

LA ESTANZUELA

Jornada Técnica

“Agricultura de Precisión”

Organizan: INIA La Estanzuela, La Hectárea Profesionales Asociados

DOLORES, OCTUBRE 2008

Serie Actividades de Difusión N°553

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION AGROPECUARIA

U R U G U A Y





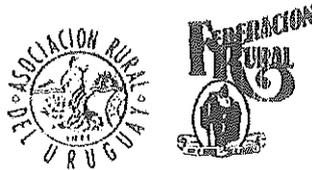
Presidente:
Ing. Agr. Dr. Dan Piestun

Vicepresidente:
Ing. Agr. Dr. Mario García



MINISTERIO DE GANADERÍA
AGRICULTURA Y PESCA
REPÚBLICA ORIENTAL DEL URUGUAY

Ing. Ind. Aparicio Hirschy (titular)
Ing. Agr. José Bonica (alterno)



Ing. Agr. Rodolfo M. Irigoyen (titular)
Ing. Agr. Mario Costa (alterno)



TABLA DE CONTENIDO

	Página
Conceptos y Herramientas en Agricultura de Precisión	1
<i>J. Sawchik, INIA La Estanzuela</i>	
<i>J. Terra, INIA Treinta y Tres</i>	
Monitoreos y Mapa de Rendimiento.....	6
<i>D. Melo, Consultora La Hectárea Asociados</i>	
<i>A. Ruiz, Consultora La Hectárea Asociados</i>	
Uso del Sensoramiento Remoto para la Selección de Ambientes en Cultivos Extensivos.....	24
<i>L. Olivera, INIA La Estanzuela</i>	
<i>V. Ciganda, INIA La Estanzuela</i>	
Modelos de Simulación, como herramientas de predicción de variabilidad de rendimiento espacial y temporal	30
<i>L. Olivera, INIA La Estanzuela</i>	
Variabilidad Espacial y Delineación de Zonas de Manejo.....	34
<i>J. Terra, INIA Treinta y Tres</i>	
<i>J. Sawchik, INIA La Estanzuela</i>	
<i>A. Ruiz, Consultora La Hectárea Asociados</i>	
<i>D. Melo, Consultora La Hectárea Asociados</i>	

La existencia de variabilidad en el tiempo y el espacio de suelos y cultivos y su relación e interacción con el rendimiento y calidad de los cultivos en las chacras es reconocida. El concepto de "agricultura sitio-específica o agricultura de precisión" implica el uso de la variabilidad presente en las chacras de manera de delinear zonas y prácticas agronómicas adecuadas a las mismas (Roel y Terra, 2006).

La agricultura de secano en Uruguay se realiza en un marco de alta variabilidad climática y de ambientes edáficos. Esto determina importantes variaciones de rendimiento entre años y a su vez una gran variación en la respuesta vegetal intra o dentro de chacras. Sin embargo, en general, las chacras agrícolas son manejadas en forma uniforme basadas en promedios que ignoran esta variabilidad, generando ineficiencias económicas y ambientales en el uso de los recursos. En la actualidad existen tecnologías disponibles para detectar, cuantificar, georeferenciar, analizar, relacionar y manejar esa variabilidad.

Para justificar un programa de manejo sitio-específico es necesario que se cumplan tres requisitos: a) la existencia de importante variabilidad en factores que influyen la productividad de los cultivos; b) la identificación y cuantificación de las principales causas de la variabilidad de estos factores y; c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para el logro de un beneficio productivo, económico o ambiental (Plant, 2001).

Factores que afectan la variabilidad de rendimientos dentro de chacras

En nuestro país varios trabajos han procurado identificar las principales fuentes de variación en el rendimiento de los cultivos bajo secano y riego. Así algunos de estos trabajos han tratado de identificar las principales fuentes de variación en trigo (Aunchain y Classen, 1990), maíz (Del Campo, 2006) y arroz (Roel y Firpo, 2006). En el caso de trigo, un estudio de variabilidad realizado en chacra mostró una menor disponibilidad de nutrientes en la parte baja del terreno, que resultó en menor desarrollo del cultivo y menores rendimientos finales. Este comportamiento es común durante el ciclo de los cultivos de invierno y más relevante cuando existen suelos con problema de drenaje interno. En un estudio similar para el cultivo de maíz, la variable posición topográfica en el terreno fue también la más relevante para explicar la variación de rendimientos (Del Campo, 2006). En un análisis que consideraba además el tipo de suelo los rendimientos más altos se obtuvieron sobre suelos Vertisoles ubicados en la loma de la chacra y caían en las posiciones de ladera media y baja debido a cambios en el tipo de suelo obteniéndose rendimientos menores a medida que se hacía más importante el grado de diferenciación textural, expresado como la relación entre el porcentaje de arcilla en el horizonte B y el porcentaje de arcilla en el horizonte A. En el caso del cultivo de arroz, se encontró que variables como la calidad del riego y el control de malezas eran variables de importancia en la variación de los rendimientos dentro de chacras (Roel y Firpo, 2006).

Por otra parte, los factores que explican la variabilidad de rendimientos intra-chacra no necesariamente son iguales para cada situación o explican solamente parte de la variación en los rendimientos (Mallarino et al., 1999; Sawchik y Mallarino, 2008). Estos autores, trabajando en chacras comerciales de Maíz y Soja encontraron que las variables que se correlacionaban significativamente en algunas chacras no lo hacían en otras. En muchos casos además, algunas variables relacionadas con la fertilidad del suelo, como el valor de análisis de suelo, no se correlacionaban con el rendimiento final.

Un hecho a destacar es que en general la asociación entre tipo de suelo y topografía explican una importante variación en los rendimientos de los cultivos en varios trabajos. El rendimiento de maíz está altamente relacionado al agua disponible y más aún durante estaciones de crecimiento con déficit hídrico. Muchos factores que se relacionan con la retención de agua de los suelos, como altos tenores

¹ Ing. Agr. (Ph.D.) Director de Programa Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

² Ing. Agr. (Ph.D.) Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

de limo, arcilla y C orgánico, tienen fuerte relación con rendimiento y esto es aún más marcado en lugares que han sufrido procesos erosivos severos, que ha removido la capa superficial de suelo (Kaspar et al., 2003). Las precipitaciones durante el período de crecimiento muchas veces interactúan con los atributos del terreno y las propiedades del suelo influenciando los rendimientos de grano. (Timlin et al., 1998; Jaynes et al., 2003; Kaspar et al., 2003). En años con precipitaciones por debajo del promedio, las áreas más altas de las lomas con mayor pendiente y curvatura convexa usualmente tienen menor agua disponible y menor rendimiento de maíz que las áreas más bajas, con menor pendiente y curvatura cóncava (Timlin et al., 1998; Jaynes et al., 2003). Contrariamente, en los años con precipitaciones por encima de los promedios, las áreas con menor grado de pendiente y cercanas a las depresiones pueden ver sus rendimientos reducidos (Jaynes et al., 2003).

Si partimos de la base de que la variabilidad y los factores que explican la variación en el rendimiento de los cultivos son variados, la pregunta inmediata es definir como caracterizamos esta variabilidad para que pueda ser utilizable en un programa de manejo sitio-específico. La variabilidad espacial de suelos y cultivos puede ser cuantificada o estimada a través de varias metodologías. Plant (2001) clasifica estos métodos de medición como: *discretos* (por ej. el muestreo de suelos y plantas en grillas), *continuos* (ej. monitores de rendimiento, sensores de conductividad eléctrica de suelos) y *remotos* (ej. imágenes satelitales).

El uso de las diferentes herramientas disponibles es dependiente de qué pregunta queremos contestar. Si queremos conocer cuales son las variables que están influenciando el crecimiento de las plantas que afectan directamente la variación en rendimiento dentro de chacras existen diversas aproximaciones para cumplir este fin. Quizás la mejor fuente de información sea la construcción e interpretación de mapas de rendimiento. Esto es obvio en la medida que el rendimiento es sin dudas el mejor indicador de la productividad del suelo en las distintas áreas de una chacra (Roel y Terra, 2006). Uno de los problemas principales en el uso de mapas de rendimiento para establecer zonas de productividad superior e inferior es la respuesta vegetal diferencial entre años por factores climáticos o simplemente la respuesta vegetal diferencial de acuerdo a los distintos cultivos presentes en la secuencia agrícola. Así, algunos autores han señalado que para definir zonas estables en rendimiento dentro de chacras es necesario superponer varios mapas de rendimiento (Lark y Stafford, 1998). Para nuestras condiciones por ej. es esperable que las zonas de mayor rendimiento en los cultivos de verano, generalmente ubicadas en zonas topográficas bajas coincidan con zonas de bajos rendimientos para cultivos de invierno (por mayor frecuencia de excesos hídricos). Por tanto la información obtenida con monitores de rendimiento debe ser utilizada con especial cuidado o en todo caso se debería utilizar la información de varios mapas de rendimiento.

¿Qué otros factores pueden estar afectando la variabilidad en el rendimiento?

Sin duda, es lógico pensar que gran parte de la variación observada en los rendimientos dentro de una chacra se deba a propiedades del suelo de tipo estáticas o de relativa estabilidad, poco afectadas en el corto plazo por el manejo. En ese sentido varios autores han destacado la importancia de las propiedades del suelo, la topografía, y atributos del terreno derivadas de ésta, entre otras para explicar la variación de rendimientos de los cultivos (Terra et al., 2006). La ventaja de esta aproximación es que frecuentemente estas variables están asociadas al rendimiento y por otro lado su mapeo debe realizarse en una sola ocasión.

Lo que sí debe quedar claro es que en la mayoría de las situaciones solo una parte razonable de la variación en rendimiento puede ser debidamente explicada y que en la mayoría de los casos son muchos los factores que están interaccionando.

El Concepto de Zona de Manejo

Una vez que se logra identificar la/s principales fuentes de variación en el rendimiento de los cultivos es necesario tomar las decisiones de manejo adecuadas. Estas decisiones de manejo pueden determinar que por ej. en determinada parte de la chacra se opte por cambiar de cultivo, o reducir el área agrícola, y en otros casos variaciones en el uso de los insumos según las zonas. En general mas de un factor está influenciando el rendimiento y por tanto es necesario identificar los factores dominantes que están limitando el rendimiento en las chacras.

Entonces desde este punto de vista el objetivo central de la Agricultura de Precisión es la obtención de *zonas de manejo* definidas por sus factores limitantes de rendimiento para ser manejadas de acuerdo a sus propiedades intrínsecas (Roel y Terra, 2006). Según Plant et al. (2001) los principales requerimientos que las zonas de manejo deben cumplir para ser consideradas como tales son: a) las diferencias de rendimiento entre zonas de manejo debe ser mayor que las diferencias dentro de la zona; b) dentro de determinada zona, los factores limitantes del rendimiento deben ser los mismos. Cuando se lleva este concepto a la práctica es lógico pensar que el número de *zonas de manejo* dentro de una chacra va a estar determinado entre otros por factores como la variabilidad natural, el tamaño de la chacra, o la habilidad del agricultor para manejar esta zona individualmente.

Varias son las fuentes de información utilizables para la generación o delineación de zonas de manejo. Quizás la más obvia es la utilización de la propia información del rendimiento representada a través de mapas. Su principal limitante es la necesidad de generar varias capas de mapas de rendimiento para obtener zonas estables de alta y baja productividad. Esto es porque zonas de alto rendimiento en años con precipitaciones por encima de lo normal en un cultivo de verano pueden pasar a ser de bajo rendimiento para un cultivo de invierno con el mismo régimen hídrico. Sin embargo puede ser utilizada como una herramienta para chequear la bondad o el ajuste de zonas generadas mediante otro tipo de información.

Históricamente la más tradicional información utilizada es la proveniente del mapa de suelos de la chacra. En general los mapas disponibles contienen información a una escala que no es la requerida en la agricultura de precisión. Es necesario recordar que en el caso de nuestro país la cartografía CONEAT representa información valiosa a una escala adecuada de trabajo. Sin embargo los Grupos CONEAT no son estrictamente unidades cartográficas de Suelos sino que constituyen áreas homogéneas o agrupamientos de suelos definidos por su capacidad productiva. Sin dudas que la fuente de información más utilizable en la construcción de zonas de manejo sería un levantamiento de suelos detallado a nivel predial, pero esto tiene un elevado costo y consume tiempo y recursos. La ventaja para nuestras condiciones es que características tales como la profundidad efectiva del perfil del suelo, su capacidad de almacenaje de agua, sus características de drenaje interno son elementos que a simple vista determinan fuertes impactos en la variación de la productividad de los cultivos. Una de las dificultades mayores para su uso en delineación de zonas de manejo sigue siendo la determinación de los límites precisos entre las Unidades de Suelos.

Por ello es común cada vez más frecuentemente para la delineación de las zonas de manejo el uso y mapeo de otras propiedades estables en el tiempo como los atributos del terreno (elevación, pendiente) junto con propiedades del suelo relativamente estables como por ej. la textura, el contenido de materia orgánica, o más recientemente la conductividad eléctrica (CE). En particular el desarrollo de sensores para la determinación de la conductividad eléctrica a campo en tiempo real ha determinado el interés por utilizar esta metodología sola o en combinación con otros atributos para la delineación de zonas de manejo. Esta propiedad, que representa un tipo de información secundaria está correlacionada positiva o negativamente con varios factores que afectan el crecimiento de las plantas. Entre estas propiedades se destacan: el contenido de humedad del suelo, la profundidad de suelo hasta la capa de suelo con mayor contenido de arcilla, la textura del suelo, entre otras (Corwin and Lesch, 2003). Si bien esta propiedad está influenciada por diversos factores que muchas veces hacen difícil una interpretación causa-efecto con el rendimiento también para determinadas condiciones se han determinado correlaciones significativas con el mismo. Por otra parte la CE provee de información acerca de propiedades del suelo sub-superficiales que son relevantes para el crecimiento de las plantas (Kravchenko et al., 2003). Esta aproximación o sea la utilización de capas de información combinadas de CE, topografía y otras propiedades del suelo puede utilizarse como un camino más rápido para la delineación de zonas de manejo, que luego pueden ser fácilmente chequeadas con la información de mapas de rendimiento de manera de acelerar el proceso de toma de decisiones.

Otras fuentes de información que han sido o pueden ser utilizadas solas o en combinación con las anteriores son el conocimiento propio de la chacra por parte del agricultor o asesor, la fotografía aérea (Fleming et al., 2004) o el uso de imágenes satelitales de alta resolución.

La delineación de zonas de manejo dentro de chacras tiene varios objetivos. Entre otros se destaca: a) reducir o describir adecuadamente la variabilidad en el valor de análisis de suelo; b) facilitar

el uso de herramientas de aplicación variable de fertilizantes; c) entender cuáles son los principales factores que determinan la variación en los rendimientos (Derby et al., 2007).

La Agricultura de Precisión y el Manejo de los Nutrientes

Claramente la aplicación de dosis variable de nutrientes es una de las metas buscadas con la agricultura de precisión. Sin embargo, su aplicación bien realizada es bastante más compleja de lo que parece a simple vista. El enfoque tradicional en fertilidad de suelos está basado en manejar a las chacras como áreas homogéneas y decidir la aplicación de fertilizante basada en el valor de análisis de una muestra compuesta de suelo.

La aparición de nuevas tecnologías como el GPS, o los sistemas de información geográfica (SIG) han permitido mapear correctamente los puntos o lugares de muestreo y estudiar la relación espacial entre los puntos de muestreo y la respuesta al agregado de fertilizante. Uno de los métodos de muestreo de suelos más utilizado en Agricultura de Precisión para describir la variación espacial de los parámetros de fertilidad es el muestreo en grillas. Este tipo de muestreo que resulta de la superposición de una figura geométrica (cuadrado, rectángulo) a una chacra tiene dos variaciones importantes: a) el método de la grilla-celda, en donde se realiza una muestra compuesta de toda la celda o b) la grilla-punto en donde la muestra compuesta se obtiene de tomas alrededor del centro de la celda. Independientemente del tipo de muestreo seleccionado este método tiene una gran debilidad que es definir el tamaño de celda apropiado para cada chacra. Varios autores han estudiado este aspecto y concluyen que en general el tamaño de la celda de muestreo no debería ser mayor a 0.4 ha para representar en la mayoría de los casos la variabilidad en la fertilidad del suelo (Mallarino y Wittry, 2004; Sawchik y Mallarino, 2007). Es de destacar que estos resultados fueron obtenidos en suelos con valores altos de análisis (en general en el rango de suficiencia o por encima de éste) y en donde ya existe una variabilidad generada por factores de manejo (causada en muchos casos por la propia aplicación de fertilizantes). Cabe destacar que en estos y otros trabajos se ha utilizado este método para evaluar la disponibilidad de nutrientes no móviles o poco móviles como P y K. Resulta claro que este tamaño de celda es muy poco práctico y la realidad muestra que los productores realizan un muestreo mucho menos intenso (1 muestra / 1.5 -2 ha). El resultado de esto es que en realidad en las zonas húmedas del cinturón maicero americano las recomendaciones de fertilización variable no serían las más adecuadas.

Claramente entonces existen factores económicos y de practicidad que hacen que el muestreo en grillas tampoco parece ser una solución en nuestras condiciones. Como alternativa se ha propuesto el muestreo dirigido o basado en zonas de manejo determinadas en base a información de mapas de rendimiento, topografía, CE. El uso de zonas de manejo basadas en el rendimiento de los cultivos tendría sentido porque pueden tener una asociación directa con la disponibilidad de nutrientes y con la remoción por parte de los cultivos. Sawchik y Mallarino (2007) utilizaron un muestreo de grilla de alta densidad (0.10-0.25 ha) para simular el comportamiento de un muestreo en zonas basadas en propiedades como elevación o CE. En general las zonas de manejo delineadas mediante el uso de estas variables presentaron una correlación significativa con el rendimiento. Sin embargo, los valores promedio de análisis de P y K en muchos casos no diferían entre zonas y raramente se observó una respuesta diferencial en rendimiento a estos nutrientes entre las zonas delineadas.

Para nuestras condiciones, en donde la variación en el tipo de suelos y topografía dentro de chacras es generalmente importante, y los valores de análisis de suelo se encuentran en general por debajo o cerca del rango de suficiencia, la información de mapas de rendimiento, topografía y CE podría ser utilizada para establecer un programa de muestreo, análisis de suelo y fertilización variable de P y K. En cualquier caso lo más relevante es que las zonas delineadas tengan también diferencias en la respuesta al agregado del nutriente de interés. Para avanzar en esta aproximación es necesario conducir experimentos simples en fajas a escala de chacra que utilicen una dosis fija del nutriente que se pretende estudiar y estas fajas deben a su vez atravesar la dirección de mayor variabilidad.

Referencias

- Ahunchain, M. y M. Claasen. 1990. Causas de variabilidad de rendimiento en trigo. Tesis Fac. Agronomía /UdelaR).
- Corwin, D.L., and S.M. Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: theory, principles and guidelines. *Agron. J.* 95:455-471.
- Del Campo, B. 2006. Factores que afectan la variabilidad intra-chacra de rendimientos en maíz. Tesis Fac. Agronomía (UdelaR), 70 pp.
- Derby, N.E., Casey, F.X.M., and D.W. Franzen. 2007. Comparison of nitrogen management zone delineation methods for corn grain yield. *Agron. J.* 99:405-414.
- Fleming, K.L., D.F. Heermann, and G. Westfall. 2004. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. *Agron. J.* 96:1581-1587.
- Jaynes, D. B., Kaspar, T.C., Colvin, T.S., and D.E. James. 2003. Cluster analysis of spatiotemporal corn yield patterns in an Iowa field. *Agron. J.* 95:574-586.
- Kaspar, T.C, Colvin, T.S., Jaynes, D.B., Karlen, D.L., James, D.E., and D.W. Meek. 2003. Relationships between six years of corn yields and terrain attributes. *Precision Agriculture* 4:87-101.
- Kravchenko, A.N., Thelen, K.D., Bullock, D.G., and N.R. Miller. 2003. Relationship among crop grain yield, topography, and soil electrical conductivity studied with cross-correlograms. *Agron. J.* 95:1132-1139.
- Lark, R.M., and J.V. Stafford. 1998. Information on within-field variability from sequences of yield maps: multivariate classification as a first step for interpretation. *Nutr. Cycling Agroecosyst.* 50:277-281.
- Mallarino, A.P., Oyarzabal, E.S., and P.N. Hinz. 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precision Agriculture* 1:15-25.
- Mallarino, A.P., and D.J. Wittry, 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH and organic matter. *Precision Agriculture* 5:131-144.
- Plant, R.E. 2001. Site Specific Management: the application of information technology to crop production. *Computer and Electronics in Agriculture* 30:9-29.
- Roel, A. y H. Firpo. 2006. Agricultura de Precisión en Uruguay. *In: Agricultura de Precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.* PROCISUR, 246 pp.
- Roel, A. y J. Terra. 2006. Muestreo de Suelos y factores limitantes del rendimiento. *In: Agricultura de Precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable.* PROCISUR, 246 pp.
- Sawchik, J., and A.P. Mallarino. 2007. Evaluation of zone soil sampling approaches for phosphorus and potassium based on corn and soybean response to fertilization. *Agron. J.* 99:1564-1578.
- Sawchik, J., and A.P. Mallarino. 2008. Variability of soil properties, early phosphorus and potassium uptake, and incidence of pests and weeds in relation to soybean grain yield. *Agron. J.* 100:1450-1462.
- Terra, J.A., Shaw, J.N., Reeves, D.W., Raper, R.L., van Santen, E., and P.L. Mask. 2006. Soil management and landscape variability affects field-scale cotton productivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70:98-107.
- Timlin, D.J., Pachepsky, Ya., Snyder, V.A., and R.B. Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:764-773.

Monitoreos y Mapeo de Rendimiento

Ing. Agr. Daniel Melo³, Ing. Agr. Adrian Ruiz⁴



La hectárea SRL
Dolores Soriano Uruguay
+589 543 3584
lahectarea@adinet.com.uy

Los monitores de rendimiento son sin duda una potente herramienta para la identificación de la variabilidad en los cultivos agrícolas. El cosechar con máquinas equipadas con monitor de rendimiento no es sinónimo de mapear el rendimiento. Para que los datos generados por los equipos sirvan para elaborar mapas de rendimiento confiables deben tenerse algunas consideraciones prácticas que son precisamente el objetivo de este trabajo

³ Ing. Agr., Consultora La Hectárea Asociados

⁴ Ing. Agr., Consultora La Hectárea Asociados

Introducción

Durante el proceso de cultivo no se ponen insumos y dinero para producir granos sino que también se generan datos. Estos datos una vez procesados, son un muy valioso producto en la medida que se use para la toma de decisiones adecuadas que aporten a mejorar el negocio agrícola. Las nuevas tecnologías como el los sistemas de posicionamiento Global y los ordenadores portátiles posibilitan generar datos que están asociados a puntos geográficos precisos y en un momento dado.

El rendimiento de los cultivos al igual que otros datos, no solo puede manejarse como un valor promedio de varias hectáreas si no como miles de valores de rendimiento de puntos vecinos.

Los monitores de rendimiento generan mapas que expresan la variación de rendimiento dentro del potrero. Esta sin duda es una herramienta fundamental para detectar los diferentes ambientes, es de destacar que un solo mapa no es suficiente y por lo general necesitamos por lo menos 4 mapas para que la información tenga confiabilidad. El estudio posterior de estos diferentes ambientes, permitirá en los, casos que se justifique, el manejo diferencial de los mismos.

En estos últimos años se están incorporado tecnologías de ultima generación para el manejo de la variabilidad de los cultivos y la agricultura de precisión, Ejemplo de esto son; monitores de rendimientos, banderilleros satelitales, corte automático de barras, pilotos automáticos para fumigación y siembra, y se esta en vías de proceso la incorporación de fumigación variable y siembra variable de semilla y fertilizante.

En respuesta a estas necesidades del mercado, La Hectárea SRL esta ejecutando un proyecto de generación y adaptación de las tecnologías de agricultura de precisión.

El proyecto de *"Aplicación de herramientas de Agricultura de Precisión y desarrollo de un sistema de información para mejorar la gestión de empresas agropecuarias"*, es una sociedad de La Hectárea SRL con una empresa de desarrollo de sistemas de Información Geográfica, y con cuatro productores de la zona. El proyecto se esta ejecutando con la participación activa del INIA. (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria.)

Desde el años 2000 se llevan cosechadas con monitores de rendimiento 45.000 ha de cultivos en secano y riego en la zona del Soriano. El área que se cosecha con monitores de rendimiento va aumentando año a año alcanzando las 13.000 Ha en la zafra 2007.

El cosechar con maquinas equipadas monitor de rendimiento no es sinónimo de mapear el rendimiento. Para que los datos generados por los quipos sirvan hay que elaborar mapas de rendimiento confiables se deben tenerse algunas consideraciones prácticas que son precisamente el objetivo de este trabajo

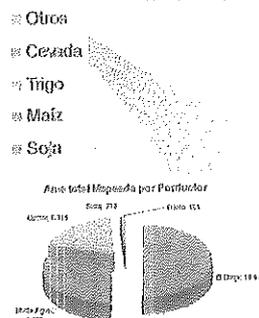
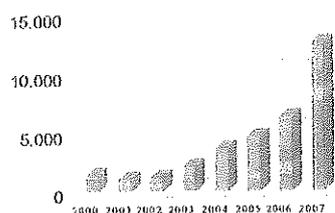
Los monitores utilizados son Case IH AFS, Ag Leader y GreenStar. En general dan buenos resultados, si bien se presentan algunos desafíos a mejora en cuanto a la calibración de los monitores y a los dispositivos de medición de Humedad de grano.

Se instalaron antenas tipo Garmin 18 y 36 sin señal correctora en equipos ya instalados y se logro un buen resultado.

Los problemas mas importantes fueron logística de cosecha, perdida de información por problemas de software, manejo de tarjetas, perdidas por desconexiones de sensores en plataforma, perdida de corriente en antena yo sensores de humedad.

Mapas de rendimiento

Evolución del área Mapeada



Se Mapearon 45.000 Ha

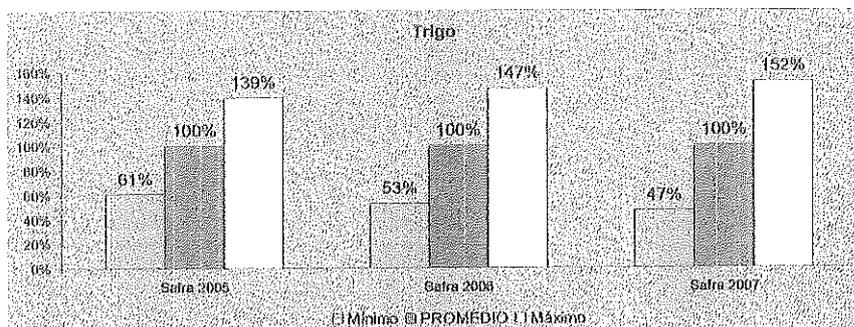
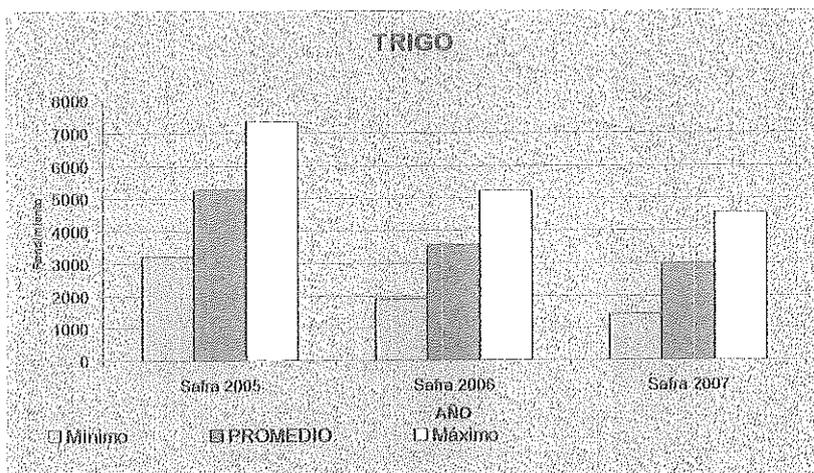
Se estan procesando con el GIS

Se analizaron los Mapas de rendimiento de 90 chacras Se mapearon 4126Ha (1678 Ha de invierno y 2447 Ha de verano).

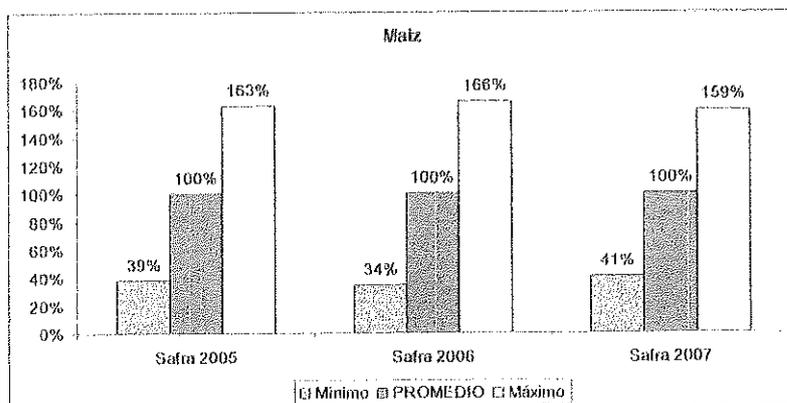
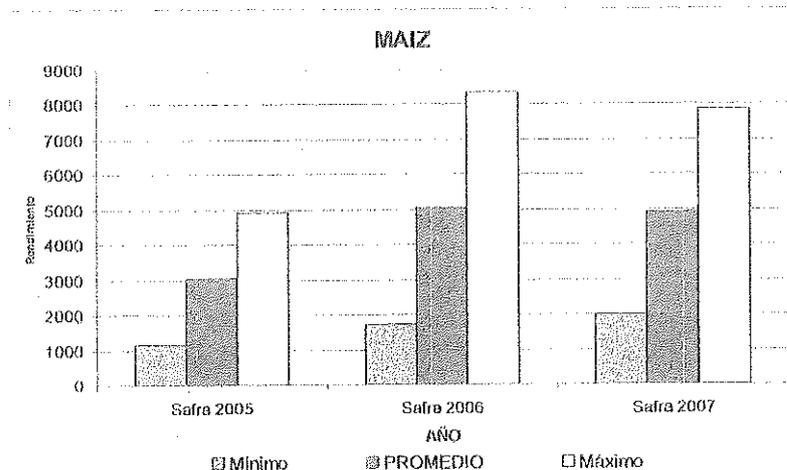
Año/safr	Datos	Maiz	Soja	Trigo	Cevada	Avena
Ver_0605	Promedio de Min	1168	1477			
	Promedio de PROMEDIO	3030	2840			
	Promedio de Max	4932	4156			
Ver_0607	Promedio de Min	1743	1083			
	Promedio de PROMEDIO	5053	2866			
	Promedio de Max	8363	4783			
Ver_0705	Promedio de Min	2011	829			
	Promedio de PROMEDIO	4929	2392			
	Promedio de Max	7857	4018			
Inv_05	Promedio de Min			3215		
	Promedio de PROMEDIO			5205		
	Promedio de Max			7355		
Inv_06	Promedio de Min			1890	3120	220
	Promedio de PROMEDIO			3574	4940	1020
	Promedio de Max			5242	6760	1820
Inv_07	Promedio de Min			1419		
	Promedio de PROMEDIO			3005		
	Promedio de Max			4572		

Se observaron áreas importantes de las chacras con rendimientos de un 60% tanto por debajo como por encima del promedio del lote

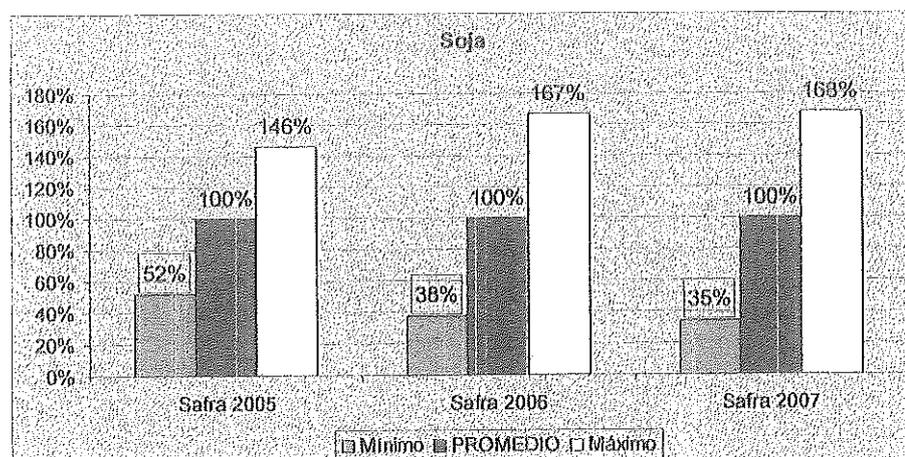
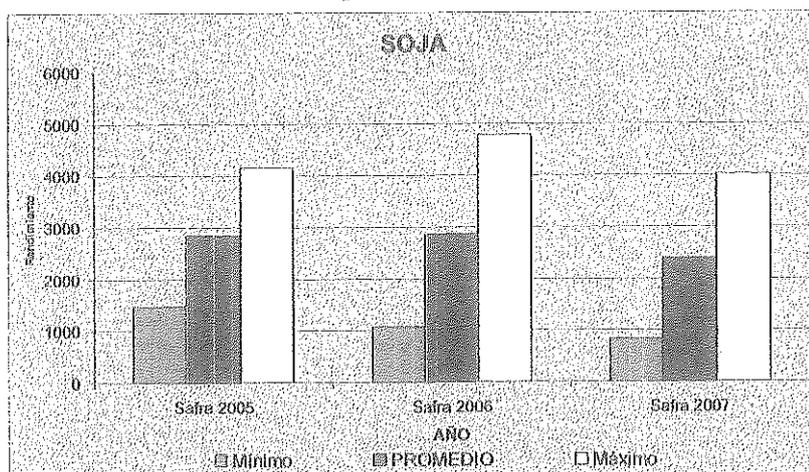
Variaciones observadas en rendimiento de Trigo



Variaciones observadas en rendimiento de Maiz



Variaciones observadas en rendimiento de Soja

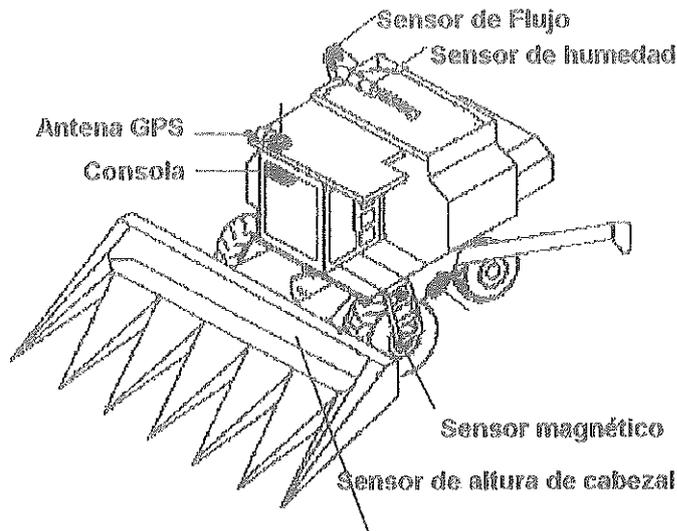


Funcionamiento y componentes de los monitores

Los monitores de rendimiento son una serie de dispositivos anexos a las cosechadoras con que determinan el rendimiento instantáneo puntual de los cultivos

Los monitores miden y graban los datos necesarios para el cálculo del rendimiento.

Dato necesario	Fuente del dato
Flujo de grano por unidad de tiempo.	Sensor de flujo de grano
Velocidad de avance de la cosechadora.	Sensor de velocidad de avance
Humedad del grano por unidad de tiempo	Sensor de humedad del grano
Ancho de corte del cabezal.	Dato cargado
Posición de trabajo del cabezal	Switch de posición del cabezal
Posición geográfica	Receptor GPS.



Estos de datos son recolectados y procesados y almacenados en tiempo real por un ordenador o consola del monitor de rendimiento. Elabora entonces un mapa que permite evaluar la variabilidad de rendimiento existente en el cultivo dentro el potrero

Los datos básicos de un mapa de rendimiento son

- Posición (coordenadas de latitud Longitud y altitud)
- Fecha y Hora
- Velocidad (Km/hora)
- Flujo de grano (Ton/hora)
- Humedad del Grano (%)
- Rendimiento en ese punto (Ton/Ha)

A partir de estos datos básicos también calculan otros parámetros como la productividad dirección de avance, estadísticas de rendimiento etc.

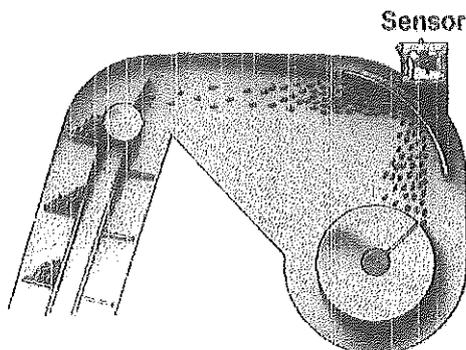
Sensores de masa o flujo de grano

Sensor de fuerza de impacto, AgLeader

Mide el flujo a través de una placa de impacto y una celda de carga que transforma la carga o fuerza en una señal eléctrica

Sensor de desplazamiento de placa, John Deere

Mide el flujo a través de una placa de impacto y un potenciómetro que transforma la carga o fuerza en resistencia variable de corriente eléctrica



Flow Controltm (Massey Ferguson)

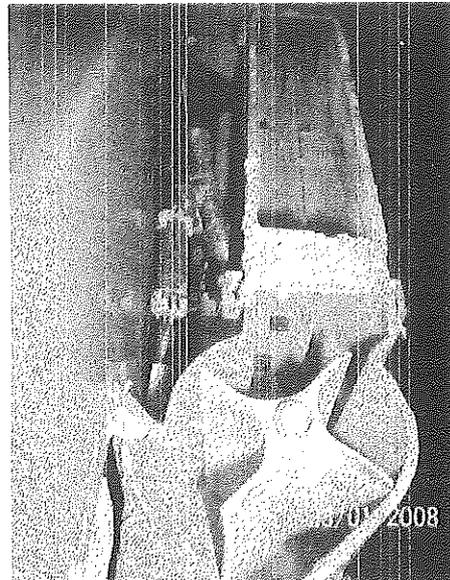
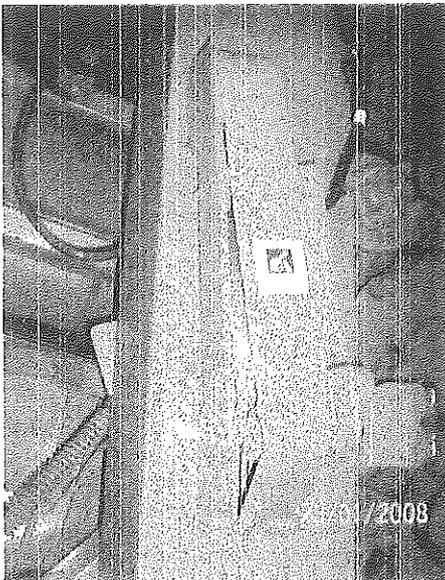
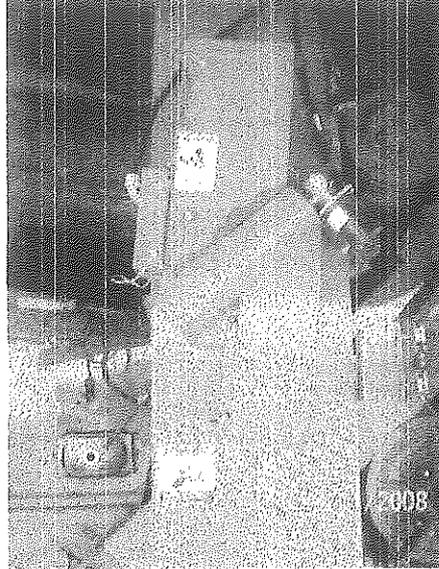
Mide el flujo de grano a través rayos Gamma, utiliza una fuente de radiación y una detector ubicado debajo de la cabeza de la noria

Micro- Trakton

Mide el flujo a través de la fuerza que aplica el grano al pasar a través de una horquilla (celda de carga sellada) instalada en la zona de descarga de la noria antes del sin fin de la tolva

Humedímetro

La humedad de l grano se estima por un sensor de capacitancia que mide las propiedades dieléctricas del grano que fluye o este estático (según el tipo de monitor) entre dos placas metálicas, Mientras más alto es el contenido de humedad del grano, más alta es la constante dieléctrica, y ello indica la cantidad de humedad del grano. Sobre este tema se han tenido problemas en el humidímetro con el sistema de descarga mostrado en la fotografía arriba y a la izquierda, lo cual con algunas modificaciones se han mejorado.



Velocímetro

La velocidad se mide a través sensores magnéticos que miden las vueltas de las ruedas delanteras de la cosechadora. Son exactos cuando existen condiciones de buen piso y la rueda no se entierra ni patina. Para contemplar estos efectos, se debe calibrar este sensor en condiciones similares a las de cosecha. También existe otro tipo de sensores de velocidad por radar de micro ondas.

GPS Antena

El GPS (Global Positioning System) es un sistema que permiten determinar las coordenadas geográficas de un punto dado como resultado de la recepción de señales provenientes de constelaciones de satélites artificiales de la Tierra

Un sistema de navegación basado en estaciones satelitales, puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas.

La mayoría de las cosechadoras están equipadas con GPS cuya precisión varía horizontalmente entre 5 y 20 metros.

A un costo algo mayor es perfectamente factible usar GPSs con más precisión y errores menores a un metro, incluso cm.

Sensor de corte de plataforma

En parte móvil de la plataforma y la cosechadora va instalado un una llave eléctrica que determina si la plataforma esta en posición de trabajo o si esta levantada.

Este dato indica a la consola que la maquina no esta teniendo ingreso de granos a trilla y por lo tanto no volara flujo en ese momento.

Monitor o consola

La consola es una "computadora" especial que en términos generales, cuenta con una pantalla y algún mecanismo tipo botonera que le permite al operario ver y cargar información. La consola está conectada a todos los sensores que suministran la información para calcular el rendimiento de grano en tiempo real. Los datos generados y parte de la información que necesita para fusionar, son almacenados en dispositivos de memoria tipo tarjeta.

Algunos datos que deben ser cargados por el operario son; lote, carga, número de hileras y distanciamiento, humedad base a la que se quiere corregir el rendimiento, cargas de calibración de peso real, calibración de humedad real, etc.

Se debe cargar antes de cada cosecha:

1. Nombre del lote.
2. Nombre o número de la carga.
3. Ancho de corte (número de hileras y distanciamiento).

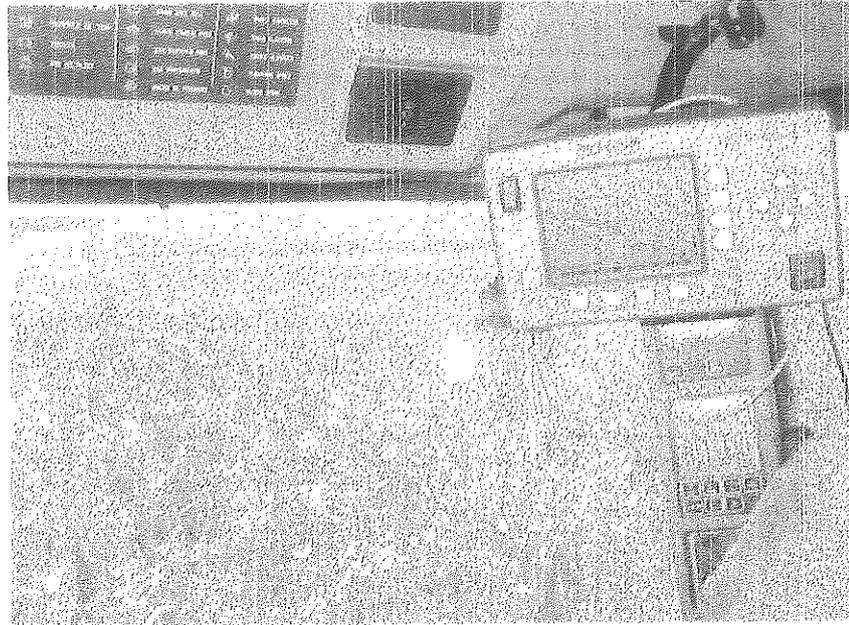
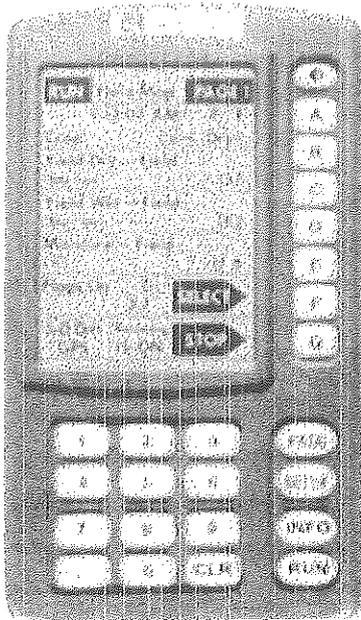
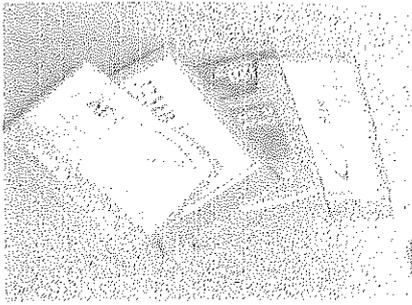
Información suministrada por el monitor:

En tiempo real se muestra en la pantalla:

- Rendimiento instantáneo (Ton/ha),
- Humedad de grano instantánea (%),
- Velocidad de avance (Km/h.),
- Flujo de grano (Ton/h.),
- Área cosechada y
- Calidad de recepción de la señal GPS.

Calcula y muestra en la pantalla y almacena: el rendimiento promedio y máximo, humedad promedio, superficie, distancia, toneladas de grano húmedo y seco, día y hora de cosecha para cada lote.

Si el monitor está recibiendo señal GPS a través de un receptor, se puede entonces confeccionar el mapa de rendimiento y humedad de grano. Y de todos los paramtros almacenados en la memoria



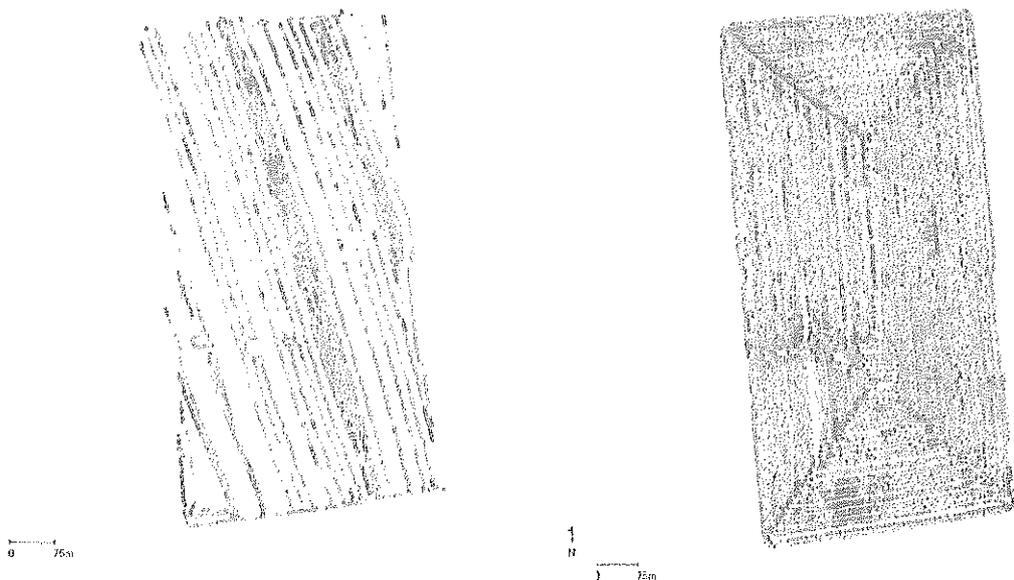
Consideraciones prácticas para la obtención de un buen mapa de rendimiento

Aspectos de Logística de cosecha

En términos generales y por las razones ya explicadas en cuanto al funcionamiento de los sensores del monitor, las condiciones ideales de trabajo del monito son aquellas que minimizan las variaciones del flujo de granos en la noria que no sean debidas a las variaciones naturales del cultivo cosechado.

La figura de la izquierda muestra el mapa de una cosecha de soja 2005-06. Fue realizada con dos maquinas, una de las cuales carecia de monitor de rendimientos. Si bien a primera vista parece deficiente, este mapa tiene pasos continuos con buena calidad de datos, los que la procesarse y luego interpolarse van a modelar bien la realidad la variación de rendimiento en el potrero.

El mapa de la derecha es el trigo 2006 del mismo potrero. A diferencias de la soja, este fue cosechado "en la vuelta", esto genera discontinuidades en la cosecha y maniobras con curvas cerradas que distorsionan las mediciones. Este tipo de mapas presentan distorsiones y requieren un mayor trabajo de limpieza y procesamiento previo a las interpolaciones.



El siguiente mapa es un ejemplo de una buena logística de cosecha, ida y vuelta, el operario también debe prestar atención cuando se desconecta algún sensor, tener mucha prolijidad en el ancho operativo, en el caso que le queden zonas donde no llega a completar el cabezal, apagar el mapeo o indicarle al monitor el cambio de ancho operativo. La otra recomendación práctica es no realizar cambios bruscos en la velocidad de cosecha. También el ser prolijo en cuidar las pérdidas de cosecha lo que me puede ocasionar errores graves en el mapa.

Ejemplo potrero 1 Prieto.Zona de Dolores



Aspectos de funcionamiento del monitor y la cosechadora.

Calibraciones

Todos sensores que están involucrados en el monitor de rendimiento deben calibrarse adecuadamente. Una vez hecho este proceso al inicio de cada zafra o de cada grano cosechado, es conveniente hacer chequeos periódicos de recalibraciones.

A pesar de los diferentes tipos de monitor, el rendimiento no es medido directamente. En lugar de eso, mediciones de fuerza, desplazamiento, o volumen, velocidad del flujo de material, contenido de humedad del grano, velocidad de cosecha y ancho de labor son combinados para producir una estimación de rendimiento de cultivo. El rendimiento del cultivo es un valor derivado o calculado. La calibración es ejecutada para asegurar que el dato del sensor y datos ingresados son usados apropiadamente por el monitor para producir el dato final en unidades de kilogramos por hectárea.

Antes de comenzar a cosechar con el monitor, este debe calibrarse correctamente para que los datos entregados y grabados sean precisos y confiables.

La calibración comprende la selección de constantes y procedimientos para determinar coeficientes de calibración y convertir las señales eléctricas medidas en parámetros deseados.

En general una maquina que esta fusionando adecuadamente, no genera demasiadas dificultades de manejo ni operación ya que con sus diferencias, los monitores están diseñados para ser muy fáciles de operar.

Calibración general previa a la cosecha

- Calibración de distancia y velocidad
- Calibración de temperatura
- Calibración por vibración de la cosechadora

Calibraciones durante la cosecha

- Calibración del sensor de altura del cabezal
- Calibración de humedad de grano
- Calibración del peso del grano

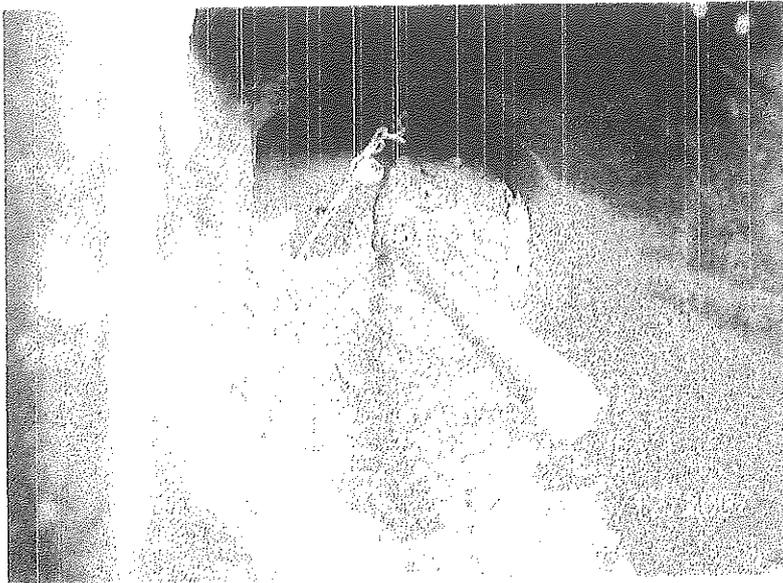
Plataforma llena

Durante la cosecha debe registrarse solo los pasos en que la cosechadora trabaja con todo su ancho operativo, Los monitores tiene un forma muy accesible al operador una llave que debe activarse cuando se agarran recorte s o situaciones en las que la maquina trabaja con la plataforma parcialmente ocupada.

Limpieza del sensor de Humedad y placas de impacto

Si buen el efecto de la acumulación de restos de grano e impurezas son contemplados al calibrar los sensores, estas pueden acumularse en cantidades que impidan el correcto funcionamiento.

En el caos de los sensores de humedad pueden incluso trancar el motor eléctrico de descarga generando que este se estropee o que queme un fusile eléctrico dispuesto en algunos monitores a tal fin. Y en definitiva no se recambia al amuestra de grano y la medición es defectuosa.



Control del correcto funcionamiento eléctrico y del control de la antena

La antena del GPS debe esta ubicad fuera de la cabina sonde no reciba interferencias de los componentes de la maquina, Debe colocarse los mas al centro de la maquina posible.

Esto implica que debe hacerse una conexión eléctrica para alimentar con corriente a la antena y que se traiga los cables de señal, generalmente son conexiones "Serial". Los cables y conexiones deben estar prolijamente instalados para evitar la perdida e señal de GPS, que es una causa frecuente de perdida de mapas de rendimiento

Procesamiento y depuración posterior de los Mapas.

Con los mapas de rendimiento se procura evaluar la variación generada en el rendimiento por factores mas o menos permanentes en el potrero como son, las variaciones naturales del suelo y topografía, o las inducidas por el manejo agrícola como la historia de la chacra, zonas compactadas, caminos etc. También un buen mapa de rendimiento es capaz de mostrar variaciones inducidas por prácticas del manejo agrícola como son los defectos de siembra, de aplicación de fertilizantes o herbicidas,

Peor también hay otras fuentes de variación en los mapas de rendimiento. Estas son debidas al funcionamiento en sí de los dispositivos de medición de los monitores, o de las cosechadoras.

El proceso de limpieza y depuración de los mapas procura asilar la variación generada por el propio funcionamiento del monitor o la cosechadora, por decirlo de algún modo la variación provocada por los aparatos de medición o errores.

La depuración de un mapa de rendimiento consiste en eliminar los puntos que se puedan identificar como "errores" La forma de identificar esto "out ley" es filtrando los puntos que en que las mediciones que se generaron a velocidades de avance cambiantes, arranques y fin de pasada y situaciones donde la maquina tubo variaciones de flujo de grano.

Para esto hay varios criterios y algunos software que ayudan en la limpieza de mapas de rendimiento. Algunos de estas herramientas están en fase experimental y siempre requiere de un trabajo concienzudo de la persona que depura el mapa de rendimiento.

Criterios de depuración de Mapas de rendimientos.

1. Cabezal ascendente: Chequear en archivo original que exista una columna que indique si el cabezal está arriba o abajo. Es el da la columna "Cuenta de área", que indica activado-desactivado La bibliografía indica que en el caso de AgLeader es la columna 9, y se indican los valores con 1 correspondientes a cabezal bajo.**2.Velocidad cambia rápidamente:** Verificar si la velocidad cambia en una pasada y entre pasadas. La bibliografía indica que se compara el punto actual con el anterior y si varía más de un 15% se elimina el punto.

3. Comparación de velocidad de GPS y de rueda: Se sugiere que en tiradas de 100 m se comparen ambas magnitudes. **4. Descartar puntos cuando las velocidades son menores a 1,5 km/hora.** Este valor de velocidad debe poder ser cambiado por el usuario.**5. Descartar puntos cuando los flujos sean menores y/o mayores a unos valores límites** que deben poder ser establecidos por el usuario. **6. Se aplica el filtro de media +/- 3 desvíos estándar** y se eliminan los puntos fuera de ese rango. Se hace para todos los puntos del mapa a la vez y las variables sobre las que se aplica son: flujo de granos, humedad, velocidad. El usuario debe poder ingresar el número de desvíos estándar a considerar. En la bibliografía aparece la opción de dividir la chacra en celdas d 25 x25 m o de 50 x 50 y eliminar los puntos mayores y menores a los 3 Desvíos por bloque (esto se utiliza siempre en el análisis de ensayos).**7. Eliminar puntas de cabeceras**, que se indique por número de puntos (debe corresponder aprox. a 15 m)**8. Eliminar puntos superpuestos** (uno de ellos) y tiradas cortas de menos de 50 m.**9. Normalizar los datos** **10. Proratear los datos de rendimiento con dato de balanza para obtención de datos reales.**

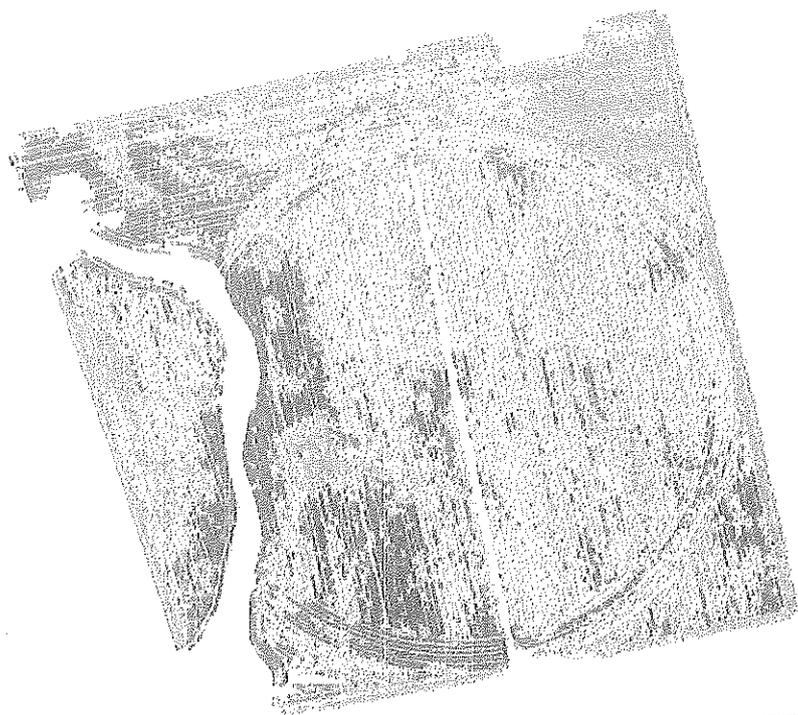
Utilidad práctica y uso de la información de los monitores de rendimiento.

Control de logística de cosecha.

Mediante los mapas de rendimiento se registra detalladamente algunos aspectos interesantes vinculados con el funcionamiento de la maquina y la producto cosechado. Los monitores arrojan directamente datos de: hora, Humedad, velocidad, productividad.

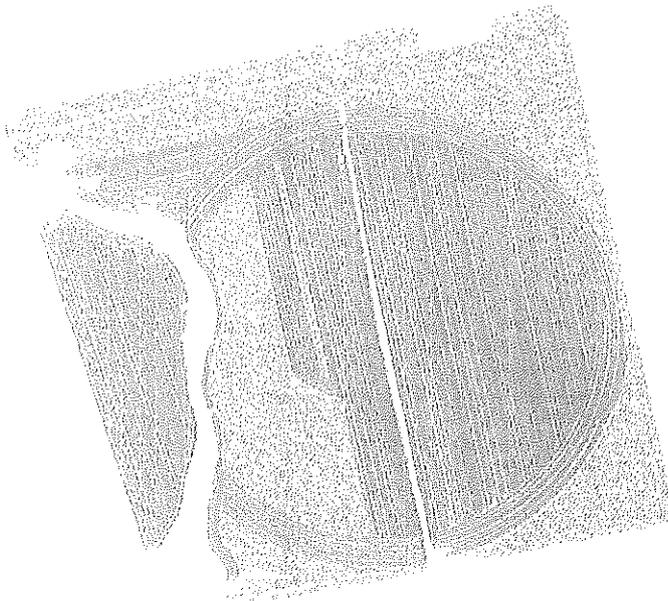
Procesando estos datos se puede estimar otra información como, pérdidas, cosechas a destiempo. Tiempos operativos etc.

Datos georeferenciados humedad de cosecha



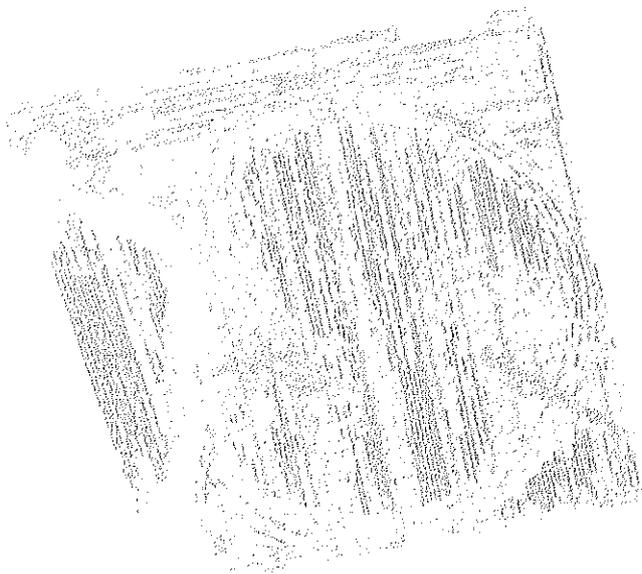
Humedad (%)	
■	16,10 - 20,00 (15,06 ha)
■	15,40 - 16,10 (23,38 ha)
■	14,70 - 15,40 (18,75 ha)
■	9,00 - 14,70 (9,02 ha)

Datos georeferenciados de fecha y hora de operación de la cosechadora



Fecha / Hora	
■	11/03/2008 - 12/03/2008 (9,52 ha)
■	10/03/2008 - 11/03/2008 (24,14 ha)
■	10/03/2008 - 10/03/2008 (32,54 ha)

Datos georeferenciados de productividad de la cosechadora



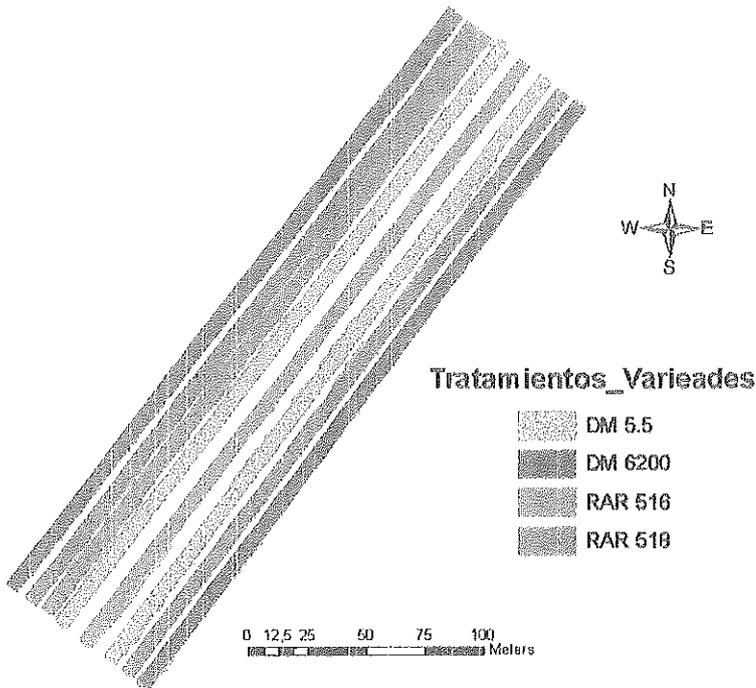
Productividad (ha/hr)	
■	4,56 - 5,85 (15,05 ha)
■	4,02 - 4,56 (19,18 ha)
■	3,49 - 4,02 (15,08 ha)
■	2,75 - 3,49 (11,60 ha)
■	0,03 - 2,75 (5,29 ha)

Realización de ensayos.

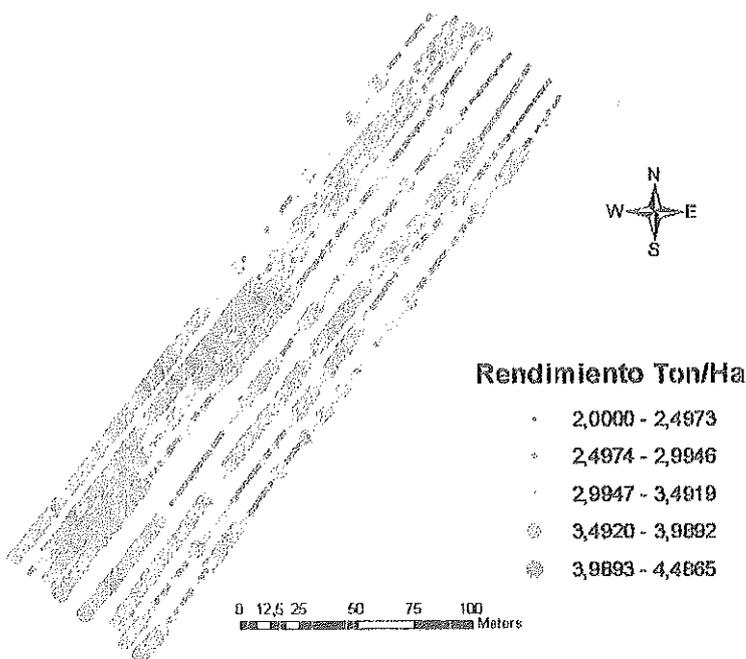
El poder medir la variación en el espacio del rendimiento de los cultivos posibilita el diseño de ensayos de en fajas obteniéndose un gran numero de observaciones.

A continuación se muestra un ejemplo en el que se sembraron cuatro variedades de Soja en dos repeticiones en franjas de 280 metros.

Mapas de Tratamientos



Mapas de rendimiento Procesado

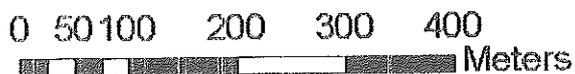
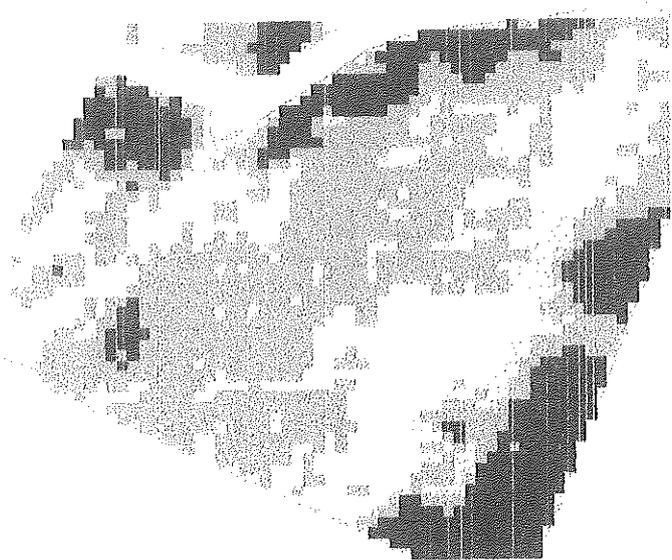
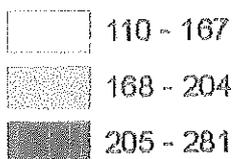


Recomendaciones practicas para la cosecha de ensayos, identificar cada carga por tratamiento, dejar uniforme la velocidad de cosecha a una velocidad baja, mantener el sentido de cosecha para todas las parcelas por lo menos una pasada por cada una, mantener en lo posible cabezal lleno, no cambiar ancho operativo, tener bien calibrado el equipo, pesar cada tratamiento para complementar informaci3n adem3s debe cosecharse en rango de humedad razonables para el cultivo y en lo posible el mismo d3a.

Diagnostico para re fertilizaci3n. (Exportaci3n de nutrientes).

Los sucesivos mapas de rendimiento de una rotaci3n agr3cola son la materia prima para el c3lculo de la extracci3n de nutrientes. El siguiente ejemplo se presenta el mapa de extracci3n de F3sforo para una rotaci3n Soja/Trigo/Soja/Trigo/Ma3z/Soja para el potrero 1 de establecimiento Prieto, departamento de soriano. Este es un dato importante para decidir la aplicaci3n variable de fertilizantes.

Extraccion de F3sforo (Kg/ha)



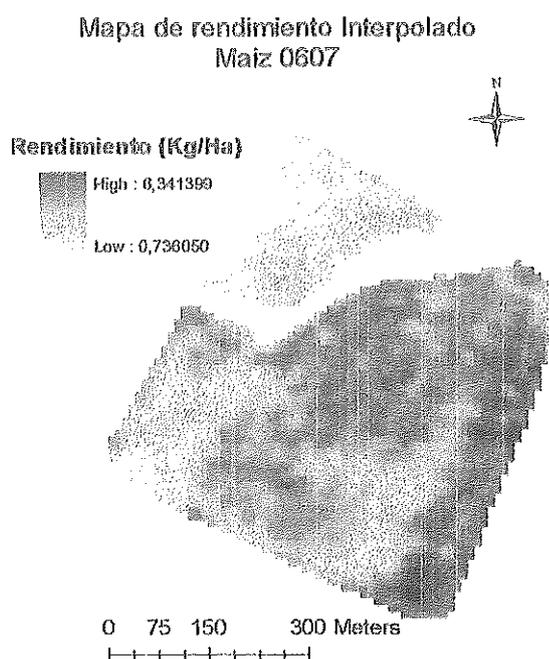
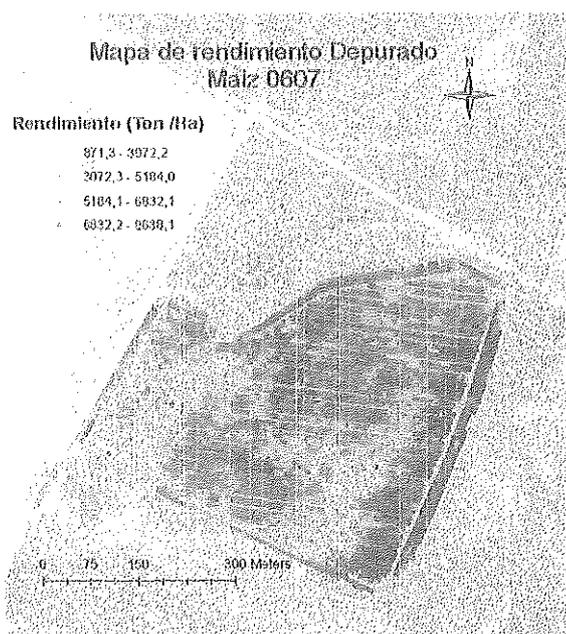
Determinación de Zonas de manejo.

La agricultura de precisión se basa en manejar diferencial mente lo ambientes que así lo ameriten. Estas zonas de manejo, varían todo el tiempo según la practica de manejo que estemos pensando o el cultivo e incluso las condiciones hídricas del suelo para ese año.

Como ya de dijo, los mapas de rendimiento son herramientas potentes para medir la variabilidad de los potreros, y son sin duda una herramienta muy potente para delimitar y clasificar las zonas de la chara según el comportamiento del rendimiento de los cultivos.

La cantidad y densidad de las mediciones es muy intensa y, a diferencia de otros análisis o muestreos, se obtiene una medición casi continua de toda el área.

Los mapas, no delimitan zonas de manejo en si mismo, sino que aportan elementos para identificarlas, Debe además estudiarse cada zona con otros métodos como de estudio de suelo topografía etc.



Consideraciones finales

- Los mapas de rendimientos son sin duda una herramienta de bajo costo para determinar la variabilidad de los ambientes de los cultivos. Proporcionan información medida directamente sobre los mismos con una altísima intensidad de muestreo.
- Hacer mapas de rendimiento no es solo equipar las cosechadoras con monitores sino que implica todo un manejo en si mismo, tanto antes , durante y después de las operaciones de cosecha
- Los mapas de rendimientos son buenas herramientas para el manejo variable en la medida que se acumulen mapas durante la rotación agrícola.
- Los mapas permiten gestionar una serie de información adicional mas haya del rendimiento, como son; tiempos operativos, velocidades, productividades de la maquina, humedad de grano y

una serie de datos útiles, para la gestión de la maquinaria, tanto para productores como para contratistas.

- A diferencia de otras herramientas de detección de la variabilidad de las chacras, los mapas de rendimiento están sujetos a los tiempos biológicos de los cultivos. Esto implica que para lograr una buena serie de datos lleva varias zafras, como mínimo un par de años cuatro cultivos. Es por esto que muchos productores adelantan camino y empezaron a mapear las cosechas logrando información contundente para el futuro análisis de la variabilidad espacial y temporal para posterior manejo diferencial.
- Es una herramienta de diagnóstico de exportación de nutriente pudiéndose usar para refertilizaciones futuras.
- También ha demostrado ser una herramienta potente para la realización de ensayos macro parcelarios, pudiendo medir el efecto tratamiento en el total de la faja o analizarlos por ambientes diferentes dentro del mismo ensayo donde nos ha pasado que los promedios son iguales pero cuando se analizan por zona encuentra respuestas diferentes.

Bibliografía.

7º Curso de Agricultura de Precisión y Máquinas Precisas - INTA Manfredi 2007

I. Aplicación del Sensoramiento Remoto en Decisiones Agronómicas.

Desde hace varios años, el sensoramiento remoto se ha percibido como una herramienta que posee un potencial importante para ser incorporada en el proceso de toma de decisiones de la actividad agrícola. Sin embargo, los últimos avances tecnológicos focalizados en el desarrollo de la operatividad de los sensores en el campo (por ej.: nuevos softwares, aumento de la capacidad de almacenamiento de la información, procesamiento estadístico acelerado de la información, versatilidad en la resolución espectral, interfaces con GPS, etc), son los que han permitido a los productores agropecuarios incorporar esta herramienta. El sensoramiento remoto permite en una forma rápida y precisa evaluar la distribución espacial y temporal de la variabilidad de las características dentro de un potrero, de un establecimiento, de una cuenca o de toda una región.

El sensoramiento remoto es una ciencia emergente que se basa en la medición a distancia de la luz reflejada por un objeto utilizando sensores. Estos sensores son dispositivos que responden a un estímulo, en este caso la radiación de luz reflejada, y producen una señal que se puede medir. La luz reflejada, o reflectancia (R), generalmente se la expresa en porcentaje del total de luz incidente y se utiliza para extraer e interpretar información respecto a las distintas características del objeto de medición. En el caso de la producción agrícola, el objeto de medición es el suelo, el cultivo, la pastura o el bosque.

En el caso de cultivos, pasturas o cualquier material vegetal verde, la reflectancia presenta una distribución característica en el espectro de luz determinada principalmente por la presencia de clorofila y otros pigmentos (Figura 1). El pigmento clorofila, presente dentro de los cloroplastos de los tejidos vegetales y especializado en la utilización de la luz para el proceso de fotosíntesis, absorbe fuertemente la luz azul y la luz roja y con una menor intensidad la luz verde. En consecuencia, los niveles de luz reflejada en el espectro visible son muy bajos especialmente en el rango del azul y del rojo (a mayor absorción de luz, menor es el porcentaje de reflectancia). Sin embargo, y debido a que los vegetales no utilizan la luz incidente en el infrarrojo cercano, la absorción por pigmentos en esta región del espectro de luz es nula, determinando niveles altos de reflectancia en este rango espectral.

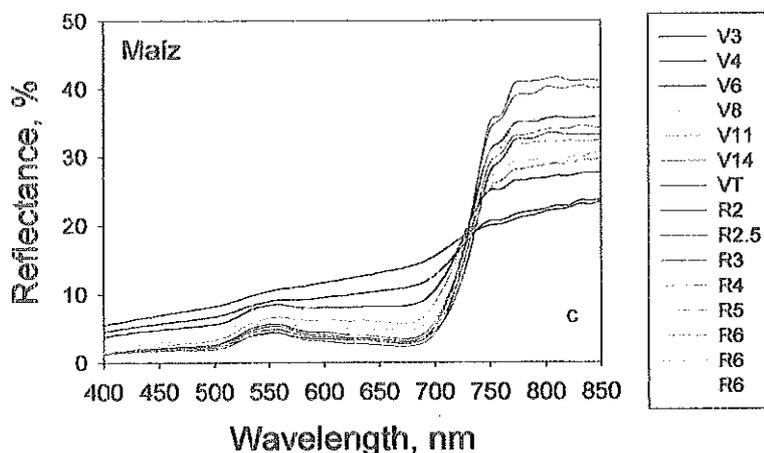


Figura 1. Cambios en la Reflectancia (visible e infrarroja cercana) de un cultivo de maíz durante la estación de crecimiento (estadio V3 a R6) (Ciganda, 2007).

Los niveles de reflectancia de un cultivo o pastura varían en los distintos rangos del espectro en función principalmente de la cantidad de biomasa por unidad de superficie (el tamaño de la "fábrica" vegetal) y de la intensidad del verde de esta biomasa (la eficiencia de funcionamiento de la "fábrica" vegetal). Algunos autores (Gitelson et. al, 2005, Ciganda et al., 2008a) resumen estas dos características midiendo la cantidad de clorofila por m² de superficie de suelo. Estas características están determinadas a su vez por el estadio de crecimiento del vegetal, el status nutricional, el status hídrico, la edad de las hojas, etc. Además, otras

⁵ Ing. Agr., Investigador Asistente, Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

⁶ Ing. Agr., Investigador Asistente, Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

características como la arquitectura del follaje, es decir el tipo y distribución de las hojas, es un factor fundamental que afecta la cantidad de luz interceptada, la cantidad de luz absorbida (por las distintas "capas" o estratos de hojas dentro del follaje), y en consecuencia la cantidad de luz reflejada hacia arriba y medida por un sensor. La arquitectura del follaje varía entre las especies por lo que es posible encontrar que dos especies con la misma cantidad de clorofila por m^2 , presentan curvas de reflectancia que varían en los niveles de luz reflejada para los distintos rangos del espectro.

Las variaciones en los niveles de reflectancia de luz no son iguales en todos los rangos del espectro (Figura 1). Dentro del espectro visible (400 nm -700 nm), por ejemplo, una mínima presencia de tejido verde es suficiente para absorber más del 90-95 % de la luz azul (400 nm a 500 nm). En consecuencia, la reflectancia en el azul no es una medida sensible a cambios en el cultivo. La luz roja (~ 660 nm- 690 nm) es más sensible a incrementos en la biomasa vegetal verde y/o a la intensidad del verde. En general, se ha reportado que es capaz de responder a cambios en el cultivo hasta valores de índice de área foliar de aproximadamente 2.5 o coberturas vegetales de ~55%. Por encima de estos valores esta banda de luz se vuelve insensible debido a que es intensamente absorbida por la clorofila lo que limita fuertemente su utilidad para extraer información de los cultivos con niveles de biomasa media a alta. La luz verde (~ 530 nm - 570 nm), responde a incrementos de IAF hasta niveles mayores que la banda roja pero se vuelve insensible para contenidos elevados de clorofila/ m^2 . La luz infrarroja cercana (730 nm- 1200 nm) no responde a la intensidad del verde, ya que no es absorbida por los pigmentos, pero debido a sus características físicas (longitud de onda más larga que la luz visible) penetra en el follaje, interacciona con el mismo, y es reflejada hacia arriba en función de la cantidad de follaje presente. En consecuencia, la reflectancia en el infrarrojo cercano es sensible al "tamaño" de la fábrica vegetal. Es importante destacar que esta banda de luz también se "satura", y por lo tanto pierde sensibilidad, a niveles muy altos de biomasa vegetal. Otro rango del espectro de luz, es el denominado "borde rojo" (~ 700 nm – 720 nm). Este rango representa el punto de inflexión entre el rojo y el infrarrojo cercano y varios autores (por ej., Gitelson et al. 2006, Steele et al., 2008, Ciganda et al., 2008) han demostrado su sensibilidad en un rango muy amplio de contenidos de clorofila/ m^2 .

La extracción de información acerca del estado de la vegetación utilizando sensoramiento remoto se maximiza eligiendo las bandas de luz sensibles a las características vegetales objetos de medición. A su vez, la combinación matemática de ciertas bandas aumenta aún más el potencial de extracción de información. A esta combinación de bandas comúnmente se los llama "Índices de Vegetación". En la bibliografía aparecen reportados muchos índices los cuales han sido desarrollados con distintos objetivos. La utilidad y las limitantes de cada índice estarán dadas por las bandas de luz que se utilizan para su cálculo. Uno de los índices más tradicionales y conocidos es el NDVI (índice de vegetación de la diferencia normalizada, calculado como: $(R_{\text{infrarrojo}} - R_{\text{rojo}}) / (R_{\text{infrarrojo}} + R_{\text{rojo}})$). Este índice intenta hacer uso de la sensibilidad de la banda roja a la presencia de clorofila y de la infrarroja a la cantidad de biomasa. Es un índice muy sensible a rangos de biomasa y contenidos de clorofila bajos a medio-bajos pero pierde su sensibilidad para extraer información en cultivos con contenidos de clorofila o cantidad de biomasa media a alta, generalmente asociados a estadios avanzados de crecimiento de un cultivo o pastura. Otros índices como el NDVI verde, calcula en igual forma que el anterior pero sustituye la banda roja por la verde. Esta sustitución de bandas lo hace sensible a situaciones de mayor contenido de clorofila y biomasa pero se torna insensible a contenidos elevados. Otros índices que utilizan la banda del borde rojo, por ej. $CI_{\text{borde rojo}}$, (calculado como $(R_{\text{infrarrojo}} / R_{\text{borde rojo}}) - 1$) muestran sensibilidad tanto a valores bajos, medios y muy altos de clorofila o biomasa verde (Figura 2).

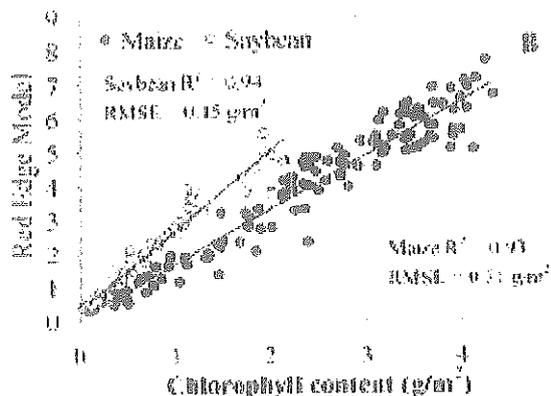


Figura 2. Relación entre el índice de vegetación $CI_{\text{borde rojo}}$ y el contenido de clorofila en el follaje de maíz y soja (Gitelson et al, 2005).

La utilización de uno u otro índice en la agricultura de precisión está determinada, principalmente, por la configuración espectral (tipo y ancho espectral de bandas de luz) de los sensores comercialmente disponibles ya sea montados en satélites, en aviones, en la maquinaria agrícola (sensores de campo) o manuales. En el caso de sensores satelitales o aéreos, el producto que se obtiene es una imagen en la cual cada pixel contiene información de la reflectancia de luz de cada banda. El procesamiento de estas imágenes con softwares especializados permite calcular los índices de vegetación en distintos momentos del año y conocer su distribución espacial. Por ejemplo, utilizando las imágenes del sensor Landsat TM, es posible calcular el índice de vegetación NDVI y el NDVI verde. Sin embargo no es posible el cálculo de índices que incluyan la banda del borde rojo debido a que el sensor montado en Landsat no está configurado para medir la luz reflejada en esta banda. En el caso de los sensores de campo, en los últimos años se han logrado avances muy importantes en cuanto a la operatividad de estos sensores para utilizarlos individualmente o en conjunto montados en maquinaria agrícola. Algunos de estos sensores extraen información del cultivo utilizando el NDVI, otros el NDVI verde, otros el NDVI ambar, etc. La facilidad en la operatividad de estos sensores sumado a la elevada capacidad de almacenamiento y a la obtención de información en tiempo real, facilita y atrae fuertemente su inclusión en la actividad agrícola. Es importante distinguir, sin embargo, la operatividad del sensor o del equipo de sensores, de su potencial de generación de información el cual está medularmente basado en las bandas de luz o el índice de vegetación para el cual está configurado.

II. Uso del NDVI para la Selección de Ambientes (zonas homogéneas) en Cultivos Extensivos.

Las imágenes que se utilizarán para realizar el cálculo del NDVI a nivel de chacra son las del sensor Thematic Mapper del satélite Landsat 5. Este sensor tiene las siguientes características: Resolución espectral: 7 bandas (Bandas 1, 2 y 3, espectro visible; Bandas 4, 5, 6 y 7 desde el infrarrojo cercano hasta el térmico); Resolución espacial (tamaño del píxel): 30 x 30 m; Resolución temporal: 16 días; Cobertura: Cada imagen cubre 185 x 185 Km.

A nivel nacional se utilizan las bandas de las imágenes del sensor AVHRR, el cual está montado en el satélite NOAA. Las imágenes de este sensor, tienen 5 bandas, la resolución espacial es de 1.1 x 1.1 km y la resolución temporal es de 1 día.

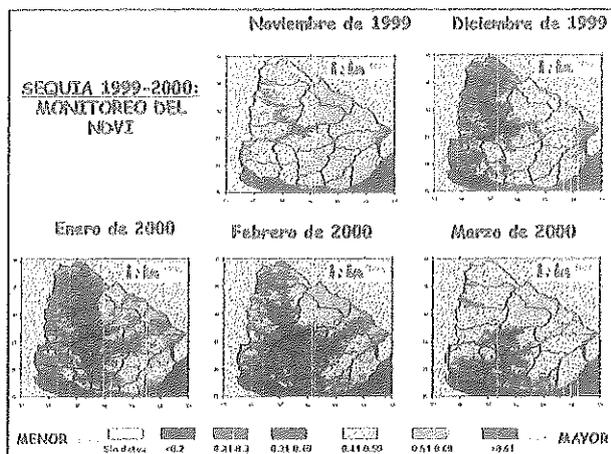
¿Qué es el NDVI?

El NDVI es un índice que permite de manera rápida, estimar la presencia de vegetación así como en cierta medida la calidad y desarrollo de la misma. Se basa en la relación de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético (rojo e infrarrojo) donde la vegetación emite o refleja según su estado (fig. 3).

$$NDVI = \frac{\text{Infrarrojo cercano} - \text{rojo}}{\text{Infrarrojo cercano} + \text{rojo}}$$

Figura 3. Cálculo del NDVI.

Cuando la vegetación está en buen estado, absorbe la radiación en la fracción del rojo – la clorofila absorbe esta radiación – mientras que el infrarrojo es reflejado al atravesar las membranas celulares. A diferencia de cuando la vegetación está sufriendo estrés, que la radiación en la fracción del rojo es en mayor parte reflejada.



Uso del NDVI a nivel nacional

Los ambientes pueden ser determinados a nivel de chacras como a nivel Nacional, es por esto que en la figura 4, se muestran los valores del NDVI para el periodo de sequía de noviembre de 1999 hasta marzo de 2000.

Figura4. Monitoreo del NDVI durante la sequía 1999-2000.

Uso del NDVI a nivel de chacras comerciales: 2 casos de estudio

A continuación se presenta en la figura 5, el NDVI de la chacra "Algarrobo Grande" de un trigo en noviembre de 2005, se observan 3 zonas con marcadas diferencias en el NDVI, una zona con valores bajos del índice, una zona con valores medios y una con valores altos.

NDVI: Trigo Invierno del 2005

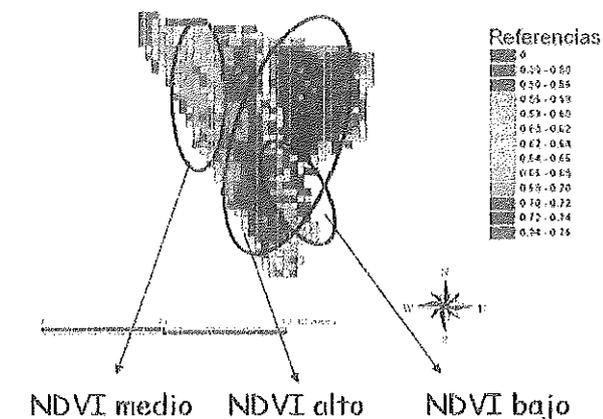


Figura 5. NDVI para un trigo del año 2005.

El valor del NDVI puede variar dentro de un mismo potrero, según: las características físicas y/o químicas del suelo, el estado sanitario y nutricional de la vegetación, el estado fenológico del cultivo.

A modo de ejemplo, se analizarán las regiones con distinto valor del NDVI, según el mapa de suelos del potrero. Para poder los valores del NDVI por unidad de suelos, se realizó la intersección de los mapas de suelo y de NDVI mediante un SIG. Los resultados de se ven en la figura 6, donde se muestran los valores del índice para cada una de las unidades de suelo.

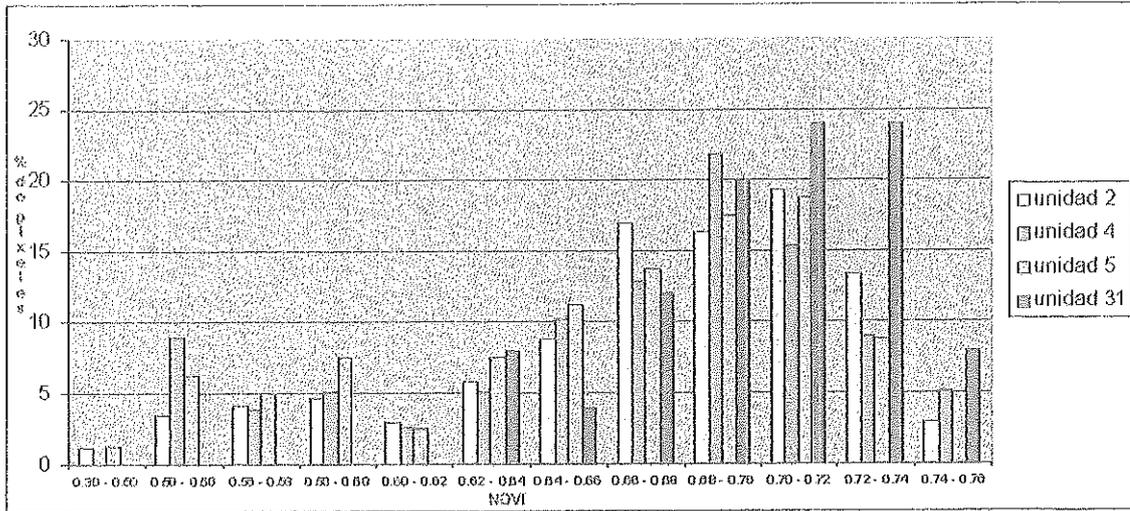


Figura 6. Valor del NDVI para cada una de las unidades de suelo.

En la figura 6 se ve que el mayor porcentaje de píxeles tiene un alto valor del índice (mayor a 0.62) y que dentro de estos altos valores, el suelo de la unidad 31, es el que presenta los mayores valores. Si de las siguientes características de los suelos: pendiente, espesor del suelo, agua disponible y drenaje, seleccionamos el drenaje por ser la variable que puede en mayor medida interferir en un cultivo de invierno, se puede observar en la figura 7, como esa unidad es la que tiene un drenaje "rápido" lo que posiblemente junto con otras características, expliquen el mayor valor del índice para ese suelo.

Mapa de suelos clasificado por DRENAJE

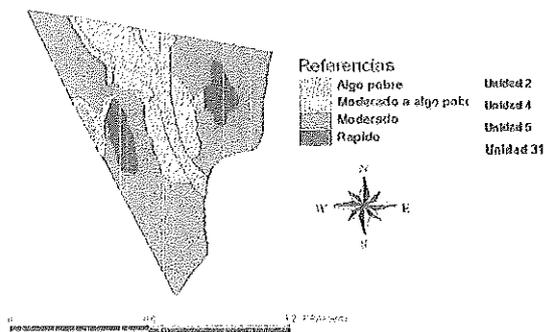


Figura 7. Mapa de drenaje.

Consideraciones finales

La teledetección o sensoramiento remoto, a través del NDVI, es una herramienta de diagnóstico útil a la hora de determinar ambientes ya sea a nivel regional como a nivel de chacras.

Es además una herramienta eficaz para determinar variaciones temporales y espaciales.

Es de ayuda, junto con información de suelos (características físico-químicas) así como de resultados físicos (como mapas de rendimiento), para la toma de decisiones de índole agronómica.

Bibliografía:

Ciganda, V., A.A. Gitelson, and J. Schepers. 2008a. Vertical Profile and Temporal Variation of Chlorophyll in Maize Canopy: Quantitative "Crop Vigor" Indicator by Means of Reflectance-Based Techniques, *Agron. J.* 100:1409–1417. doi:10.2134/agronj2007.0322

Ciganda, V.S., A.A. Gitelson, J. Schepers, 2008. Non-destructive determination of maize leaf and canopy chlorophyll content. *Journal of Plant Physiology*, *in press*.

Ciganda, V.S. 2007. Distribution of Chlorophyll in Maize Canopy: Technique, Quantification, and Implications for Remote Sensing. University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE. Tesis de Doctorado.

Gitelson, A.A., A. Viña, D.C. Rundquist, V. Ciganda, T.J. Arkebauer, 2005. Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08403, doi: 10.1029 / 2005GL022688.

Steele, M. R., A. A. Gitelson, and D.C. Rundquist. 2008. Non-Destructive Estimation of Leaf Chlorophyll Content in Grapes, *American Journal of Enology and Viticulture*, *in press*.

Modelos de Simulación, como herramientas de predicción de variabilidad de rendimiento espacial y temporal.

Laura Olivera⁷
INIA - Unidad GRAS

Introducción

¿Qué es un modelo de simulación? Un modelo de simulación es una representación matemática (simplificada) de la realidad. Es una herramienta que ayuda a entender la realidad y a predecir variaciones en los sistemas productivos.

Existen diferentes modelos de simulación, desde simples a complejos y distintos según el cultivo a simular. Los más complejos, tienen la ventaja de poder evidenciar las interacciones entre el ambiente (clima y suelo) y el manejo.

Algunos modelos de cultivos son los siguientes: CROPGRO: Leguminosas: como Soja, Maní; CROPGRO: Tomate, Algodón, Pasturas; CERES-Maíz; CERES-Arroz; CERES/CROPSIM-Trigo & Cebada; CERES-Sorgo; CERES-Mijo; SUBSTOR-Papa; Otros (Mandioca, Caña de Azúcar). Estos modelos de cultivos, integran el DSSAT.

¿Qué es el DSSAT?

Es un sistema de soporte de decisiones para la transferencia de agro tecnología (Decision Support System for Agrotechnology Transfer, según su sigla en inglés). El DSSAT es una colección de programas independientes que operan juntos, donde la simulación de cultivos es lo más importante. Permite simular el crecimiento y desarrollo de distintos cultivos, el agua en suelo y plantas así como la dinámica del Nitrógeno y del Carbono en el suelo.

En la tabla 1. se muestran ejemplos de aplicaciones (para América Latina).

Tabla 1. Ejemplos de aplicaciones de los modelos de simulación para A. Latina.

Tipo de aplicaciones	Referencias
Manejo de cultivos	Savin et al., 1995; Travasso y Magrin, 1998
Manejo del Riego	Heinemann et al., 2000
Agricultura de Precisión	Booltink et al., 2001
Evaluación de cultivares	Castelan Ortega et al., 2000; Ferreyra et al., 2000; White et al. 1995
Cambio Climático	Baethgen, 1997, Conde et al., 1997; Diaz et al., 1997; Magrin et al., 1997; Maytin et al., 1995
Variabilidad Climática	Messina et al., 1999; Podesta et al., 2002; Ferreyra et al., 2001; Royce et al., 2002
Estimación de rendimiento	Meira y Guevara, 1997; Travasso et al., 1996
Sustentabilidad	Giraldo et al., 1998
Educación	Ortiz, 1998

⁷ Ing. Agr., Investigador Asistente, Programa Nacional de Investigación Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

La gran pregunta que responden los modelos de simulación es:

"¿qué pasaría si.....?"

Siembro el maíz el 18 de setiembre o el 11 de noviembre.....

Uso una densidad de siembra de 70.000 plantas/ha?

Si siembro esta variedad o la otra.....?

Si llueve un 30 % por debajo de lo normal..... ?

Si fertilizo con x kg de urea a V6 y/o a V8?

Para contestar estas preguntas es necesario contar con la siguiente información básica: información del cultivo (parámetros genéticos), Información del suelo (características físicas y químicas), información diaria del clima (precipitaciones, temperatura máxima y mínima y radiación solar), manejo del cultivo (fecha de siembra, densidad de siembra, fertilizaciones). En la medida que la información que se ingresa al modelo sea de mayor calidad, más confiables serán las salidas del mismo.

A continuación se presentan los resultados parciales de la serie técnica del INIA N° 162, "Simerpa: Sistema de Información Geográfica para la evaluación de riesgos climáticos en la producción agropecuaria de Uruguay y Paraguay." Como ejemplo de simulaciones para maíz a nivel regional: Río Negro, Soriano y Colonia.

Se plantearon 36 tratamientos con la siguiente información: 3 cultivares de maíz, uno de ciclo corto, uno intermedio y uno largo; 3 fechas de siembra, 15 de setiembre, 25 de octubre, 15 de diciembre; 2 situaciones de fertilización nitrogenada, una con 60 kg de N a la siembra y otra sin fertilización; con laboreo y en siembra directa; y con la información climática diaria de 42 años. En la figura 1, se muestran los rendimientos que representan un año malo, uno bueno y uno normal.

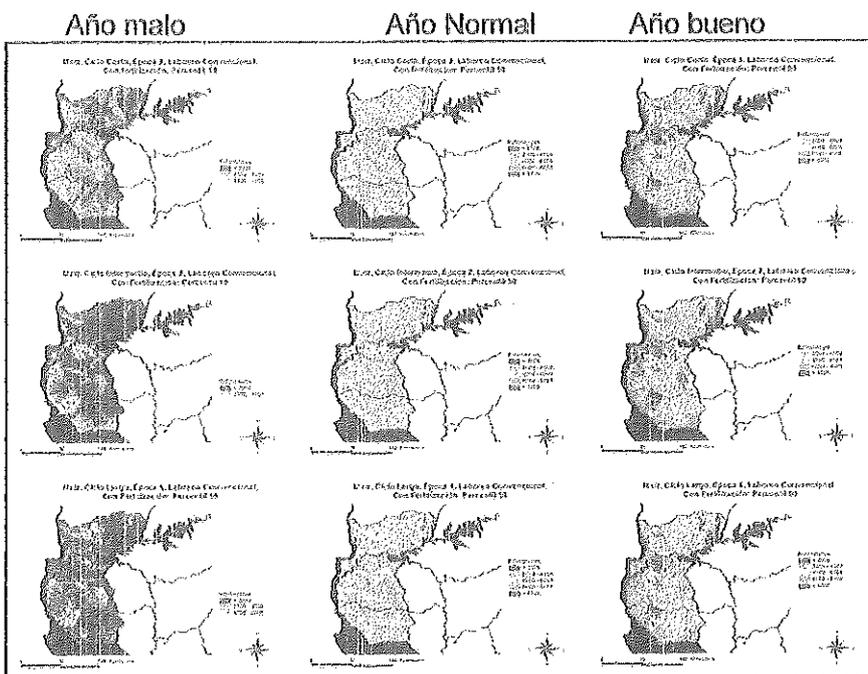
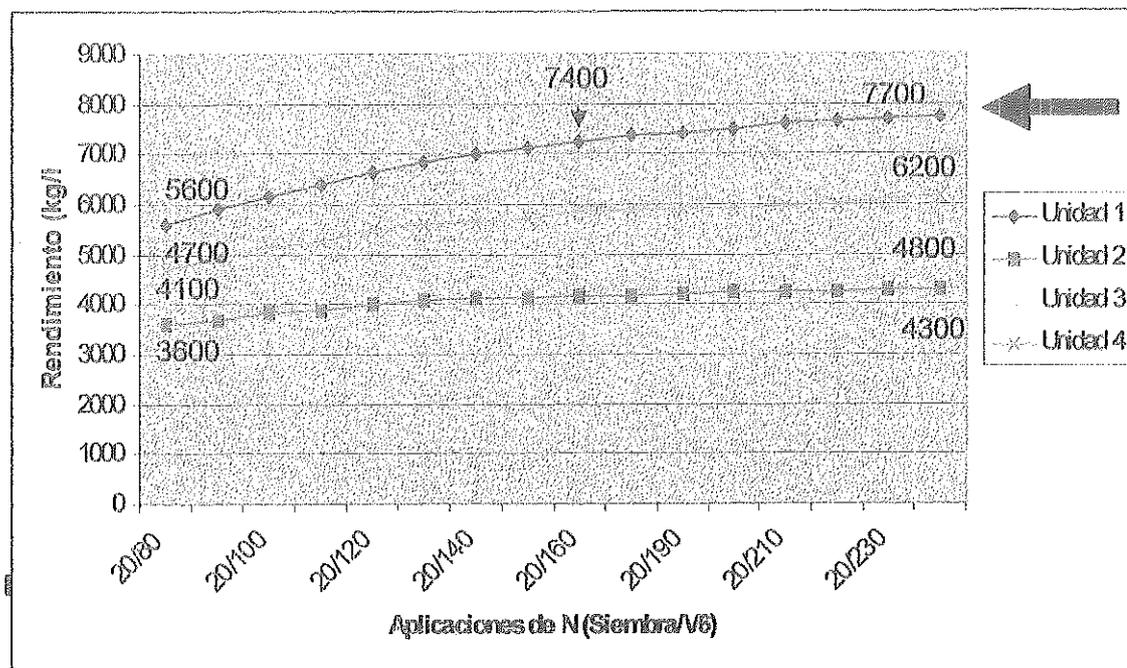


Figura 1. Mapas de rendimiento por suelo, salidas del modelo CERES-Maíz.

Ejemplos a nivel de chacra: Como antecedente para que se justifique un manejo diferencial dentro de una chacra debe de existir información donde se constatan variaciones considerables en el rendimiento y que las variaciones espaciales en las entradas y/o en el manejo, incrementarán las ganancias y reducirán los riesgos ambientales.

Se tomaron como ejemplo 2 chacras comerciales, a las dos chacras se les realizó el mismo manejo: se utilizó un híbrido con ciclo intermedio, se sembró el 18 de setiembre con una densidad de 70.000 plantas/ha. A una de las chacras se le varió la fertilización nitrogenada y a la otra el riego a modo de ejemplo.

Para la chacra donde se cambió la fertilización nitrogenada en el primer ejemplo se fertilizó a razón de 20 Kg de N/ha a la siembra y 60 Kg de N a V6, en el segundo caso, con igual fertilización a las siembra y con 160 Kg de N a V6. Se realizó la "corrida" del modelo para las 4 unidades de suelo de la chacra, se seleccionó el suelo que tiene mayor potencial de respuesta al N (suelo unidad 1), y a ese suelo se le aplicaron 100 Kg más de N a V6. En la figura 2, se ven los rendimientos máximos y mínimos obtenidos para cada unidad de suelo.



El rendimiento ponderado (por superficie ocupada de cada suelo) pasó de 5000 a 6200 Kg/ha de maíz, por lo que suponiendo que la urea está a 900 U\$/t y el maíz a 300 U\$/t, el ingreso neto pasa de 510 a 678 U\$/ha.

En la segunda chacra, se simuló un maíz con riego y se lo regó cada vez que el mismo lo necesitaba. Luego de realizadas las corridas se seleccionó el suelo que necesitó la menor cantidad de riegos y de milímetros regados como el de mayor potencial. Como ejemplo de un cambio en el manejo, se cambió el híbrido y se obtuvo un menor rendimiento (13.000 vs 18.000 kg/ha) con la misma cantidad de riegos y de milímetros regados. En la figura 3, se muestran las tablas con la cantidad de riegos que fueron necesarios en cada unidad de suelos y los milímetros regados para cada híbrido.

Híbrido 19				mas riego en estado de crecimiento			
Unidad	Mínimo	Medio	Máximo	Unidad	Mínimo	Medio	Máximo
2	5	10	20	2	203	403	603
5	7	11	18	5	130	352	509
31	8	15	21	31	265	527	711

Híbrido 31				mas riego en estado de crecimiento			
Unidad	Mínimo	Medio	Máximo	Unidad	Mínimo	Medio	Máximo
2	5	10	20	2	204	404	603
5	7	11	18	5	120	349	503
31	8	15	21	31	265	503	713

Figura 3. Cantidad de riegos y milímetros regados para cada unidad de suelos para 2 híbridos de diferente potencial de rendimiento.

Consideraciones finales:

- Es importante marcar que los resultados de las simulaciones **NO** remplazan el análisis de la realidad, **son hipótesis**. Si ayudan al análisis, lo complementan y lo potencian.
- Los modelos de simulación de cultivos (DSSAT) son una herramienta muy poderosa a la hora de determinar variaciones temporales y espaciales.
- Permiten realizar cambios en el manejo y/o ambiente del cultivo, y ver los efectos en el rendimiento de manera precisa.

Bibliografía:

A. Irmak et al., 2000. Estimating spatially variable soil properties for application of crop models in precision farming. Vol. 44(5): 1343–1353 E 2001 American Society of Agricultural Engineers ISSN 0001–2351 1343 University of Florida & Iowa State University.

ICASA DSSAT 2006 TRAINING WORKSHOP.

Baethgen, W.; Giménez, A.; Castaño, J. P.; Olivera, L.; Mayeregger, E.; Pekholtz, F.; Rebella, C.; Hartmann, T.; Di Bella, C.; y Straschnoy, J. Sección 1: Desarrollo de metodologías y herramientas para el sistema de información y monitoreo. Simerpa: Sistema de Información Geográfica para la evaluación de riesgos climáticos en la producción agropecuaria de Uruguay y Paraguay. Serie Técnica del INIA N° 162,

Variabilidad Espacial y Delineación de Zonas de Manejo.

José A. Terra¹, Jorge Sawchik², Adrián Ruiz³, Daniel Melo⁴

Introducción

La existencia de variabilidad espacio-temporal de factores bióticos, abióticos y prácticas de manejo así como sus efectos combinados sobre el rendimiento y calidad de los cultivos en las chacras es conocida desde los inicios de la investigación agrícola (Plant, 2001; Mulla y McBratney, 2002). Hasta la década del 90, la agricultura tradicional debía utilizar manejos uniformes que ignoraban o no consideraban esta variabilidad, generando ineficiencias en el uso de recursos que podían impactar negativamente en el ambiente y la productividad física y económica de los sistemas productivos (Hatfield, 2000; Stafford, 2000). Sin embargo, con la liberación para el uso civil de los GPS, sumado a la aparición de sensores y cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento, la variabilidad de suelos y cultivos pudo empezar a ser cuantificada de forma práctica y económica para considerar sus posibilidades de manejo. Actualmente existen y se desarrollan tecnologías para detectar, cuantificar, georeferenciar, analizar, relacionar y manejar esa variabilidad.

De esta forma, surge el concepto agronómico de **Agricultura de Precisión (AP)** basado en el manejo del suelo y de los cultivos a una escala menor que el de la chacra. La idea central de la AP es entonces delinear zonas dentro de una chacra de acuerdo a su variabilidad para el manejo sitio-específico de las mismas conforme sus características intrínsecas (Plant, 2001).

Existen tres criterios básicos que deben cumplirse para justificar el manejo sitio específico: a) La existencia de variabilidad espacial en el rendimiento y en factores que lo pueden afectar; b) La caracterización de la variabilidad y cuantificación de las relaciones causa-efecto; c) el conocimiento científico-agronómico que permita utilizar la información recolectada para manejar o alterar la variabilidad buscando un beneficio productivo, económico o ambiental.

La variabilidad espacial de suelos y cultivos en chacras puede ser cuantificada o estimada a través de métodos discretos (muestreo grillas), continuos (monitor rendimiento, sensores contacto), y remotos (imágenes) (Fraisse et al., 2001; Plant, 2001).

El diseño de un esquema de muestreo en chacras para conocer su variabilidad requiere la respuesta de dos preguntas básicas: ¿cuál es el objetivo del muestreo? y ¿qué se conoce? o ¿qué información previa existe del área? (Pocknee et al., 1996; Mulla y McBratney, 2002; Stein y Ettema, 2003). El muestreo en grillas asume el desconocimiento previo de la variabilidad de la chacra y el muestreo dirigido consiste en esquemas de muestreo basados en información generada por métodos continuos y remotos (mapas suelo, mapas rendimiento, imágenes, topografía, etc). La estimación de la variabilidad de una propiedad del suelo en base a un muestreo georeferenciado implica el uso de la geoestadística que se trata de una rama de la estadística aplicada que cuantifica la correlación y estructura espacial de una variable (modelación) y luego estima sus valores en los sitios no muestreados (interpolación). Debido a que los muestreos basados en grillas sistemáticas insumen altos costos, tiempo y trabajo, el muestreo dirigido basado en potenciales zonas de manejo aparece como una mejor alternativa (Fraisse et al., 2001).

El concepto de Zonas de Manejo (ZM) ha evolucionado a través del tiempo y puede tener varios significados y aplicaciones (Kitchen et al, 2005). En general se lo define como la delineación de sub-áreas dentro de la chacra que expresan una combinación relativamente homogénea de factores del rendimiento para las que sería apropiado un manejo similar del suelo y los cultivos. Un concepto más moderno describe a las ZM como ambientes de una chacra que tienen un alogaritmo o curva de respuesta única. Por ejemplo, la respuesta de un cultivo al agregado de un nutriente puede ser diferente en una ZM que tiene una cierta combinación de atributos edáficos y topográficos que en otra ZM que es distinta. En este sentido, los ensayos en fajas a escala de chacra permiten la

¹ Ing. Agr. (Ph.D.) Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

² Ing. Agr. (Ph.D.) Director de Programa Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA.

³ Ing. Agr., La Hectárea Profesionales Asociados

⁴ Ing. Agr., La Hectárea Profesionales Asociados

evaluación del efecto de prácticas de manejo a través de todo el terreno; por tanto una mejor aproximación a la adaptabilidad de esas prácticas en condiciones de producción (Mallarino et al., 2000). Las ZM también han sido utilizadas para delinear áreas de una chacra para estudiar el efecto de factores edáficos y bióticos en el rendimiento, como por ejemplo el ajuste de modelos de simulación de crecimiento de cultivos. Por lo tanto, el concepto de ZM es algo ambiguo si no se especifica el objetivo de la subdivisión de la chacra (Kitchen et al., 2005).

Algunas interrogantes que normalmente aparecen cuando se quieren delinear MZ son: a) que fuentes de información deben usarse; b) como debo utilizar y procesar esa información para crear las zonas; c) cual es el número óptimo de zonas para la chacra; y d) que tan estables son para diferentes condiciones ambientales y secuencia de cultivos.

La metodología para la delimitación de ZM es diversa tanto en las fuentes de información utilizada como en las técnicas utilizadas para crear los límites de las zonas (Kitchen et al., 2005). Entre las fuentes de información más comunes destacan: a) El uso de información de relevamientos de suelos realizados por especialistas. b) Mapas de distribución espacial de propiedades del suelo generado en base a muestreos en grillas intensos y uso de geoestadística. c) Imágenes remotas de resolución diversa tomadas por plataformas montadas en satélites o aviones. d) Mapas de rendimiento generados en la chacra durante varias zafas. E) Uso de información edáfica y topográfica temporalmente estable tales como los atributos de terreno (elevación, pendiente, etc.), textura, conductividad eléctrica.

La interrogante de cuántas zonas necesita una chacra es una de las más clásicas entre productores y técnicos. El número de zonas de manejo dentro de una chacra va a estar dado por la variabilidad natural de la chacra, el tamaño de la chacra y algunos factores prácticos de manejo. Así es que una chacra puede contener varias zonas: solamente una en caso de que toda la chacra sea considerada una unidad de manejo, o en el caso que varias chacras sean agrupadas como una unidad de manejo. Tampoco existen reglas fijas ni limitantes extremas para la elección del tamaño y la forma de las zonas de manejo; principalmente si las aplicaciones o implementos son guiados por GPS. Tal vez el tamaño mínimo o la forma de una zona esté limitado por la habilidad del productor de poder manejarla individualmente, lo que está muy relacionado a las dimensiones y capacidades del parque de maquinaria, a las características físicas de la chacra y a la dirección o patrón de trabajo de la maquinaria.

Una aplicación específica de las ZM es la identificación de ambientes de similar potencial productivo "zonas de productividad o rendimiento" en el sentido de que algunas decisiones de manejo clave dependen de las expectativas de rendimiento, tales como la aplicación de N, semilla o la reposición de nutrientes basado en remoción. En sistemas de agricultura de secano, las ZM están normalmente relacionadas a atributos de suelo y de terreno estables relacionados con la acumulación y dinámica de agua en la chacra (Terra et al., 2006). Sin embargo, la variabilidad climática que ocurre zafa a zafa en nuestros sistemas y la diversidad de cultivos pueden ser factores de incertidumbre sobre la estabilidad temporal de las ZM. Las zonas de productividad han sido comúnmente derivadas de análisis de mapas de rendimiento, aunque se necesitan varias zafas climáticamente contrastantes debido al riesgo que efectos de años opuestos se neutralicen. Los atributos edáficos y topográficos también han sido utilizados para la delimitación de zonas de productividad con la ventaja de que al ser temporalmente estables solo necesitan ser relevados en una oportunidad. El uso de estos atributos fisiográficos para la delimitación de zonas de manejo asume un conocimiento agronómico razonable de sus efectos sobre la productividad de los cultivos.

En este sentido, la conductividad eléctrica aparente del suelo (CE) ha sido asociada con algunas propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos que regulan su dinámica. En suelos sin problemas de salinidad, la CE se correlaciona principalmente con el contenido de arcilla, el contenido de agua del suelo y la capacidad de intercambio catiónico (Mueller et al., 2003; Sudduth et al., 2001). Por tanto, la determinación de CE con sensores conectados a GPS está siendo utilizada para inferir la distribución espacial de algunas propiedades de los suelos y para delinear ZM (Kitchen et al., 2003; Terra et al., 2006). La efectividad del mapeo de CE como estimador de alguna propiedad del suelo decrece cuando más de una variable correlacionada con CE cambia a través de la fisiografía. Sin embargo, la variabilidad espacial de CE es indicativa al menos de diferentes condiciones de suelo lo cual puede ser utilizado a la hora de definir zonas de muestreos. La variabilidad de CE puede estar también relacionada a atributos fisiográficos que influyen

significativamente las propiedades de los suelos y la productividad de los cultivos. El sensor de CE desarrollado por Veris Tech. mide la conductividad eléctrica aparente del perfil del suelo de 0-30cm y 0-90cm y opera mediante la descarga de una corriente eléctrica por discos en contacto con el suelo montados sobre una barra mientras es arrastrado por un vehículo a través de la chacra.

De esta forma, desde fines del año 2006 INIA se encuentra trabajando en forma asociada con la consultora "La Hectárea" sobre chacras ubicadas en la zona de Dolores (Soriano) de productores pioneros en el uso de las herramientas de agricultura de precisión. La hipótesis de este estudio fue que un alto porcentaje de la variación espacial en el rendimiento de cultivos de secano en Uruguay es explicado por la interacción de factores edáficos y topográficos y sus efectos sobre la dinámica de agua a nivel de campo. Esto permitiría, basado en un relevamiento de estos atributos, delinear zonas de manejo u ambientes contrastantes dentro de chacras y ajustar el manejo agronómico para cada una de ellas.

Objetivos

A. Determinar los principales atributos edáficos y topográficos asociados a los patrones de variación de productividad de cultivos agrícolas de secano del Uruguay.

B. Desarrollar metodologías para la delimitación de zonas de productividad contrastante dentro de chacras para guiar su manejo sitio-específico.

Materiales y métodos

Descripción de los sitios

En el año 2006 se seleccionaron un grupo de chacras sembradas con cultivos de secano distribuidas entre las empresas agrícolas participantes del proyecto. Las chacras tienen entre 25 y 100 ha (Cuadro 1) y están ubicadas en los alrededores de Dolores, Soriano en sitios contrastantes que presentan significativa variabilidad espacial en sus atributos edáficos y/o topográficos que a priori se consideran tengan los mayores impactos sobre la variación del rendimiento y la calidad de los cultivos. En cada chacra seleccionada se realizó un relevamiento detallado y georeferenciado del suelo, la topografía y los cultivos instalados mediante el uso de las herramientas de agricultura de precisión (GPS, Sensores Remotos, Sensor de Conductividad Eléctrica, Monitores de Rendimiento, fotografías aéreas, etc.), complementados por muestreos de suelos dirigidos basados en la información anterior.

Establecimiento	Potrero	Superficie (ha)	Suelos CONEAT
Media Agua	Algarrobo grande	71	11.7, 11.4, 10.15
EL Chajá	9	61	11.7, 03.52
El Chajá / El Águila	27	168 (3)	11.6, 11.7, 10.15, 03.52
Prieto	5 y 6	65	11.7, 03.40

Cuadro 1. Superficie y suelos CONEAT de las chacras seleccionadas en los diferentes establecimientos.

Cultivos y prácticas de Manejo:

Los estudios se realizaron sobre los cultivos correspondientes a la rotación utilizada en las chacras seleccionadas. Las prácticas de manejo de suelos y cultivos tales como fecha de siembra, densidad, aplicación de agroquímicos, cultivares utilizados, fertilización fueron las que cada productor aplicó en su sistema productivo.

Relevamiento Detallado de Suelos

Para cada chacra se realizó un relevamiento detallado de suelos por un especialista en descripción y clasificación de suelos. En cada una de ellas, se establecieron transectas interceptando la máxima variabilidad de suelos esperada (en base a fotografías aéreas y mapas topográficos) para delinear la distribución de las distintas unidades de mapeo presentes. Para los suelos dominantes se

distribución de las distintas unidades de mapeo presentes. Para los suelos dominantes se establecieron sitios representativos de muestreo a los efectos de su descripción y el muestreo de los distintos horizontes descriptos de acuerdo al protocolo de relevamiento de suelos (Dir. Suelos-MGAP). En cada sitio representativo de muestreo y para cada horizonte se tomó una muestra de suelo para la posterior determinación de C orgánico y textura. Estos parámetros se utilizarán para el cálculo de agua potencialmente disponible mediante el uso de ecuaciones empíricas desarrolladas en el país. Por otro lado para estos mismos sitios se determinó en forma cualitativa el drenaje en profundidad esperado, utilizando una metodología descrita por Califra y Molfino (2003).

Mapas de Conductividad Eléctrica

Cada una de las chacras fue mapeada en el invierno de 2007 con un sensor de conductividad eléctrica (Veris Tech. 3100) tirado por un vehículo equipado con GPS. El vehículo realizó pasadas a intervalos regulares de 20-m en la dirección de la máxima variabilidad de la chacra. Las medidas de conductividad eléctrica fueron determinadas a dos profundidades en el perfil: 0-30 cm y 0-90 cm. Las determinaciones se intentaron realizar a contenidos de agua en el suelo próximos a capacidad de campo para que los mapas obtenidos reflejen los cambios texturales esperables en la chacra. Los mapas de conductividad eléctrica obtenidos fueron utilizados conjuntamente con la información topográfica para guiar la ubicación de los puntos de muestreo de suelo (muestreo dirigido) basados en una grilla sistemática desalineada dentro de cada zona determinada.

Mapas Topográficos

La elevación de cada chacra fue determinada simultáneamente al sensoramiento de CE mediante la utilización de un GPS con corrección diferencial (OMNISTAR) en el vehículo. Los mapas topográficos fueron generados mediante modelos digitales de elevación (DEM) disponibles en Sistemas de Información Geográfica (GIS) y posteriormente fueron derivados atributos de terreno primarios (pendiente, concavidad/convexidad, orientación pendiente, área cuenca, etc.) y secundarios (Índice Compuesto Topográfico (CTI), Índice Poder Escorrentía etc.) descriptos por Moore (1993). El objetivo de los mapas topográficos es la obtención de un nivel de detalle en las chacras de 1-m de intervalo vertical.

Muestreo Dirigido de Suelos

En cada chacra se realizaron muestreos dirigidos de suelos en puntos georeferenciados. Las chacras tuvieron una intensidad de muestreo de alrededor de 1 punto/ha, flexible de acuerdo al número de zonas delineadas utilizando la información topográfica y de conductividad eléctrica. En cada punto de muestreo se tomó una muestra compuesta de 8 submuestras en un radio de 5 m desde el punto y a una profundidad de 0-15-cm. En una primera instancia, para cada punto se analizó pH (agua), C orgánico, N total, N-NO₃, P (Bray), K intercambiable y contenido de arcilla, arena y limo.

Imágenes Satelitales e Imágenes Aéreas

Para cada chacra se compiló una serie de imágenes históricas del satélite LANDSAT TM5 como herramienta adicional para la identificación de ambientes productivos contrastantes dentro de chacras en base a índices de vegetación. Estas imágenes tienen una resolución espacial, espectral y temporal de 30*30m, 7 bandas y 16 días, respectivamente y fueron utilizadas en 2 tipos de aproximaciones presentadas en otra charla i) por un lado se analizó la información de las imágenes históricas para determinar algún patrón de variación sistemático a través de los años o en años contrastantes; ii) por otro se comparó los patrones de variación de las imágenes con el respectivo mapa de rendimiento obtenido en la zafra.

Mapas de Rendimiento

Los cultivos presentes en las chacras fueron cosechados con máquinas equipadas con Monitores de Rendimiento y GPS lo que permitió conocer la productividad en cualquier punto de la chacra a través de las sucesivas zafras. Los mapas de rendimiento obtenidos fueron filtrados y procesados antes de su utilización para remover los errores y problemas más comunes de acuerdo a lo propuesto por Simbahan et al. (2004).

Información Adicional

Para todas las chacras se conto con información complementaria incluyendo cartografía CONEAT, mapas altimetricos del SGM, planos georeferenciados de los establecimientos, camineria e imágenes del Google Herat.

Análisis Estadístico y Espacial

Las capas de información fueron cargadas a un SIG en un sistema de coordenadas común para que cada punto de una chacra tuviese su combinación única de factores. Para todas las variables se sacaron estadísticas descriptivas de tendencia central, distribución y fueron testeadas por la presencia de correlación espacial. La información de CE, atributos de terreno y rendimiento recolectados intensivamente y que presentaron una fuerte correlación espacial fueron interpolados para toda el area de la chacra en base a una cuadrícula de 10x10m. Esto no fue posible con los datos de suelo colectados en el muestreo debido a la pobre correlación espacial encontrada. Por tanto, para cada sitio de muestreo de suelos, se determinó el valor promedio de CE, atributos de terreno y rendimiento en un radio de 10-m.

Con esta información se utilizó en primer lugar un análisis de factores principales para reducir la complejidad de la información y determinar que variables explicaban la mayor parte de la variabilidad de las chacras. Posteriormente, se realizo un análisis de correlación para determinar las relaciones simples entre variables dentro de cada chacra y un análisis de regresión múltiple (Stepwise) para determinar que proporción de la variación de rendimiento podía explicarse por las variables medidas y cuales eran las más importantes.

Posteriormente se crearon zonas de manejo utilizando 2 fuentes de información. Por un lado la CE y los atributos de terreno y por el otro los mapas de rendimiento acumulados para la chacra. Las zonas de manejo fueron creadas utilizando el software "Analizador de Zonas de Manejo" (MZA) desarrollado por Fridgen et al. (2004) que está basado en el procedimiento de análisis de cluster no supervisado de medias k difusas. El análisis de clusters es una de las herramientas estadísticas más extendidas para la creación de zonas de manejo, debido a la objetividad y neutralidad del procedimiento.

Por ultimo se chequeo la similitud de las zonas de manejo creadas por ambas metodologías y la efectividad de las zonas de manejo en captar la variabilidad observada en los análisis de suelos o los mapas de rendimiento cuantificando la proporción de la varianza total de estos explicada por la subdivisión de la misma en las zonas de manejo. El número óptimo de zonas de manejo es aquel que provoca la máxima reducción de varianza.

A los efectos prácticos en este artículo solo se presentara la información correspondiente a uno de las chacras (Establecimiento Media Agua) con el objetivo de mostrar alguno de los pasos lógicos a seguir para el procesamiento e interpretación de la información a nivel experimental y productivo.

Resultados

La chacra elegida para mostrar alguno de las posibles metodologías para la delineación de zonas de manejo corresponde al sitio algarrobo grande del establecimiento Media Agua. La chacra tiene una superficie de 78 ha y la razón por la cual la seleccionamos para el ejercicio radica en el hecho de que sobre la misma ocurren 3 unidades CONEAT, esto es la 10.15, 11.4 y 11.7 correspondientes a las unidades Fray Bentos, Young y Ecilda Paullier de la carta 1:1.000000, con características diferentes.

Estadística Descriptiva.

En el Cuadro 2 se presentan estadísticas de tendencia central y distribución de las variables medidas en la chacra. Entre las propiedades químicas del suelo determinadas en 53 sitios distribuidos en base a la información de topografía y conductividad eléctrica (Figura 1), destacan por su coeficiente de variación los contenidos de P y K, mientras el pH y el contenido de Corg fueron los menos variables, patrón que se repite en todas las chacras evaluadas. La chacra destaca también por su variabilidad topográfica, donde hay 30-m de diferencia entre el punto mas alto y mas bajo de la misma. Durante los últimos años se obtuvieron tres mapas de rendimiento sobre la chacra

(Figura 2), 2 correspondientes al cultivo de trigo en 2005 y 2007 y uno de maíz en la zafra 2007-08. Entre ambos cultivos de trigo existió un cultivo de soja que no pudo ser monitoreado. Los rendimientos de trigo fueron muy buenos en ambas zafras a pesar de las diferencias climáticas entre ambas y tienen un coeficiente de variación en el entorno de 15 a 18%. Por otro lado, los rendimientos de maíz fueron muy deprimidos por una siembra de segunda y un verano muy seco en la zona, con coeficientes de variación del orden de 37%.

	n	Media	Desvio standard	Mínimo	Máximo	Curtosis
CE0-30 (mS/m)	7800	50.8	15.1	10.7	155.0	4.7
CE0-90 (mS/m)	7800	65.6	20.1	9.1	157.1	0.69
CE30-90 (mS/m)	7800	73.8	27.6	5.0	176.4	0.14
Eleva (m)	7800	84.2	7.6	66.7	97.8	-0.96
Pendiente (%)	7800	2.5	1.3	0.01	9.8	1.9
CTI	7800	8.3	0.8	0.8	14.4	4.0
pH	54	6.2	0.5	5.6	7.7	2.6
C.org (%)	54	2.8	0.3	1.6	3.7	4.5
N-NO3 (ppm)	54	10.0	1.7	7.4	17.2	5.2
P (Brayl) (ppm)	54	11.8	3.6	5.3	22.1	0.01
K int meq/100g	54	0.92	0.33	0.44	1.86	1.0
Arcilla (%)	54	35.3	4.5	19.9	28.1	-0.83
Arena (%)	54	34.2	5.2	27.2	47.6	-0.1
Trigo05 kg/ha	11315	5.60	0.84	2.57	8.50	1.08
Trigo07 kg/ha	6170	4.89	0.90	1.55	8.49	2.18
Maiz07 kg/ha	13972	3.05	1.12	0.63	6.99	-0.55

Cuadro 2. Estadística descriptiva de las propiedades del suelo, atributos de terreno y rendimientos obtenidos en el sitio del establecimiento Media Agua.

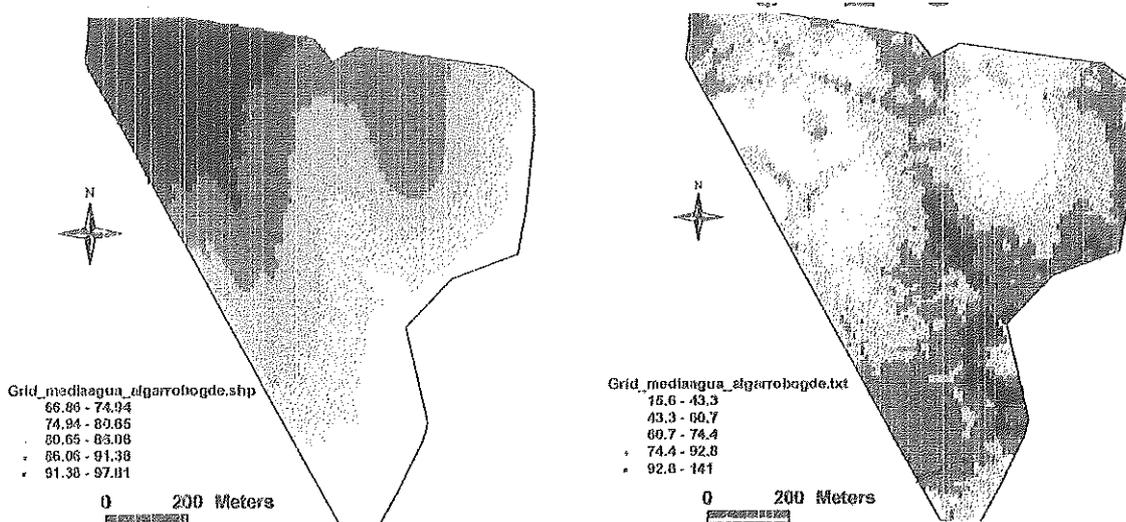


Figura 1. Mapa topográfico y de conductividad eléctrica de la chacra.

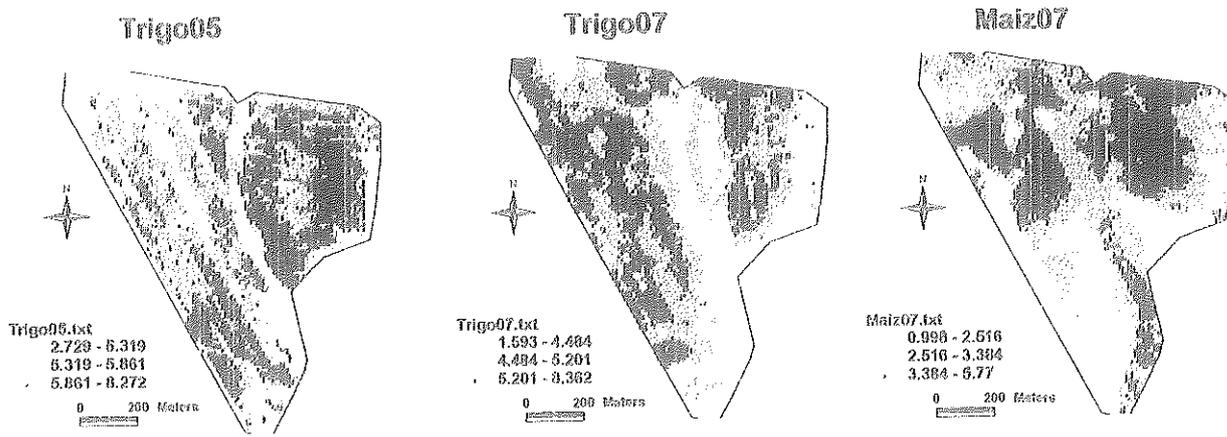


Figura 2. Mapas de rendimiento de trigo 2005, Trigo 2007 y Maiz 2008.

Análisis de Factores Principales

El Análisis de Factores Principales (AFP) es una técnica de estadística multivariada utilizada frecuentemente en estudios de ecología y de agricultura de precisión (Terra et al., 2006). La idea principal de esta técnica es reducir la complejidad de la información generando nuevas variables (Factores) de las variables originales que no están correlacionadas y que concentren en pocos factores la mayor parte de la variabilidad de una base de datos multivariada de un sitio. Aquellas variables que tengan la mayor contribución relativa a los nuevos factores serán las más importantes para explicar la variabilidad de una chacra. Para el AFP se tomaron como inputs la información promedio de conductividad eléctrica, atributos topográficos y análisis de suelo de los 53 puntos de la grilla de muestreo (12 variables). En el Cuadro 3 se puede apreciar que se generaron 4 variables latentes (Factores) de las 12 variables originales correspondientes a aquellos que tenían "eigenvalues" mayores a 1 con lo que se logró explicar más del 80% de la variabilidad de los datos originales. Por otro lado, queda claro la importancia de la CE0-90 y la reacción del suelo (pH) en su contribución con el Factor1 que por sí solo explica casi el 30% de la variación del sitio. Por otro lado, la CE0-30 es la más relacionada con el Factor2, por lo que se puede aseverar que la conductividad eléctrica por sí misma contribuye a explicar el 50% de la variabilidad de los datos relevados en esta chacra.

	Factor1	Factor2	Factor3	Factor4
CE ₀₋₃₀ (mS/m)	0.07	0.92	-0.02	0.24
CE ₀₋₉₀ (mS/m)	-0.86	0.44	-0.04	-0.07
CE _{0-90/0-30}	-0.85	-0.36	-0.02	-0.28
Eleva m	0.25	-0.74	0.44	0.10
Pendiente %	-0.03	0.00	-0.88	0.17
CTI	-0.02	-0.27	0.87	-0.20
pH	0.88	-0.18	-0.10	0.03
Corg (%)	0.09	-0.07	-0.33	0.77
K int (meq/100g)	0.51	0.06	0.25	0.54
P Brayl (ppm)	0.56	0.24	-0.03	0.19
Arena (%)	0.75	-0.25	0.25	-0.44
Arcilla (%)	0.06	0.45	-0.28	0.78
Eigenvalue	3.45	2.16	2.07	1.95
Varianza Explicada (%)	29	18	17	16

Cuadro 3. Contribución relativa de los atributos edáficos y topográficos medidos en el sitio de la Media Agua a los factores principales.

Relación entre variables

Para estudiar la relación entre todas variables se utilizó un análisis de correlación con la información promedio de los 53 puntos de muestreo seleccionados en la chacra (Cuadro 4). Entre los atributos edáficos resalta la alta correlación negativa entre la CE0-90 y el pH del suelo en superficie. El rendimiento de trigo del 2005 estuvo correlacionado con atributos edáficos (arcilla) y topográficos (pendiente) relacionados a la dinámica de agua de la chacra (drenaje) evidenciando algunos problemas de falta de agua. Para el Trigo de 2007 se observaron algunas correlaciones pobres con la CE0-90 y la elevación. Mientras que para el rendimiento de maíz de 2007-08 se observó una alta correlación con CE0-90 y otras de menor magnitud con elevación y pH del suelo lo que coincide con las particularidades de un verano extremadamente seco.

	CE ₀₋₃₀	CE ₀₋₉₀	Eleva	Pend.	CTI	pH	C	P _(Brayl)	K _{int}	Arc.	Tr ₀₅	Tr ₀₇	Mz ₀₇
CE0-30 (mS/m)	1	0.34	-0.58	ns	-0.29	ns	ns	ns	ns	0.60	ns	ns	-0.33
CE0-90 (mS/m)		1	-0.53	ns	ns	-0.80	ns	ns	-0.45	-0.39	ns	-0.31	-0.80
Eleva (m)			1	-0.31	0.52	ns	ns	ns	ns	-0.35	ns	0.31	0.48
Pend. (%)				1	-0.73	ns	0.31	ns	ns	0.35	0.45	ns	ns
CTI					1	ns	-0.36	ns	ns	-0.52	-0.46	ns	ns
pH						1	ns	ns	0.39	0.30	ns	ns	0.58
C.org (%)							1	ns	ns	0.65	0.35	ns	
P(Brayl, ppm)								1	0.34	0.28	ns	ns	0.31
Kint meq/100g									1	0.32	ns	0.33	0.33
Arcilla (%)										1	0.52	ns	ns
Trigo05 kg/ha											1	ns	ns
Trigo07 kg/ha												1	ns
Maiz07 kg/ha													1

Cuadro 4. Coeficientes de correlación Pearson entre atributos edáficos, topográficos y rendimiento promedio en 53 puntos evaluados en la chacra del establecimiento Media Agua.

Los modelos de regresión relacionando rendimiento en cada uno de los tres cultivos evaluados explicaron entre el 23 y el 65% de la variación dependiendo del año y el cultivo (Cuadro 5, 6 y 7). El mayor coeficiente de determinación fue encontrado para el maíz del 2008 en el año seco donde la CE0-90 por sí sola explicó el 65% de la variación de rendimiento del cultivo (Cuadro 7), lo que también podía observarse en los respectivos mapas de CE y productividad generados. Por otro lado, el contenido de arcilla (0-15cm), la relación de largo/% de pendiente y la conductividad eléctrica en superficie lograron explicar casi el 50% de la variación del rendimiento de trigo en el 2005. Por último se aprecia que la variación de rendimiento de trigo en el 2007 estuvo poco relacionada a las variables mediadas que logran explicar poco más del 20% de aquella (Cuadro 6).

Variable	R ² parcial	R ² Modelo	C(p)	P>F
Arcilla	0.27	0.27	18.6	<0.001
SLF	0.11	0.39	9.9	0.003
CE0-30	0.06	0.45	6.2	0.024

Cuadro 5. Coeficientes de determinación y significancia del modelo de regresión múltiple ajustado relacionando el rendimiento de Trigo en la zafra 2005 con las atributos de suelo y terreno seleccionados.

Variable	R ² parcial	R ² Modelo	C(p)	P>F
SLF	0.11	0.11	1.9	<0.01
Corg	0.07	0.18	-0.2	0.04
Kint	0.05	0.23	-0.8	0.09

Cuadro 6. Coeficientes de determinación y significancia del modelo de regresión múltiple ajustado relacionando el rendimiento de Trigo en la zafra 2007 con las atributos de suelo y terreno seleccionados.

Variable	R ² parcial	R ² Modelo	C(p)	P>F
CE0-90	0.64	0.65	4.8	<0.001

Cuadro 7. Coeficientes de determinación y significancia del modelo de regresión múltiple ajustado relacionando el rendimiento de Maiz en la zafra 2007-08 con las atributos de suelo y terreno seleccionados.

Delineación de Zonas de Manejo. Análisis de Clusters

Se utilizaron dos alternativas para la creación de las zonas de manejo, la primera utilizó solamente la información edáfica y topográfica, mientras que la segunda utilizó solo los mapas de rendimiento generados. Con ambas bases de datos se generaron entre 2-6 zonas de manejo y luego se seleccionó para cada caso el número de óptimo de ellas. Los índices de performance disponibles en el software Management Zone Analyst revelaron que para esta chacra el número óptimo de zonas era de 4 utilizando la información de atributos de terreno y de 3 si se utilizaba la información de rendimiento de las 3 zafras (Figura 3). Del análisis visual de las zonas generadas por ambas vías se puede apreciar que existe bastante coincidencia; el próximo paso será comparar la coincidencia de las mismas utilizando un procedimiento tal como el descrito por Kitchen et al. (2005).

En general la subdivisión de la chacra en zonas de manejo redujo la varianza de las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos, sugiriendo que las mismas de alguna forma fueron efectivas en captar la variabilidad de esos factores (Cuadro 8 y 9). Se encontraron diferencias significativas en pH, y contenidos de Corg, P, K y arcilla entre las zonas generadas en base a topografía y CE. De la misma forma, en todos los cultivos se observaron diferencias de rendimiento entre las zonas de manejo, donde la zona3 se destacó en años secos en ambos cultivos, sin embargo fue la menos productiva en un año lluvioso como el 2005 (Cuadro8).

Por otro lado, las zonas de manejo creadas en base a los mapas de rendimiento fueron iguales de efectivas en captar la variabilidad de la mayoría de las propiedades de los suelos analizadas (Cuadro 9).

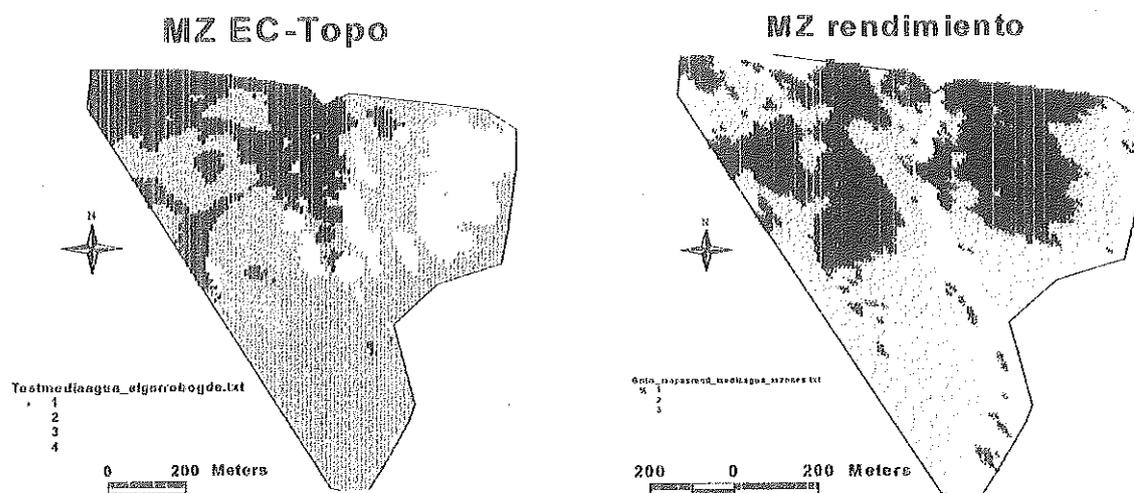


Figura 3. Zonas de manejo creadas en base a la información edáfica y topográfica o en base a los mapas de rendimiento.

	pH agua	Corg (%)	P Brayl ppm	K int meq/100g	Arcilla %	Trigo05 t/ha	Trigo07 t/ha	Maiz07 t/ha
Zona1	5.8 c	2.66b	9.7c	0.74b	31.7	5.45b	4.94ab	2.66b
Zona2	6.0 bc	2.89a	12.1b	0.82b	36.9a	5.71b	4.91b	2.10c
Zona3	6.8 a	2.84ab	14.7a	1.27a	35.9a	5.46b	5.37a	3.97a
Zona4	6.1 b	2.94a	11.1bc	0.88b	37.2a	6.16a	4.84b	3.08b

Valores seguidos por una misma letra en la misma columna no difieren significativamente con $p=0.05$

Cuadro 8. Comparación de rendimiento de 3 zafras y propiedades del suelo entre las cuatro zonas de manejo determinadas en base a un análisis de clusters de la información de conductividad eléctrica y topográfica

	CE ₀₋₃₀ (mS/m)	CE ₀₋₉₀ (mS/m)	Eleva (m)	Pend. (%)	pH	Corg (%)	P Brayl ppm	K _{int} meq/100g	Arcilla %
Zona1	46a	46b	88a	2.6a	6.6a	2.87a	13.6a	1.05a	35.4a
Zona2	49a	72a	84b	2.9a	6.0b	2.85a	11.0b	0.88a	35.9a
Zona3	52a	78a	78c	2.0a	5.9b	2.37b	10.2b	0.57b	29.5b

Valores seguidos por una misma letra en la misma columna no difieren significativamente con $p=0.05$

Cuadro 9. Comparación de atributos de terreno y propiedades del suelo entre las cuatro zonas de manejo determinadas en base a un análisis de clusters de los mapas de rendimiento.

Consideraciones Finales

La identificación de factores que controlan los patrones de variación sistemática en cultivos permitiría ajustar métodos prácticos y económicos para delinear zonas de manejo. En un sistema de AP exitoso los factores limitantes para una óptima productividad y protección ambiental deben ser identificados, georeferenciados, caracterizados y manejados en las zonas y momentos apropiados. La idea medular de la agricultura sitio-específica es, entonces, identificar estos procesos potencialmente limitantes y establecer para cada uno de ellos los indicadores más críticos para su caracterización y posterior manejo.

Las ZM no implican necesariamente recomendaciones de manejo diferenciales entre ellas o que las mismas sirvan para todas las aplicaciones de agricultura de precisión. Es también reconocido que las zonas de manejo pueden ser bastantes diferentes dependiendo de las condiciones ambientales, el cultivo y el manejo de suelos utilizado. Por tanto, deberían ser analizadas, evaluadas y ajustadas en el tiempo.

Referencias

- Fraisse, C.W., Sudduth, K.A., Kitchen, N.R. & Fridgen, J.J. 1999. Use of unsupervised clustering algorithms for delineating within-field management zones. *ASAE/CSAE-SCGR Annual International Meeting, Toronto, Ontario, Canada.*
- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R. & Sudduth, K.A. 2000. Variability of soil and landscape attributes within sub-field management zones. *Proceedings of the 5th International Conference on Precision Agriculture, Bloomington, Minnesota, USA, 16-19 July, 2000.*

- Fridgen, J.J., Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Drummond, S.T., Wiebold, W.J. & Fraisse, C.W. 2004. Management Zone Analyst (MZA): Software for Subfield Management Zone Delineation. *Agronomy Journal* 96:100-108.
- Kitchen, N.R., Sudduth, K.A., Myers, D.B., Drummond, S.T. & Hong, S.Y. 2005. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 285-308.
- Mallarino, A., M. Bermudez, D.J. Wittry, and P.H. Hinz. 2000. Alternative data managements and interpretations for strip trials harvested with yield monitors. In P.C. Robert et al. (ed.) Precision Agriculture [CD-ROM] Proc. Int. Conf., 5th, Bloomington, MN. 16-19 July 2000. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.
- Moore, I.D., P.E. Gessler, G.A. Nielsen, y G.A. Peterson. 1993. Soil attributes prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:443-452.
- Mueller, T. G., N.J. Hartsock, T.S. Stombaugh, S.A. Shearer, P.L. Cornelius, y R.I. Barnhisel. 2003a. Soil Electrical Conductivity Map Variability in Limestone Soils Overlain by Loess. *Agronomy Journal* 95:496-507.
- Mulla D.J., y A.B. McBratney. 2002. Soil Spatial Variability. p. 343-373. In: A.W. Warrick (Editor) *Soil Physics companion*. CRS Press, Boca Raton, FL.
- Plant, R.E. 2001. Site Specific Management: the application of information technology to crop production. *Computers and Electronic in Agriculture* 30: 9-29.
- Pocknee, S., B.C. Boydell, H.M. Green, D.J. Waters, y C.K. Kvien. 1996. Directed Soil Sampling. In: P.C. Roberts, R.H. Rust, y W.E. Larson (Ed.) *Proceeding of the 3rd International Conference of Precision Agriculture*. Minneapolis, Minnesota. ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- Roel, A., and J.A. Terra. 2006. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. p. 65-80. In: Bongiovanni, R., E.C. Montovani, S. Best, and A. Roel (ed.). *Agricultura de Precisión: Integrandos conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. PROCISUR-IICA.
- Stein, A., y C. Ettema. 2003. An overview of spatial sampling procedures and experimental design of spatial studies for ecosystem comparisons. *Agriculture Ecosystems and Environment* 94:31-47.
- Terra, J.A., Shaw, J.N., Reeves, D.W., Raper, R.L., van Santen, E., Schwab, E.B. & Mask, P.L. 2006. Soil Management and Landscape Variability Affects Field-Scale Cotton Productivity. *Soil Science Society of America Journal* 70: 98-107.
- Simbahan, G.C., Dobermann, A. & Ping, J.L. 2004. Screening Yield Monitor Data Improves Grain Yield Maps. *Agronomy Journal* 96, 1091-1102.



LA ESTANZUELA

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION AGROPECUARIA

U R U G U A Y

INIA LA ESTANZUELA

COLONIA
C.C. 39173
Tel.: (0574) 8000
Fax: (0574) 8012

INIA LAS BRUJAS

LAS PIEDRAS
C.C. 33985
Tel.: (02) 3677641
Fax: (02) 3677609

INIA TACUAREMBO

TACUAREMBO
C.C. 78086
Tel.: (063) 22407
Fax: (063) 23969

INIA TREINTA Y TRES

TREINTA Y TRES
C.C. 42
Tel.: (045) 22305
Fax: (045) 25701

INIA SALTO GRANDE

SALTO
C.C. 68033
Tel.: (073) 35156
Fax: (073) 29624

INIA DIRECCION NACIONAL

MONTEVIDEO
Andes 1365 P. 12
C.C. 11100
Tel.: (02) 9020550
Fax: (02) 9023633