

Para obtener en cada ZM la dosis óptima de P o la cantidad del nutriente necesario para alcanzar el máximo retorno económico a la fertilización con P (DOEP) (Dillon y Anderson, 1990) se utilizó la función de producción de maíz dependiente de P por ZM , la cual fue optimizada de la siguiente manera:

$$\pi = P_{maiz} (\beta_{0_{ZM}} + \beta_{1_{ZM}}P + \beta_{2_{ZM}}P^2) - P_p - P \quad [5]$$

$$\pi_{max} = \frac{\delta\pi}{\delta P} = 0 \quad [6]$$

$$\pi_{max} = \frac{\delta\pi}{\delta P} = P_{maiz}(\beta_{1_{ZM}} + 2\beta_{2_{ZM}}P) - P_p = 0 \quad [7]$$

$$DOEP = \frac{\left(\frac{P_p}{P_{maiz}}\right) - \beta_{1_{ZM}}}{2\beta_{2_{ZM}}} \quad [8]$$

Donde, P_{maiz} es el precio del maíz puesto en campo a obtener por un productor agrícola de la zona de Río Cuarto al momento de cosecha según cotización de la Bolsa de Cereales de Rosario, P_p es el precio en kg de P puesto en campo según precio comercio de Río Cuarto. DOEP es la dosis óptima económica por ZM de fósforo.

Los precios utilizados de maíz y fósforo fueron de 1,77 y 32,8 $\$/\text{kg}$, respectivamente. El precio del maíz fue tomado en dólares estadounidenses a febrero de 2016 como precio futuro de venta en el mercado físico a abril de 2016 (168 USD t^{-1}) según cotización de la bolsa de cereales de Rosario y transformación posterior según cotización banco Nación tipo de cambio vendedor (13,15 $\$/\text{USD}$), se consideró un gasto de comercio y flete de un 22%. El precio del fósforo fue tomado al 3 de febrero de 2016 según cotización del mercado local en Río Cuarto, en dólares estadounidenses y posterior transformación en pesos (indicada para el precio del maíz). Finalmente la relación de precio (insumo/producto) se calculó en $\$18,53$.

Finalmente, para comparar los retornos de fósforo por hectárea que se obtendrían en caso de adoptar tecnología de dosificación fija o variable se realizó el cálculo por hectárea de rendimientos y costos de fertilizante dentro de cada tecnología de dosificación. Además se realizó la ponderación por el porcentaje de participación de cada sub zona dentro del lote.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Zonas de manejo

A partir de la metodología utilizada para la realización de zonificación y mediante la interpretación de los índices de FPI y el NCE arrojados por MZA, se establecieron dos zonas de manejo claramente diferenciadas en Cuatro Vientos (Figura 5), mientras que para Chaján el análisis indica una posible falta de información para poder tomar una correcta decisión (Figura 6), en estos casos Fridgen *et al.* (2004), afirman que en cuantos menos ambientes se divida es mejor, por lo que se definieron dos zonas de manejo en este lote de producción.

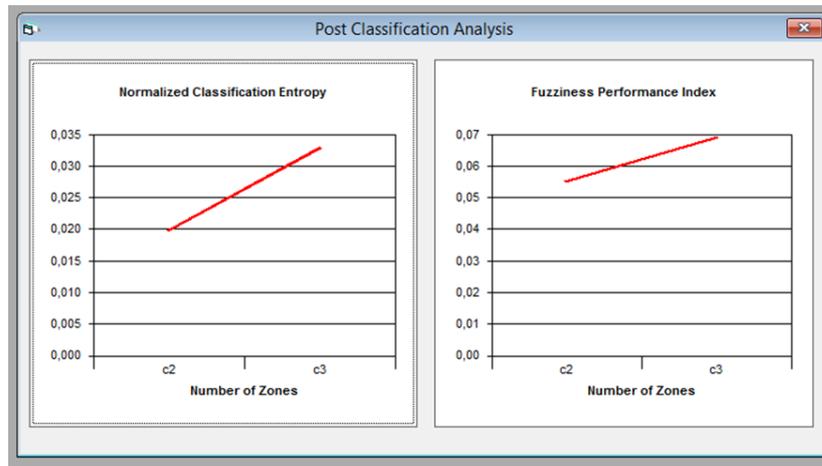


Figura 5. Índices NCE (izquierda) y FPI (derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar para Cuatro Vientos.

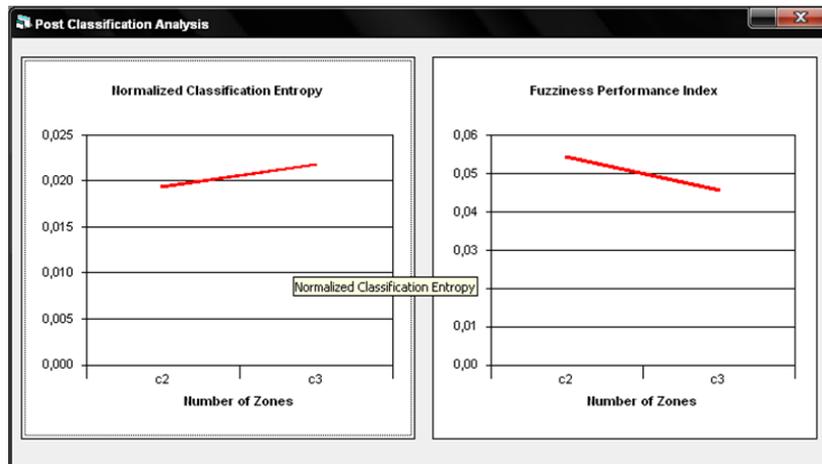


Figura 6. Índices NCE (izquierda) y FPI (derecha) para evaluar visualmente la cantidad óptima de ambientes a delimitar para Chaján.

Finalmente por medio de la metodología descrita para realizar zonas de manejo se obtuvieron para Cuatro Vientos los ambientes que se muestran en la Figura 7 y para Chaján en la Figura 8.

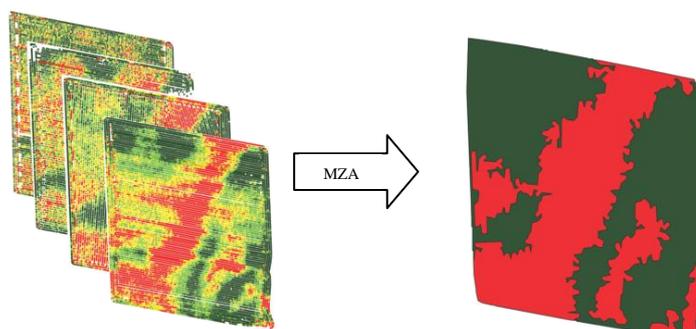


Figura 7. Mapas de Rendimiento (izquierda) y Zonificación mediante MZA (derecha), en rojo baja producción y verde alta producción de Cuatro Vientos.

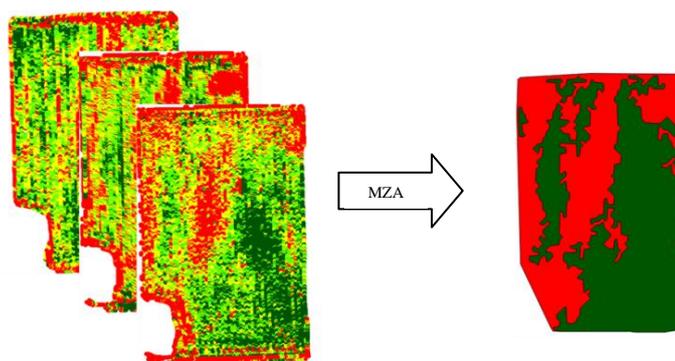


Figura 8. Mapas de Rendimiento (izquierda) y Zonificación mediante MZA (derecha), en rojo baja producción y verde alta producción de Chaján.

Por lo tanto, para comprobar las ZM de cada sitio se realizó una validación cruzada mediante el Análisis de la Varianza. A partir del cual se puede interpretar que en Cuatro Vientos la diferencia entre zonas de manejo, en cada campaña, fue estadísticamente significativa (Tabla 2, Anexo 3). Estos resultados explican que en promedio, la diferencia entre ZM en soja fue de 14,82%, mientras que para maíz esta fue de 32,68% entre zonas.

Tabla 2. Rendimiento (kg ha^{-1}) promedios por zonas de manejos de las campañas 2007-2009-2010 y 2011 para Cuatro Vientos.

Ambiente	Soja 2007	Soja 2009	Maíz 2010	Soja 2011
	Rendimiento (kg ha^{-1})			
AP	2768 a	2693 a	4709 a	2603 a
BP	2597 b	2175 b	3549 b	2281 b
Valor p	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
CV (%)	7,78	13,70	18,61	13,43

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

En cuanto a Chaján, de dicho análisis se interpreta análogamente a Cuatro Vientos, que en todas las campañas la diferencia de rendimientos entre zonas de manejos son estadísticamente significativas (Tabla 3), observándose en promedio una diferencia de 22,87 y 15,28% para soja y maíz respectivamente.

Tabla 3. Rendimiento promedios por zonas de manejos de las campañas 2009-2010-2011 y 2012 para Chaján.

Ambiente	Maíz 2009	Soja 2010	Maíz 2011	Soja 2012
Rendimiento (kg ha ⁻¹)				
AP	8515 a	3878 a	8530 a	746 a
BP	7809 b	3294 b	7020 b	583 b
Valor p	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
CV (%)	11,46	13,47	12,93	43,03

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

3.2 Indicadores químicos del suelo

El muestreo de suelo a la siembra indicó que en Chaján (Tabla 4) el P extractable (0-20 cm) fue de 7,35 y 11,25 mg kg⁻¹ y el nivel de Zn fue 0,18 y 0,22 mg kg⁻¹, en AP y BP respectivamente. Esto podría explicarse por la mayor extracción de nutrientes en la zona de AP realizada por los cultivos, que sistemáticamente presentan más productividad en esta zona, extrayendo mayor cantidad de nutrientes.

En Cuatro Vientos el análisis de suelo indicó (Tabla 5) un P extractable de 9,35 y 5,90 mg kg⁻¹ y Zn de 0,93 y 0,67 mg kg⁻¹ en AP y BP respectivamente. El bajo nivel de P en BP, podría deberse a factores de génesis de suelo, los cuales hicieron que por su combinación, se originara un suelo de baja fertilidad natural.

Estos resultados indican que la disponibilidad de P y Zn son muy bajos en ambos sitios y en cada ZM, sobre todo si se lo compara con los umbral críticos citado para maíz, que varían en un rango de entre 14 y 19 mg kg⁻¹ para P (Blanco *et al.*, 2004; Echeverría *et al.*, 2002; Echeverría y García, 1998; y García, 2003) y de 1 mg kg suelo⁻¹ para Zn (Ratto, 2006; Barbieri *et al.*, 2015).

A partir de las muestras de suelo realizadas a cosecha en los tratamientos 1-Testigo (0 kg ha⁻¹ de P a la Siembra) y 4 (48 kg ha⁻¹ de P), se evaluó la evolución de P extractable durante la campaña, encontrándose en el testigo un incremento en ambas localidades (Tabla 4 y 5), lo cual estaría explicado esto por la mayor mineralización de P orgánico asociada a la diferencia en la temperatura del suelo entre muestreos, julio 2012 vs abril 2013 (García *et al.*, 2014). Este análisis realizado sobre los tratamientos con 48 kg ha⁻¹ de P (tratamiento 4) indicó que los valores de P-Bray fueron aún superiores, explicando el incremento de oferta nutricional debida a la fertilización además de la mineralización por temperatura ya descripta.

Como se puede apreciar en la Tabla 4, la fertilización con P incrementó los valores de P Bray de 12,85 y 13,15 a 16,05 y 16,15 mg kg⁻¹ en Chaján AP y BP, respectivamente lo cual representa un incremento del 24,9 y 22,8%. Esta situación evidencia la importancia de la fertilización con P en estos ambientes.

Tabla 4. Resultado de análisis de suelo realizados a la siembra y cosecha por zonas de manejo en Chaján.

Chaján					
Determinación	Momento	Tratamiento	Profundidad (cm)	AP	BP
Materia Orgánica (MO)	Siembra	-	0-20	11,50 g kg ⁻¹	10,80 g kg ⁻¹
Fosforo Extraíble	Siembra	-	0-20	7,35 mg kg ⁻¹	11,25 mg kg ⁻¹
	Cosecha	Testigo	0-20	12,85 mg kg ⁻¹	13,15 mg kg ⁻¹
	Cosecha	48 kg ha ⁻¹ P	0-20	16,05 mg kg ⁻¹	16,15 mg kg ⁻¹
Zinc	Siembra	-	0-20	0,18 mg kg ⁻¹	0,22 mg kg ⁻¹
Reac. del Suelo (pH)	Siembra	-	0-20	6,5	6,3
	Siembra	-	0-20	8,1 mg kg ⁻¹	5,8 mg kg ⁻¹
Nitrógeno de Nitratos	Siembra	-	20-40	2,3 mg kg ⁻¹	3,5 mg kg ⁻¹
	Siembra	-	40-60	3,8 mg kg ⁻¹	6,5 mg kg ⁻¹

En Cuatro Vientos se encontraron resultados similares a los presentados en Chaján, puesto que los aumentos en el P Bray a cosecha por fertilización fueron del 33,52 y 25,3 % para AP y BP respectivamente.

Ambos análisis explicarían dos situaciones destacables, primero que los suelos son muy deficitarios de P y segundo que las ZM no difieren en gran medida en los valores de P a la siembra ni a la cosecha lo cual podría explicar la falta de respuesta diferencial al P entre ZM.

Tabla 5. Resultado de análisis de suelo realizados a la siembra y cosecha por zonas de manejo en Cuatro Vientos.

Cuatro Vientos					
Determinación	Momento	Tratamiento	Profundidad (cm)	AP	BP
Materia Orgánica (MO)	Siembra	-	0-20	11,2 g kg ⁻¹	10,3 g kg ⁻¹
Fósforo Extraíble	Siembra	-	0-20	9,35 mg kg ⁻¹	5,9 mg kg ⁻¹
	Cosecha	Testigo	0-20	17,6 mg kg ⁻¹	17,2 mg kg ⁻¹
	Cosecha	48 kg ha ⁻¹ P	0-20	23,5 mg kg ⁻¹	21,55 mg kg ⁻¹
Zinc	Siembra	-	0-20	0,93 mg kg ⁻¹	0,67 mg kg ⁻¹
Reac. del Suelo (pH)	Siembra	-	0-20	6,8	6,4
	Siembra	-	0-20	9,2 mg kg ⁻¹	7,9 mg kg ⁻¹
Nitrógeno de Nitratos	Siembra	-	20-40	3,7 mg kg ⁻¹	4,6 mg kg ⁻¹
	Siembra	-	40-60	2,9 mg kg ⁻¹	5,8 mg kg ⁻¹

3.3 Rendimiento

3.3.1 Mapas de Rendimiento

En la Figura 9, se muestra los mapas de rendimiento de los experimentos de las dos localidades conjuntamente con el mapa de ZM (fondo) de cada lote. En ambos experimentos

visualmente se observa que habría alguna diferencia entre ZM, y estaría relacionada con la ambientación que se realizó para cada lote.

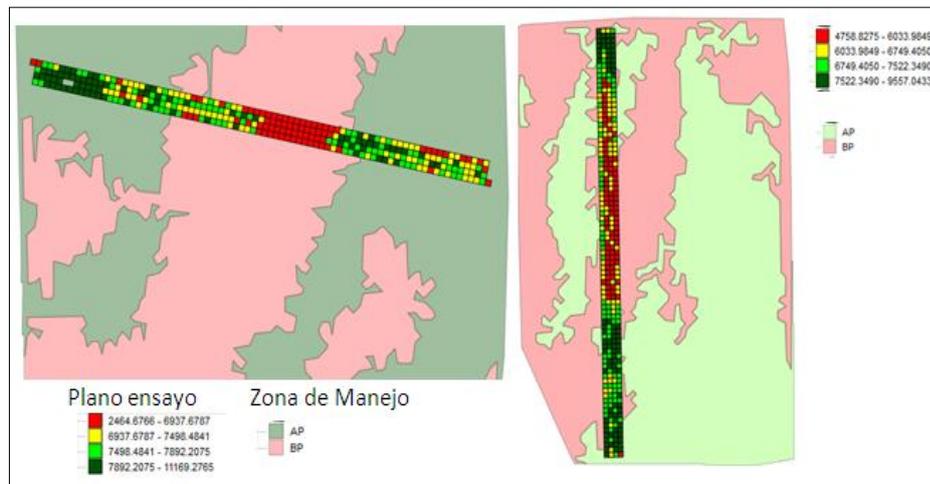


Figura 9. Mapa de zonas, Rojo: Baja Producción; Verde: Alta Producción. Mapa de rendimiento de los ensayo en grilla superpuesta al mapa de zonas. Izquierda: Cuatro Vientos. Derecha: Chaján.

3.3.2 Elección del modelo estadístico

El análisis de regresión del rendimiento en función de la zona de manejo y la dosis de P se presenta en la Tabla 3 para el ensayo de Cuatro Viento, con y sin zona de manejo. En la Tabla 4, se observan los resultados para el ensayo realizado en Chaján con y sin zonas de manejo, cada uno con ambos modelos, el OLS y el SAR.

Tabla 6. Análisis de regresión espacial del rendimiento (kg ha^{-1}) en función de dosis de fertilizantes (P) y Zonas de manejo, para ambos modelos en Cuatro Vientos.

	Modelo clásico (OLS) s/z		Modelo error espacial (SAR) s/z		Modelo clásico (OLS) c/z		Modelo error espacial (SAR) c/z	
	Coef.*	Valor p	Coef.*	Valor p	Coef.*	Valor p	Coef.*	Valor p
β_0	6749,3	<0,01	6727,0 4	<0,01	6490,8	<0,01	6679,9	<0,01
β_1	5,38	0,04	4,943	0,04	7,78	<0,01	25,61	0,03
β_2	-0,006	0,50	-0,005	0,59	-0,017	0,051	-0,143	0,53
β_3					740,14	<0,01	163,89	0,15
β_4					-1,45	0,51	-2,08	0,84
β_5					0,006	0,5	0,004	0,98
Lambda (λ)			0,87	0			0,84	0
Medidas de ajuste:								
R^2	0,075		0,78		0,37		0,786	
Criterio de Akaike	5367,8 4		4971,4 4		5249,64		4974,65	
Tests Diagnóstico:								
Moran's I (error)	0,779	N/A			0,624	N/A		
Lagrange Multiplier (lag)	584,71	0			386,68	0		
Robust LM (lag)	0,308	0,57			18,52	0		
Lagrange Multiplier (error)	588,19	0			377,48	0		
Robust LM (error)	3,784	0,051			9,33	0		

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ y β_5 , parámetros de la función de producción de maíz dependiente de la fertilización con P por zona de manejo (ZM)

s/z= sin zonas de manejo incluidas en el análisis estadístico (Zona única).

c/z= con zonas de manejo incluidas en el análisis estadístico (2 ZM).

* Los coeficientes están expresados en kg ha^{-1} .

A partir del análisis realizado para el ensayo de Cuatro Vientos en una situación sin zonificar, se puede verificar que los datos de rendimiento están correlacionados espacialmente, ya que el modelo clásico (OLS) arroja valores de Moran's I relativamente altos (0,77) y un bajo R^2 (0,07) indicando que el modelo posee un bajo poder predictivo. Además valores de Lagrange Multiplier (error) y Robust LM (error) mayores a sus contrapartes (lag) altamente significativos ($p < 0,05$), indican la conveniencia de utilizar el modelo de error espacial (SAR). Lo enunciado anteriormente se verifica cuando al analizar los datos con el SAR el coeficiente de determinación del mismo asciende a un R^2 de 0,78, con un valor del criterio Akaike menor lo que indica el mejor desempeño de este modelo.

Por otra parte cuando se considera el análisis con ZM, nuevamente se verifica la correlación espacial de los datos a través del alto valor de Moran's I (0,62) y el R^2 de 0,37.

La incorporación de ZM disminuye la correlación espacial y mejora el desempeño del modelo clásico, aunque no es suficiente para utilizar este modelo. Los valores de Lagrange Multiplier (error) y Robust LM (error) son mayores a sus contrapartes (lag) revelando el beneficio de utilizar el modelo SAR. Por último cuando se realiza SAR se observa un R^2 mayor (0,78) y un menor criterio de akaike. Es frecuente que el estudio de datos de rendimiento georeferenciados, con o sin zonas presente autocorrelación espacial y heterocedasticidad exigiendo en la mayoría de los casos modelar la estructura espacial de los datos (Bongiovanni, 2002).

Tabla 7. Análisis de regresión espacial del rendimiento (kg ha^{-1}) en función de dosis de fertilizantes (P) y Zonas de manejo, para ambos modelos en Chaján.

	Modelo clásico (OLS) s/z		Modelo error espacial (SAR) s/z		Modelo clásico (OLS) c/z		Modelo error espacial (SAR) c/z	
	Coef.*	Valor p	Coef.*	Valor p	Coef.*	Valor p	Coef.*	Valor p
β_0	7154,9	<0,01	6969,9	<0,01	7479,3	<0,01	6952,8	<0,01
β_1	-2,20	0,25	0,923	0,58	-3,91	0,08	4,55	0,62
β_2	-0,003	0,69	-0,016	0,013	0,0043	0,61	-0,408	0,02
β_3					504,47	<0,01	-29,67	0,71
β_4					0,17	0,93	-0,623	0,93
β_5					-0,001	0,88	-0,029	0,82
Lambda (λ)			0,89	0			0,899	0
Medidas de ajuste:								
R^2	0,074		0,82		0,25		0,83	
Criterio de Akaike	5746,1		5238,6		5677,5		5239,67	
	5		2		1			
Tests Diagnóstico:								
Moran's I (error)	0,824	N/A			0,668	N/A		
Lagrange Multiplier (lag)	726,36	0			543,67	0		
Robust LM (lag)	1,88	0,17			59,37	0		
Lagrange Multiplier (error)	738,51	0			485	0		
Robust LM (error)	14,03	0			0,7	0,39		

s/z= sin zonas de manejo incluidas en el análisis estadístico (Zona única).

c/z= con zonas de manejo incluidas en el análisis estadístico (2 ZM).

* Los coeficientes están expresados en Kg/ha.

Considerando el análisis realizado para el sitio Chaján, se puede observar la similitud de los resultados con el sitio Cuatro Vientos, en cuanto a los indicadores correspondientes para elección de modelo, en ambas situaciones el modelo que mejor ajustó fue SAR considerando o no las zonas de manejo.

No fueron detectadas diferencias estadísticamente significativas asociadas a las ZM sobre el rendimiento de maíz (observar corrimiento no significativo en ZM2 en Tabla 6 y 7). Ello podría explicarse por la fecha de siembra empleada ya que estudios realizados en la región por otros autores, indican que el efecto de las ZM sobre el rendimiento son mayores en siembras tempranas (Espósito *et al.*, 2012; Martínez Bologna *et al.*, 2014; Cerliani *et al.*, 2014).

Otro aspecto a considerar ante la falta de significancia en la respuesta al P por ZM, podría ser atribuida a la zonificación propuesta en este trabajo, la cual se realizó empleando tres mapas de rendimiento de años anteriores. En este sentido Boydell y McBratney (2002) indican que deberían utilizarse al menos cinco mapas de rendimiento para lograr una adecuada zonificación. Peralta *et al.*, 2012 recomendaron la utilización de mapas de electroconductividad aparente de suelo, como los generados por la sonda Veris 3100 (Veris Technologies, Salina, Kansas, EEUU), para delinear ZM específicas para manejo variable de P.

3.3.3 Relación entre fertilización fosforada y rendimiento de maíz.

A partir de la información presentada en las tablas 6 y 7, se extrajeron los parámetros significativos del modelo estadístico con mejor desempeño a los efectos de confeccionar la función de producción de maíz dependiente de la fertilización con P, en cada localidad (Tabla 8).

Tabla 8. Función de respuesta del maíz al P, para cada sitio del ensayo.	
Localidad	Función de Respuesta
Chaján	$6952,82 + 4,55 * P + (-0,408) * P^2$
Cuatro Vientos	$6679,9 + 25,61 * P$

En ambos sitios experimentales se observó respuesta a la aplicación de P. Este tipo de respuesta varió en función del sitio analizado (Figura 10 y 11).

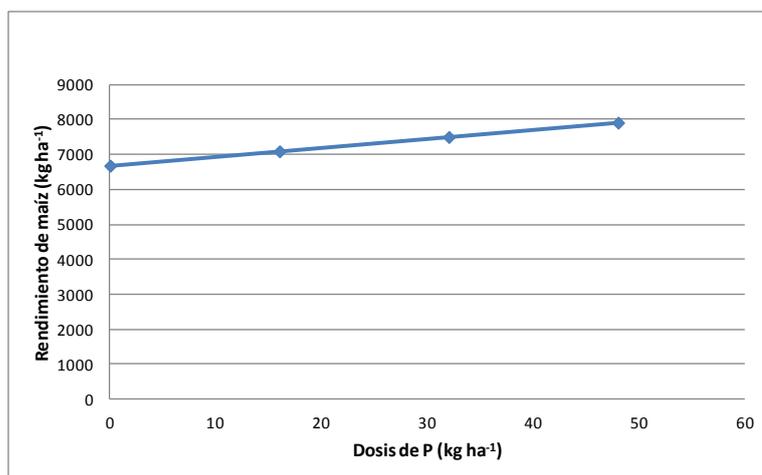


Figura 10. Rendimiento del maíz, en función de distintas dosis de P aplicada a la siembra de Cuatro Vientos.

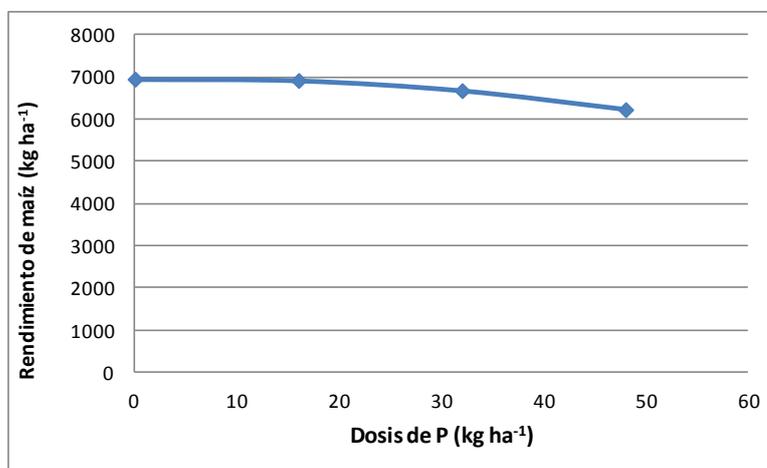


Figura 11. Rendimiento del maíz, en función de distintas dosis de P aplicada a la siembra de Chaján.

En Cuatro Vientos la respuesta a la fertilización fue positiva, aumentando linealmente el rendimiento ante el agregado de fósforo, esto podría deberse al bajo nivel de P disponible en el suelo (García *et al.*, 2014). Estos resultados coinciden con los propuestos por Fontanetto *et al.*, (2010), quienes indicaron que para valores de fósforo disponible entre 5 y 9,9 mg kg⁻¹ de P-Bray, la respuesta a la fertilización con P fue positiva y lineal.

Por el contrario, en Chaján, la respuesta a la fertilización fosforada, tanto agronómica como económica, fue negativa a pesar de que el suelo también presento valores de P inferiores a los umbrales críticos de 14-15 mg kg⁻¹ P-Bray indicados por García (2005) como resultado de 35 ensayos en distintas zonas de la región pampeana, y aun mas si se considera el umbral señalado por Fontanetto *et al.* (2010) de 18 mg kg⁻¹ P-Bray. Esto coincide con lo encontrado por García *et al.*, (2014) quienes no detectaron respuesta a la fertilización con P aún en suelos con baja disponibilidad de este nutriente. Es posible que existan otros factores que limiten la producción en estas condiciones u otras limitaciones que aun no son evidentes al estado de conocimiento actual.

Sería factible también, que las diferencias encontradas en la disponibilidad de Zn al momento de la siembra entre localidades expliquen el comportamiento diferencial a la fertilización con P. En ambos experimentos los niveles de este nutriente (0,2 y 0,8 mg Zn kg suelo⁻¹ para Chaján y Cuatro Vientos, respectivamente) son inferiores al valor crítico en maíz de 1 mg Zn kg suelo⁻¹ (Barbieri *et al.*, 2015), aunque la condición del suelo de Chaján es de una marcada deficiencia y por lo tanto la falta de respuesta al P pueda deberse al antagonismo de este micronutriente con el fósforo (Ratto, 2006). Cabría esperarse que la fertilización con P incorporada al momento de la siembra usando FDA acentúe dicha deficiencia, debido a diferentes mecanismos por los cuales el P puede dificultar la absorción y el transporte de Zn en la planta (Malavolta, 2006).

Es necesario destacar que una adecuada nutrición balanceada en maíces tardíos, es importante para el logro de buenos niveles productivos. En este sentido Michiels (2015) detecto en 7/9 ensayos de fertilización de maíz tardío, ubicados en distintas localidades de la región pampeana que, la deficiencia de P, S y Zn son factores limitantes de la producción de este cultivo. En concordancia con estos resultados Ferraris y Urrutia, (2014) también encontraron que en fechas de siembra tardías es posible encontrar respuesta al agregado de N, S y Zn si el rendimiento esperado es similar a la de fechas temprano.

3.3.4 Optimización agronómica y económica de la fertilización fosforada

En el sitio Chaján, tanto la DOAP (para maximizar producción) como la DOEP (maximizar retorno económico) fueron iguales a 0 kg de P ha⁻¹. Esto podría explicarse ya que el tipo de respuesta observada fue negativa. Contrariamente, en el sitio Cuatro Vientos se destaca que la respuesta a la aplicación de P fue positiva lineal (Figura 2) y por lo tanto la dosis óptima agronómica (DOAP) fue aquella dosis máxima evaluada, es decir 48 kg ha⁻¹ permitiendo obtener 7909 kg ha⁻¹ de maíz. Para maximizar el retorno económico a la fertilización con P se determinó la DOEP, la cual fue de 25,5 kg ha⁻¹ de P con la cual se podrían haber obtenido 7333 kg ha⁻¹ de grano de maíz (Tabla 9).

Tabla 9. Dosis óptima agronómica (DOA) y dosis óptima económica (DOE) de P para dos sitios experimentales (Córdoba).

Chaján		Cuatro Vientos	
DOAP	DOEP	DOAP	DOEP
kg FDA ha ⁻¹			
0	0	48	25,5

En resumen, la DOEP como P aplicado incorporado al momento de la siembra, fue en Chaján de 0 kg ha⁻¹, mientras que para Cuatro Vientos fue de 25,5 kg ha⁻¹. Además, la DOAP fue de 0 kg ha⁻¹ para el primer sitio pero de 48 kg ha⁻¹ para el segundo.

Realizando una comparación económica, sin tener en cuenta el efecto residual de la fertilización fosforada, entre los resultados obtenidos en los dos sitios en estudio y la dosis de P utilizada en promedio con mayor frecuencia entre los productores agropecuarios del sur de Córdoba según Cisneros *et al.* (2008), se puede observar que para ambos sitios se hubiera aplicado una dosis promedio de 23 kg ha⁻¹ de P con costo de 754,4 \$ ha⁻¹. Mientras que la dosis recomendada debiera ser 0 kg ha⁻¹ para el sitio Chaján, implicando una pérdida directa de 951,85 \$ ha⁻¹ (considerando el costo del fertilizante y la pérdida de 111,55 kg ha⁻¹ de maíz por la respuesta negativa a la aplicación). A nivel lote se ocasionaría una pérdida de \$71.388,75 (75 ha).

En Cuatro Vientos, en términos económicos serían necesarios aplicar 2,5 kg ha⁻¹ extras a los valores modales empleados (25,5 vs 23 kg ha⁻¹) ello significa un aumento en el costo de fertilización de 82 \$ ha⁻¹ con un incremento del rendimiento de 64 kg ha⁻¹ implicando un incremento del ingreso bruto de 113,38 \$ ha⁻¹ y del retorno al P de 31,38 \$ ha⁻¹ (Tabla 10). Esta mejora en el retorno económico justificaría un incremento de \$ 3.137,95 a nivel de lote (100 ha).

Estos resultados valorizan en gran medida la información de los ensayos a nivel lote de productor ya que ponen en evidencia la diversidad de situaciones que se encuentra en cada establecimiento y resaltan la importancia de realizar estudios de optimización económica de la fertilización.

Tabla 10. Diferencia en pesos por hectárea entre la dosis de P más frecuente utilizado por el productor del sur de Córdoba y la dosis óptima económica (DOE) de P para dos sitios experimentales (Córdoba).

	Dosis	P		Maíz		Margen	Diferencia
		kg ha ⁻¹	\$/ha	kg ha ⁻¹	\$/ha		
Chaján	Productor	23	\$754,40	6841,32	\$12.109,14	\$11.354,74	\$951,85
	DOEP	0	\$0,00	6952,87	\$12.306,58	\$12.306,58	
Cuatro Vientos	Productor	23	\$754,40	7269,11	\$12.866,32	\$12.111,92	\$31,38
	DOEP	25,5	\$836,40	7333,16	\$12.979,70	\$12.143,30	

4. CONCLUSIONES

En términos generales los resultados de este trabajo permiten concluir que no se justifica agronómica ni económicamente la fertilización con P variable por ZM en maíces tardíos. Con lo cual se rechaza la hipótesis originalmente planteada.

Se caracterizaron espacialmente ambos lotes de producción identificando dos ZM en cada uno, sin embargo las determinaciones químicas realizadas al suelo por ZM no mostraron diferencias contrastantes.

El análisis de la respuesta a la fertilización a nivel lote, permite concluir que la dosis óptima agronómica y económica variaron en función del lote, siendo para uno de ellos igual a 0, mientras que en el otro sitio fueron de 48 kg ha⁻¹ la DOAP y de 25,5 kg ha⁻¹ la DOEP. Además el uso de DOEP en comparación a la dosis frecuentemente empleada genera una importa ventaja económica para el productor.

Otro punto de interés que se desprende de este estudio es que la combinación de dosis altas de P en bandas a la siembra con niveles muy bajos de Zn en el suelo pueden acentuar la deficiencia del micronutriente y limitar la respuesta a P si no se corrige mediante fertilización con Zn.

Sería recomendable la evaluación en siembras tempranas y/o una nueva delimitación de ZM construidas con una mayor cantidad de información.

5. BIBLIOGRAFIA

- ALESSO, C., M. PILATTI, S. IMHOFF Y M. GRILLI. 2012.** Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de La Pampa llana Santafesina. *Ciencia del suelo* vol.30 no.1 Ciudad Autónoma de Buenos Aires-Buenos Aires, Argentina.
- ANDRADE, F., A. CIRILO, S. UHART, Y M. OTEGUI. 1996.** Ecofisiología del cultivo de maíz. Editorial La Barrosa-Dekalb Press. Buenos Aires, Argentina.
- ANSELIN, L. 1988.** *Spatial Econometrics: Methods and Models.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- ANSELIN, L. 1999.** *Spatial Econometrics.* Staff paper. Bruton Center, School of Social Sciences, University of Texas at Dallas, Richardson. 31 pp.
- AKAIKE, H. 1974.** A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control.* 19(6): 716–723
- BERARDO, A. 2003.** Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". Inpofos Cono Sur, Rosario-Santa Fe, Argentina. p: 38-44.
- BARBIERI P., H. SAIN ROZAS, H. ECHEVERRÍA y F. ANDRADE. 2008.** Nitrogen Use Efficiency in Maize as Affected by Nitrogen Availability and Row Spacing. *Agronomy Journal* 100:1094-1100.
- BARBIERI, P., H. R. SAINZ ROZAS, H. E. ECHEVERRÍA, F. SALVAGIOTTI, P. BARBAGELATA, M. BARRACO, J. C. COLAZO, G. FERRARIS, H. S. SÁNCHEZ, R. H. CÁCERES DÍAZ, N. I. REUSSI CALVO, G. ESPOSITO, M. EYHERABIDE Y B. LARSEN. 2015.** ¿El análisis de suelo permite diagnosticar la deficiencia de zinc en el cultivo de maíz? Simposio Fertilidad 2015. Rosario-Santa Fe, Argentina. p: 18-21.
- BERMUDEZ, M. 2011.** Cómo llevar a la práctica en gran escala el manejo sitio-específico de N y P. Simposio Fertilidad 2011. Rosario-Santa Fe, Argentina. p: 47-54
- BERT, F. y E. SATORRE. 2012.** Sistemas de producción de maíz: maíz temprano y tardío. *Revista técnica en Siembra Directa de AAPRESID.* p: 19-22.
- BLANCO H., M. BOXLER, J. MINTEGUIAGA, R. HOUSSAY, G. DEZA MARÍN, A. BERARDO Y F. GARCÍA. 2004.** Red nutrición Crea sur de Santa Fe. *Informaciones Agronómicas* 23: 9-14.
- BOLSA DE CEREALES. 2012.** Los maíces tardíos ya juegan en primera. En: [http://www.bolsadecereales.com.ar/detalle-de-los-maices-tardios-ya-juegan-en-primera-\(infocampo\)-8885](http://www.bolsadecereales.com.ar/detalle-de-los-maices-tardios-ya-juegan-en-primera-(infocampo)-8885). Consultado: 13-03-2013.
- BONGIOVANNI, R. 2001.** Agricultura de Precisión y Sustentabilidad. En: 7° Congreso Nacional del Maíz. Pergamino-Buenos Aires, Argentina.

- BONGIOVANNI, R. 2002.** A Spatial Econometric Approach to the Economics of Site-Specific Nitrogen Management in Corn Production. Ph.D. Thesis, Agricultural Economics, Purdue University. 306 pps.
- BONGIOVANNI, R. 2006.** Econometría espacial. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Editorial PROCISUR. Cap.8.2. p:162-165
- BOUMA, J., y P. FINKE. 1993.** Origin and nature of soil resource variability. In Robert, P.C., R.H. Rust, and W.E. Larson (eds.). Proceedings of First Workshop Soil Specific Crop Management. April 14-16. 1992. ASA, CSSA, SSSA. Minneapolis, Minnesota, USA. p. 3-13
- BOYDELL, B., y A. B. MCBRATNEY. 2002.** Identifying potential within-field management zones from cotton yield estimates. Precision Agric. 3:9-23.
- BRAGACHINI, M.; A. MENDEZ, F.; SCARAMUZZA y F. PROIETTI. 2006.** Monitoreo de rendimiento y elaboración de mapas. Libro agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Editorial PROCISUR. Cap.3. p: 45-55.
- BRAY R. y L.T. KURTZ. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. Soil Sci. 59:39-45.**
- BULLOCK, D. S. y D. G. BULLOCK. 2000.** From Agronomic Research to Farm Management Guidelines: A Primer on the Economics of Information and Precision Technology. Precision Agriculture. 2(1):71-101.
- CASSMAN, K., A. DOBERMAN y D.WALTERS. 2002.** Agroecosystems, nitrogen-use efficiency and nitrogen management. Ambio 2: 132-140
- CASSMAN, K., A. DOBERMAN, D.WALTERS y H YANG. 2003.** Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. Annu. Rev. Environ. Resour 28: 315–358.
- CERLIANI, C., M.F. GOMEZ, R. NAVILLE, G. BALBOA, Y G. ESPÓSITO. 2014.** Densidad de siembra optima de maíz (zea mays) ajustada por zonas de manejo. En: X Congreso Nacional de Maíz. Rosario, Argentina.
- CISNEROS, J.M., A. CANTERO, A. DEGIOANNI, V.H. BECERRA y M.A. ZUBRZYCKI. 2008.** Capítulo III. Producción, Uso y Manejo de las Tierras. En: De Prada, J. D. y J. Penna (Eds.) Percepción económica y visión de los productores agropecuarios de los problemas ambientales en el sur de Córdoba, Argentina. Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad de los sistemas de producción y recursos naturales N° 08. IES INTA. Pp 31-44.
- COMAIZ. 2013.** Importancia del Maíz. En: <http://www.comaiz.mx/importancia-maiz/>. Consultado: 12-10-2015
- DILLON, J. Y J. ANDERSON. 1990.** The analysis of response in crop and livestock production. Pergamon Press, New York (EUA). p: 250.

- DOBERMAN, A. 2007.** Nutrient use efficiency. Measurement and management. IFA International Workshop On Fertilizer Best Management Practices, Brussels, Belgium.
- ECHEVERRÍA, H.E. Y F.O. GARCÍA. 1998.** Guía para la fertilización fosfatada de trigo, maíz, girasol y soja. Boletín técnico 149, INTA, EEA Balcarce-Buenos Aires, Argentina.
- ECHEVERRÍA E., G. FERRARIS, G. GERSTER, F.H. GUTIERREZ BOEM Y F. SALVAGIOTTI. 2002.** Fertilización en soja y trigo - soja: respuesta a la fertilización en la región pampeana resultados de la red de ensayos del Proyecto Fertilizar – INTA Campaña 2000/2001 y 2001/2002. EEA INTA Pergamino, 44 p.
- ESPÓSITO, G., G. BALBOA, C. CASTILLO, R. BALBOA, Y A. DEGIOANNI. 2012.** Fecha de siembra y fertilización variable de maíz sobre Haplustoles de Córdoba. XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino y Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata. Buenos Aires. Argentina.
- FAO. 2011.** Productos básicos por país. En: <http://faostat.fao.org/site/340/default.aspx>. Consultado: 07/08/2015.
- FERRARIS, G. y F. MOUSEGNE, . 2008.** Efecto aditivo del agregado de diferentes nutrientes en maíz en el norte, centro y oeste de la provincia de Buenos Aires. IV Jornada de Maíz INTA EEA Pergamino-Buenos Aires, Argentina p: 14.
- FERRARIS, G. 2010.** Fertilización fosforada en cultivos extensivos. Criterios de diagnóstico y herramientas tecnológicas para su manejo en el norte –centro-oeste de Buenos Aires y sur de Santa Fe. INTA. Desarrollo Rural. Pergamino-Buenos Aires, Argentina. p:4-6.
- FERRARIS G. N., L. COURETOT, F. MOUSEGNE, M. LÓPEZ DE SABANDO y L. VENTIMIGLIA. 2011.** Fertilización fosforada líquida en maíz. Proyecto Regional Agrícola. INTA. EEA Pergamino-Buenos Aires, Argentina
- FRIDGEN, J. J. 2000.** Development and evaluation of unsupervised clustering software for sub-field delineation of agricultural fields. M. S. thesis. Univ. of Missouri, Columbia.
- FRIDGEN, J.J., N.R. KITCHEN, K.A. SUDDUTH, S.T. DRUMMOND, W.J. WIEBOLD y C.W. FRAISSE. 2004.** Management zone analyst (MZA): software for subfield management zone delineation. Agron. J. 96: 100-108
- FONTANETTO, H. 1993.** Efecto del método de aplicación del fertilizante fosfórico en maíz a dos niveles de disponibilidad hídrica. Tesis Magister Scientiae. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina
- FONTANETTO, H., O. KELLER, S. GAMBAUDO, J. ALBRECHT, G. GIANINETTO, E. WEDER, O. ZEN, I. DAVEREDE, y F. O. GARCÍA. 2010.** Respuesta del maíz a la fertilización fosforada en la Región centro de Santa Fe. . Publicación Miscelánea N° 118. EEA INTA Rafaela, Rafaela-Santa Fe, Argentina

- GARCÍA, F., K. FABRIZZI, M. RUFO, Y P. SCARABICCHI. 1997.** Fertilización nitrogenada y fosfatada de maíz en el sudeste de Buenos Aires. VI Congreso Nacional de Maíz. AIANBA. Pergamino- Buenos Aires, Argentina
- GARCÍA, F. 2000.** Requerimientos nutricionales de los cultivos. Jornada de actualización técnica para profesionales. "Fertilidad 2000", INPOFOS, Rosario-Santa Fé, Argentina. p: 40-43
- GARCÍA, F. 2003.** El manejo de fósforo en la producción de trigo y maíz. Simposio El fósforo en la agricultura argentina. INPOFOS. Rosario-Santa Fé, Argentina. p:55-61.
- GARCÍA, F. 2005.** Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz. Presentado en la jornada "Maíz" capacitación agropecuaria INPOFOS/PPI/PPIC/ cono sur, Argentina. p: 1-2.
- GARCIA, F., L. PICONE E I. CIAMPITTI. 2014.** Fósforo. En: Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. 2^{da} Edición, Cap.83 p: 229-259.
- GEOINTA. 2016.** Suelos de Cordoba. Visor GeoINTA. En: <http://geointa.inta.gov.ar/visor/?p=857>. Consultado: 20-05-2016.
- GREGORET, M.C., M. DÍAZ ZORITA, J. DARDANELLI, Y R. BONGIOVANNI. 2011.** Regional model for site-specific corn nitrogen fertilization rainfed in Haplustolls of the central pampas, Argentina. Precision Agriculture. 12(6): 831-849.
- GUTIÉRREZ BOEM, F., J. SCHEINER, L. MARTÍN, Y R. LAVADO. 2002.** Respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosforada y nitrogenada. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Puerto Madryn- Chubut, Argentina. p: 16-19.
- GUTIERREZ BOEM F., F. GARCIA, Y M. BOXLER. 2010** ¿Qué tan distintos son los niveles críticos de fósforo disponible para soja, maíz y trigo? XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Fertilidad de Suelos y Nutrición Vegetal. Rosario-Santa Fe, Argentina.
- INMAN, D.J., R. KHOSLA, Y D.G. WESTFALL. 2005.** Nitrogen uptake across sitespecific management zones in irrigated corn production systems. Agron. J. 97:169–176
- MAIZAR. 2006.** Comienza la era del Maíz. En: <http://www.maizar.org.ar/vertext.php?id=224>. Consultado: 12-10-2015.
- MALAVOLTA, E. 2006.** Relación entre el fósforo y el zinc. Informaciones Agropecuarias. 63: 12-13.MIZZOU-ARS. 2000.
- MARSCHNER, H. 1995.** Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London 2nd edition. Cap. 4. p: 889.
- MARTÍNEZ BOLOGNA, G., S. CASTRO, C. CERLIANI, G. BALBOA, R. NAVILLE, Y G. ESPÓSITO. 2014.** Densidad de siembra de maíz asociada a la variabilidad espacial del suelo. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II

Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”. Bahía Blanca. Buenos Aires. Argentina.

- MELGAR R., Y A. CAAMAÑO. 1997.** Fertilización nitrogenada, fosfatada y azufrada. Revista Agromercado. Cuadernillo de Maíz. Año II N° 12. p: 14-15.
- MORAN, P.A.P. 1950.** Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* 37(1):17–23.
- MULLA, D. y J.SCHEPERS. 1997.** Key processes and properties for site-specific soil and crop management. In F.J. Pierce, y E. Sadler (ed.). *The state of site-specific management for agriculture*. ASA-CSSA y SSSA. Madison, Wisconsin, EE.UU. p: 1-18.
- MZA. 2000.** Management Zone Analyst. Version 1.0.1. University of MissouriColumbia & Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture
- PANDEY, R.N. y GIRISH, B.H. 2007.** An improved turbidometric method for the estimation of sulphur in soil extracts. *Sulphur in agriculture*. 18:9-12.
- PERALTA, N. R., J. J. COSTA, M. BALZARINI y H. ANGELINI. 2012.** Delineation of management zones with measurements of soil apparent electrical conductivity in the southeastern pampas. *Can. J. Soil Sci.* 93:1-14.
- QUANTUM GIS DEVELOPMENT TEAM. 2011.** Quantum GIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- RATTO, S.E. 2006.** Los microelementos en el sistema productivo del área pampeana. Micronutrientes en la agricultura. Ed. Vazquez M. AACs.:79-112.
- ROEL, A. y J. TERRA. 2006.** Muestreo de suelos y factores limitantes del crecimiento. *Agricultura de Precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. PROCISUR. Cap 4. p: 74.
- SAGyP – INTA. 1990.** Atlas de Suelos de la República Argentina. Proyecto PNUD Arg-85/019, Buenos Aires, Argentina. p. 395.
- SEILER, R.A, FABRICIUS, R.A., ROTONDO, V.H. y VINOCUR, M.G. 1995.** Agroclimatología de Río Cuarto – 1974 / 1993. Volumen I.FVA. UNRC. Río cuarto. Córdoba. Argentina.
- SIIA. 2013.** Sistema integrado de información agropecuaria. Estadísticas. En: www.siia.gov.ar. Consultado: 16-02-2013.
- TUKEY, J.W. 1977.** *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley Reading, MA. Cap 1. 688pp
- VÁZQUEZ, M. 2002.** Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones agronómicas del Cono Sur. Edición especial sobre el simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosforada", XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Puerto Madryn- Chubut, Argentina. p: 3-7.

WALKLEY, A. y I. A. BLACK. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soli organic matter a proposed modification of the chromic acid trititation method. *Soli Science* 37:29-38.

6. ANEXO I

LIMPIEZA DE MAPAS DE RENDIMIENTO MEDIANTE QGIS.

Procedimiento.

1) Cargar archivo a QGIS.

i. Cargar archivo .csv (ej: 'Santiago N-La Sofia-Lote13-2012-Harvest-Cosecha-Soja.csv') desde la barra de herramientas administrar capa, con la herramienta "Añadir capa de texto delimitado".

ii. Verificar que ventana se visualicen correctamente cada uno de los atributos en columnas. De no ser así comprobar el formato del archivo.

iii. Elegir Sistema de Referencia de Coordenadas "geográficas/WGS84".

iv. Guardar en la carpeta de trabajo correspondiente, la capa vectorial (botón derecho sobre el nombre) Guardar como... "Archivo shape de ESRI" con un nombre que se pueda identificar fácilmente y de una longitud menor a 8 caracteres, (ej: 'ls13sj12' de esta forma se puede identificar Campo (ls: La Sofia), lote (13), cultivo (sj: Soja) y campaña (2012)

v. No modificar el SRC (debe ser WGS84).

vi. Macar Añadir archivo guardado al mapa.

vii. Eliminar la capa 'Santiago N-La Sofia-Lote 13-2012-Harvest-Cosecha-Soja.

2) En la capa que quedo cargada, eliminar campos innecesarios y renombrar restantes, deben quedar:

i. Lat – Lon – Alt12 – Var13 – HG12 – Rto12 – Distancia-Registro-Ancho

Alt12: Altimetría medida en metros sobre el nivel del mar en el 2012

Var12: Variedad que se cosecho en ese lote.

Hg12: Humedad de cosecha.

Rto12: Rendimiento en $t\ ha^{-1}$; $qq\ ha^{-1}$ o $kg\ ha^{-1}$

Distancia: Atributo que mide la distancia entre puntos de registro (cm), relacionado con la velocidad, ya que cada registro se toma a un intervalo constante de 1, 3 o 5 segundo dependiendo de la configuración del monitor.

Registro: Registro de altura del cabezal, tomado como *Activo o Desactivo*, también pueden ser *0 o 1*.

Ancho: Es el ancho de franja que va cosechando el cabezal por pasada.

ii. Guardar los cambios

3) Limpiar mapa por medio de atributos independientes al Rendimiento.

a. Altura de Plataforma.

i. Abrir Tabla de Atributos y por medio de la herramienta Seleccionar objetos espaciales usando una expresión, seleccionar todos Registro = 'Desactivado'

ii. Verificar en el mapa los registros seleccionados y Eliminar.

b. Distancia.

i. Calcular el promedio de la distancia: Vectorial/Herramienta de Análisis/Estadísticas Básicas- Campo objetivo: Distancia

ii. Registrar la media (X) y el Desvío estándar (DS).

iii. Seleccionar:

$X - DS < Distancia > X + DS$

iv. Verificar los registros seleccionados y Eliminar

v. Eliminar atributos: Registro y Distancia.

c. Ancho.

i. Calcular el promedio del Ancho: Vectorial/Herramienta de Análisis/Estadísticas Básicas- Campo objetivo: ancho

ii. Registrar la media (X) y el Desvío estándar (DS).

iii. Seleccionar:

$X - DS < Distancia > X + DS$

iv. VERIFICAR los registros seleccionados y Eliminar

v. Eliminar atributos: Registro, Distancia y Ancho.

4) Limpieza de datos extremos de Rendimiento

a. Hacer doble clic sobre el nombre de la capa

Solapa *Estilo*

Símbolo *Graduado*

Columna: *Rto12*

Modo: Cuantiles

Clases: 4

-Clasificar

b. Registrar los cuantiles 1 y 3 (Q1 y Q3)

i. Calcular el intervalo intercuartil (IIQ= Q3-Q1)

ii. Seleccionar: $Rto12 < (Q1 - IIQ * 1,5)$

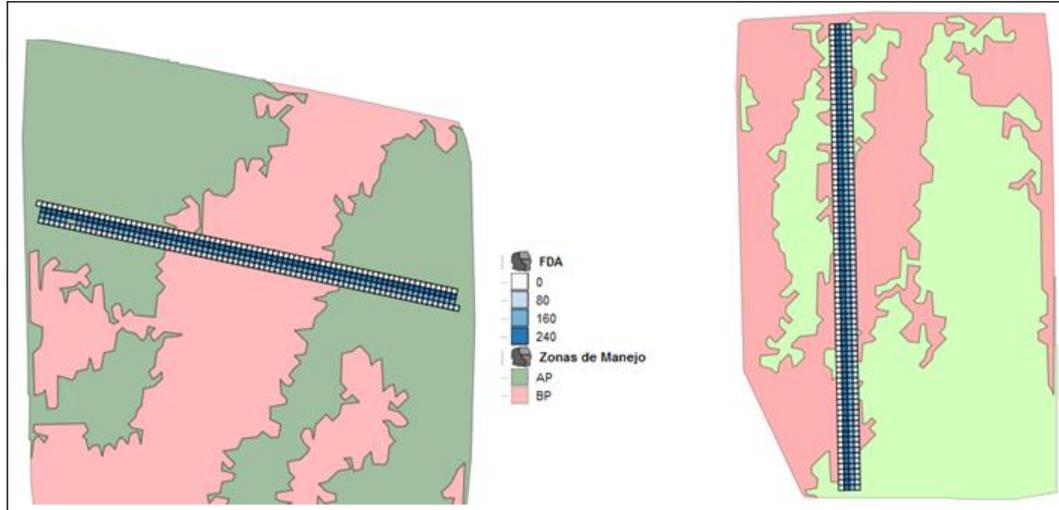
iii. Verificar los registros seleccionados y Eliminar.

iv. Seleccionar: $Rto12 >)Q3 + IIQ*1,5)$

v. Verificar los registros seleccionados y Eliminar.

ANEXO II

Ensayos realizados junto con la ubicación en el lote correspondiente y su respectiva zonificación.



Mapa de zonas, Rojo: Baja Producción; Verde: Alta Producción. Mapa de los ensayo en grilla superpuesta al mapa de zonas. Izquierda: Cuatro Vientos. Derecha: Chaján.

ANEXO III

Salidas estadísticas de InfoStat

Chaján

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rto mz09	3501	0.12	0.12	11.46

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	433263577.16	1	433263577.16	498.60	<0.0001
z	433263577.16	1	433263577.16	498.60	<0.0001
Error	3040465074.57	3499	868952.58		
Total	3473728651.73	3500			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=61.87455

Error: 868952.5792 gl: 3499

z	Medias	n	E.E.	
AP	8515.00	1612	23.22	A
BP	7809.21	1889	21.45	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rto Sj10	3501	0.27	0.27	13.47

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	296674758.26	1	296674758.26	1287.62	<0.0001
z	296674758.26	1	296674758.26	1287.62	<0.0001
Error	806187561.20	3499	230405.13		
Total	1102862319.46	3500			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=31.86105

Error: 230405.1332 gl: 3499

z	Medias	n	E.E.	
AP	3878.61	1612	11.96	A
BP	3294.57	1889	11.04	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rto Mz11		3501	0.36	0.36 12.93

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1984023849.56	1	1984023849.56	1992.54	<0.0001
z	1984023849.56	1	1984023849.56	1992.54	<0.0001
Error	3484038174.32	3499	995723.97		
Total	5468062023.88	3500			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=66.23438

Error: 995723.9709 gl: 3499

z	Medias	n	E.E.	
AP	8530.51	1612	24.85	A
BP	7020.18	1889	22.96	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Rto Sj12		3501	0.08	0.08 43.03

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	23207001.85	1	23207001.85	289.20	<0.0001
z	23207001.85	1	23207001.85	289.20	<0.0001
Error	280782794.38	3499	80246.58		
Total	303989796.24	3500			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=18.80301

Error: 80246.5831 gl: 3499

z	Medias	n	E.E.	
AP	746.48	1612	7.06	A
BP	583.14	1889	6.52	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Cuatro Vientos.

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sja07	4985	0.14	0.14	7.78

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	36255342.61	1	36255342.61	837.66	<0.0001
z	36255342.61	1	36255342.61	837.66	<0.0001
Error	215673212.45	4983	43281.80		
Total	251928555.07	4984			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=11.57126

Error: 43281.8006 gl: 4983

z	Medias	n	E.E.	
AP	2767.82	2296	4.34	A
BP	2596.73	2689	4.01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Sja09	4985	0.38	0.38	13.70

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	331879177.44	1	331879177.44	3034.46	<0.0001
z	331879177.44	1	331879177.44	3034.46	<0.0001
Error	544990585.24	4983	109369.97		
Total	876869762.68	4984			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=18.39403

Error: 109369.9750 gl: 4983

z	Medias	n	E.E.	
AP	2693.12	2296	6.90	A
BP	2175.47	2689	6.38	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
mz10	4985	0.37	0.37	18.61

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	1666545042.95	1	1666545042.95	2886.91	<0.0001
z	1666545042.95	1	1666545042.95	2886.91	<0.0001
Error	2876572132.90	4983	577277.17		
Total	4543117175.86	4984			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=42.25908

Error: 577277.1690 gl: 4983

z	Medias	n	E.E.	
AP	4709.46	2296	15.86	A
BP	3549.46	2689	14.65	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
sjal1	4985	0.19	0.19	13.43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	127959778.40	1	127959778.40	1201.77	<0.0001
z	127959778.40	1	127959778.40	1201.77	<0.0001
Error	530570855.47	4983	106476.19		
Total	658530633.87	4984			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=18.14906

Error: 106476.1901 gl: 4983

z	Medias	n	E.E.	
AP	2603.31	2296	6.81	A
BP	2281.88	2689	6.29	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)

Análisis de la varianza

Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
sjal2	4985	0.12	0.12	20.74

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	60692976.80	1	60692976.80	692.59	<0.0001
z	60692976.80	1	60692976.80	692.59	<0.0001
Error	436670537.79	4983	87632.06		
Total	497363514.59	4984			

Test:LSD Fisher Alfa=0.05 DMS=16.46491

Error: 87632.0566 gl: 4983

z	Medias	n	E.E.	
AP	1546.74	2296	6.18	A
BP	1325.37	2689	5.71	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0.05$)