

Sensor portátil GreenSeeker™ para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI):

Una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas

Parte A: Conceptos y estudios de caso

Bram Govaerts

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT)
b.govaerts@cgiar.org

Nele Verhulst

Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT)
Katholieke Universiteit Leuven (K.U.Leuven)
n.verhulst@cgiar.org

Mariela Fuentes Ponce

Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Xochimilco
mfponce@correo.xoc.uam.mx



Índice

Introducción.....	1
A. La reflectancia de las plantas y el índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)	1
B. El NDVI y la teledetección remota: Una breve reseña.....	2
C. Un estudio de caso en los Valles Altos del centro de México	2
Uso del sensor portátil del NDVI para monitorear el crecimiento y desarrollo de los cultivos.....	5
Variabilidad espacial en el crecimiento del cultivo como indicador de sustentabilidad	7
Variabilidad espacial en el crecimiento del cultivo como indicador de procesos edáficos en un marco de sustentabilidad	9
Referencias	13

Agradecimientos

Nele Verhulst es becaria de la Fundación de Investigación–Flanders. Este trabajo fue financiado por el CIMMYT y sus colaboradores estratégicos. La introducción del sensor portátil GreenSeeker™, que mide el índice diferencial de vegetación normalizado (también conocido como NDVI, por sus siglas en inglés), fue posible gracias a Bill Raun, de la Universidad Estatal de Oklahoma, quien aportó también valiosas ideas y conocimientos sobre los aspectos técnicos y científicos de la aplicación de esta herramienta. La preparación e impresión de este documento se realizaron con fondos (linkage funds) de la Agencia Estadounidense para el Desarrollo Internacional (USAID) 2009 y en colaboración con el proyecto “Uso del sensor GreenSeeker para el cultivo de cebada maltera” del CIMMYT e IASA (Impulsora Agrícola).

Cita correcta: Verhulst, N., Govaerts, B., Fuentes Ponce, M. 2010. Sensor portátil GreenSeeker™ para la medición del índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI): Una herramienta para la evaluación integral de las prácticas agronómicas. Parte A: Conceptos y estudios de caso. México, D.F.; CIMMYT.

Introducción

A. La reflectancia de las plantas y el índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)

La reflectancia es la fracción de energía reflejada por un objeto posteriormente a la incidencia de la misma en la superficie. La reflectancia espectral de un cultivo difiere considerablemente entre el rango del infrarrojo cercano ($\lambda = 700\text{-}1300\text{ nm}$) y del rojo visible ($\lambda = 550\text{-}700\text{ nm}$) (Kumar y Silva, 1973; Figura 1). Las plantas suelen tener baja reflectancia en las porciones azul y roja del espectro debido a la absorción de la clorofila en dicho rango y una reflectancia más alta en la región del verde, lo que hace que las plantas sean verdes a nuestros ojos.

La superficie de la planta refleja intensamente la energía en el rango de infrarrojo cercano, la reflectancia es determinada por las propiedades de los tejidos foliares, es decir, por su estructura celular y las interfaces entre la pared celular exterior, el protoplasto y el cloroplasto (Kumar y Silva, 1973). Estas características anatómicas son afectadas por factores medioambientales como la humedad del suelo, la cantidad disponible de nutrientes, la salinidad y la etapa foliar en que se encuentra la planta (Ma et al., 2001). El máximo contraste de reflectancia entre la vegetación y el suelo ocurre en la región del rojo y del infrarrojo cercano. Por tanto, los datos de reflectancia espectral pueden utilizarse para computar una gama de índices de vegetación, los cuales están correlacionados con características agronómicas y biofísicas de la planta, así como asociados con la actividad fotosintética y productividad de la planta (Ma et al., 2001; Adamsen et al., 1999).

El NDVI logra predecir la actividad fotosintética de la planta ya que este índice de vegetación incluye tanto el rango del infrarrojo cercano como la luz roja. La

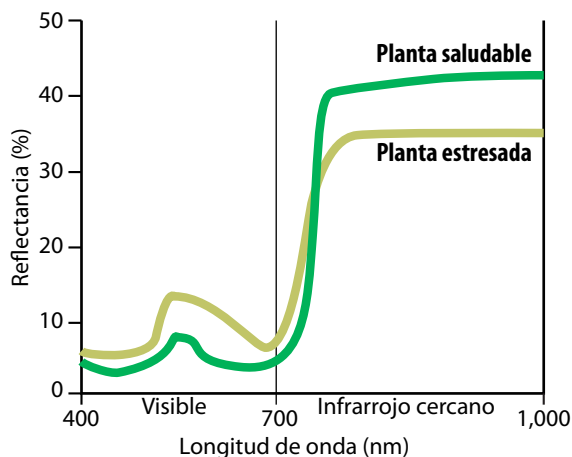


Figura 1. Espectro típico de reflectancia de una planta saludable y otra en condiciones de estrés.

actividad fotosintética de las plantas es determinada por el contenido y la actividad de la clorofila. Se ha comprobado que existe una relación entre el contenido de nitrógeno y la clorofila foliar en el cultivo de maíz (Piekielek y Fox, 1992; Chapman y Barreto, 1997) y el trigo (Evans, 1989).

El NDVI se calcula a partir de las mediciones de la reflectancia en el rango de luz roja e infrarrojo cercano (NIR, por sus siglas en inglés) del espectro:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}}$$

donde R_{NIR} es la reflectancia de la radiación NIR y R_{Red} es la reflectancia de la radiación del rojo visible.

El NDVI ha sido correlacionado con numerosas variables como: la deficiencia de nutrientes en los cultivos, el rendimiento de cereales de grano pequeño y el estrés hídrico prolongado de las plantas. Sin embargo, más que reflejar el efecto de un solo parámetro, el NDVI tiene que ser considerado como una medida del crecimiento integral de la planta, incluyendo factores que intervienen en dicho crecimiento. Es probable que las características físicas detectadas por medio del índice estén relacionadas con propiedades que determinan la densidad del follaje (por ejemplo, la superficie foliar o el porcentaje de cobertura) o con la biomasa total. La variabilidad de un índice no está relacionada con una sola característica de la planta o del suelo, por lo cual es necesario tener una idea del factor limitante de crecimiento del cultivo. Por ejemplo, en un campo donde el factor limitante es el N, seguramente el NDVI tendrá una fuerte correlación con la cantidad de N disponible en el suelo; sin embargo, en una parcela donde el factor limitante es el agua, el NDVI estará correlacionado en igual medida con la humedad del suelo disponible para las plantas.

Existen diferentes índices de vegetación. No obstante, aquellos cuya fuente principal sean la reflectancia del rojo visible e infrarrojo cercano producirán información similar a la del NDVI. Una de las razones de la amplia aceptación del NDVI es que muchos sensores (desde portátiles hasta satelitales) hacen mediciones en el rango espectral de luz roja e infrarrojo cercano. En el futuro, la mayoría, si no es que todos los nuevos satélites comerciales, contarán con bandas del rojo e infrarrojo cercano, con ello se dispondrá de más datos de este tipo.

Lecturas adicionales

Araus, J.L., J. Casadesus, J. Bort. 2001. Recent tools for the screening of physiological traits determining yield. *En*: M.P. Reynolds, J.I. Ortiz-Monasterio, A. McNab (eds.), Application of physiology in wheat breeding. México, D.F.: CIMMYT. Pp. 59-77.

B. El NDVI y la teledetección remota:

Una breve reseña

Las mediciones satelitales del NDVI se ven influenciadas por varios factores que no tienen relación con la vegetación, como las condiciones atmosféricas (por ejemplo, nubes, aerosoles y vapor de agua), la geometría y calibración satelitales (ángulos de visión y solares), así como, por el tipo de suelo y la cobertura de los cultivos (Holben 1986; Soufflet et al. 1991; Justice et al. 1991). El ángulo de incidencia de la radiación solar también tiene un fuerte efecto sobre los índices de vegetación (Pinter 1993). Sin embargo, estos problemas se pueden evitar al medir el NDVI con un sensor óptico portátil GreenSeeker™, el cual fue diseñado en la Universidad Estatal de Oklahoma y comercializado por Ntech Industries. Dicho sensor elimina los efectos de la interferencia atmosférica y la geometría satelital porque la medición se hace muy cerca de la superficie de las plantas. Además, tiene su propia fuente de luz por lo que las mediciones pueden hacerse de día o de noche sin interferencia de los rayos o la posición del sol. El hecho de que el clima y el ángulo del sol no afectan las mediciones del sensor es una gran ventaja en comparación con las mediciones satelitales, esto fue confirmado por un estudio independiente publicado en el sitio web de la Universidad Estatal de Oklahoma (<http://nue.okstate.edu>). Por la alta resolución del sensor portátil se obtienen mediciones precisas a nivel de parcela en contraste con la baja resolución de las mediciones de sensores remotos aéreos o espaciales.

El sensor portátil no maltrata las plantas, además facilita y agiliza la toma de lecturas (aproximadamente 1,000 por segundo), midiendo un área representativa de la parcela. Sin embargo, queda todavía mucho por investigar en cuanto a la comparación entre las mediciones del sensor portátil NDVI con las imágenes satelitales, especialmente para poder extrapolar los resultados y modelos generados.

C. Un estudio de caso en los Valles Altos del centro de México

Descripción y diseño experimental de la zona de estudio

Los estudios de caso que se utilizan como ejemplo en este documento se realizaron en el campo experimental El Batán en un ensayo de largo plazo, en condiciones climáticas semiáridas y subtropicales en los Valles Altos del centro de México (2,240 msnm; 19.318 N, 98.508 O). La temperatura media anual fue de 14 °C (1990-2001) y la precipitación promedio anual de 600 mm, 520 mm aproximadamente entre mayo y octubre. La temporada de lluvias es en verano caracterizada por intensas precipitaciones de corta duración; la evapotranspiración potencial anual es de 1,900 mm. El

ciclo vegetativo promedio es de 152 días. El suelo es un Phaeozem Háplico (Arcílico) (International Union of Soil Sciences (IUSS) Working Group World Reference Base (WRB), 2006). El clima de "El Batán" es similar a algunas regiones de Asia Occidental y África del Norte, así como de América del Sur (Cono Sur y zona andina); la altiplanicie central de Etiopía y los llanos de la costa mediterránea de Turquía (van Ginkel et al., 2002).

El experimento se estableció en 1991, como lo describen Fischer et al. (2002). Cada parcela mide 7.5 m por 22 m. Las prácticas establecidas incluyen la siembra de las variedades recomendadas de maíz, a una densidad de 60,000 plantas por hectárea en surcos separados entre sí 75 cm. En el caso del trigo la densidad es de 100 kg de semilla por hectárea en surcos de 20 cm de distancia entre ellos. Ambos cultivos se fertilizan con urea con una dosis de 120 kg de N por hectárea. Para el control de malezas se emplean herbicidas apropiados acorde a las necesidades del cultivo. No se hace control de plagas ni de enfermedades, salvo el tratamiento aplicado a la semilla por parte de las empresas comercializadoras de este insumo. La fecha de siembra tanto del maíz como del trigo depende del inicio de la temporada de lluvias y generalmente se realiza entre el 1 y el 15 de junio.

El diseño experimental consiste de bloques completamente al azar con dos repeticiones. En total son 32 tratamientos. Los 16 tratamientos básicos preservados desde 1991 hasta ahora consisten en la combinación de las siguientes variables: (1) rotaciones de cultivo (monocultivo vs. rotación de maíz/trigo); (2) tipo de labranza (convencional vs. labranza cero); y (3) manejo de residuos (retención vs. remoción). Se estableció un segundo grupo de parcelas experimentales en 1996 que incluye en sus tratamientos: retención parcial de residuos y siembra en camas permanentes. Los estudios de caso incluidos en este documento, se refieren a los 16 tratamientos básicos establecidos en 1991 que se preservan hasta ahora. En el Cuadro 1 se muestran los 16 tratamientos base.

Cuadro 1. Tratamientos del ensayo de largo plazo establecidos en el CIMMYT, El Batán, México.

Labranza Manejo de residuos	Labranza cero		Labranza convencional	
	Retenidos	Removidos	Retenidos	Removidos
Rotaciones	M M	M M	M M	M M
	M W	M W	M W	M W
	W M	W M	W M	W M
	WW	WW	WW	WW

W=trigo, M=maíz.

Rotación: MM=maíz continuo, WW=trigo continuo; WM o MW=rotación anual de maíz y trigo.

El concepto calidad del suelo

A manera de introducción del estudio de caso, se proporcionan algunos resultados de la calidad del suelo del ensayo de largo plazo. Cuando se evalúa la sustentabilidad de un sistema agronómico, la pregunta más importante que surge es: ¿Qué sistema de producción no degrada los recursos naturales, cuál es el más óptimo para la preservación del suelo, cuál es el menos vulnerable en cuanto a la producción de alimentos, y al mismo tiempo mantiene o mejora la productividad? La calidad del suelo puede plantearse conceptualmente como el parámetro de sustentabilidad del suelo. Karlen et al. (1997) definieron la calidad del suelo para la Sociedad Estadounidense de Ciencias del Suelo como “la aptitud de un tipo específico de suelo de funcionar en un ecosistema y sustentar la productividad de las plantas y los animales, conservando o mejorando la calidad del agua y el aire, y al mismo tiempo sustentar el hábitat y la salud humana”. Gregorich et al. (1994) la definen de manera más práctica y simple como “el grado de aptitud de un suelo para un uso específico”. Esto significa que la calidad del suelo depende del uso al que esté destinado (Singer y Ewing, 2000). En el contexto de la producción agrícola, la calidad del suelo se define en términos de su aptitud para mantener una alta productividad, sin provocar una degradación significativa del suelo y del medio ambiente. La evaluación de la calidad del suelo se realiza en función de sus características físicas, químicas y biológicas.

Una evaluación comparativa de la calidad del suelo consiste en cotejar el desempeño de un sistema ante otros sistemas alternativos. El comparar atributos bióticos y abióticos del suelo de diferentes sistemas, contribuye a decidir acerca de la sustentabilidad relativa de cada sistema, con base en las diferencias de los parámetros medidos (Larson y Pierce, 1994). Las evaluaciones comparativas son útiles para determinar las diferencias en las características del suelo generadas por la aplicación de disímiles prácticas agronómicas en el tiempo (Wienhold et al., 2004). Un método dinámico de evaluación difiere de una evaluación comparativa en que la dinámica en el tiempo del sistema constituye un indicador de su sustentabilidad (Larson y Pierce, 1994). Es necesario realizar una evaluación dinámica para establecer la dirección y magnitud de un cambio provocado por el uso de una práctica agronómica específica (Wienhold et al., 2004), sobre todo cuando se le compara con las prácticas comunes de los agricultores. Esta evaluación requiere de un período de tiempo adecuado.

Para aplicar el concepto de calidad del suelo y pasar de una definición teórica a una medición real, es necesario seleccionar y cuantificar un conjunto mínimo de datos que representan la calidad del suelo (Larson

y Pierce, 1991; Gregorich et al., 1994). Varios autores han propuesto diferentes conjuntos mínimos de datos. Nosotros proponemos que, en lugar de trabajar con listas predeterminadas de indicadores, éstos se seleccionen con base en las condiciones agroecológicas específicas del sitio. La comparación será entre las condiciones consideradas óptimas para el uso específico del suelo con las condiciones reales. Esta comparación revelará los factores limitantes del sistema. Todos los parámetros relacionados con los factores limitantes deberán medirse en una primera evaluación general. Dependiendo de los resultados obtenidos, se depura la lista de parámetros relevantes y se elabora un conjunto mínimo de datos que se utilizará para realizar evaluaciones en el futuro (Govaerts et al., 2006a).

La calidad del suelo en el estudio de caso en los Valles Altos del centro de México

Para aplicar el concepto de calidad del suelo, es necesario contar con un conjunto definido de parámetros indicadores para determinar con claridad qué características se medirán. Como ya se mencionó, existen en la literatura varias propuestas de indicadores; sin embargo, en nuestro estudio de caso, aplicamos un método diferente. No utilizamos ninguno de los conjuntos mínimos de datos predefinidos (Larson y Pierce, 1994), sino una selección de indicadores agroecológicos específicos al sitio, como se describe arriba, lo que efectuamos en dos etapas. La primera consistió en compilar una lista de factores limitantes, basada en la comparación de las condiciones óptimas para el uso del suelo en cuestión y las características agroecológicas reales. Los indicadores relacionados con los factores limitantes posiblemente sean relevantes para evaluar el sistema. La segunda etapa consistió en escoger del grupo de indicadores seleccionados previamente aquellos que ayudaran explicar mejor el sistema, con el fin de formar un estricto conjunto mínimo de datos.

En el Cuadro 2 se muestran los resultados de la comparación entre las condiciones óptimas para el crecimiento de un cultivo y la situación actual en la estación El Batán del CIMMYT, situado en los Valles Altos del centro de México. En el Cuadro 3 se muestra la lista de los parámetros de los factores limitantes, que fueron evaluados midiendo los siguientes indicadores:

- Físicos: taza de infiltración, infiltración directa (tiempo de saturación de agua), agregación por tamizado en seco y en húmedo, resistencia a la penetración, densidad aparente, punto de marchitez permanente, retención del agua en contra de la fuerza de gravedad.
- Químicos: CIC, N total, NO_3^- y NH_4^+ , C orgánico total, P, macronutrientes (Ca, Mg, K, Na), micronutrientes (Fe, Mn, Zn, Cu), pH, CE.
- Biológicos: C y N de la biomasa microbiana.

Después del análisis estadístico y la depuración, el conjunto mínimo de datos para evaluar la calidad del suelo se constituyó con los siguientes indicadores físicos: tiempo de saturación, estabilidad de agregados, punto de marchitez permanente y resistencia a la penetración de la capa superficial del suelo. Los indicadores químicos importantes fueron: de 0 a 5 cm de profundidad las concentraciones de C, N, K y Zn y de 5 a 20 cm las concentraciones de C y N.

Según los resultados del análisis multivariado, se formaron los siguientes grupos de tratamientos: (1) labranza cero con retención de residuos; (2) labranza cero con remoción de residuos; y (3) labranza convencional. La combinación de labranza cero con retención de residuos mejoró las condiciones químicas y físicas del suelo. En cambio, la labranza cero con remoción de residuos produjo una gran acumulación de Mn en la capa superficial del suelo, poca estabilidad de agregados, alta resistencia a la penetración y la presencia de costras en la superficie, lo anterior influyó en el bajo tiempo de infiltración y alto escurrimiento. Por último, la calidad del suelo con labranza convencional fue intermedia (independientemente del manejo de residuos), lo que se reflejó sobre todo en el estado físico del suelo.

Cuadro 3. Conjunto de parámetros de los factores limitantes en la zona de El Batán (adaptado de Govaerts et al., 2006a).

Parámetros
Compactación
Infiltración
Contenido de humedad
Estabilidad de agregados
Densidad aparente
Carbón orgánico
Estado de los nutrientes
Actividad biológica
Enfermedades transmitidas en el suelo

Cuadro 2. Comparación de las condiciones óptimas para el crecimiento de un cultivo con las condiciones agroecológicas de El Batán (adaptado de Govaerts et al., 2006a).

Parámetro	Condiciones óptimas para trigo	Condiciones en El Batán	Condiciones óptimas para maíz	Condiciones en El Batán	Posibles limitantes
Clima					
Temperatura del suelo		15-22 °C	16-18 °C*	15-22 °C	No
Temperatura diurna óptima	20-25 °C♦	20-25 °C	25-30 °C*	20-25 °C	No
Temperatura nocturna media			>13 °C*		No
Temperatura diurna media			<45 °C*		No
Precipitación pluvial	400-600 mm♦	600 mm Periodos secos Periodos de lluvia excesiva	400 mm*	600 mm Periodos de sequía Periodos de lluvia excesiva	Sí
Suelo					
Estructura	Fina♦	Arcilloso	Fina*	Arcilloso	No
Contenido de humedad	Evitar encharcamientos, escurrimientos y marchitez	Periodos de sequía y acame	Evitar encharcamientos, escurrimientos y marchitez	Periodos de sequía y acame	Sí
Aireación	Bien aireado♦	Poca compactación, alta densidad aparente, costras	Bien aireado*	Poca compactación, alta densidad aparente, costras	Sí
Materia orgánica	Alta♦	Alta	Alta*	Alta	No
Capacidad de campo			Alta*	Alta	No
pH	>5.0♦	5.9	5.0-7.0*	5.9	No
Contenido de Al	Bajo♦	0	Bajo*	0	No
Contenido de nutrientes	Alto♦	Tiende a disminuir	Alto*	Tiende a disminuir	Sí
Micronutrientes	En general, deficiencia de Cu, B, Mn, Zn**	Tiende a disminuir	En general, deficiencia de Fe, Zn**	Tiende a disminuir	Sí
Patógenos	Libre de patógenos	Roya amarilla, roya de la hoja y <i>Septoria tritici</i>	Libre de patógenos	Sensible a nematodos	Sí

♦ Tanner y Raemaeker, 2002; * Ristanovic, 2002; ** K.D. Sayre, comunicación personal.

Para más detalles del caso, consulte:

Govaerts, B., K.D. Sayre, J. Deckers. 2006a. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil & Tillage Research* 87: 163-174.

Lecturas adicionales

- Barrios, E., R.J. Delve, M. Bekunda, J. Mowo, J. Agunda, J. Ramisch, M.T. Trejo, R.J. Thomas. 2006. Indicators of soil quality: A south-south development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma* 135: 248-259.
- Doran, J.W., T.B. Parkin. 1994. Defining and assessing soil quality. *En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart (eds.), Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: American Society of Agronomy (ASA) and Soil Science Society of America (SSSA). Pp. 3-21.
- Karlen, D.L., D.E. Stott. 1994. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart, (Eds.), Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: ASA and SSSA. Pp. 53-72.
- Larson, W.E., F.J. Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measurement of sustainable management. *En: J.W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdicek, B.A. Stewart (Eds.), Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: ASA and SSSA. Pp. 37-51.

Uso del sensor portátil del NDVI para monitorear el crecimiento y desarrollo de los cultivos

El comportamiento, crecimiento y desarrollo de un cultivo constituyen indicadores integrales, que revelan la eficiencia de un determinado sistema agronómico dentro de los límites de un medio ambiente agroecológico. Cualquier variedad que haya sido seleccionada para una zona agroecológica dada, actuará como un indicador integral de todos los factores medioambientales y revelará cómo el manejo agronómico influye y determina el uso eficiente de los recursos. Al final del ciclo, el rendimiento es el resultado estático y final del comportamiento de un cultivo; sin embargo, tal resultado no refleja las fluctuaciones que ese comportamiento presentó durante el ciclo. Los rendimientos no permiten evaluar las interacciones que hubo, durante el ciclo entre el manejo agronómico y el ambiente de producción, ni tampoco entender totalmente la influencia del manejo agronómico. El comportamiento del cultivo en el tiempo constituye un factor crucial para poder entender y evaluar los sistemas de producción y perfeccionar el manejo de recursos. No se ha estudiado a fondo el efecto que tienen factores agronómicos como los sistemas de labranza, el manejo de residuos y la rotación de cultivos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas durante el ciclo del cultivo.

Hasta ahora, la mayor parte de los conocimientos que existen acerca del crecimiento y el desarrollo de las plantas han sido generados bajo las prácticas de manejo convencionales, como la labranza intensiva y la remoción de residuos. En cambio, el sensor portátil del NDVI permite monitorear el crecimiento y el desarrollo de las plantas durante todo el ciclo de cultivo, aportando conocimientos sobre el efecto de los distintos manejos agronómicos sobre el sistema.

Estudio de caso en los Valles Altos del centro de México

Materiales y métodos

En los ciclos 2004 y 2006, se hicieron tres mediciones del NDVI por semana con el sensor óptico portátil GreenSeeker™ (NTech Industries, Inc., EEUU) en los surcos centrales de las 16 parcelas manejadas con los tratamientos básicos establecidos en 1991. Para todos los tratamientos, se graficaron los valores promedio de NDVI que incluyeron todas las mediciones obtenidas durante el ciclo del cultivo desde de la siembra. Como un ejemplo se muestran las curvas de NDVI relacionadas con el crecimiento y desarrollo del maíz correspondientes al ciclo 2006. En el análisis de las curvas se empleó la función PROC MIXED del paquete estadístico SAS (SAS Institute, 1994) y la instrucción REPEATED para el análisis de las mediciones repetidas. Las curvas de NDVI se dividieron en tres períodos y cada uno se analizó por separado con PROC MIXED. Los tres períodos fueron: Período I, durante el cual los valores del NDVI se incrementaron gradualmente (del día 16 al 66); Período II, los valores del NDVI fueron relativamente estables (del día 69 al 94); y el Período III, los valores del NDVI descendieron gradualmente (del día 100 al 136) (Verhulst et al., 2011).

Resultados

Los tratamientos de labranza cero con retención de residuos, obtuvieron los valores de NDVI más bajos en el Período I en comparación con los tratamientos de labranza convencional con el mismo sistema de rotación ($P < 0.05$). La rotación influyó en las primeras etapas del desarrollo del cultivo, ya que, en el Período I, los valores del NDVI fueron más bajos para maíz sembrado después de trigo, en comparación con los de monocultivo de maíz (Figura 2). En el caso de maíz después de trigo con labranza convencional y retención de residuos, los valores del NDVI fueron más bajos que los de monocultivo de maíz con labranza convencional y retención o remoción de residuos ($P < 0.05$). Para maíz después de trigo con labranza convencional y remoción de residuos, el valor del NDVI fue más bajo que el correspondiente a monocultivo de maíz con labranza convencional y retención de residuos ($P < 0.05$). No hubo diferencias significativas entre los diferentes sistemas de rotación en etapas posteriores del ciclo. En

los Períodos II y III, la labranza cero con remoción de residuos presentó los valores más bajos en comparación con los otros tratamientos ($P < 0.05$) (Verhulst et al., 2011).

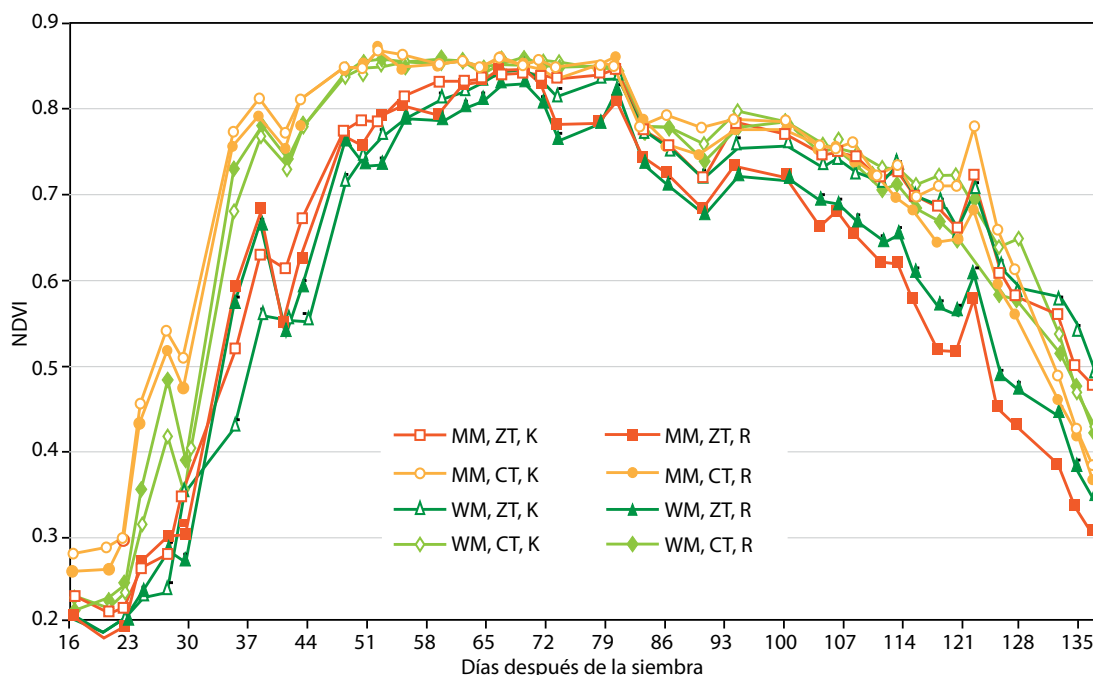
Discusión

Al inicio del ciclo las plantas en parcelas con labranza convencional, crecieron más rápido, que las sembradas en labranza cero y retención de residuos. Existen pocos informes respecto a diferencias observadas en el desarrollo de los cultivos con diferentes prácticas de labranza, sin embargo, encontramos algunos estudios cuyos resultados coinciden con los nuestros. Riley (1998) reportó que el desarrollo de los cereales de primavera se retrasaba en condiciones de labranza reducida, pero se compensaba en etapas posteriores del ciclo. Raimbault y Vyn (1991) y Vyn y Raimbault (1993) reportaron que el crecimiento de las plantas con labranza cero era más lento que en los sistemas convencionales. Sin embargo, McMaster et al. (2002) observaron, en las Grandes Llanuras Centrales de Estados Unidos, que la emergencia de las plántulas fue más rápida, más abundante y más uniforme con labranza cero que con labranza convencional en cuatro de seis años, debido a que, con la labranza cero, los contenidos de humedad del suelo en el perfil de siembra eran más favorables.

Es importante resaltar que la lentitud en el crecimiento inicial de la planta con labranza cero en comparación con la labranza convencional, es compensado en etapas posteriores del ciclo. Además, cuando se analizan los

rendimientos finales (reportado por Govaerts et al., 2005), los tratamientos que obtuvieron los rendimientos más altos por lo general alcanzaron los máximos valores de NDVI en períodos posteriores de crecimiento. Esto indica que en los tratamientos donde el crecimiento inicial es más lento puede existir una ventaja. Al parecer, la labranza cero con retención de residuos fomenta un uso más eficiente y oportuno de los recursos disponibles para el crecimiento del cultivo. Las diferencias de los ciclos de C y N entre los sistemas de labranza cero y convencional, ambos con residuos, podría plantear la hipótesis que en la labranza cero con residuos existe una mejor sincronización entre la demanda y mineralización del N, donde el N es liberado más lentamente, en comparación con la labranza convencional donde el N se libera en gran cantidad al inicio del ciclo. Sin embargo, es necesario seguir investigando al respecto para confirmar dicha hipótesis.

Al parecer, la rotación influyó en el crecimiento inicial del cultivo, porque los valores de NDVI de los cultivos sembrados después del trigo fueron más bajos que los de los cultivos sembrados después del maíz. Sin embargo, en la literatura no se encontraron artículos que reporten que el crecimiento de un cultivo sembrado después del trigo se retrase. Las diferencias observadas entre los sistemas de rotación no se observaron en etapas más adelante del ciclo del cultivo, por lo tanto, el sembrar el trigo primero no tuvo ningún efecto negativo en el rendimiento final, en comparación con sembrar el maíz primero.



Rotación: MM: monocultivo de maíz; WM: rotación anual de maíz y trigo; Sistema de labranza: CT: labranza convencional; ZT: labranza cero. Manejo de residuos: R: remoción de todos los residuos; K: todos los residuos retenidos en la parcela.

Figura 2. Las curvas (NDVI vs. días después de la siembra) de crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz en el ciclo 2006 del ensayo de sustentabilidad a largo plazo en El Batán, México (adaptado de Verhulst et al., 2011).

Al analizar las curvas de crecimiento del cultivo basadas en el NDVI se encontró que el combinar labranza cero con remoción de residuos (monocultivo de maíz y rotación trigo-maíz) afecta negativamente el desarrollo del cultivo. Esto corresponde con el impacto negativo que tienen estas prácticas en la calidad y la sanidad del suelo (Govaerts et al., 2006a, b; 2007a, b; 2008; 2009), así como sus bajos rendimientos (Govaerts et al., 2005).

A partir de lo anterior, se concluye que las prácticas de labranza, rotación y manejo de residuos influyen en el desarrollo del cultivo. Sin embargo, es necesario hacer más investigación para entender a fondo los mecanismos subyacentes. Dado que la mayoría de las prácticas y los conocimientos que se tienen en la actualidad se basan en la labranza convencional, es importante monitorear y entender el crecimiento del cultivo bajo diferentes sistemas de manejo y así poder seleccionar las variedades adecuadas y ajustar los tiempos y la aplicación de insumos (fertilización, riego, etc.) de manera integral para cada sistema.

Para más detalles del estudio de caso, consulte

Verhulst, N., B. Govaerts, V. Nelissen, K.D. Sayre, J. Crossa, D. Raes, J. Deckers. 2011. The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. *Field Crops Research*, 120: 58-67.

Lecturas adicionales

Raimbault, B.A., T.J. Vyn. 1991. Crop-Rotation and Tillage Effects on Corn Growth and Soil Structural Stability. *Agronomy Journal* 83: 979-985.

Riley, H.C.F. 1998. Soil mineral-N and N-fertilizer requirements of spring cereals in two long-term tillage trials on loam soil in southeast Norway. *Soil & Tillage Research* 48: 265-274.

Vyn, T.J., B.A. Raimbault. 1993. Long-Term Effect of 5 Tillage Systems on Corn Response and Soil-Structure. *Agronomy Journal* 85: 1074-1079.

Variabilidad espacial en el crecimiento del cultivo como indicador de sustentabilidad

La estructura espacial de los ecosistemas suele reflejar la forma en que estos sistemas funcionan (Herrick et al., 2002). Esta estructura también refleja la distribución espacial de los principales procesos relacionados con la producción. Un cambio en la variabilidad espacial en el crecimiento de la planta, a cualquier escala, indica que la distribución de los recursos limitantes ha cambiado o que ha surgido algún otro factor limitante. Un cambio en la disponibilidad de recursos en cualquier escala se verá reflejado en un cambio y afectación de los procesos que controla. Cuando existe abundancia de todos los elementos que intervienen en el crecimiento de las

plantas, se observa un patrón de crecimiento uniforme. Sin embargo, cuando uno o más de estos elementos críticos son limitantes para la planta, los efectos de la competencia entre plantas aumentan la variabilidad del comportamiento entre ellas, lo cual incrementa el coeficiente de variación (CV), en comparación con un sistema donde no hay ningún elemento limitante.

Como principio general, nuestra propuesta es que la competencia por recursos ocasiona una mayor variabilidad entre una planta y otra dentro de la misma parcela. A pesar de la escasa información, existen algunos reportes que sustentan este principio. En un estudio de la evolución del crecimiento del maíz, los investigadores infirieron la competencia intraespecífica por el incremento del CV de la biomasa de las plantas. Edmeades y Daynard (1979) observaron que, a una baja densidad (cinco plantas por metro), el CV de la biomasa de las plantas fue bajo y casi constante (ca. 10%) durante toda la etapa de crecimiento, lo cual indicó que el crecimiento de cada planta en la parcela fue similar. En cambio, en una población de mayor tamaño (20 plantas por metro), el CV llegó a 40% durante el mismo período. Por tanto, este parámetro estadístico revela que existen plantas con diferentes capacidades competitivas en la misma parcela (Edmeades y Daynard, 1979). La existencia del crecimiento jerárquico entre las plantas de una misma parcela podría estar relacionado con la intensidad de competencia intraespecífica, es decir, que depende de la densidad de población de las plantas (Maddonni y Otegui, 2004). Al comparar diferentes híbridos mejorados de maíz, Tollenaar y Wu (1999) llegaron a la conclusión de que el uso eficiente de recursos por el cultivo está relacionado de manera inversa con la variabilidad entre una planta y otra. Martin et al. (2005) sugirieron que la competencia por la humedad del suelo puede ser la causa de un aumento de la variabilidad entre una planta y otra, sobre todo en condiciones de secano.

La variabilidad espacial dentro de la parcela puede ser el resultado de la variación inherente de las condiciones de la parcela. Sin embargo, las prácticas agronómicas también influyen en la variabilidad espacial entre las plantas de una misma parcela. Por tanto, una mayor variabilidad espacial durante el ciclo puede considerarse como una reacción al uso ineficiente de los recursos que son esenciales para el crecimiento, resultado de un manejo no sustentable de estos recursos.

Ginting et al. (2003) reportaron que hubo mayores diferencias en los rendimientos de soya entre elevaciones altas y bajas en un sistema de labranza convencional en comparación con labranza reducida. Kravchenko et al. (2005) compararon tres tratamientos: sin insumos, con pocos insumos y con el nivel de insumos convencional. Encontraron que la variabilidad

general (expresada en el CV) fue más alta en el tratamiento sin insumos y que los rendimientos de ese mismo tratamiento fueron más sensibles a pequeñas variaciones en la disponibilidad de nutrientes y de agua en la parcela.

La variabilidad espacial reduce la eficiencia en el uso de recursos: el potencial de las condiciones climáticas y el potencial del germoplasma se expresan únicamente en ciertas partes de la parcela, mientras que en otras, el rendimiento es menor. En consecuencia, una mayor variabilidad espacial de las plantas durante todo el ciclo puede considerarse como una reacción al uso ineficiente de los recursos que son limitantes para el crecimiento, inducido por un manejo no sustentable de esos recursos. Una mayor variabilidad espacial puede ser un indicador confiable de un mal manejo del cultivo y, como tal, puede ayudar a corregir el problema. El sensor NDVI GreenSeeker™ es una herramienta útil que permite monitorear la variabilidad espacial en el comportamiento del cultivo durante todo el ciclo.

Estudio de caso en los Valles Altos del centro de México

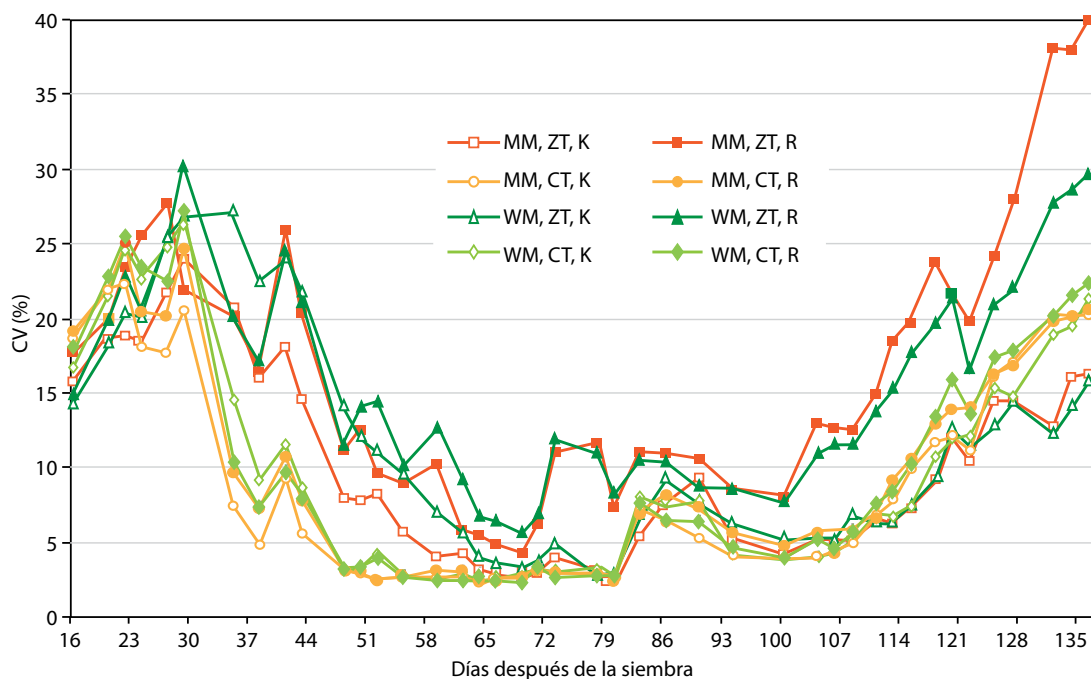
Materiales y métodos

Las mediciones del NDVI se realizaron de la misma manera que en el estudio del desarrollo del cultivo de los ciclos 2004, 2005 y 2006. El CV se define como la desviación estándar expresada como un porcentaje

del resultado promedio (Steel et al., 1997). El CV se calculó para cada secuencia de mediciones del NDVI por parcela, que consistió en aproximadamente 200 mediciones por parcela. Como ejemplo, los CV correspondientes a las curvas de crecimiento del maíz (CV vs. días después de la siembra) del ciclo 2006 se muestran en la Figura 3. Los CV computados de cada secuencia de mediciones de NDVI, medida varias veces durante el ciclo, se analizaron como variables dependientes con PROC MIXED y utilizando la instrucción REPEATED en los análisis de mediciones repetidas en el tiempo.

Resultados

Las curvas de los CV mostraron una tendencia general opuesta a la que se observa en las curvas del NDVI (Figura 2). Se observó alta variabilidad espacial al principio del ciclo en todos los tratamientos. Después de la primera etapa, el follaje comenzó a cerrarse y el CV disminuyó (hasta aproximadamente 65 días después de la siembra). La cobertura del suelo por el follaje estaba cercana al máximo, el color de las hojas era uniforme y el CV era <10%. Cerca del espigamiento (83 días después de la siembra), los CV volvieron a aumentar. Los CV bajaron más lentamente con labranza cero que con labranza convencional, pero en etapas posteriores del ciclo (aproximadamente 70 días después de la siembra) no hubo diferencias entre la labranza cero con retención de residuos y los tratamientos con labranza convencional.



Rotación: MM: monocultivo de maíz; WM: rotación anual de maíz y trigo; Sistema de labranza: CT: labranza convencional; ZT: labranza cero. Manejo de residuos: R: remoción de todos los residuos; K: todos los residuos retenidos en la parcela.

Figura 3. Coeficiente de variación (CV) que corresponde a la curva de NDVI del crecimiento (CV vs. días después de la siembra) de maíz, en el ciclo 2006 del ensayo de sustentabilidad a largo plazo en El Batán, México (adaptado de Govaerts et al., 2007c).

El procedimiento MIXED reveló que el monocultivo de maíz bajo labranza cero con remoción de residuos tuvo un CV significativamente más alto durante el ciclo, en comparación con todos los demás tratamientos ($P < 0.05$). La labranza cero con remoción de residuos y rotación de maíz y trigo generó valores de CV significativamente más bajos que el mismo tratamiento con monocultivo de maíz, pero significativamente más alto en comparación con los demás tratamientos ($P < 0.05$) (Govaerts et al., 2007c).

Discusión

Las mediciones del CV realizadas durante todo el ciclo de cultivo reflejaron la curva de crecimiento y senescencia del maíz (Figura 3). Una vez que el follaje comenzó a cerrarse, las hojas de las plantas más grandes cubrieron las hojas y el verticilo de las plantas más pequeñas. A medida que estas hojas comenzaron a llenar los surcos, intersectando y, en algunos casos, cubriendo las hojas de las plantas más pequeñas, la cobertura del suelo por vegetación aumentó. Raun et al. (2005) obtuvieron resultados similares.

En el experimento de sustentabilidad en los tratamientos de labranza cero, con monocultivo de maíz y rotación maíz-trigo, ambos con remoción de residuos, se presentaron los CV significativamente más altos durante el ciclo de cultivo ($P < 0.05$). En todas las parcelas en que se aplicó alguno de estos tratamientos se obtuvieron los CV más altos durante todo el ciclo y, por lo tanto, la variabilidad más alta dentro de la parcela. Estos mismos tratamientos se caracterizaron por sus bajos rendimientos (hasta un 50% más bajos) en todos los años anteriores del experimento, en comparación con los tratamientos de labranza cero con retención de residuos (Govaerts et al., 2005). Dichos tratamientos se han caracterizado también por su baja calidad y mala salud del suelo, en comparación con otros tratamientos (Govaerts et al., 2006b; 2007a, b; 2008). Cuando se estableció el experimento en 1990, se elaboró un mapa de la variabilidad del suelo, se encontró que ésta era mínima dentro del área del experimento (López-Noverola, 1995). Las prácticas inadecuadas (labranza cero con remoción de residuos) que se aplicaron año tras año aumentaron la variabilidad espacial del desarrollo de las plantas de dos maneras. En primer lugar, alteraron las propiedades del suelo a tal grado que provocaron condiciones de estrés. En condiciones de estrés, la competencia entre plantas por los recursos aumenta, lo cual genera una mayor variabilidad entre las plantas (Martin et al., 2005). En segundo lugar, el mal manejo afectó espacialmente las características del suelo. Debido a la variación en la topografía, la degradación provocada por el manejo inadecuado no ocurrió de igual forma en toda la parcela. Esto generó una variabilidad espacial en las características del

suelo, que a su vez produjo variabilidad espacial en el comportamiento del cultivo. Sin embargo, la labranza cero con retención de residuos propició una mejor infiltración de agua y mayor fertilidad del suelo en toda la parcela, lo que evitó la degradación del mismo, redujo la competencia entre plantas y, en consecuencia, la variabilidad espacial. Se llegó a la conclusión de que el aumento de la variabilidad espacial dentro de la parcela en el comportamiento del cultivo estaba asociada a un manejo agronómico incorrecto, en este caso, el tratamiento de labranza cero con remoción de residuos se caracterizó por una reducción en la calidad biológica, química y física del suelo.

Para más detalles del estudio de caso, consulte

Govaerts, B., K.D. Sayre, J. Deckers, P. Decorte, B. Goudeseune, K. Lichter, J. Crossa, L. Dendooven. 2007. Evaluating spatial within plot crop variability for different management practices with an optical sensor? *Plant and Soil* 299: 29-42.

Lecturas adicionales

- Martin, K.L., P.J. Hodgen, K.W. Freeman, R. Melchiori, D.B. Arnall, R.K. Teal, R.W. Mullen, K. Desta, S.B. Phillips, J.B. Solie, M.L. Stone, O. Caviglia, F. Solari, A. Bianchini, D.I. Francis, J.S. Schepers, J. Hatfield, W.R. Raun. 2005. Plant-to-plant variability in corn production. *Agronomy Journal* 97: 1603-1611.
- Scottford, I.M., P.C.H. Miller. 2004a. Combination of spectral reflectance and ultrasonic sensing to monitor the growth of winter wheat. *Biosystems Engineering* 87: 27-38.
- Scottford, I.M., P.C.H. Miller. 2004b. Estimating tiller density and leaf area index of winter wheat using spectral reflectance and ultrasonic sensing techniques. *Biosystems Engineering* 89: 395-408.
- Washmon, C.N., J.B. Solie, W.R. Raun, D.D. Itenfisu. 2002. Within field variability in wheat grain yields over nine years in Oklahoma. *Journal of Plant Nutrition* 25: 2655-2662.
- Raun, W.R., J.B. Solie, K.L. Martin, K.W. Freeman, M.L. Stone, G.V. Johnson, R.W. Mullen. 2005. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. *Journal of Plant Nutrition* 28: 173-182.

Variabilidad espacial en el crecimiento del cultivo como indicador de procesos edáficos en un marco de sustentabilidad

La variabilidad espacial en el crecimiento del cultivo integra los efectos de la variabilidad espacial del suelo, el medio ambiente y las características de las plantas (Stafford et al., 1996). Las diferencias en un recurso generan variabilidad espacial en el comportamiento del cultivo únicamente cuando el recurso es limitante

del desarrollo del cultivo. Shatar y McBratney (1999) examinaron en Australia las relaciones entre el rendimiento de sorgo y las propiedades del suelo, encontraron que la mayoría de las características edáficas que midieron variaban espacialmente, pero que solo unas cuantas causaban variación en el rendimiento. En la parcela, la principal causa de la variación en el rendimiento de sorgo fueron los cambios en la cantidad de agua disponible para las plantas. El suelo en la parte central de la parcela contenía más agua, de manera que la producción del cultivo en esa parte de la parcela llegó a un nivel tal que el contenido de potasio se volvió inadecuado y limitó la producción. Machado et al. (2002) reportaron un efecto positivo del $\text{NO}_3\text{-N}$ presente en el suelo sobre el rendimiento de grano de sorgo en un año en que hubo agua abundante, y un efecto negativo cuando el agua escaseó.

Relacionar la variabilidad espacial en el desarrollo del cultivo con la variación en las características del suelo permite identificar los factores limitantes del sistema. Las variaciones en el desarrollo del cultivo corresponderán a la variabilidad espacial de las características del suelo que limitan el rendimiento. El sensor detecta las zonas donde el desarrollo de las plantas es eficiente o deficiente, entonces son correlacionadas con aquellas zonas de la parcela que presentan diferencias en la calidad del suelo. Esto permite hacer un estudio detallado de los procesos subyacentes del suelo y de cómo éstos pueden ser afectados por las diferentes prácticas de manejo.

Estudio de caso en los Valles Altos del centro de México

Materiales y métodos

Se realizaron mediciones del NDVI con el sensor óptico portátil GreenSeeker™ (NTech Industries, Inc., EEUU) para evaluar el comportamiento de las plantas, 84 días después de la siembra (al inicio del espigamiento del maíz y al inicio del llenado del grano de trigo), en el ciclo 2006. En el maíz, se midió el NDVI en todos los surcos, excepto los de la orilla de la parcela quedando un total ocho surcos. En el caso del trigo, se midió seis franjas de 0.60 m de ancho, la primera y la última a 1.0 m de la orilla y las demás a la misma distancia una de otra. Las características del suelo solo se midieron espacialmente en las parcelas con rotaciones de maíz y trigo (ocho tratamientos). Las características del suelo se determinaron en ocho puntos dentro de cada parcela, situados en una cuadrícula de 5.5 x 2.5 m, dejando una franja de 3 m en el lado sureste de la parcela y una de 2.5 m en los demás costados. Las características del suelo que se midieron fueron: humedad volumétrica; infiltración directa en la superficie (tiempo de saturación); distribución y estabilidad de agregados en seco y en húmedo; N total y N inorgánico, materia

orgánica, pH, conductividad eléctrica y contenido de Ca, Mg, Na y K. Para examinar los patrones de comportamiento del cultivo en las parcelas con diferentes tratamientos, se elaboraron mapas del NDVI con la versión 9.2 de ArcMap (Environmental Systems Research Institute, 2006). Para asociar visualmente los patrones del comportamiento de la planta y la variabilidad de las características del suelo, se hicieron sobreposiciones de NDVI y de los valores de las características del suelo con ArcMap 9.2. A manera de ejemplo, en la Figura 4 se muestran las sobreposiciones correspondientes a algunas características claves del suelo, para el caso del maíz. En la figura de las sobreposiciones, aparecen datos de una sola parcela manejada con labranza convencional, debido a que el efecto del manejo de los residuos fue mínimo.

Resultados

En las parcelas con cultivo de maíz, labranza cero y remoción de residuos se observó un claro patrón de crecimiento (Figura 4), que no se observó en las parcelas adyacentes. Se encontraron valores bajos en el lado sureste de la parcela (colores claros) y altos en el lado noroeste (colores oscuros). En las parcelas bajo labranza cero con remoción de residuos, los valores correspondientes al contenido de humedad del suelo, el tiempo de saturación, distribución de agregados (expresados como el diámetro medio ponderado [MWD, por sus siglas en inglés], obtenido con tamizado en seco) y el contenido de materia orgánica de 0 a 5 cm de profundidad variaron de bajos en el lado sureste del campo a altos en el lado noroeste, lo cual refleja el patrón de desarrollo del cultivo (Figura 4). Las parcelas con labranza cero con retención de residuos mostraron valores mayores en las características del suelo que las parcelas con labranza convencional (Figura 4). Las parcelas bajo labranza cero con retención de residuos o labranza convencional no mostraron un patrón en las características del suelo ni en el desarrollo del cultivo. Las parcelas con labranza cero con remoción de residuos, en la capa superficial (entre 0 y 5 cm de profundidad) mostraron un claro patrón en el contenido de N inorgánico (Figura 4). Los valores fluctuaron desde altos en el lado sureste del campo hasta bajos en el lado noroeste, contrariamente a lo que se observó en el desarrollo del cultivo.

Discusión

Los suelos bajo labranza cero con remoción de residuos no tenían un mantillo que disminuyera el escurrimiento superficial y permitiera la infiltración del agua. La estructura deficiente del suelo ocasionó que éste se sellara rápidamente en la superficie, disminuyera la tasa de infiltración, aumentara el escurrimiento superficial y la erosión del suelo (Govaerts et al., 2006a). Pequeñas variaciones topográficas (inclinación del campo de <0.3%) causaron diferentes grados de degradación

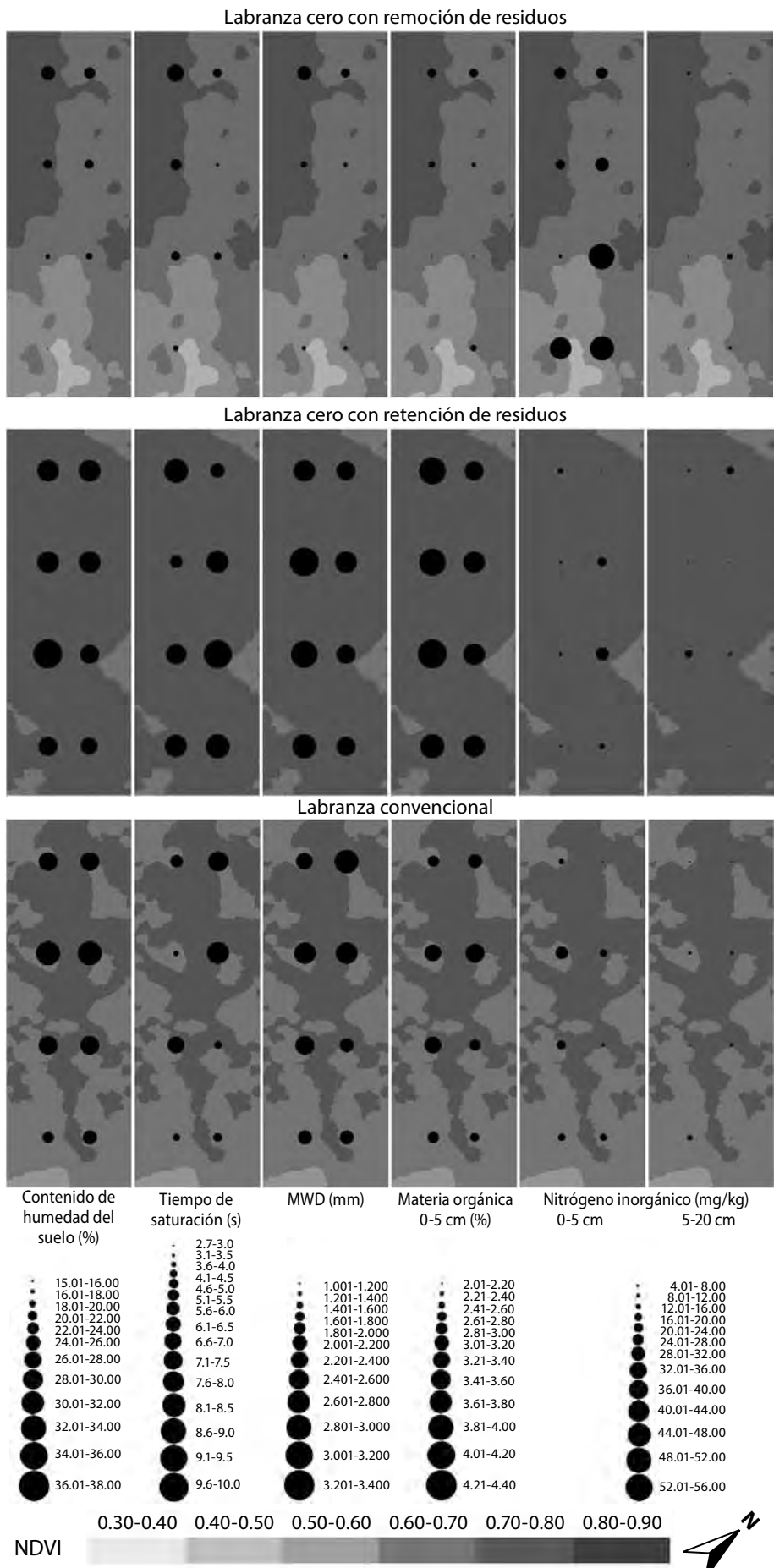


Figura 4. Sobreposiciones de NDVI y atributos del suelo (humedad volumétrica del suelo [%], tiempo de saturación, diámetro medio ponderado [MWD] obtenido mediante tamizado en seco [mm], materia orgánica del suelo [%] y contenido de nitrógeno inorgánico [mg por kg] a profundidades de 0 a 5 cm y de 5 a 20 cm), en parcelas de maíz del ciclo 2006 en el ensayo de sustentabilidad a largo plazo del CIMMYT, en El Batán, México (adaptado de Verhulst et al., 2009).

dentro de la parcela. Aunque una inclinación de 0.3% pareciera poco, el agua en el terreno bajo labranza cero con remoción de residuos fluyó hacia los puntos más bajos (en este caso, el lado noroeste del campo), porque el suelo estaba desprotegido y la superficie sellada. Así, el lado noroeste del campo recibió más agua debido al escurrimiento del lado sureste (más elevado), lo que compensó, en parte, la degradación generalizada de la calidad del suelo, que fue ocasionada por la labranza cero con remoción de residuos.

Cuando el agua es el factor limitante, disponer de más hará que las plantas crezcan mejor, con lo cual los niveles del NDVI durante el ciclo serán mayores, al igual que el rendimiento y la biomasa de la raíz al final del ciclo en el lado noroeste de la parcela, en comparación con aquellos del lado sureste de la misma. En las parcelas con labranza cero y remoción de residuos después de la cosecha, se dejó una mayor cantidad de biomasa de raíces en el lado noroeste de la parcela, esto ocasionó que las cantidades de materia orgánica, y en consecuencia, la estructura del suelo, el agua retenida y la infiltración siguieran siendo mayores en el lado noroeste que en el lado sureste del campo. El contenido de humedad del suelo en el lado noroeste aumentó aún más, comparado con el del lado sureste y, en consecuencia, tanto el crecimiento de las plantas como el comportamiento del cultivo fueron mejores en el lado noroeste de la parcela. Al inicio del experimento (1990) existía poca variabilidad espacial en el campo, a través de los años, el manejo agronómico incorrecto de la labranza cero con remoción de residuos, aumentó la variabilidad espacial en las propiedades del suelo y en el comportamiento del cultivo (López-Noverola, 1995).

En las parcelas con labranza cero y remoción de residuos la variabilidad en las propiedades del suelo produjo variabilidad espacial en el desarrollo del cultivo, la calidad del suelo y el desarrollo del cultivo variaron según la microtopografía, mostrando valores más altos donde había menos elevación. Además, la degradación generalizada de la calidad del suelo bajo labranza cero con remoción de residuos provocó condiciones de estrés. Como ya se mencionó, el estrés aumenta la competencia entre plantas por los recursos, y esta competencia genera mayor variabilidad entre ellas (Martín et al., 2005). El manejo agronómico de labranza cero con remoción de residuos, provocó que la distribución del comportamiento dentro de la parcela no fuera uniforme, lo que indica un uso ineficiente de los recursos disponibles lo que provocó pérdidas en el rendimiento. En algunas partes de la parcela el rendimiento fue mayor que en otras, bajo las mismas condiciones específicas de clima y germoplasma.

Los mapas de las parcelas con labranza cero y retención de residuos mostraron grandes diferencias con los mapas de las parcelas con labranza cero y remoción de residuos. El contenido de humedad del suelo, la infiltración (tiempo de saturación), la estructura del suelo (MWD obtenido mediante tamizado en seco) y el contenido de materia orgánica fueron uniformemente altos bajo labranza cero con retención de residuos (Figura 4), mientras que con labranza cero y remoción de residuos los valores fueron más altos donde la elevación era menor. La ausencia del efecto topográfico en los sistemas con retención de residuos se debe a que la capa de rastrojo evita el escurrimiento (Govaerts et al., 2006a) y a la reducción proporcional de la evaporación (Scopel et al., 2004). Estos dos factores aumentaron la cantidad de agua disponible para el cultivo y con esto se aseguró un comportamiento uniforme en toda la parcela. Así pues, la alta calidad del suelo redujo la competencia por recursos y, en consecuencia, la variabilidad de las plantas. Los valores y la variabilidad de las características del suelo y del comportamiento del cultivo fueron intermedios en las parcelas con labranza convencional.

Lo anterior demuestra que el comportamiento del cultivo siguió el mismo patrón que la humedad del suelo y los atributos relacionados con ésta, como la infiltración, la estructura del suelo y la materia orgánica. Por tanto, la humedad del suelo es el factor limitante en este sistema. Para poder desarrollar prácticas agronómicas sustentables particularmente en esta zona, es necesario optimizar la captación y almacenamiento de agua. La calidad intermedia del suelo bajo labranza convencional podría causar problemas en años con déficit de agua, por lo que conservar el agua del suelo es crucial para evitar el estrés hídrico.

Para más detalles del estudio de caso, consulte

Verhulst, N., B. Govaerts, K.D. Sayre, J. Deckers, L. Dendooven. 2009. Using NDVI and soil quality analysis to assess influence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. *Plant and Soil* 317: 41-59.

Lecturas adicionales

- Kravchenko, A.N., G.P. Robertson, K.D. Thelen, R.R. Harwood. 2005. Management, Topographical and Weather Effects on Spatial Variability of Crop Grain Yields. *Agronomy Journal* 97: 514-523.
- Kravchenko, A.N., D.G. Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy Journal* 92: 75-83.
- Robertson, G.P., K.L. Gross. 1994. Assessing the heterogeneity of below-ground resources: Quantifying pattern and scale. In M.M. Caldwell, R.W. Pearcy (eds.). *Plant Exploitation of Environmental Heterogeneity*. Academic Press, New York, New York, USA: 237-253.

Referencias

- Adamsen, F.J., P.J. Pinter, E.M. Barnes, R.L. Lamorte, G.W. Wall, S.W. Leavitt, B.A. Kimball. 1999. Measuring wheat senescence with a digital camera. *Crop Sci.* 39: 719-724.
- Chapman, S.C., H.J. Barreto. 1997. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. *Agron. J.* 89: 557-562.
- Edmeades, G.O., T.B. Daynard. 1979. Development of Plant-To-Plant Variability in Maize at Different Planting Densities. *Can. J. Plant Sci.* 59: 561-576.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI), 2006. ArcGIS 9.2 Geostatistical Analyst. ESRI, Redlands, California, USA.
- Evans, J.R. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C-3 plants. *Oecologia* 78: 9-19.
- Fischer, R.A., F. Santiveri, I.R. Vidal. 2002. Crop rotation, tillage and crop residue management for wheat and maize in the sub-humid tropical highlands. I. Maize and system performance. *Field Crops Res.* 79: 123-137.
- Ginting, D., J.F. Moncrief, S.C. Gupta. 2003. Performance of a variable tillage system based on interactions with landscape and soil. *Precis. Agric.* 4: 19-34.
- Govaerts, B., M. Fuentes, K.D. Sayre, M. Mezzalama, J.M. Nicol, J. Deckers, J. Etchevers, B. Figueroa-Sandoval. 2007b. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil Till. Res.* 94: 209-219.
- Govaerts, B., N. Verhulst, K.D. Sayre, P. Decorte, B. Goudeseune, K. Lichter, J. Crossa, J. Deckers, L. Dendooven. 2007c. Spatial crop variability evaluated with an optical sensor; does crop management influences spatial variability? *Plant and Soil.* 299: 29-42.
- Govaerts, B., M. Mezzalama, K.D. Sayre, J. Crossa, K. Lichter, V. Troch, K. Vanherck, P. De Corte, J. Deckers. 2008. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on selected soil micro-flora groups in the subtropical highlands. *Appl. Soil Ecol.* 38: 197-210.
- Govaerts, B., M. Mezzalama, K.D. Sayre, J. Crossa, J.M. Nicol, J. Deckers. 2006b. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/wheat root rot and nematode populations. *Appl. Soil Ecol.* 32: 305-315.
- Govaerts, B., M. Mezzalama, Y. Unno, K.D. Sayre, M. Luna-Guido, K. Vanherck, L. Dendooven, J. Deckers. 2007a. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass, and catabolic diversity. *Appl. Soil Ecol.* 37: 18-30.
- Govaerts, B., K.D. Sayre, J. Deckers, J. 2005. Stable high yields with zero tillage and permanent bed planting? *Field Crop Res.* 94: 33-42.
- Govaerts, B., K.D. Sayre, J. Deckers. 2006a. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of México. *Soil Till. Res.* 87: 163-174.
- Govaerts, B., K.D. Sayre, B. Goudeseune, P. De Corte, K. Lichter, L. Dendooven, J. Deckers. 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. *Soil Till. Res.* 103: 222-230.
- Gregorich, E.G., M.R. Carter, D.A. Angers, C.M. Monreal, B.H. Ellert. 1994. Towards A Minimum Data Set to Assess Soil Organic-Matter Quality in Agricultural Soils. *Can. J. Soil Sci.* 74:367-385.
- Herrick, J.E., J.R. Brown, A.J. Tugel, P.L. Shaver, K.M. Havstad. 2002. Application of soil quality to monitoring and management: Paradigms from rangeland ecology. *Agron. J.* 94: 3-11.
- Holben, B.N. 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 7: 1395-1416.
- IUSS Working Group WRB, 2006. World Reference Base for Soil Resources 2006. 2nd edition. World Soil Resources Reports No. 103, FAO, Rome, pp 128.
- Justice, C.O., T.F. Eck, D. Tanré, B.N. Holben. 1991. The effect of water vapour on the NDVI derived for the Sahelian region from NOAA AVHRR data. *Int. J. Remote Sens.* 12: 1165-1188.
- Karlen, D.L., M.J. Mausbach, J.W. Doran, R.G. Cline, R.F. Harris, G.E. Schuman. 1997. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 4-10.
- Kravchenko, A.N., G.P. Robertson, K.D. Thelen, R.R. Harwood. 2005. Management, topographical and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agron. J.* 97: 514-523.
- Kumar, R., L. Silva. 1973. Light ray tracing through a leaf cross-section. *Appl. Optics* 12: 2950-2954.
- Larson, W.E., F.J. Pierce. 1994. The dynamics of soil quality as a measurement of sustainable management. In J. W. Doran, D.C. Coleman, D.F. Bezdecik, B.A. Stewart (eds.), *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison: American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. Pp. 37-51.
- Larson, W.E., F.J. Pierce. 1991. Conservation and enhancement of soil quality. In: J. Dumanski, E. Pushparajah, M. Latham, R. Myers, C.R. Elliot (eds.), *Evaluation for Sustainable Land Management in the Developing World*, vol. 2. IBSRAM Proc. 12(2). Int. Board for Soil Res. and Management, Bangkok, Thailand, Pp. 175-203.
- López-Noverola, U., 1995. El C, N y P de la biomasa microbiana en suelos con diversos manejos. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de postgraduados en ciencias agrícolas. Instituto de recursos naturales. Programa Edafología. Montecillo, Estado de Mexico, Mexico. Pp. 150.
- Ma, B.L., L.M. Dwyer, C. Costa, E.R. Cober, M.J. Morrison. 2001. Early prediction of soybean yield from canopy reflectance measurements. *Agron. J.* 93: 1227-1234.
- Machado, S., E.D. Jr. Bynum, T.L. Archer, J. Bordovsky, D.T. Rosenow, C. Peterson, K. Bronson, D.M. Nesmith, R.J. Lascano, L.T. Wilson, E. Segarra. 2002. Spatial and temporal variability of sorghum grain yield: Influence of soil, water, pests, and diseases relationships. *Precis. Agric.* 3: 389-406.
- Maddoni, G.A., M.E. Otegui. 2004. Intra-specific competition in maize: early establishment of hierarchies among plants affects final kernel set. *Field Crop Res.* 85: 1-13.
- Martin, K.L., P.J. Hodgen, K.W. Freeman, R. Melchiori, D.B. Arnall, R.K. Teal, R.W. Mullen, K. Desta, S.B. Phillips, J.B. Solie, M.L. Stone, O. Caviglia, F. Solari, A. Bianchini, D.I. Francis, J.S. Schepers, J. Hatfield, W.R. Raun. 2005. Plant-to-plant variability in corn production. *Agron. J.* 97: 1603-1611.
- McMaster, G.S., D.B. Palic, G.H. Dunn. 2002. Soil management alters seedling emergence and subsequent autumn growth and yield in dryland winter wheat-fallow systems in the Central Great Plains on a clay loam soil. *Soil Till. Res.* 65: 193-206.
- Piekielek, W.P., R.H. Fox. 1992. Use of A Chlorophyll Meter to Predict Sidedress Nitrogen Requirements for Maize. *Agron. J.* 84: 59-65.
- Pinter, P.J. 1993. Solar angle independence in the relationship between absorbed PAR and remotely sensed data for alfalfa. *Remote Sens. Environ.* 46: 19-25.
- Raimbault, B.A., T.J. Vyn. 1991. Crop-rotation and tillage effects on corn growth and soil structural stability. *Agron. J.* 83: 979-985.
- Raun, W.R., J.B. Solie, K.L. Martin, K.W. Freeman, M.L. Stone, G.V. Johnson, R.W. Mullen. 2005. Growth stage, development, and spatial variability in corn evaluated using optical sensor readings. *J. Plant Nutr.* 28: 173-182.
- Riley, H.C.F. 1998. Soil mineral-N and N-fertilizer requirements of spring cereals in two long-term tillage trials on loam soil in southeast Norway. *Soil Till. Res.* 48: 265-274.
- SAS Institute, 1994. SAS User's Guide. SAS Inst., Cary, NC, USA.
- Scopel, E., F.A.M. Da Silva, M. Corbeels, F.O. Affholder, F. Maraux. 2004. Modelling crop residue mulching effects on water use and production of maize under semi-arid and humid tropical conditions. *Agronomie* 24: 383-395.
- Shatar, T.M., A.B. McBratney. 1999. Empirical modeling of relationships between sorghum yield and soil properties. *Precis. Agric.* 1: 249-276.
- Singer, M.J., S. Ewing. 2000. Soil quality. In *Handbook of soil science*, ed. M. E. Sumner, G271-G289. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Soufflet, V., D. Tanré, A. Begue, A. Podaire, P.Y. Deschamps. 1991. Atmospheric effects on NOAA AVHRR data over Sahelian regions. *Int. J. Remote Sens.* 12: 1189-1204.
- Stafford, J.V., B. Ambler, R.M. Lark, J. Catt. 1996. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. *Comput. Electron. Agric.* 14: 101-119.
- Steel, R.G.D., J.H. Torrie, D.A. Dickey. 1997. Principles and procedures of statistics, a biometrical approach. 3rd ed. New York: McGrawHill Book Co.
- Tollenaar, M., J. Wu. 1999. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Sci.* 39: 1597-1604.
- van Ginkel, M., R.M. Trethowan, K. Ammar, J. Wang, M. Lillemo. 2002. Guide to bread wheat breeding at CIMMYT. Wheat Program Special Report No. 5. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Verhulst, N., B. Govaerts, V. Nelissen, K.D. Sayre, J. Crossa, D. Raes, J. Deckers. 2011. The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat growth and development evaluated with an optical sensor. *Field Crops Research* 120: 58-67.
- Vyn, T.J., B.A. Raimbault. 1993. Long-term effect of 5 tillage systems on corn response and soil-structure. *Agron. J.* 85: 1074-1079.
- Wienhold, B.J., S.S. Andrews, D.L. Karlen. 2004. Soil quality: a review of the science and experiences in the USA. *Environ. Geochem. Hlth.* 26: 89-95.



Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo

Apdo. Postal 6-641, 06600 México, D.F. México

www.cimmyt.org