



Universidad Nacional de Río Cuarto

Facultad de Agronomía y Veterinaria

*Trabajo Final Presentado para
Optar al Grado de Ingeniero Agrónomo*

“Relación entre el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) y el rendimiento en grano de maíz (*Zea mays L.*), fertilizado con nitrógeno en diferentes zonas de manejo”

Alumno

BALBOA, Guillermo Raúl

31.123.666

Director

Ing. Agr. Espósito, Gabriel Pablo

Codirector

Ing. Agr. Castillo, Carlos Alberto

Río Cuarto – Córdoba

Junio de 2008

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO

Facultad de Agronomía y Veterinaria

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: “Respuesta nitrogenada del maíz (*Zea mays L.*) por zonas de manejo y su relación con el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)”

Autor: Guillermo Raúl Balboa

DNI: 31.123.666

Director: Ing. Agr. Gabriel Pablo Espósito

Codirector: Ing. Agr. Carlos Alberto Castillo

Aprobado y corregido de acuerdo a las sugerencias del Jurado Evaluador:

Ing. Agr. Grosso Liliana _____

Ing. Agr. M. Sc. Plevich, José Omar _____

Ing. Agr. Ph. D. Seiler Roberto _____

Fecha de presentación: ___/___/_____

Aprobado por Secretaría Académica: ___/___/_____

Med. Vet. JORGE DE LA CRUZ
Secretario Académico
Facultad de Agronomía y Veterinaria

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional en cada momento y por su significativo aporte en mi formación personal y profesional.

A mi amigo de la infancia Agustín Sigal.

A mis amigos y compañeros de estudio: “Flaco” Andreo, Franco Carrara, Nico Pérez y Fede Posincovich.

A compañeros y amigos de la carrera por los momentos compartidos

A los Ingenieros Gabriel Espósito, Carlos Alberto Castillo, Ricardo Balboa y Estela Brichi.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto.

Al Ing. Ricardo Melchiori del INTA Paraná.

Al Ing. Federico Espina de AyT

Al termino de esta etapa de mi vida, quiero expresar todo mi agradecimiento a quienes con su ayuda, apoyo y comprensión, me alentaron a lograr esta hermosa realidad... mi Formación Profesional

ÍNDICE DE TEXTO

I. RESUMEN	6
II. SUMMARY	7
III. INTRODUCCIÓN	8
i .HIPOTESIS.....	13
ii. OBJETIVOS GENERALES	13
iii. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
IV. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
i. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO	14
1. CLIMA.....	14
2. FISIOGRAFÍA	15
3. CONDICIONES EXPERIMENTALES.....	15
ii. DETERMINACIONES REALIZADAS.....	16
iii. ANALISIS DE DATOS.....	17
V. RESULTADOS Y DISCUSIONES	18
i. ZONIFICACIÓN.....	18
1. ENSAYO I SAN BELTRÁN.....	18
i. ZONAS DE MANEJO	18
i. PERFIL DEL SUELEO	19
2. ENSAYO II EL PIQUETE	20
i. ZONAS DE MANEJO	20
i. PERFIL DEL SUELO.....	21
3. COMPARACIÓN DE PERFILES	22
ii. RELACIONES ENTRE ZONAS DE MANEJO, FERTILIZACIÓN Y RENDIMIENTO.....	23
iii. RELACIÓN ENTRE NDVI Y RENDIMIENTO.....	26
VI. CONCLUSIONES	31
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	31
VIII. ANEXO.....	36

ÍNDICE DE CUADROS

- Cuadro 1** Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Productividad Baja. (15)
- Cuadro 2** Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Productividad Media. (16)
- Cuadro 3** Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Productividad Alta (16)
- Cuadro 4.** Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Productividad Baja. (18)
- Cuadro 5.** Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Productividad Media. (18)
- Cuadro 6.** Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).
Zona de manejo: Productividad Alta (18)
- Cuadro 7.** Fecha de ocurrencia de estadios fenológicos (19)
- Cuadro 8.** Resultados estadísticos Ensayo I Establecimiento San Beltrán (19)
- Cuadro 9.** Resultados estadísticos Ensayo II Establecimiento El Piquete (21)
- Cuadro10.** Rendimiento de ambientación y Obtenido Ensayo I San Beltrán (26)
- Cuadro 11.** Rendimiento de ambientación y Obtenido Ensayo II El Piquete (26)

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitación Mensual Normal período 1978 – 2007 para la localidad de Río Cuarto, Córdoba. (11)
- Figura 2.** Mapa de Zonas de Manejo por productividad y Plano de Ensayo I en Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba) (15)
- Figura 3.** Mapa de Zonas de Manejo por productividad y Plano de Ensayo II en Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba). (16)
- Figura 4.** Rendimiento en función del NDVI, para los datos de los dos ensayos. (23)
- Figura 5.** Rendimiento en función del NDVI agrupados por productividad. (23)
- Figura 6.** Rendimiento en función del NDVI promedio de cada dosis. (24)
- Figura 7.** Rendimiento estimado y obtenido en función del INSA Y (25)
- Figura 8.** NDVI en función del espacio y Ambientación para una franja al azar del ensayo II en el establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba) (26)

I. RESUMEN

La disponibilidad nutricional presenta una elevada variabilidad espacial. Para el manejo de la misma se han desarrollado diversas técnicas agronómicas entre otras el Manejo de Nutrientes Sitio-Específico (MNSE), que corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del lote. El objetivo del presente trabajo fue verificar la relación entre la respuesta en rendimiento de grano a la fertilización nitrogenada en maíz (*Zea mays L.*) y el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) empleando un sensor remoto GreenSeeker, en el estadio V₈. Para ello se establecieron dos ensayos de maíz: el Ensayo I en el establecimiento “San Beltrán” ubicado 10km al oeste de la localidad de Río Cuarto (Córdoba); y el Ensayo II en el establecimiento “El Piquete” distante a 60km al este de la mencionada localidad. El diseño experimental fue factorial en franjas con tres repeticiones espaciales. Cada tratamiento consistió en la combinación de dos factores: las dosis de nitrógeno y las zonas de manejo. Luego de aplicar el fertilizante en estadio V₅, se procedió a la lectura del NDVI georreferenciado en estadio V₈ mediante el sensor remoto de mano GreenSeeker. La cosecha de ambos ensayos se realizó con cosechadora equipada con monitor de rendimiento. Todos los resultados fueron analizados mediante ANAVA, test de separación de medias y análisis de regresión. Los resultados mostraron que las zonas de manejo, determinadas mediante diferencias entre mapas índice de productividad, se correlacionan en parte con las caracterizaciones edafológicas. Ante la ausencia de respuesta a la fertilización nitrogenada, no se pudo establecer correctamente si el instrumental presenta relación con la respuesta a la fertilización. No obstante, se ha podido encontrar una asociación aceptable entre el NDVI y el rendimiento en grano del cultivo de maíz.

Palabras clave: *NDVI – fertilización – zonas de manejo – maíz – agricultura de precisión*

II. SUMMARY

Relationship between Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and nitrogen fertilized corn (*Zea mays L.*) grain yield, in different management zones

The nutritional availability presents a high spatial variability. For its management there have been developed several agronomic techniques such as Site-Specific Nutrients Management (MNSE), corresponding to variable application of fertilizers dose according to fertility level of each sector of homogenous management within the plot. The objective of this work was to verify the relationship between the increase of grain yield with nitrogen corn (*Zea mays L.*) fertilization and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sensor readings using GreenSeeker remote sensor in V8 stage. On this purpose, two field corn trials were done. Trial I: in the “San Beltrán” farm, located 10km to the west of the city of Río Cuarto (Córdoba); and Trial II: in the “El Piquete” farm, located 60km to the east of the same city. The experimental design was factorial in strips with three spatial repetitions. Each treatment consisted of the combination of two factors: nitrogen doses and management zones. After applying fertilizer in V5 stage, came the NDVI georeferenced reading in V8 stage, using the GreenSeeker remote hand held sensor. The harvest of both trials was done with a yield monitor equipped combine. Results were analyzed by ANOVA, means separation test and regression analysis. This results showed that the management zones, determined by differences between productivity index maps, are partly correlated with soil characterizations. Due to no response in nitrogen fertilization, it was not possible to clearly find a relationship between this equipment and fertilization response. However, an acceptable association between the NDVI and corn grain yield could be found.

Keywords: NDVI – Fertilization – Management zones – Corn – Precision Agriculture

III. INTRODUCCIÓN

Los adelantos tecnológicos introducidos en la agricultura Argentina en los últimos años, que contribuyeron al logro de duplicar la producción de granos durante la última década, han sido numerosos. Frente a la necesidad de mantener e incrementar la competitividad del sector agropecuario, principal generador de riquezas genuinas de Argentina, se aprecia la necesidad de continuar mejorando la eficiencia de utilización y aprovechamiento de los diferentes insumos, aplicados hoy a través de diagnósticos genéricos (Bragachini, 2000).

Una buena disponibilidad nutricional, especialmente en los momentos en que los nutrientes son requeridos en elevadas cantidades, asegura: i) un buen crecimiento foliar, lo que permite al cultivo alcanzar rápidamente y mantener la cobertura total del suelo; y, ii) una alta eficiencia de conversión de la radiación interceptada en biomasa. Esto garantiza un óptimo estado fisiológico en la etapa decisiva para la determinación del rendimiento. El maíz necesita absorber 20 kg de nitrógeno y alrededor de 4 kg de fósforo por tonelada de rendimiento de grano. En consecuencia, los requerimientos de estos nutrientes quedan definidos según el potencial productivo de cada ambiente, debiéndose aplicar fertilizantes cuando la cantidad aportada por el suelo no satisfaga las necesidades de los cultivos. Cuando los requerimientos nutricionales no son cubiertos, la tasa de crecimiento del cultivo se reduce y como consecuencia su productividad (Andrade *et al.*, 1996).

La eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN), entendida como la cantidad de grano producida por unidad de nitrógeno aportado, fue estimada por Dale (1997), Tkachuk (1979) y Keeney (1982) en aproximadamente un 33%, a nivel mundial para la producción de cereales (trigo, *Triticum aestivum L.*, maíz, *Zea mays L.*, arroz, *Oryza sativa L.*, cebada, *Hordeum vulgare L.* sorgo, *Sorghum bicolor L.*, mijo, *Pennisetum glaucum L.*, avena, *Avena sativa L.* centeno, *Secale cereale L.*). El 67% restante representa una elevada pérdida económica valuada en miles de millones de dólares por año. La baja eficiencia es consecuencia de la desnitrificación del suelo, la volatilización, los escurrimientos superficiales y la lixiviación, entre otras posibles causas.

Incrementar la EUN en cereales es posible en sistemas que utilicen variedades con alto índice de cosecha, o por incorporar fertilizantes del tipo nitrógeno del amonio, o por aplicación de dosis variables basadas en la detección de zonas de manejo mediante el empleo de sensores. (Raun, *et al.*, 1999).

Diversos autores han manifestado que, aplicaciones nitrogenadas en dosis completa al momento de la siembra, incrementan los riesgos de pérdidas por lixiviación ante lluvias intensas; además de dificultar el cálculo de la dosis necesaria por desconocer el estado de crecimiento del cultivo (Schmidt *et al.*, 2002; Tawainga *et al.*, 2003; Sainz Rozas *et al.*, 2000). Por este motivo, la aplicación de nitrógeno en estadios vegetativos intermedios entre

la siembra y la floración, es una técnica de manejo agronómico que mejora la eficiencia de uso del nutriente (Scharf *et al.*, 2002).

La decisión de fertilizar constituye una de las herramientas de manejo empresarial que más afecta el costo y la rentabilidad de la producción de cereales como el trigo y el maíz. Principalmente, porque el nitrógeno, en el rango de uso más frecuente, es el nutriente más vinculado al rendimiento y tiene una relación lineal con el mismo (Melgar, 2002). Cualquier tipo de práctica agronómica, tendiente a incrementar la producción de granos, plantea la necesidad de reducir la incertidumbre de saber si el adicional de rendimiento obtenido superará en términos económicos lo invertido en dicha práctica (Maddoni *et al.*, 2003).

En los sistemas de producción real, la disponibilidad nutricional presenta una elevada variabilidad espacial, principalmente en relación al nitrógeno, por lo cual cuantificar la oferta nitrogenada del suelo y con ello realizar diagnósticos precisos lleva a errores de sobre y subdosificación (Mulla y Bhatti, 1997).

Investigaciones realizadas en pequeñas parcelas dentro de los lotes, han evidenciado que la producción de maíz difiere significativamente en distintos sectores del campo, dependiendo de la variabilidad microambiental de cada parcela y con ello se alteran sustancialmente las necesidades de fertilización nitrogenada (Bundy y Andraski, 1995).

La práctica dominante de los productores agropecuarios en la Argentina y en el mundo, es aplicar la misma cantidad de fertilizante nitrogenado en toda la superficie del campo, sin considerar la posible variabilidad espacial de las necesidades de este nutriente. Por este motivo Scharf *et al.* (2005) han señalado que es frecuente la fertilización en exceso en algunos sectores del lote y la subfertilización en otros.

Para el manejo de la variabilidad espacial mencionada en el párrafo anterior, se ha desarrollado la agricultura de precisión. Esta práctica ha sido definida por Pierce y Nowak (1999) como la aplicación de tecnologías y principios para manejar la variabilidad espacial y temporal intralote, mediante la modificación de las decisiones agronómicas que consideran la optimización de los recursos en cada punto del campo, cuya finalidad es mejorar la productividad minimizando el impacto ambiental.

Las características del suelo y del cultivo varían en el espacio (distancia y profundidad) y en el tiempo. La agricultura de precisión es un conjunto de técnicas orientadas a optimizar el uso de insumos agrícolas (semilla, agroquímicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola. Esta optimización se logra con la distribución de la cantidad correcta de esos insumos, dependiendo del potencial productivo y de la necesidad de cada punto de las áreas de manejo (Mantovani, *et al.*, 2006)

El área de mayor desarrollo dentro de la agricultura de precisión es el Manejo de Nutrientes Sitio-Específico (MNSE), también llamado Tecnología de Dosis Variable (TDV),

que corresponde a la aplicación variable de dosis de fertilizantes de acuerdo al nivel de fertilidad de cada sector de manejo homogéneo dentro del lote, esto significa que no se trabaja necesariamente con una sola dosis de fertilizante, sino que con tantas dosis como áreas significativamente homogéneas existan en la explotación (Ortega *et al.*, 1999)

La variabilidad que existe dentro de un lote se puede caracterizar en tres tipos: i) natural, tales como: tipo de suelo, topografía, etc.; ii) aleatoria, como las precipitaciones; y iii) de manejo, como la aplicación de fertilizantes, la densidad y uniformidad de siembra, etc. (Bongiovani, 2003). Mientras más diferencias de potenciales de rendimiento tengan esos sitios, existe mayor posibilidad que la aplicación variable de insumos (fertilizantes, semillas, agroquímicos) sea una práctica conveniente en términos económicos y ambientales.

En los últimos años gracias al desarrollo de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) un observador cualquiera puede determinar cual es su posición en la superficie terrestre en todo momento, bajo cualquier condición climática y en un radio de cobertura global. Esta tecnología instalada en máquinas cosechadoras con monitores de rendimiento ha permitido la realización de mapas de productividad a pequeña escala conocidos como “mapas de rendimiento” (Claret *et al.*, 2006).

La variabilidad espacial puede ser analizada en primer término, a través de diferentes capas de información, como ser: mapas de rendimiento de cultivos anteriores, fotografías aéreas, mapas topográficos, imágenes satelitales, experiencias anteriores del productor o bien mapas de suelo de áreas homogéneas. De este modo se pueden definir dentro de un lote, sitios con potencialidad de rendimiento muy diferentes.

Si el área y las diferencias de rendimiento justifican agrónomica y económicamente el tratamiento diferencial de los insumos, se podría comenzar con la siguiente etapa que consiste en la caracterización de los ambientes y posterior diagnóstico de la aplicación de semilla y/o fertilizante en forma variable (Bragachini *et al.*, 2005).

En consecuencia, la aplicación de la agricultura de precisión puede presentar tres ventajas desde el punto de vista productivo y/o de la aplicación de insumos pudiéndose obtener así, i) mayores rendimientos por redistribución de semillas y/o fertilizantes mejor ajustados a las condiciones de cada sitio ó ii) iguales rendimientos con un menor costo de producción ó iii) mayores rendimientos y reducción de los costos de producción (Bragachini *et al.*, 2000).

Ensayos con diferentes dosis de N abarcando distintas posiciones topográficas mostraron que la productividad del cultivo y las curvas de respuesta a este nutriente difieren por efecto de la posición del paisaje y del año (Bongiovanni 2003).

Esta variabilidad ambiental ha sido desde siempre percibida por la mayoría de los agricultores, al observar las diferencias en los patrones de crecimiento (altura, color, forma) entre los distintos sectores del campo. Mediante esta “percepción remota” se puede

interpretar si el cultivo se encuentra bajo algún tipo de estrés por sequía, deficiencia nutricional o infestación por plagas o enfermedades. La percepción remota es un grupo de técnicas que permiten recolectar información sobre un objeto o área sin tener que estar en contacto físico con el mismo. Las distancias que separan al sensor del objeto o área estudiado pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros. Los métodos más comunes para recoger información incluyen desde sensores manuales hasta el uso de sensores colocados sobre aviones o satélites. (Von Martini *et al.*, 2005).

El manejo sitio específico del sistema suelo – planta se puede lograr mediante diferentes estrategias, algunas de las mismas se basan en la determinación de zonas que tienden a comportarse de manera homogénea a través de los años (zonas de manejo); mientras que otras estrategias utilizan los sensores de cultivo en forma directa para el manejo variable de insumos en tiempo real (Rufo, 2006).

Recientemente se han comenzado a desarrollar sensores terrestres que proveen información de la reflectancia del dosel en tiempo real. Los mismos están diseñados para montarse en equipos de alto despeje (como pulverizadores autopropulsados) y son capaces de realizar prescripciones y aplicaciones correctivas (Melchiori *et al.*, 2006).

Existen en la actualidad diversas metodologías para el procesamiento de la información relevada. Por lo general se utilizan determinadas bandas del espectro visible y/o del infrarrojo cercano (NIR) a fin de elaborar índices sensibles a parámetros del crecimiento, como la cobertura, el contenido de clorofila o nitrógeno en hojas entre otros. Uno de los más empleados es el índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI) (Moreira 2006).

El NDVI está basado en las propiedades de los tejidos vegetales verdes de reflejar la radiación solar incidente de manera diferencial en la banda espectral correspondiente al rojo del espectro visible “VIS” (0.6 - 0.7 μm) y la correspondiente al infrarrojo cercano “NIR” (0.7 – 1,1 μm). La presencia de clorofila en el tejido vegetal provoca una alta reflexión en el infrarrojo cercano y una baja reflexión en el rojo. Así es de esperar que el NDVI alcance valores mínimos en suelo desnudo y máximos cuando el dosel se acerque a cobertura total (Teal, et al., 2006).

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

Calera *et al.* (2003) utilizaron lecturas de NDVI obtenidas con imágenes satelitales y hallaron muy buenas correlaciones entre éste y el coeficiente de extinción de la radiación en el cultivo (kc), estableciendo con ello necesidades de riego.

Raun *et al.* (2001), identificaron etapas críticas del crecimiento en las cuales el potencial de la producción se podría predecir como resultado de la fuerte relación entre NDVI y la producción de grano.

Martin *et al.* (2007) determinaron que en las etapas tempranas del crecimiento (V_3 a V_5), el rendimiento en grano y la biomasa no se correlacionaron con el NDVI (R^2 26%), en los estadios V_6 y V_7 el ajuste fue de un 29% y en las etapas comprendidas entre V_8 y V_{12} el mismo trepó hasta el 66%. Recientemente, Teal *et al.* (2006) encontraron un ajuste del 77% entre el NDVI (lectura realizada en V_8) y el rendimiento del maíz.

La Universidad de Oklahoma (EEUU) elaboró un algoritmo de recomendación de fertilización nitrogenada (OSU) basado en el sensor GreenSeeker (NTech Industries, Inc., CA, EE.UU.). En Argentina dicho algoritmo fue calibrado por Melchiori *et al.*, (2006) para el cultivo de trigo y maíz, siendo las únicas experiencias en el país con este sensor remoto, permitiendo generar una herramienta de diagnóstico y recomendación de la refertilización nitrogenada en dichos cultivos.

En sus investigaciones, Melchiori *et al.* (2006), Raun *et al.* (2002) y Martin *et al.* (2007) realizaron una evaluación de refertilización nitrogenada en base a la utilización del sensor remoto GreenSeeker. Las experiencias combinan dosis preestablecidas de nitrógeno y dosis arrojadas a través del algoritmo OSU.

Esposito *et al.* (2006) en el Dpto. de Río Cuarto (Córdoba) elaboraron, calibraron y validaron un modelo de diagnóstico de la fertilización nitrogenada en maíz (NP-Zea), el cual realiza un balance de nitrógeno entre la demanda potencial y la oferta de un ambiente en particular. Bocco (2006) ha encontrado un alto índice de coincidencia D entre valores observados y simulados de rendimiento en ensayos realizados, en ambientes contrastantes de la zona de Coronel Moldes (Córdoba), estableciendo que este modelo puede utilizarse para diagnóstico de nitrógeno por zonas de manejo.

Como en la actualidad no existen metodologías para la determinación de las propiedades físicas y químicas de suelo requeridas por el NP-Zea, a la misma escala de detalle que la de los monitores de rendimiento, es factible cometer errores a la hora de discernir el grado de precisión de este modelo en el Manejo de Nutrientes Sitio-Específico. Por lo tanto y ante la disponibilidad de contar con instrumental capaz de determinar atributos del estado nutricional del cultivo a escala detallada y georreferenciada como el GreenSeeker, el propósito de este proyecto es generar información que aporte conocimientos para la calibración de este nuevo método de diagnóstico de nitrógeno sitio específico en el sur de Córdoba.

III. i. HIPÓTESIS

En suelos con significativa variabilidad espacial, el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), obtenido a partir de un sensor remoto activo (*Hand Held GreenSeeker, NTech*) en estadio V₈ del maíz, se correlaciona con la variabilidad espacial de la respuesta en rendimiento de grano a la fertilización nitrogenada.

III. ii. OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación entre la respuesta en rendimiento de grano a la fertilización nitrogenada en maíz (*Zea mays L.*) y el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) obtenido mediante el empleo de un sensor remoto en estadio V₈, en lotes con diferentes zonas productivas; para su uso en Manejo de Nutrientes Sitio-Específico.

III. iii. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar, caracterizar y delimitar territorialmente la variabilidad espacial del rendimiento de maíz, para determinar diferentes zonas de manejo dentro de un lote de producción.
- Evaluar si la respuesta a la fertilización nitrogenada es distinta en las diferentes zonas de manejo establecidas, para su posterior correlación con el NDVI.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

IV. i. CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

IV. i. 1. CLIMA

La región de Río Cuarto presenta un clima templado sub húmedo, con precipitaciones que suelen exceder la evapotranspiración en los meses de primavera y otoño y con déficits puntuales en verano e invierno (Seiler *et al.*, 1995).

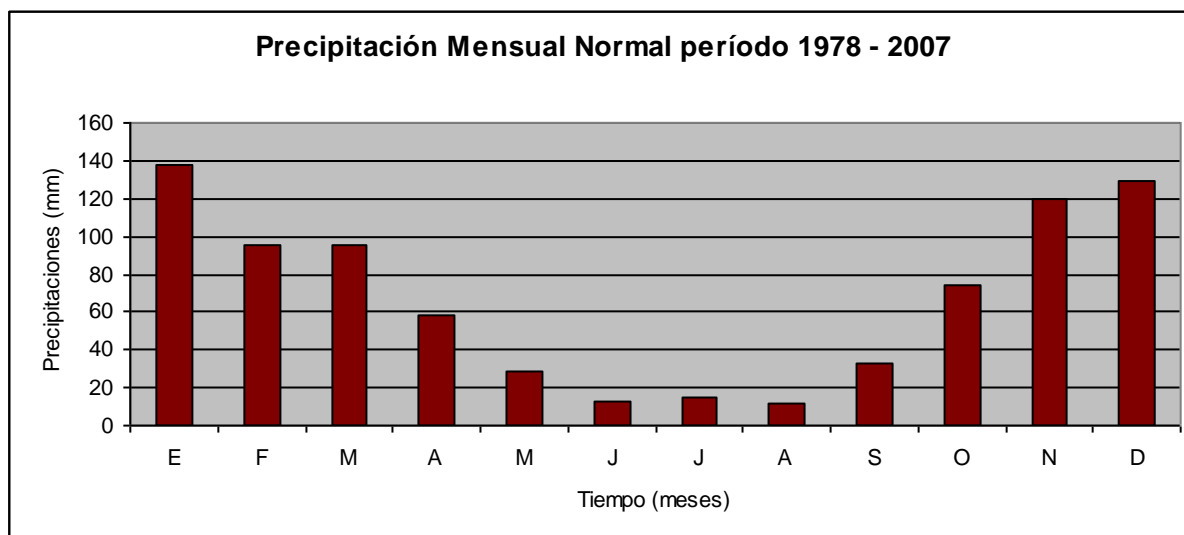


Figura 1. Precipitación Mensual Normal período 1978 – 2007 para la localidad de Río Cuarto, Córdoba.

La precipitación media anual normal es de 801,2 mm con valores extremos mínimos de 451,1 mm en 1988 y máximos de 1195,2 mm en 1984, para la serie 1978 – 2007. (Seiler *et al.*, 1995).

Cabe destacar que la precipitación media normal del ciclo del cultivo (Septiembre – marzo) es de 685mm mientras que en el mismo período de la campaña 2006 – 2007 el registro ascendió a 813mm. Este excedente de casi 130 mm durante el ciclo del cultivo juega un rol muy importante en la definición del rendimiento, pudiendo llegar a enmascarar las diferencias en productividad de los diferentes ambientes.

El régimen térmico es mesotermal, la temperatura media del mes más cálido (enero) es de 23°C con una máxima absoluta de 39,5°C. La temperatura media del mes mas frío (julio) es de 9,1°C con una mínima absoluta de - 11,5°C. La amplitud térmica media anual es de 13,9°C.

La fecha media de la primera helada es el 25 de mayo y la de última es el 12 de septiembre, siendo el período libre de heladas 255 días en promedio.

IV. i. 2. FISIOGRAFÍA

La zona se caracteriza por presentar planicies intermedias suavemente onduladas, con presencia de medanos aislados asociados a lomas muy suavizadas. El relieve es normal – subnormal suavemente ondulado, con pendientes medias y largas de gradientes de hasta 1,5% (Cisneros *et al.*; 2000).

IV. i. 3. CONDICIONES EXPERIMENTALES

Se realizaron dos ensayos en dos establecimientos agrícolas de la zona de Río Cuarto. Los mismos fueron seleccionados de acuerdo a su historia de rendimientos según mapas georreferenciados de años anteriores (Campañas 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2004-2005), eligiendo aquellos establecimientos en los cuales sus lotes presentaron una marcada variabilidad de producción. El Ensayo I se realizó en el establecimiento “San Beltrán” (33°09′05,81″S 64°30′21,40″O) ubicado 10km al oeste de la localidad de Río Cuarto en la provincia de Córdoba (figura 2); el Ensayo II se llevo a cabo en el establecimiento “El Piquete” (33°21′24,88″S 63°49′22,32″O) distante a 60km al este de la mencionada localidad (figura 3).

Con los mapas de rendimiento de años anteriores de los lotes donde se realizaron los ensayos se confeccionaron mapas de productividad relativa siendo el rendimiento promedio por año y por lote base 100. Posteriormente se promedió para cada punto dentro del lote la productividad relativa de los 5 años anteriores, obteniéndose así “mapas índice de productividad”, los cuales se confeccionaron utilizando el software ArcView GIS 3.2 (ESRI, 1996).

Con los mapas índice de productividad se establecieron tres zonas de manejo, a saber:

- PA – productividad alta – (más de una desviación estándar por encima de la media),
- PM – productividad media – (rendimiento medio)
- PB – productividad baja – (menos de una desviación estándar por debajo de la media);

La siembra del maíz se realizó orientando los surcos del cultivo de manera de cruzar perpendicularmente las diferentes zonas de manejo.

El diseño experimental utilizado fue en franjas con tres repeticiones espaciales. Cada tratamiento consistió en la combinación de dos factores: las dosis de nitrógeno y las zonas de manejo. Las dosis de nitrógeno empleadas en ambos ensayos se presentan a continuación:

- 0 kg N ha-1 (testigo)
- 32 kg N ha-1
- 64 kg N ha-1

- 129 kg N ha⁻¹
- 193 kg N ha⁻¹

La refertilización de ambos ensayos se realizó al estadio de 5° hoja totalmente desplegada del maíz y con máquina refertilizadora. El fertilizante nitrogenado empleado fue urea (46% de nitrógeno).

Al momento de la siembra todas las parcelas fueron fertilizadas con una mezcla de 28,6 kg ha⁻¹ de P, más 14 kg ha⁻¹ de S y 40 kg ha⁻¹ de N, aplicados como fosfato diamónico y sulfato de amonio, para evitar otras interferencias nutricionales.

Las dosis seleccionadas fueron aquellas que permitieron un gradiente de aplicación nitrogenada hasta valores superiores a los 200 kg de nitrógeno (N a la siembra + N en V6) para asegurar dosis de no respuesta (*¹).

IV. ii. DETERMINACIONES REALIZADAS:

- *Caracterización de las zonas de manejo.* Con el mapa de unidades ambientales y el empleo de un GPS portátil se procedió a determinar algunas características topográficas y edafológicas de cada unidad ambiental. Para ello se realizó una calicata de 1,5m de ancho por un metro de largo y 1m de profundidad con su lado mayor orientado de este a oeste. En la misma se procedió a caracterizar el perfil edafológico mediante secuencia, tipo y profundidad de cada horizonte y características texturales. En el horizonte superficial se determinó: materia orgánica, fósforo, pH, nitrógeno de nitratos y azufre de sulfatos.
- *Fecha de ocurrencia de estadios fenológicos.* Mediante observación visual se determinaron los estadios fenológicos de V₆, V₈, V₁₃, R₁, R₃ y R₆ utilizando la escala de Ritchie y Hanway (1997).
- *Medición de NDVI mediante sensor remoto GreenSeeker (NTech Industries, Inc., CA, EE.UU.) en el estadio V₉.* Se utilizó el sensor remoto activo de NDVI *Hand Held GreenSeeker* que arroja valores de NDVI en tiempo real). Para ello se realizaron mediciones en todos los tratamientos y sus repeticiones. Las mediciones se efectuaron en los dos surcos centrales de cada parcela a 70 cm por encima del dosel. Se incorporó un GPS al sensor para georreferenciar los valores obtenidos.
- *Rendimiento en grano.* La cosecha de ambos ensayos se realizó con máquinas equipadas con monitores de rendimiento y posicionamiento global mediante GPS.

¹ Ing. Agr. Gabriel Espósito, Universidad Nacional de Río Cuarto, Comunicación personal.

IV. iii. ANÁLISIS DE DATOS

Todos los resultados fueron analizados mediante ANAVA, test de separación de medias (DMS, Fisher) y análisis de regresión, para ello se utilizó el paquete de análisis estadísticos InfoStat® (2002). Las mediciones georreferenciadas del sensor de NDVI *Hand Held GreenSeeker (NTech)* se graficaron contra los rendimientos obtenidos.

V. RESULTADOS Y DISCUSIONES

V. i. ZONIFICACIÓN

V. i. 1. ENSAYO I “SAN BELTRÁN”

V. i. 1. i. ZONAS DE MANEJO

Como se aprecia en la Figura 2 del ensayo San Beltrán, la zonificación muestra una área de alta productividad en el sector este del lote, una de productividad media que atraviesa el mismo desde el margen noreste hacia el noroeste y dos zonas de productividad baja, una en el sector noroeste y otra en la zona central que se extiende hacia el sur, esta última abarcada en el ensayo realizado. Se puede observar en la Figura 2 que el ensayo (área rectangular multicolor) se estableció en la zona sur del lote dado que se puede atravesar en forma perpendicular las tres zonas de manejo identificadas, con las franjas de nitrógeno del ensayo.

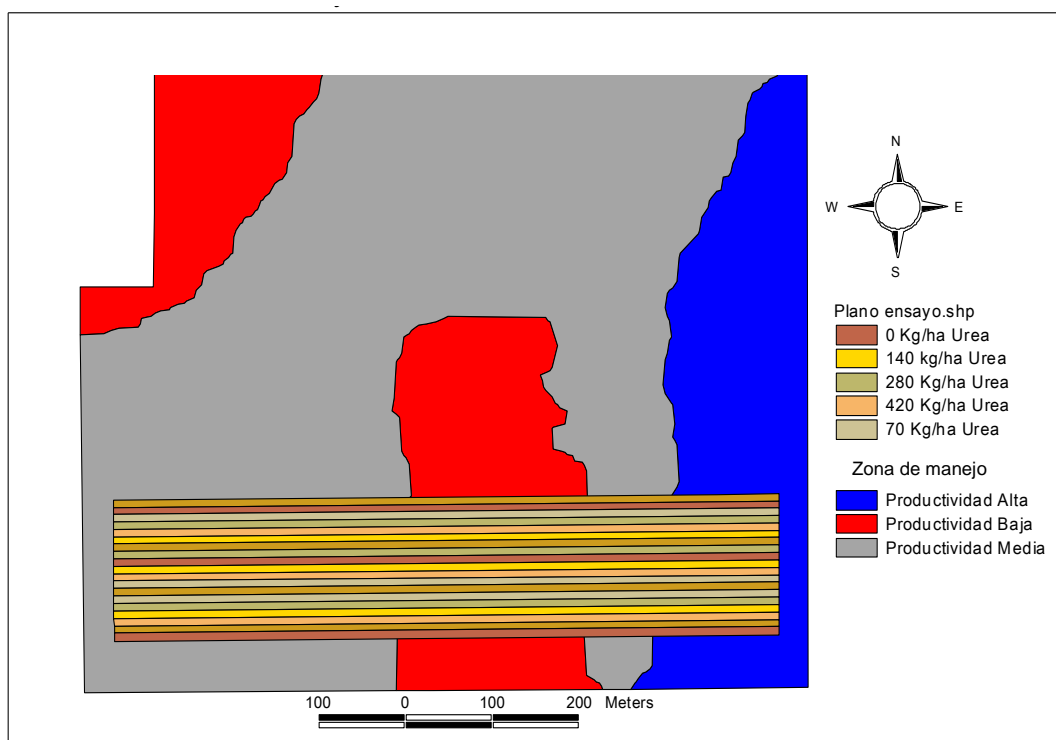


Figura 2. Mapa de Zonas de Manejo por productividad y Plano de Ensayo I en Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).

V. i. 1. ii. PERFIL DEL SUELO

Teniendo en cuenta los mapas de zonas de manejo y observando las características del lote in situ, se realizaron tres calicatas (una por cada zona de manejo) para la descripción del perfil del suelo, las cuales se presentan a continuación:

Cuadro 1. Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).

Zona de manejo: Productividad Baja.

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Siembra					V ₆
					MO (%)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	pH	N-NO ₃ (ppm)
Ap	0 – 13	17	35	48	2,06	16,5	19	8,8	6,1	12,6
A2	13 – 22	17	35	48						
AB	22 – 34	17	33	50						12,2
Bw1	34 – 52	15	33	50						
Bw2	52 – 65	14	32	54						
BC	65 – 83	12	31	57						
C	83 –	8	30	62						

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. N-NO₃: nitrógeno de nitratos. S-SO₄ azufre de sulfatos.

Cuadro 2. Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).

Zona de manejo: Productividad media

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Siembra					V ₆
					MO (%)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	pH	N-NO ₃ (ppm)
Ap	0 – 11	17	35	48	2,86	28,7	19	8,6	6,3	13,01
A2	11 – 20	17	35	48						
AB	20 – 30	17	33	50						12,81
Bw1	30 – 47	15	33	50						
Bw2	47 – 57	14	32	54						
BC	57 – 68	12	31	57						
C	68 –	8	30	62						

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. N-NO₃: nitrógeno de nitratos. S-SO₄ azufre de sulfatos.

Cuadro 3. Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento San Beltrán, Río Cuarto (Córdoba).

Zona de manejo: Productividad Alta

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Siembra					V ₆
					MO (%)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	pH	N-NO ₃ (ppm)
A	0 – 22	20	45	35	2,56	51,9	15	9,1	6,2	15,8
AB	22 – 33	20	45	35						
Bt1	33 – 52	24	45	31						14,2
Bt2	52 – 70	24	45	31						
BC	70 – 85	15	40	45						
C	85 –	13	40	47						

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. N-NO₃: nitrógeno de nitratos. S-SO₄ azufre de sulfatos.

En San Beltrán las zonas de manejo identificadas como de Productividad Alta, Productividad Media y Productividad Baja se correlacionan en el paisaje con el bajo, la

media loma y loma respectivamente. Como se puede apreciar en los Cuadros 1, 2 y 3, los niveles de fósforo disponible al momento de la siembra difieren entre las diferentes zonas, siguiendo el orden PA>PM>PB con diferencias del 80,8% y del 214,5% a favor de PA sobre PM y PB respectivamente. Estos valores pueden considerarse como niveles aceptables para la producción de maíz. La media del contenido de MO de las tres zonas de manejo es de 2,47%. En cuanto a la textura, el ambiente de productividad baja y el de productividad media son similares, aunque el segundo posee más MO. Cuando se llevó a cabo la observación directa el perfil, éste se encontraba a capacidad de campo y se destacó que si existiese estrés hídrico (en la zona de productividad alta) la exploración del suelo por las raíces se vería comprometida por la textura del mismo. Al contar con abundantes precipitaciones durante el ciclo del cultivo esta problemática no se evidenció.

V. i. 2. ENSAYO II “EL PIQUETE”

V. i. 2. i. ZONAS DE MANEJO

En la Figura 3 (El Piquete) se identifica una zona de alta productividad en el sector este, una zona de mayor tamaño de productividad baja que se extiende desde el sector noroeste atravesando el centro del lote y hacia ambos lados de las zonas de productividad baja se encuentran las zonas de productividad media. En este caso las franjas de fertilización (rectángulo multicolor) se ubican de este a oeste atravesando las tres zonas de manejo establecidas, de manera perpendicular.

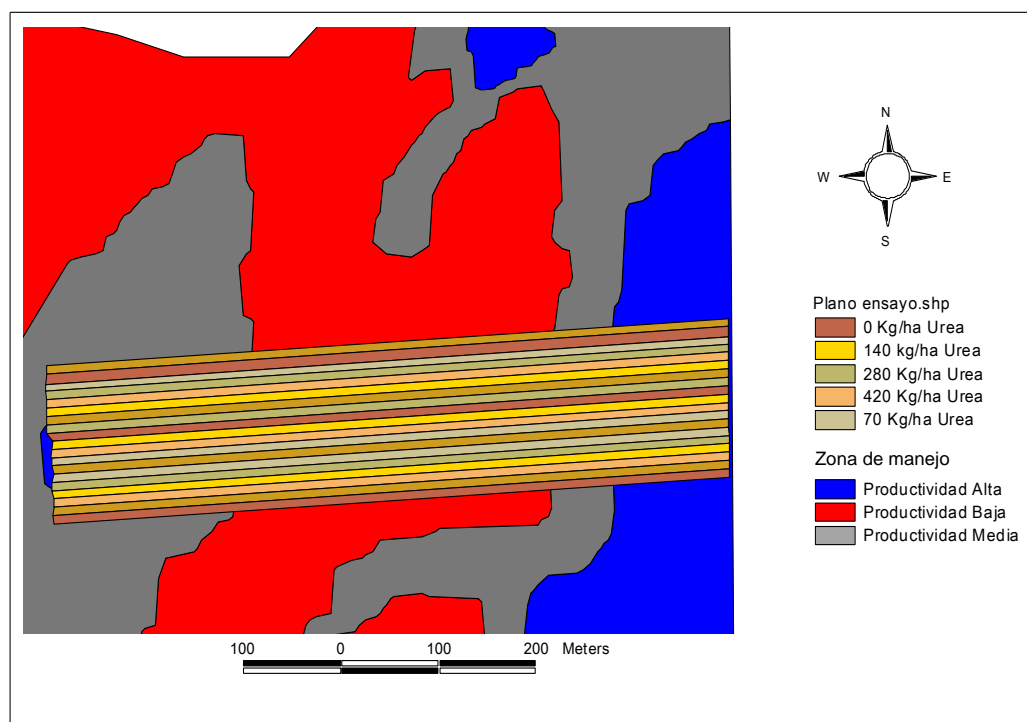


Figura 3. Mapa de Zonas de Manejo por productividad y Plano de Ensayo II en Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).

V. i. 2. i. PERFIL DEL SUELO

Con los mismos criterios adoptados para el Ensayo I en San Beltrán se describieron los tres perfiles representativos del Ensayo II en el Establecimiento El Piquete.

Cuadro 4. Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).

Zona de manejo: Productividad Baja

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Siembra					V ₆
					MO (%)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	pH	N-NO ₃ (ppm)
Ap	0 – 10	15	27	58	1,36	11,1	7	6,4	6,4	16,8
A2	10 – 22	15	27	58						
Bw	22 – 43	13	25	62						10,6
BC	43 – 58	8	25	65						
C	58 +	10	25	67						7,8

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. N-NO₃: nitrógeno de nitratos. S-SO₄ azufre de sulfatos.

Cuadro 5. Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).

Zona de manejo: Productividad Media

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Siembra					V ₆
					MO (%)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	pH	N-NO ₃ (ppm)
Ap	0 – 12	18	30	52	1,7	10,3	9	6,3	6,4	25,4
A2	12 – 27	18	30	52						
Bw1	27 – 43	15	28	57						13,6
Bw2	43 – 56	13	28	59						
BC	56 – 70	11	28	61						10,8
C	70 +	11	28	61						

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. N-NO₃: nitrógeno de nitratos. S-SO₄ azufre de sulfatos.

Cuadro 6. Perfil del suelo Ensayo I Establecimiento El Piquete, Río Cuarto (Córdoba).

Zona de manejo: Productividad Alta

Horizonte	Profundidad (cm)	Arcilla (%)	Limo (%)	Arena (%)	Siembra					V ₆
					MO (%)	P (ppm)	N-NO ₃ (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	pH	N-NO ₃ (ppm)
Ap	0 – 10	20	30	50	1,7	9,9	14	7,2	6,1	23,0
A2	10 – 25	20	30	50						
AB	25 – 35	18	30	52						24,0
Bw1	35 – 46	16	30	52						
Bw2	46 – 59	14	28	58						14,6
BC	59 – 72	11	28	61						
C	72 +	11	28	61						

MO: materia orgánica. P: fósforo disponible. N-NO₃: nitrógeno de nitratos. S-SO₄ azufre de sulfatos.

En “El Piquete” las zonas de manejo identificadas como de Productividad Baja, Productividad Media y Productividad Alta, se correlacionan en el paisaje con la loma, una media loma baja y el bajo respectivamente. El perfil de este último es muy similar al de la media loma baja como se observa en los Cuadros 5 y 6.

Las características de los perfiles detalladas en los Cuadros 4, 5 y 6 muestran un menor desarrollo del mismo en las tres zonas de manejo con respecto al establecimiento San Beltrán. La media del contenido de materia orgánica es de 1,56% y el nivel medio de fósforo para las tres zonas de manejo es de 10,5 ppm. En este caso, las diferencias entre zonas son muy bajas para realizar similares interpretación a las planteadas en San Beltrán.

V. i. 3. COMPARACION DE PERFILES

El material originario (loess) en ambos establecimientos es de textura franco arenosa, sin embargo, los suelos del establecimiento San Beltrán poseen una mayor evolución pedológica en comparación con los del establecimiento El Piquete.

La mayor evolución en los suelos de San Beltrán se evidencia en un perfil más profundo y en la secuencia, espesor y tipo de horizontes que posee. En el caso de la loma en El Piquete por ejemplo el horizonte C se encuentra a los 58cm de profundidad siendo la secuencia Ap-A2-Bw-BC-C y en San Beltrán el horizonte C se divide a partir de los 83cm siendo la secuencia Ap-A2-Bw1-Bw2-BC-C. Las diferencias son aún mayores si se compara las secuencias de horizontes de los bajos donde en San Beltrán podemos encontrar dos horizontes Bt ausentes en los suelos de El Piquete.

A continuación se presentan los momentos de ocurrencia de los diferentes estadios fenológicos según la escala de Ritchie y Hanway (1997).

Cuadro 7. Estadios fenológicos

	<i>Fecha de Ocurrencia</i>	
	San Beltrán	El Piquete
Siembra	02/12/2006	22/10/2006
Emergencia	06/12/2006	30/10/2006
V6	27/12/2006	01/12/2006
V8	05/01/2007	11/12/2006
V13	20/01/2007	26/12/2006
R1	03/02/2007	11/01/2007
R3	18/02/2007	26/01/2007
R6	25/03/2007	28/02/2007

V. ii. RELACIONES ENTRE ZONAS DE MANEJO, FERTILIZACIÓN Y RENDIMIENTO

Los datos de rendimiento para el Ensayo I según la zona de manejo y la dosis de urea se resumen en el cuadro 8.

Cuadro 8: Rendimiento según zona de manejo y Dosis de Fertilización para el Ensayo I Establecimiento “San Beltrán”

		Rendimiento (qq/ha)
Zona de manejo	Productividad Alta	115,22 a
	Productividad Media	112,44 a
	Productividad Baja	111,89 a
DMS (p<0.05)		4,81
Dosis Urea	Testigo	109,74 a
	70	113,22 a
	140	112,93 a
	280	115,52 a
	420	112,83 a
DMS (p<0.05)		6,09
Zona de manejo x Dosis		
Valor p		0,8193
CV (%)		2,4

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba LSD, Fisher (Infostat, 2004). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación. qq, quintales

Los resultados de las pruebas estadísticas realizadas indican que no existió diferencia de medias para el rendimiento, según las zonas de manejo (p de 0,0591). Para el caso de las dosis de N, las medias de rendimiento tampoco mostraron diferencias significativas (p 0,1107). Además, no se evidenció interacción entre dosis y zona de manejo en rendimiento (p 0,8193). El CV de la variable en análisis, nos indica que los datos son bastante homogéneos.

Estos resultados permiten interpretar que no se detectó respuesta a la fertilización nitrogenada en ninguna de las zonas de manejo evaluadas, razón por la cual se puede evidenciar que las mismas no fueron suficientemente distintas entre sí como para marcar diferencias en la respuesta al nitrógeno; o que las características particulares del lote en cuestión y/o del año no permitieron expresar un mayor productividad ante el agregado de nitrógeno.

De acuerdo a los resultados de los Cuadros 2, 3 y 4, la elevada disponibilidad de nitrógeno presente en el estadio V₆ del maíz (posiblemente como consecuencia de las características meteorológicas del año bajo estudio) explicaría la falta de respuesta a la

fertilización nitrogenada. La transformación de los niveles de nitrógeno de nitrato a kg de N/ha permitieron asumir que en ese estadio la oferta era de 92, 96 y 113 kg N/ha en Productividad Baja, Productividad Media y Productividad Alta respectivamente. Por otro lado, los requerimientos de nitrógeno para los rendimientos promedio obtenidos en cada ambiente fueron de 244, 247 y 256 kg N/ha para PB, PM y PA. La diferencia entre los requerimientos de nitrógeno del cultivo y la disponibilidad encontrada en V_6 fue de 152 kg N/ha (PB), 151 kg N/ha (PM) y 143 kg N/ha (PA), nivel que fue aportado vía mineralización de la materia orgánica entre V_6 y madurez fisiológica.

Empleando el factor de mineralización de la materia orgánica propuesto por Espósito *et al.* (2006), para ambientes similares del sur de Córdoba, se comprueba que bajo las condiciones meteorológicas en las que se desarrolló la experiencia el suelo pudo haber aportado entre un 3% - 3,5% de mineralización de la materia orgánica, lo cual fue suficiente para cubrir esta diferencia (152 kg/N PB, 151 kg/N PM y 143 kg/N PA).

La ausencia de respuesta estadísticamente significativa al rendimiento entre zonas de manejo puede ser explicada de acuerdo a lo propuesto por Kravchenko *et al.* (2005), dado que la variabilidad ambiental depende de las precipitaciones ocurridas dentro del ciclo del cultivo, donde años de baja precipitación están asociados con productividad contrastante entre zonas mientras que en años de elevada precipitación son de escasa a nula variabilidad ambiental.

Como fue planteado en la zonificación, la topografía del lote de producción explicaría las principales diferencias productivas entre ambientes. Por lo tanto, se comprende que, es el balance hídrico de los cultivos en cada zona de manejo la principal propiedad diferencial entre éstas. De este modo a medida que la oferta hídrica o precipitaciones aumenta la variabilidad de rendimiento entre zonas de manejo disminuye.

Los datos de rendimiento según la zona de manejo y la dosis de urea para el Ensayo II se resumen en el cuadro 9. En el mismo se puede apreciar que no se encontró interacción estadísticamente significativa entre las zonas de manejo y las dosis para el rendimiento (p 0,2723) similarmente a lo presentado para el Ensayo I. Del mismo modo, la respuesta a la aplicación de nitrógeno no presentó una dependencia ambiental, como tampoco se detectó respuesta estadísticamente significativa en rendimiento (p 0,418) a las distintas dosis de nitrógeno aplicadas.

Cuadro 9: Rendimiento según zona de manejo y dosis de fertilización para el Ensayo II Establecimiento “El Piquete”

		Rendimiento (qq/ha)
Zona de manejo	Productividad Alta	126,12 a
	Productividad Media	123,05 a
	Productividad Baja	117,72 a
DMS (p<0.05)		3,68
Dosis Urea	Testigo	119,91 a
	70	121,88 a
	140	122,04 a
	280	120,94 a
	420	125,95 a
DMS (p<0.05)		6,26
Zona de manejo x Dosis		
Valor p	0,2723	
CV (%)	2,24	

En columnas, letras distintas indican diferencias significativas al 5% de probabilidad según prueba LSD, Fisher (Infostat, 2004). DMS, diferencia mínima significativa. CV, Coeficiente de variación. qq, quintales

Como puede observarse en los Cuadros 4, 5 y 6 del establecimiento el Piquete, la disponibilidad de nitrógeno en el estadio V₆, fue mayor en comparación con los datos de San Beltrán. Posiblemente una mayor aireación de esos suelos pueda explicar la mayor mineralización de la MO. Estos niveles de N podrían explicar la falta de respuesta a la fertilización.

La transformación de los niveles de nitrógeno de nitrato a kg de N/ha permite cuantificar que en ese estadio (V₆) la oferta fue de 91, 129 y 160 kg N/ha en PB, PM y PA respectivamente. Los requerimientos de este nutriente para los rendimientos promedio obtenidos en cada ambiente fueron de 259, 270 y 277 kg N/ha para PB, PM y PA. La diferencia entre los requerimientos de nitrógeno del cultivo y la disponibilidad encontrada en V₆ fue de 167 (PB), 141 (PM) y 117 (PA).

En este caso, el factor de mineralización de la materia orgánica propuesto por Esposito *et al.* (2006), para ambientes similares del sur de Córdoba, (3% - 3,5%) no se ajustó a las necesidades de mineralización para cubrir la diferencia de N entre la oferta y la demanda. El factor de mineralización estimado que cubre esta diferencia asciende al 4,6%.

V. iii. RELACIÓN ENTRE NDVI Y RENDIMIENTO

El objetivo de las diferentes dosis de fertilizante fue generar una respuesta diferencial en rendimiento del cultivo que debería ser captada por el sensor de NDVI. A pesar de que los rendimientos obtenidos en las diferentes franjas de fertilización en los dos ensayos no fueron diferentes estadísticamente, se procedió a graficar los mismos en función del NDVI relevado.

Recordemos que las mediciones de NDVI fueron georreferenciadas automáticamente a medida que se llevaba a cabo la toma de datos. Esto permitió luego asociar cada valor de NDVI a cada valor arrojado por el monitor de rendimiento.

La Figura 4 muestra la relación entre el NDVI y el rendimiento, se representan todos los datos de los dos ensayos llevados a cabo en la campaña 2006 – 2007. Podemos observar que la línea de tendencia lineal alcanza un ajuste del 57%. A mayor NDVI, en estadio V_8 , se obtuvo un mayor rendimiento. Según las investigaciones de Teal *et al.* (2006) existe una fuerte relación entre rendimiento y NDVI en el estadio V_8 de crecimiento en maíz (R^2 0,77). Dicha relación es de tipo exponencial y se obtuvo analizando 4 años de datos en 17 localidades (Oklahoma, EEUU). Mediciones en estadio V_9 y superiores no mostraron correlaciones significativas con el rendimiento en grano (V_9 R^2 0,22; V_{11} - V_{12} R^2 0,4).

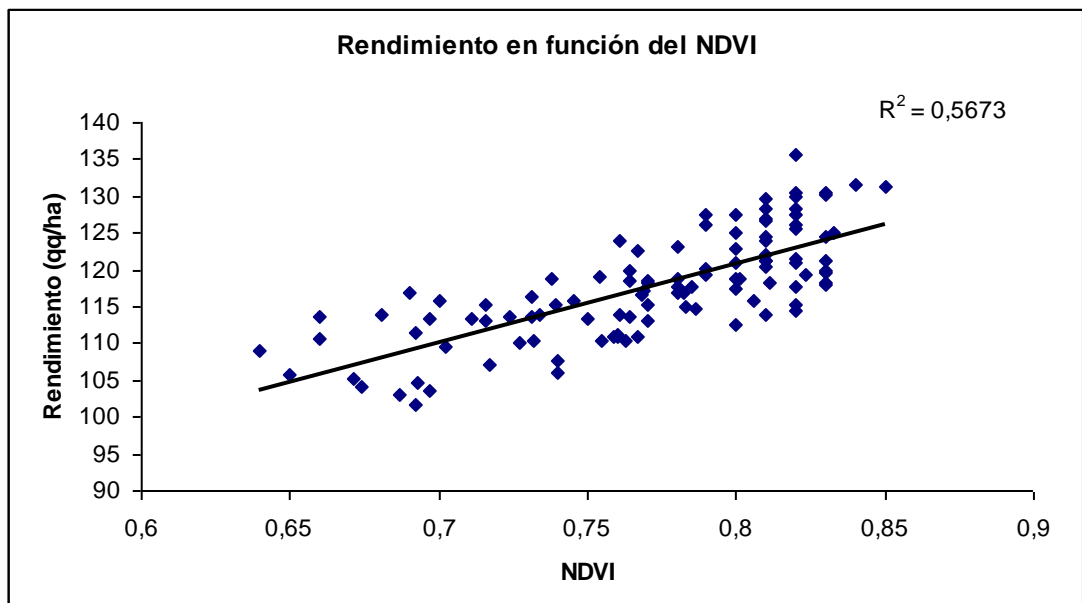


Figura 4. Rendimiento en función del NDVI, para los datos de los dos ensayos.

Según Teal *et al* (2006), debido a la influencia del dosel en el campo de visión del sensor GreenSeeker, mediciones de NDVI más tardías que V_8 no son capaces de distinguir variaciones, este problema es similar al que reportan otros investigadores con diferentes técnicas de medición del NDVI mediante sensores remotos como fotos aéreas o satelitales (Viña *et al.*, 2004).

Categorizando los datos por días desde siembra (DDS) la predicción en el rendimiento no varía pero si se amplía la ventana crítica de medición en dos hojas (V_7 - V_9). Al ampliar la ecuación de rendimiento potencial incluyendo a la temperatura, la misma puede adaptarse a una mayor variedad de climas. (Teal, *et al.*, 2006).

Los resultados de los dos ensayos agrupados por ambientes se observan en la Figura 5. En cada caso se hizo un promedio de las cinco dosis de N por bloque aplicadas en cada ambiente, de la misma forma se promediaron los rendimientos. Esta agrupación de los datos permitiría observar si las zonas de manejo determinadas como de productividad baja, media y alta poseen valores de NDVI diferentes que permitan establecer una tendencia y a su vez una relación con un mayor rendimiento en grano. Como se puede interpretar de la Figura, no se visualiza un claro patrón de distribución que nos permita ubicar zonas del gráfico para cada zona de productividad. No obstante estas aseveraciones, el ajuste de la regresión entre NDVI por zonas de manejo y rendimiento fue del 88%.

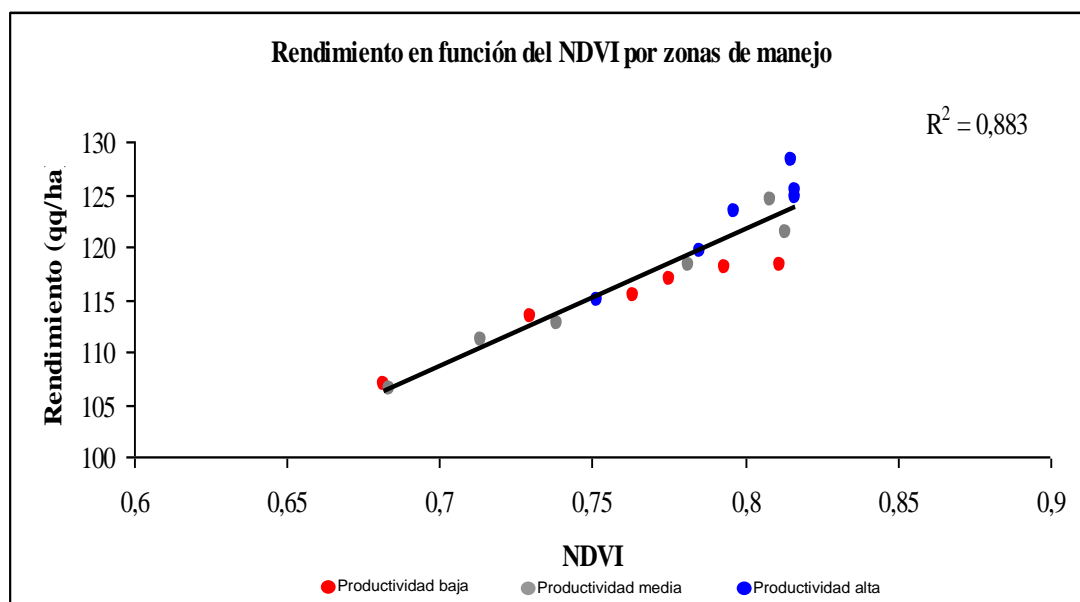


Figura 5. Rendimiento en función del NDVI agrupados por productividad.

En la Figura 6 se promediaron las repeticiones por zonas de manejo de las dosis de N aplicadas para los dos ensayos. Se refleja en el mismo que no existió respuesta a la fertilización ya que las dosis se ubican en forma aleatoria. Solo la dosis testigo parecería mostrar rendimientos menores en la mayoría de las repeticiones, aunque según los análisis estadísticos éstas no fueron significativas. La tendencia demuestra que a mayores valores de NDVI, en el estadio V_8 , los rendimientos aumentan (R^2 0,76) coincidiendo con lo obtenido por Teal *et al.* (2006).

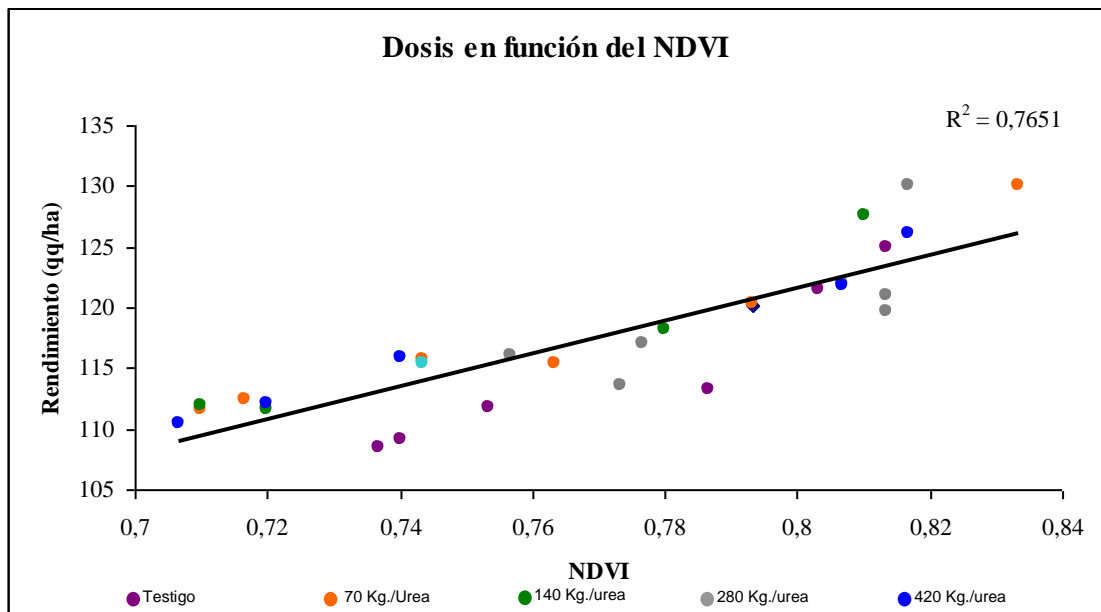


Figura 6. Rendimiento en función del NDVI promedio de cada dosis, datos de los dos ensayos.

El algoritmo de recomendación de fertilización nitrogenada (OSU) basado en el sensor GreenSeeker (NTech Industries, Inc., CA, EE.UU.) desarrollado en la Universidad de Oklahoma en los Estados Unidos fue calibrado por Bianchini y Melchiori (2006) en Paraná, Entre Ríos (Argentina) para el cultivo de trigo y maíz. La ecuación de rendimiento potencial para maíces de primera obtenida luego de tres campañas de ensayos fue la siguiente:

$$(1) \quad YPO = 1941 \times e^{INSEY \times 162}$$

Donde YPO es el rendimiento potencial estimado y la variable INSEY se obtiene del cociente entre el NDVI y los días desde siembra hasta medición con el sensor. La Figura 7 combina los datos de rendimiento obtenidos en los dos ensayos de la campaña 2006 – 2007 con los rendimientos potenciales según la ecuación (1) para los NDVI censados en ambos ensayos.

Si bien se encontró una relación lineal entre el NDVI y el rendimiento obtenido ésta difiere de la obtenida por Melchiori para estos datos. Dicha diferencia puede originar una distinta calibración de la ecuación para la zona del Sur de Córdoba, objeto del presente estudio, aunque cabe destacar que solo se cuenta con datos de una campaña perteneciente a sólo dos ensayos experimentales. En este sentido es importante destacar que durante el procesamiento de la información, el análisis de los datos de los dos ensayos juntos permitió obtener mayores ajustes que por separado. Por lo tanto no se está en condiciones de determinar aún, que la calibración del equipo para el Sur de Córdoba sea diferente a la planteada por Melchiori, requiriéndose la realización de futuros ensayos en otras campañas.

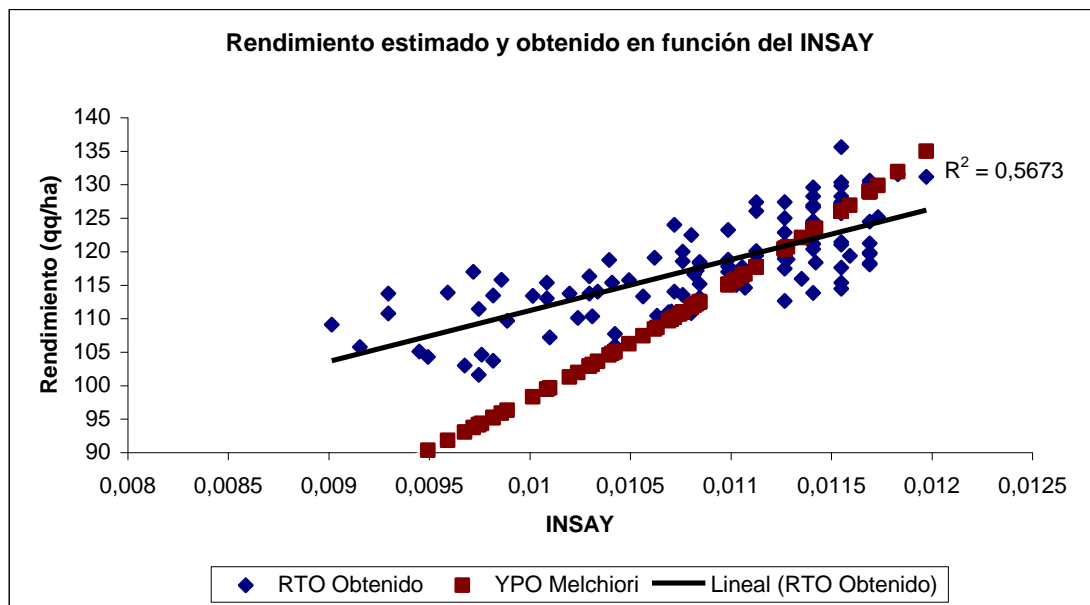


Figura 7. Rendimiento estimado y obtenido en función del INSAY

La Figura 8 presenta una combinación de lecturas de NDVI en función de las distancias sobre el plano de zonificación del Ensayo II en el establecimiento “El Piquete” procesado en ArcView 3.0. Los valores de NDVI corresponden al promedio cada 50 valores del total de valores de una franja seleccionada al azar (4500 datos aprox.).

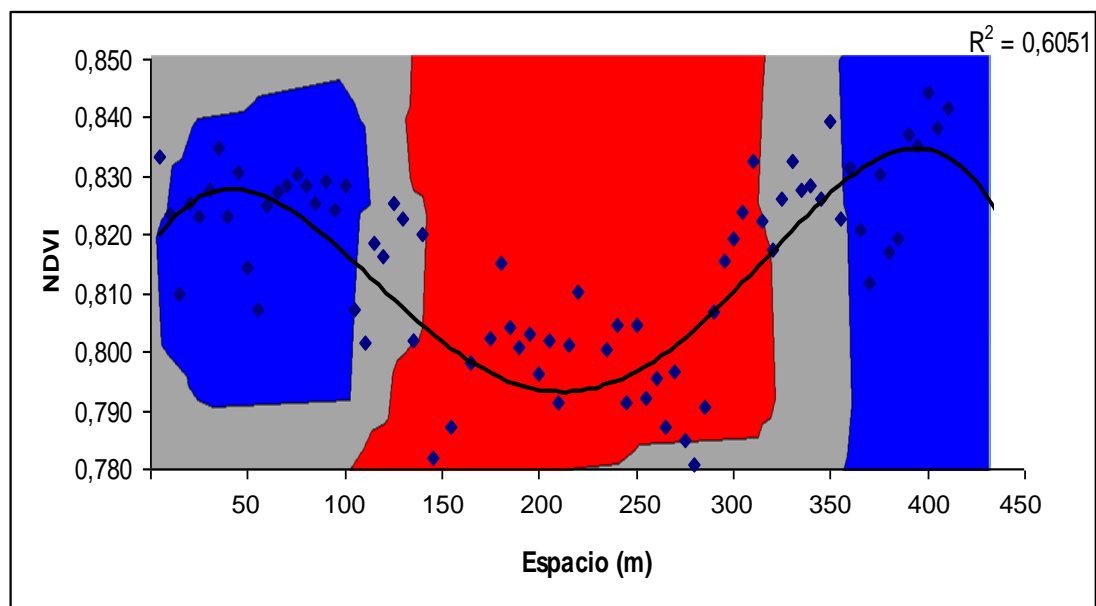


Figura 8. NDVI en función del espacio y zona de manejo para una franja al azar del ensayo II en el establecimiento “El Piquete”

La línea de tendencia presentada trata de evidenciar las variaciones que sufre el NDVI en el espacio. Según la ambientación descrita en un principio las zonas de Productividad Alta, Productividad Media y Productividad Baja se correspondían con una toposecuencia de Zona de bajo, zona de media loma y zona de loma respectivamente. La secuencia de ambientes donde se realizó el ensayo en el establecimiento “El Piquete” es la siguiente (de este a oeste):

PA – PM – PB – PM – PA. Teniendo en cuenta todo esto podemos observar en la Figura 8 que existe una relación, para la franja en análisis, entre el NDVI y la zonificación.

Es importante aclarar que son otros los factores que explican esta relación puesto que, como se observa en la Figura 5, las zonas de manejo no se agrupan de ninguna forma. Las diferentes dosis de N tampoco han agrupado los datos en la relación NDVI y rendimiento. Por lo tanto queda claro que la relación detectada entre ambas variables se debería explicar por otros elementos no considerados en este trabajo. Por lo tanto, en virtud de la sensibilidad detectada con el *GreenSeeker*, ante la ausencia de respuesta a la fertilización nitrogenada, es de suponer que frente a condiciones de respuesta favorable será válido su empleo como herramienta de diagnóstico.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados permiten establecer que las zonas de manejo, establecida mediante diferencias entre mapas índice de productividad, se correlacionan en parte con las caracterizaciones edafológicas.

Ante la ausencia de respuesta a la fertilización nitrogenada, no se pudo establecer correctamente si el instrumental presenta relación con la respuesta a la fertilización. No obstante, se ha podido comprobar una asociación muy aceptable entre el NDVI y el rendimiento en grano del cultivo de maíz.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- ANDRADE, F.; CIRILO, A.; 1996 Maíz en alta producción Capítulo 9.: en Ecofisiología del cultivo de maíz. Ed. La Barrosa. Pág. 255 – 267.
- BUNDY, L.G. y T. W. ANDRANSKI. 1995. Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests. J. Prod. Agric. 8:561-568.
- BOCCO, F. A. 2006. Validación del Modelo NP-Zea, en la fertilización nitrogenada del Cultivo de Maíz, en dos Suelos de la Zona de Coronel Moldes (Cba.). Trabajo Final. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto.
- BONGIOVANNI R 2003. LA Agricultura De Precisión En La Cosecha Pág. 85 – 90 Revista Idia XXI. N°5. INTA.
- BRAGACHINI, M.; A VON MARTINI; A MENDEZ. Agricultura de precisión en Argentina. 2000. Proyecto Nacional de Agricultura de Precisión, INTA Manfredi. En <http://www.agriculturadeprecision.org/presfut/AgPrecArgentina.htm> Consultado 12/12/2007
- BRAGACHINI M. 2000 Nivel De Adopción Actual y Potencial de la Agricultura de precisión en el Mundo y en Argentina. Proyecto Nacional de Agricultura de Precisión, INTA Manfredi. En <http://www.agriculturadeprecision.org/presfut/NivelAdopcionActualyPotencial.htm> Consultado 12/12/2007.
- BRAGACHINI, M.; A. VON MARTINI; A. MENDEZ. 2005 Proyecto Nacional de agricultura de precisión Actualización 2005. INTA Manfredi. En <http://www.agriculturadeprecision.org/proyecto/indiceProy.htm>. Consultado 12/12/2007.
- BRAGACHINI, M.; A. MENDEZ; F. SCARAMUZZA. 2005. Dosis Variable de Insumos en Tiempo Real – Equipamiento. Proyecto Nacional de Agricultura de Precisión, INTA Manfredi. <http://www.agriculturadeprecision.org/mansit/DosisVariableInsumosTiempoReal.pdf> . Consultado 12/12/2007
- CALERA; A. BELMONTE; A.M. JOCHUM; A. CUESTA GARCIA. 2003. Space – assisted irrigation management: Towards user – friendly products. ICID Workshop on Remote Sensing of Crop Evapotranspiration, Montpellier, Francia. Irrigation and Drainage Systems 19: 337–353
- CISNEROS, J; A. CANTERO y C. CHOLAKY. 2000. Uso y Manejo de Suelos. Facultad de Agronomía y Veterinaria. UNRC. Río Cuarto, Córdoba. p:41

- CLARET, M.; S. BEST y L. LEON. 2006 Sistema de Posicionamiento Global (GPS) En: Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable. Ed. PROCISUR/IICA. Cap. 2, 25:41.
- DALE, N. 1997. Ingredient analysis table. 1997 ed. Feedstuffs. 69(30): 24–31.
- ESPOSITO, G.; C. CASTILLO; R. BALBOA. 2006. Calibración y validación de un método de diagnóstico de fertilización nitrogenada en maíz para el sur de Córdoba (Argentina). Departamento de Producción Vegetal. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba. Argentina. RIA 35 (3):45-63. Diciembre 2006. INTA, Argentina.
- ESRI, ArcView GIS 3,2® 1996.
- INFOSTAT® Software Estadístico Versión 1.1 Actualización 2002. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- KEENEY, D.R. 1982. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. In F.J. Stevenson (ed.) Nitrogen in agricultural soils. Agron. Monogr. 22. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI. p. 605–649.
- KRAVCHENKO, A. N.; G. P. ROBERTSON, K. D. THELEN, y R. R. HARWOOD. 2005. Management, Topographical, and Weather Effects on Spatial Variability of Crop Grain Yields. Agron. J. 97:514–523.
- MADDONI, G.A.; R.A. RUIS; P. VILLARIÑO; I. GARCIA. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Ed. Facultad de Agronomía Universidad de Buenos Aires. Cap. 19 (501:534).
- MARTIN, K. L.; W.R. RAUN; K.W. FREEMAN; R.K. TEAL; K. DESTA; D.B. ARNALL; B. TUBAÑA; J.B. SOLIE; M.L. STONE. 2007. Expression of spatial variability in corn (*Zea mays* L.) as influenced by growth stage using optical sensor measurements. Oklahoma State University. Stillwater, Oklahoma. Agron J. 99:384-389
- MANTOVANI, E.; F. CARVALHO PINTO y D. MARCAL DE QUEIROZ. 2006. Introducción a la Agricultura de Precisión. En: Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable. Ed. PROCISUR/IICA. Cap. 1, 15:22.
- MELCHIORI R.J.M., O.P. CAVIGLIA; N. FACCENDINI; A. BIANCHINI; W.R.. RAUN. 2006 Evaluación de refertilización nitrogenada basada en la utilización de un sensor óptico. INTA EEA Paraná. Actualización Técnica en maíz. Serie Extensión nº 41 p 33:36
- MELGAR, R. 2002. Manejo del riesgo de la fertilización de Cereales. www.fertilizar.org.ar

- MOREIRA, M. A. 2006. Sensores remotos. En “Agricultura de Precisión: Integrando Conocimientos para una Agricultura Moderna y Sustentable”. Ed. Bongiovanni et al. PROCISUR/IICA. Capítulo 5.: 81 – 98
- MULLA, D.J.; BHATTI, A.U. 1997. An avaluation of indicator properties affecting spatial patterns in N and requirements for winter wheat yield. En Precision Agriculture. Volume I: Spatial Variability in Soil and Crop. STAFFORD J.V. Bios Scientific Publisher.
- ORTEGA, R.; L. FLORES. 1999. Agricultura de precisión. p13-46. En R. ORTEGA y L. FLORES (ed.) Agricultura de Precisión: Introducción al manejo sitio - específico. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, CRI Quilamapu-Chile.
- PIERCE, J.S.; P. NOWAK. 1999. Aspects of precision agriculture. D Spark (ed) Advanced in Agronomy 67:1-85
- RAUN, W.R.; G.V. JOHNSON; M.L. STONE; J.B. SOLLE; E.V. LUKINA; W.E. THOMASON; J.S. SCHEPERS. 2001 In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. Agron. J. 93:131-138
- RAUN, W.R. Raun and V. JHONSON 1999. Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. Agronomy Journal 91:357-363
- RAUN W.R.; J.B. SOLIE; G.V. JOHNSON; M.L. STONE; R.W. MULLEN; K.W. FREEMAN; W.E. THOMASON; E.V. LUKINA 2002. Improving nitrogen use efficiency in cereal grain production with optical sensing and variable rate application Agron. J. 94:815-820
- RITCHIE W.; J. HANWAY 1997. How a corn plant develops. Special Reports N° 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames, Iowa.:21 p.
- RUFO, M. 2006. Agricultura de precisión: desafíos y oportunidades para la ciencia del suelo (Conferencia). XX congreso argentino de la ciencia del suelo, I reunión de suelos de la región andina. Salta – Jujuy, Argentina (Libro de Resúmenes Pág. 3:4).
- SAINZ ROZAS, H.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT, G.A.; DOMÍNGUEZ, G. 2000. Evaluation of the Presidedress Soil Nitrogen Test for No-Tillage Maize Fertilized at Planting. Agron. J. 92:1176–1183
- SCHARF, P.C.; N. KITCHEN; K. SUDDUTH; J. DAVIS; V. HUBBARD y J. LORY. 2005. Field Scale Variability in optimal Nitrogen Fertilizer Rate for Corn. Agron. J. 97:452-461.
- SCHARF, P.C.; W.J. WIEBOLD; J.A. LORY. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen Fertilizer Timing and Deficiency Level. Agronomy Journal. 94:435–441.

- SCHMIDT, J.P.; DEJOIA, A.J.; FERGUSON, R.B.; TAYLOR, R.K.; YOUNG, R.K.; HAVLIN, J.L. 2002. Corn Yield Response to Nitrogen at Multiple In-Field Locations. *Agron. J.* 94:798–806.
- SEILER, R., R. FABRICIUS, V. ROTONDO y M. VINOCUR. 1995. *Agroclimatología de Río Cuarto – 1974 / 1993. Volumen I.* UNRC. p:41
- TKACHUK, R. 1977. Calculation of the nitrogen-to-protein conversion factor. In J.H. Hulse et al. (ed.) *Nutritional standards and methods of evaluation for food legume breeders.* Int. Dev. Res. Ctr., Ottawa, ON. p. 78–82.
- TAWAINGA; KATSVAIRO, W.; COX, W.J.; VAN ES, H.M. 2003. Spatial Growth and Nitrogen Uptake Variability of Corn at Two Nitrogen Levels. *Agron. J.* 95:1000–1011.
- TEAL R. K., B. TUBANA, K. GIRMA; K. W. FREEMAN; D. B. ARNALL; O. WALSH; W. R. RAUN. 2006. In-Season Prediction of Corn Grain Yield Potential Using Normalized Difference Vegetation Index . *Agron. J.* 98:1488-1494
- TUCKER, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sens. Environ.* 8:127–150.
- VIÑA, A., A.A. GITELSON, D.C. RUNDQUIST, G. KEYDAN, B. LEAVITT, and J. SCHEPERS. 2004. Monitoring maize (*Zea mays* L.) phenology with remote sensing. *Agron. J.* 96:1139–1147.
- VON MARTINI, A.,; M. BRAGACHINI; A. BIANCHINI; E. MARTELLOTTO; A. MÉNDEZ. 2005. Percepción remota. Proyecto Agricultura de Precisión, INTA Manfredi. <http://www.agriculturadeprecision.org/percrem/PercepcionRemota.htm>. Consultado: 12/12/2007

VIII. ANEXO



Foto 1: Ubicación de Ensayo I San Beltrán, Río Cuarto, Córdoba. Imagen satelital Digital Globe, Google Earth (Fecha 02/05/2006)



Foto 2: Ubicación de Ensayo II El Piquete, Río Cuarto, Córdoba. Imagen satelital Digital Globe, Google Earth (Fecha 25/05/2005)



Foto 3: Ensayo I San Beltrán: Perfil del suelo calicata en zona de manejo Productividad Baja



Foto 4: Ensayo I San Beltrán: Perfil del suelo calicata en zona de manejo Productividad Media



Foto 5: Ensayo I San Beltrán: Perfil del suelo calicata en zona de manejo Productividad Alta



Foto 6: Medición de NDVI en Ensayo I San Beltrán, Río Cuarto, Córdoba



Foto 7: Medición de NDVI en Ensayo II El Piquete, Río Cuarto, Córdoba