

## INDICADORES FÍSICOS DEL SUELO BAJO LABRANZA DE CONSERVACIÓN Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO DE TRES CULTIVOS\*

### SOIL PHYSICAL INDICATORS UNDER CONSERVATION TILLAGE AND THEIR RELATIONSHIP WITH YIELD OF THREE CROPS\*

Agustín Navarro Bravo<sup>1§</sup>, Benjamín Figueroa Sandoval<sup>1</sup>, Mario Martínez Menes<sup>1</sup>, Félix González Cossio<sup>2</sup> y Esteban Salvador Osuna Ceja<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Programa de Edafología, Colegio de Postgraduados, km 35.5, carretera México- Texcoco, C. P. 56230, Montecillo, Estado de México, México. <sup>2</sup>Instituto de Socioeconomía, Estadística e Informática, Colegio de Postgraduados. <sup>3</sup>Campo Experimental Pabellón, INIFAP. <sup>§</sup>Autor para correspondencia: navarro@colpos.mx

#### RESUMEN

El manejo físico del suelo implica optimizar, en la zona de las raíces de las plantas, las propiedades físicas, tales como: estructura, porosidad, infiltración, retención de agua, entre otras; que son importantes para el manejo sustentable del recurso e identificación de indicadores físicos del suelo. Por ello, se evaluó un agroecosistema de haba-maíz-frijol en rotación con labranza de conservación, para conocer los indicadores físicos a través de las propiedades físicas y químicas del suelo y su relación con el rendimiento de los cultivos, en el Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México durante 2006. Las propiedades de suelo medidas fueron resistencia mecánica, densidad aparente, materia orgánica, conductividad eléctrica, porosidad, distribución del tamaño de partículas, humedad aprovechable, saturada y residual, conductividad hidráulica saturada, infiltración acumulada, sorbilidad; así mismo, se evaluó el rendimiento de haba, maíz y frijol. Los datos se analizaron mediante análisis de regresión simple y múltiple. Los resultados mostraron que la materia orgánica y la conductividad hidráulica saturada, son los indicadores del suelo que definen el rendimiento de los tres cultivos bajo labranza de conservación.

**Palabras clave:** estructura del suelo, rendimiento de grano, sostenibilidad.

#### ABSTRACT

Soil physical management implies the optimization, near the plant root zone (plant rhizosphere), of the physical properties such as: structure, porosity, infiltration, and water retention, among others. These characteristics are important for the sustained management of the soil and for the identification of soil physical indicators. For that reason the agroecosystem faba bean-corn-dry bean rotation, under conservation tillage, was evaluated in order to know the physical indicators throughout the physical and chemical soil properties related to crop yield. The research was conducted at the Colegio de Posgraduados, Texcoco, State of Mexico during 2006. Measured soil properties were: mechanic resistance, bulk density, organic matter, electric conductivity, porosity, distribution of particle size, usable moisture, saturated and residual, saturated hydraulic conductivity, accumulated infiltration and sorbidity. Likewise, faba bean, corn and common bean seed yield, were measured. Data were analyzed throughout multiple and simple regression analysis. Results indicate that organic matter content and saturated hydraulic conductivity are the soil indicators that define seed yield in the three studied crops under conservation tillage.

**Key words:** grain yield, soil structure, sustainability.

\* Recibido: Marzo de 2006  
Aceptado: Junio de 2007

## INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural y un sistema muy complejo; que permite el sostenimiento de las actividades productivas, pero por su amplia variabilidad, es difícil establecer una sola medida física, química o biológica que refleje su calidad (Bandick y Dick, 1999).

Los métodos agrícolas de producción de cultivos se han concentrado en la labranza intensiva, suministro de insumos externos como estrategia para incrementar la fertilidad del suelo y rendimiento de la cosecha. Sin embargo, las consecuencias de la labranza intensiva son la compactación del suelo, pérdida de la biodiversidad, contaminación del suelo y el agua por el uso excesivo de agroquímicos, así como el incremento de la erosión. Por el contrario, la labranza de conservación es un esquema de producción de cultivo, diferente a los métodos convencionales y una alternativa de manejo productivo del suelo. Sus principales ventajas son: aumentar el contenido de materia orgánica en la superficie del suelo, coadyuvar a la estabilidad estructural, incrementar la retención de agua, y reducir el escurrimiento y producción de sedimentos. Lo anterior promueve aumento en la calidad física de los suelos agrícolas y del ambiente en general (Gregorich y Carter, 1997).

Para cuantificar la calidad física del suelo, los indicadores necesitan ser medidos espacialmente a través de la evaluación de las propiedades del suelo (físicas, químicas y biológicas), las cuales deben ser fáciles de medir, aún los más sensibles a cambios generados por las prácticas de manejo, cuyos valores indicarían la calidad (Larson y Pierce, 1991; Dexter, 2004).

La calidad física del suelo se asocia con el uso eficiente del agua, nutrientes, y pesticidas; lo cual reduce las emisiones de gases que generan el efecto invernadero. Como consecuencia, se presenta un incremento en la producción agrícola (Lal *et al.*, 1998). La calidad física del suelo no se puede medir directamente, pero se infiere a través de indicadores de calidad del suelo estáticos o dinámicos, y medición de atributos del mismo, que se influyen por el uso y prácticas de manejo (Carter, 2002; Sanchez-Maranon *et al.*, 2002; Dexter, 2004). Los cambios temporales en las propiedades del suelo con la labranza, son indicadores que se usan para determinar si mejora la calidad del suelo, si es estable o si disminuye con el tiempo (Lal, 1998).

Lo anterior permite establecer niveles críticos de indicadores de calidad del suelo, asignar un factor de peso y relacionarlo con la productividad (Lal, 1994).

En un sistema de manejo sustentable, la interpretación se mide en los cambios adquiridos por los indicadores de calidad del suelo en el tiempo (Larson y Pierce, 1991). Las variaciones en espacio y tiempo de los indicadores de calidad del suelo, son la consecuencia de numerosos factores físicos, químicos y biológicos. Por lo tanto, se han propuesto varias series de datos mínimos para valorar cuantitativamente la sustentabilidad de un suelo con prácticas de manejo (Larson y Pierce, 1991; Doran y Perkin, 1994; Lal, 1994). La regresión lineal (factor simple) y el análisis multivariado son herramientas estadísticas que se utilizan para evaluar la calidad del suelo (Li y Lindstorm, 2001; Mendham *et al.*, 2002), así como funciones de pedotransferencia (Salchow *et al.*, 1996; Dexter, 2004), y análisis de componentes principales (ACP), para determinar indicadores de calidad del suelo (Brejeda *et al.*, 2000).

La hipótesis de este estudio fue que el rendimiento de los cultivos evaluados bajo el sistema de rotación que se implementó en labranza de conservación, se puede explicar mediante el comportamiento de las propiedades físicas y químicas del suelo. Por tanto, el objetivo de esta investigación fue: encontrar los indicadores físicos del suelo a través de las propiedades físicas y químicas de éste, y su relación con el rendimiento de haba, maíz y frijol.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en el *Campus* Montecillo del Colegio de Postgraduados, Texcoco, Estado de México, que se ubica en las coordenadas geográficas (19° 28' 4.26" latitud norte y 98° 53' 42.18" longitud oeste con una altitud de 2 250 m). La precipitación media anual es de 550 mm, con una buena distribución (>450 mm) durante la estación de crecimiento del haba, maíz y frijol, y temperatura media anual de 18 °C con un período libre de heladas de 150 días. El suelo tiene textura migajón arcillo limoso, de origen aluvial y lacustre, moderadamente drenado, clasificado como Fluvaquentic Endoaquoll (Gutiérrez-Castorena, 1999).

Durante el ciclo primavera-verano de 1995 se estableció un experimento de largo plazo con labranza de conservación, donde se realizan prácticas de rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas para producción de grano. En esta área experimental (0.84 ha), se realizó un análisis geoestadístico de materia orgánica (MO) en la capa arable (5, 10, y 15 cm de profundidad) del suelo, porque en esta capa hay mayor acumulación de MO en un sistema de

producción de cultivos con labranza de conservación, dando las 10 parcelas de escurrimiento (2 m x 7 m, 14 m<sup>2</sup>) con aplicación de lluvia simulada con diferentes niveles de MO, para medir propiedades físicas y químicas del suelo en tres puntos centrales equidistantes y lineales de las parcelas de escurrimiento; así mismo se evaluó el rendimiento de grano de los cultivos dentro y alrededor de dichas parcelas.

El contenido de humedad volumétrica ( $\theta_v$ ) en el perfil edáfico (15 cm), la resistencia mecánica (RM) y la infiltración acumulada del agua ( $I_a$ ), se determinaron con métodos no invasivos de exploración electromagnética: reflectometría de dominio del tiempo (TDR), penetrómetro de ultrasonido (PU) y un simulador de lluvia móvil tipo ARS/USDA respectivamente. Además se usó métodos tradicionales para medir densidad aparente ( $\rho_a$ ), materia orgánica (MO), conductividad eléctrica (CE) y textura del suelo.

La determinación de  $\rho_a$  se realizó al igual que la  $\theta_v$  y RM en cada punto de muestreo a 15 cm de profundidad, se utilizó el método del cilindro de volumen conocido (Jury *et al.*, 1991). La porosidad total ( $f$ ) se determinó a partir de la densidad aparente ( $\rho_a$ ) medida y se consideró una densidad real igual a 2.6 Mg m<sup>-3</sup> (Hillel, 1980).

La humedad aprovechable ( $\theta_a$ ) se estimó como la diferencia en humedad entre capacidad de campo (CC) y punto de marchitamiento permanente (PMP); la humedad residual ( $\theta_r$ ) fue predicha por el modelo propuesto por Rawls *et al.* (1991).

La CE y MO se evaluaron en muestras de suelo que se recolectaron en los tres puntos de muestreo de las parcelas de escurrimiento. En el laboratorio se efectuaron las determinaciones a través del método de pasta de saturación y Walkley y Black, respectivamente.

La infiltración del agua (I) se determinó al usar un simulador de lluvia tipo ARS/USDA (Norton *et al.*, 1995), con el cual se aplicaron tres eventos de lluvia en cada área de muestreo respectivo con una intensidad de 20, 60 y 100 mm h<sup>-1</sup>. La tasa de infiltración se determinó a partir de la diferencia entre la intensidad de la lluvia y el escurrimiento ocurrido (Q). La conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) se determinó con los datos de la tasa de infiltración, los cuales se graficaron contra el tiempo para los eventos de 60 y 100 mm h<sup>-1</sup> de lluvia que se aplicó en cada área de muestreo, y se calculó el promedio aritmético de los tres últimos valores de la tasa de infiltración. Estos valores corresponden a la porción de la curva de

velocidad de infiltración donde ésta se hace constante. La infiltración acumulada ( $I_a$ ) se obtuvo de la diferencia entre la lluvia total y el escurrimiento. La sorbilidad ( $S_o$ ) se calculó de acuerdo con Chong (1983).

La siembra de los cultivos de haba, maíz y frijol se realizó a equidistancias (entre hileras y entre plantas) de 30 cm en forma manual, para garantizar una densidad de 100 000 plantas ha<sup>-1</sup> en cada uno de los cultivos evaluados; como alternativa para obtener una alta población de plantas en un sistema de labranza de conservación que maneja residuos de cosecha sobre la superficie del suelo.

Se determinaron las estadísticas descriptivas básicas y posteriormente se hicieron análisis de correlación por pares de parámetros con los 14 atributos de suelo medidos en la capa de 0-15 cm de profundidad y el rendimiento de los tres cultivos, se usó el software SAS V8.0 (1999). Los atributos que se usó para el análisis de correlación fueron: RM,  $\rho_a$ , MO, CE,  $f$ , contenido de arena (Ar), limo (Li), arcilla (Ac),  $\theta_a$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $K_s$ ,  $I_a$ ,  $S_o$ , rendimiento de haba ( $\hat{Y}_h$ ), maíz ( $\hat{Y}_m$ ) y frijol ( $\hat{Y}_f$ ). También se realizó un análisis de regresión múltiple, con el rendimiento de grano de los cultivos ( $\hat{Y}_h$ ,  $\hat{Y}_m$  y  $\hat{Y}_f$ ) como variables dependientes y los atributos del suelo como variables independientes.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las propiedades del suelo que presentaron coeficientes de variación (CV), mayores de 25% fueron la RM,  $I_a$ , CE y  $K_s$ . Lo que indicó una mayor variación espacial de estos en el área donde se ubicaron las parcelas. Los coeficientes de variación de las variables físicas:  $\theta_a$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $S_o$ , Ar, Lm y Ac, fueron menores de 20%; pero la  $\rho_a$  y  $f$  estos fueron cercanos a cero o con una distribución espacial uniforme. Para el rendimiento de grano de haba ( $\hat{Y}_h$ ), maíz ( $\hat{Y}_m$ ) y frijol ( $\hat{Y}_f$ ), los coeficientes fueron de bajos a moderados, con un rango de 4.38 a 24.96%. Otras estadísticas tales como: mínimo, máximo, media, mediana y la desviación estándar se muestran en el Cuadro 1.

El análisis de correlación por pares de parámetros de los 14 atributos de suelo y tres rendimientos de cultivos, mostró una correlación significativa con una probabilidad  $p \leq 0.05$  en 21 de los 136 pares de atributos del suelo (Cuadro 2). La RM se correlacionó negativamente con CE ( $R^2 = -0.85$ ), pero con las demás variables disminuyó; la CE tuvo un  $R^2 = 0.75$  con la Ar, y disminuyó estadísticamente con las otras variables.

**Cuadro 1. Estadística descriptiva de las propiedades del suelo Fluvaquentic Endoaquoll.**

Propiedades	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	D. Std.	CV (%)
RM (kPa)	10	680	3567	2105.18	2365.15	1024.53	48.67
$\rho_a$ (g cm <sup>-3</sup> )	10	1.16	1.18	1.17	1.17	0.006	0.51
MO (%)	10	1.70	2.20	1.94	1.95	0.135	6.96
CE (dS m <sup>-1</sup> )	10	0.44	1.33	0.778	0.714	0.279	35.89
<i>f</i> (%)	10	0.546	0.553	0.550	0.551	0.002	0.36
Ar (%)	10	13	17	14.9	15	1.287	8.64
Li (%)	10	50	55	52.1	52	1.969	3.78
Ac (%)	10	30	37	33	32	2.211	6.70
$\theta_a$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	10	0.164	0.382	0.303	0.305	0.058	19.19
$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	10	0.379	0.598	0.519	0.521	0.058	11.20
$\theta_r$ (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	10	0.034	0.049	0.044	0.046	0.005	10.82
$K_s$ (cm h <sup>-1</sup> )	10	0.157	0.527	0.394	0.432	0.113	28.59
$I_a$ (cm)	10	7.9	59.3	38.8	40.05	15.442	39.80
$S_o$ (cm s <sup>-1/2</sup> )	10	0.703	0.992	0.829	0.829	0.079	9.58
$\hat{Y}_h$ (t ha <sup>-1</sup> )	10	1.83	2.76	2.17	2.09	0.307	14.13
$\hat{Y}_m$ (t ha <sup>-1</sup> )	10	5.38	6.19	5.75	5.73	0.251	4.38
$\hat{Y}_f$ (t ha <sup>-1</sup> )	10	1.25	2.62	1.95	2.03	0.487	24.96

Donde: RM= resistencia mecánica;  $\rho_a$ = densidad aparente; MO= materia orgánica; CE= conductividad eléctrica; *f*= porosidad total; Ar= arena; Li= limo; Ac= arcilla;  $\theta_a$ = humedad aprovechable;  $\theta_s$ = humedad saturada;  $\theta_r$ = humedad residual;  $K_s$ = conductividad hidráulica saturada;  $I_a$ = infiltración acumulada;  $S_o$ = sorbilidad y  $\hat{Y}_h$ ,  $\hat{Y}_m$  y  $\hat{Y}_f$ = rendimiento de haba, maíz y frijol respectivamente.

Por el contrario, la MO se correlacionó significativamente con  $\rho_a$ , *f*,  $K_s$ ,  $S_o$ ,  $\hat{Y}_h$  y  $\hat{Y}_m$  ( $R^2 > 0.7$ ), y correlación  $R^2 = 0.59$  con el rendimiento del frijol. Una alta correlación positiva fue obtenida entre  $I_a$  con  $K_s$  y  $\hat{Y}_f$  ( $R^2 > 0.77$ ), pero negativamente con  $\rho_a$  ( $R^2 = -0.55$ ). La  $K_s$  tuvo una alta correlación positiva con  $\hat{Y}_h$ ,  $\hat{Y}_m$ ,  $\hat{Y}_f$ ,  $I_a$  y MO ( $R^2 > 0.72$ ) y una correlación negativa con Ac ( $R^2 = -0.7$ ). La  $S_o$  se correlacionó positivamente con MO y *f* ( $R^2 > 0.72$ ), y negativamente con  $\rho_a$  ( $R^2 = -0.72$ ). La *f* se correlaciona positivo con  $S_o$  y MO ( $R^2 = 0.72$ ), pero con  $\rho_a$  tuvo una  $R^2 = -1$ , (dado que ésta se estimó a partir de la  $\rho_a$ ). De la misma manera, existió una alta correlación positiva entre  $\theta_a$  y  $\theta_s$  ( $R^2 = 1$ ), pero estas dos variables presentaron una correlación baja ( $R^2 < 0.52$ ) con las otras variables estudiadas. La  $\theta_r$  se correlacionó positivamente con Li ( $R^2 = 0.75$ ) y negativamente con Ac ( $R^2 = -0.99$ ). En este análisis de correlación las variables  $\theta_a$  y  $\theta_s$  fueron las únicas que no se correlacionaron significativamente con el total de variables estudiadas (Cuadro 2).

Al efectuar las regresiones lineales simples, la MO,  $K_s$ ,  $I_a$  y  $S_o$  tuvieron una regresión lineal aceptable con el rendimiento de los tres cultivos. En la Figura 1 se ilustra que la MO y  $K_s$  se relacionaron con el rendimiento de haba, maíz y frijol ( $R^2 < 0.6$ ; Figura 1a-f);  $S_o$  con el rendimiento de haba ( $R^2 = 0.42$ ; Figura 1g); mientras que la  $I_a$  se relacionó con el rendimiento de maíz y frijol ( $R^2 < 0.66$ ; Figura 1h-i).

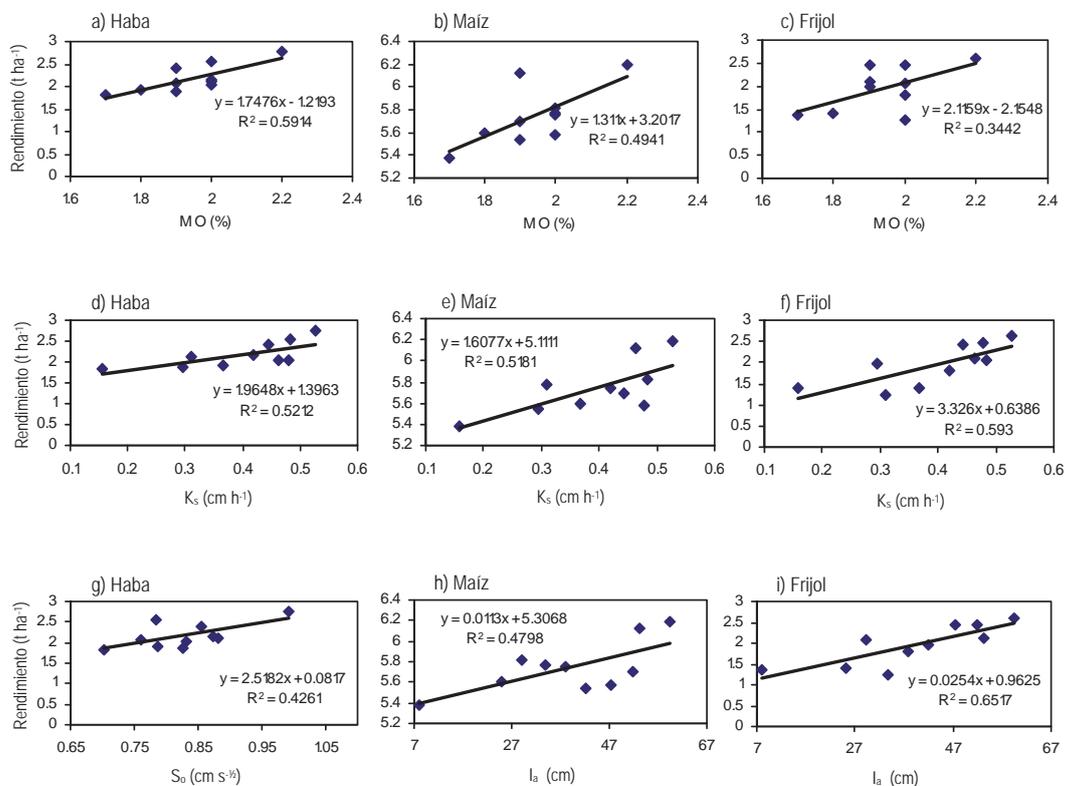
Las propiedades del suelo que explican el rendimiento del haba de mayor a menor importancia son: MO,  $K_s$ ,  $S_o$ , Ac,  $\theta_r$ ,  $I_a$ , Li, RM y CE; estas variables del suelo aportaron una explicación individual de 59.1 a 18.2%; otras como la  $\rho_a$ , *f*, Ar,  $\theta_a$  y  $\theta_s$  explicaron individualmente menos de 12% (Figura 2). En la misma figura se muestra la línea acumulativa del porcentaje de explicación de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de haba. Se observa que la línea comienza con 59.1% de MO, con un ligero aumento a  $K_s$ , del mismo modo en los tramos de  $S_o$  a  $\theta_r$  y de  $I_a$  a CE existieron aumentos que llegaron al 100% en forma acumulativa; pero de  $K_s$  a  $S_o$ ,  $\theta_r$  a  $I_a$  no existe aumento en forma acumulativa.

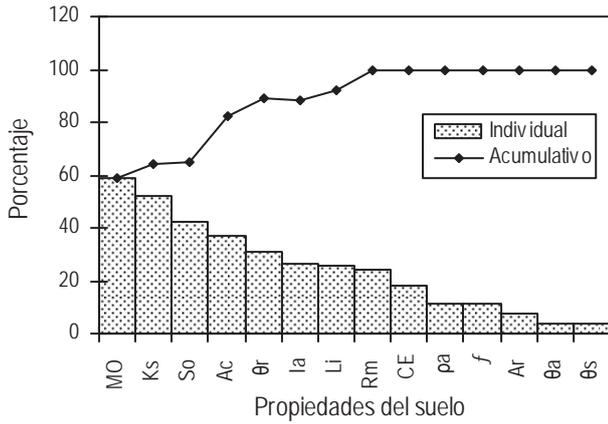
El rendimiento de maíz se influenció por  $K_s$ , MO,  $I_a$ ,  $S_o$ ,  $\rho_a$ , *f*, Ac, RM,  $\theta_r$  y CE; las cuales explicaron individualmente de 51.8-14.2% (Figura 3). Además, se observó que la línea acumulativa inicia con  $K_s$  a  $S_o$ , con un ligero aumento en porcentaje de acumulación, pero de *f* a RM y de  $\theta_r$  a CE, existe un mayor aumento que finaliza con 100% de explicación. Por el contrario, en el tramo de  $S_o$  a *f* y de RM a  $\theta_r$  la pendiente es cero, es decir, indica que en forma acumulativa estas variables no explican un aumento razonable como lo hacen individualmente.

**Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre propiedades físicas y químicas del suelo Fluvaquentic Endoaquoll y el rendimiento de haba, maíz y frijol.**

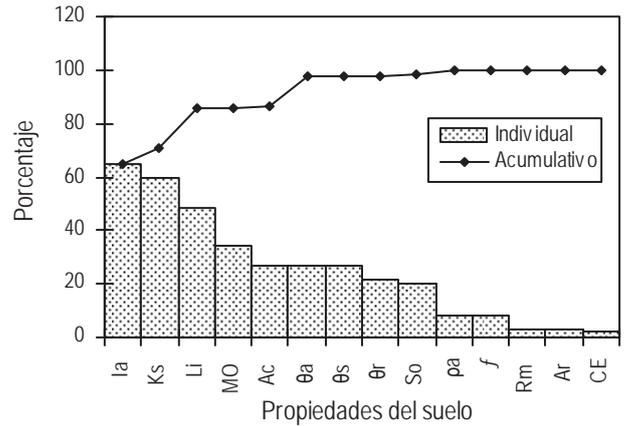
	RM	$\rho_a$	MO	CE	$f$	Ar	Li	Ac	$\theta_a$	$\theta_s$	$\theta_r$	$K_s$	$I_a$	$S_o$	$\hat{Y}_h$	$\hat{Y}_m$	$\hat{Y}_f$
RM	1																
$\rho_a$	0.58	1															
MO	-0.45	-0.72	1														
CE	-0.85	-0.48	0.29	1													
$f$	-0.58	-1.00	0.72	0.48	1												
Ar	-0.67	-0.07	-0.04	0.73	0.07	1											
Li	-0.25	0.05	0.32	0.25	-0.05	-0.13	1										
Ac	0.62	0.00	-0.26	-0.65	0.00	-0.47	-0.82	1									
$\theta_a$	-0.11	0.08	-0.07	0.24	-0.08	0.24	0.31	-0.41	1								
$\theta_s$	-0.11	0.08	-0.07	0.24	-0.08	0.24	0.31	-0.41	1.00	1							
$\theta_r$	-0.63	0.03	0.21	0.69	-0.03	0.55	0.75	-0.99	0.42	0.42	1						
$K_s$	-0.63	-0.52	0.74	0.50	0.52	0.17	0.68	-0.70	0.11	0.11	0.66	1					
$I_a$	-0.15	-0.55	0.69	0.13	0.55	-0.15	0.35	-0.22	0.12	0.12	0.19	0.77	1				
$S_o$	-0.33	-0.72	0.87	0.32	0.72	0.08	-0.02	-0.02	-0.05	-0.05	0.02	0.53	0.66	1			
$\hat{Y}_h$	-0.49	-0.33	0.77	0.43	0.33	0.28	0.51	-0.61	0.20	0.20	0.57	0.72	0.52	0.65	1		
$\hat{Y}_m$	-0.44	-0.50	0.70	0.38	0.50	0.30	0.31	-0.45	0.03	0.03	0.43	0.72	0.69	0.53	0.69	1	
$\hat{Y}_f$	-0.18	-0.29	0.59	0.15	0.29	-0.17	0.69	-0.52	0.52	0.52	0.46	0.77	0.81	0.45	0.62	0.48	1

Donde: RM= resistencia mecánica (kPa);  $\rho_a$ = densidad aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ ); MO= materia orgánica (%); CE= conductividad eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ );  $f$ = porosidad total (%); Ar= arena (%); Li= limo (%); Ac= arcilla (%);  $\theta_a$ = humedad aprovechable ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_s$ = humedad saturada ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\theta_r$ = humedad residual ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $K_s$ = conductividad hidráulica saturada ( $\text{cm h}^{-1}$ );  $I_a$ = infiltración acumulada (cm);  $S_o$ = sorbilidad ( $\text{cm s}^{-0.5}$ ) y  $\hat{Y}_h, \hat{Y}_m, \hat{Y}_f$ = rendimiento de haba, maíz y frijol ( $\text{t ha}^{-1}$ ) respectivamente.

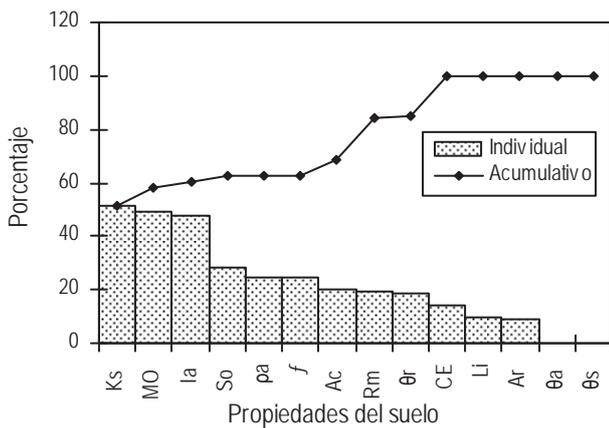
**Figura 1. Relación lineal entre el rendimiento de grano de haba, maíz y frijol con MO,  $K_s$ ,  $I_a$  y  $S_o$ .**



**Figura 2. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de haba, en las parcelas de escurrimiento.**



**Figura 4. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de frijol, en las parcelas de escurrimiento.**



**Figura 3. Porcentaje explicativo individual y acumulativo de las propiedades del suelo sobre el rendimiento de maíz, en las parcelas de escurrimiento.**

El rendimiento de frijol se debió a la  $I_a$ ,  $K_s$ ,  $Li$ ,  $MO$ ,  $Ac$ ,  $\theta_a$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $S_o$  y  $\rho_a$ , con un rango de 65.2-8.5% y las variables restantes explican individualmente menos de 8% (Figura 4). En la misma figura se muestra la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que explicaron 100% el rendimiento del cultivo de frijol, en este caso existen pendientes marcadas, por ejemplo, de  $I_a$  a  $Li$  se encuentra el mayor porcentaje de explicación (85.5%); además, se observan tramos de  $MO$  a  $\theta_a$ , y  $\theta_r$ , a  $\rho_a$ , con menor porcentaje de explicación, pero hay tramos de  $Li$  a  $MO$  y  $\theta_a$  a  $\theta_r$ , donde no hay pendiente del rendimiento.

Con la inclusión de dos o más propiedades del suelo como variables independientes y el rendimiento de grano del haba, maíz y frijol como variable dependiente en las regresiones múltiples la  $R^2$  aumentó de 0.64-0.97. La  $MO$ ,  $K_s$  y  $Ac$ , explicaron 80% el rendimiento de haba, pero al incluir  $RM$  y  $Ar$  se explicó un 85% y al incluir la  $\theta_r$  se alcanzó 96% (Cuadro 3). El rendimiento de grano del cultivo de maíz se influenció por  $K_s$ ,  $MO$  y  $Ar$ , las cuales explican 64% de dicho rendimiento, pero al incluir la  $I_a$ , aumentó 73% y posteriormente al adherir a  $S_o$ , se alcanzó un 94% (Cuadro 3). De la misma manera, las propiedades del suelo que influenciaron el rendimiento de grano de frijol fueron  $I_a$ ,  $K_s$  y  $MO$ , variables que explican el 71% el rendimiento, pero al incluir  $\theta_a$  a la ecuación, aumento a 88% y finalmente al adherir  $Ar$  se alcanzó el 97% (Cuadro 3).

De nueve ecuaciones de regresión múltiple que se muestran en el Cuadro 3, en ocho de ellas el coeficiente de la  $MO$  fue positivo, lo cual indicó que el rendimiento de grano de los cultivos estudiados aumenta conforme el contenido de  $MO$  fue mayor en el suelo. Cada una de las variables del suelo tuvieron una influencia diferente para explicar el rendimiento de los cultivos, pero en general la  $K_s$ ,  $MO$  y  $Ar$  fueron tres de 14 variables del suelo que estuvieron presentes en las regresiones múltiples con el rendimiento de grano de los tres cultivos (haba, maíz y frijol). Otras variables que influenciaron en menor importancia en las ecuaciones de regresión múltiple fueron:  $Ac$ ,  $RM$ , y  $\theta_r$  para explicar el rendimiento del haba, así también  $I_a$  y  $S_o$  influenció en el rendimiento de maíz, del mismo modo  $I_a$  y  $\theta_a$  en el rendimiento de frijol (Cuadro 3).

**Cuadro 3. Ecuaciones de regresión múltiple para el rendimiento (t ha<sup>-1</sup>) de haba, maíz y frijol.**

Núm.	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	$\hat{Y}_h = 2.03MO - 1.09K_s - 0.09Ac + 1.67$	0.80
2	$\hat{Y}_h = 2.17MO - 0.57K_s - 0.08Ac + 0.0001RM + 0.08Ar - 0.52$	0.85
3	$\hat{Y}_h = 1.88MO - 0.04K_s - 0.63Ac + 0.0002RM + 0.23Ar - 274.13\theta_r + 2.68$	0.96
4	$\hat{Y}_m = 0.73K_s + 0.88MO + 0.05Ar + 2.98$	0.64
5	$\hat{Y}_m = 0.01K_s + 0.71MO + 0.08Ar + 0.008I_a + 2.94$	0.73
6	$\hat{Y}_m = -2.17K_s + 3.45MO + 0.16Ar + 0.02I_a - 4.56S_o + 0.49$	0.94
7	$\hat{Y}_f = 0.02I_a + 1.85K_s - 0.44MO - 1.38$	0.71

Donde:  $\hat{Y}_h$ ,  $\hat{Y}_m$ ,  $\hat{Y}_f$  = rendimiento de haba, maíz y frijol respectivamente; MO = materia orgánica; RM = resistencia mecánica;  $\rho_a$  = densidad aparente;  $K_s$  = conductividad hidráulica saturada; Ac = arcilla; Ar = arena;  $\theta_r$  = humedad residual;  $I_a$  = infiltración acumulada;  $S_o$  = sorbilidad;  $\theta_a$  = humedad aprovechable.

**CONCLUSIONES**

La materia orgánica, conductividad hidráulica saturada y contenido de arcilla fueron las variables que definieron el rendimiento del haba. El rendimiento de maíz influenciado por la conductividad hidráulica saturada, materia orgánica y contenido de arena. El rendimiento de frijol está asociado con la infiltración acumulada, conductividad hidráulica saturada y materia orgánica. Por lo tanto, la conductividad hidráulica saturada y la materia orgánica (agua y nutrimento) son los indicadores del suelo que definen el rendimiento de los tres cultivos manejados con labranza de conservación.

**LITERATURA CITADA**

- Bandick, A. K., and Dick, R. P. 1999. Field management effect on soil enzyme activities. *Soil Biology and Biochemistry*. 31(11):1471-1479.
- Brejada, J. J.; Moorman, T. B.; Karlen, D. L. and Dao, T. H. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: I. Central and southern high plains. *Soil Science Society of America Journal* 64:2115-2124.
- Carter, R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal* 94:38-47.
- Chong, S. K. 1983. Calculation of sorptivity from constant-rate rainfall infiltration measurement. *Soil Science Society of America Journal* 47:627-630.
- Dexter, A. R. 2004. Soil physical quality part I. Theory, effect of soil texture, density and organic matter, and effect on root growth. Article in press. *Geoderma* 120:201-214.
- Doran, J. W. and Parkin, T. B. 1994. Defining and assessing soil quality in defining soil quality for a sustainable environment. *In: Defining soil quality for a sustainable environment*. Doran, J. W.; Coleman, D. C.; Bezdicsek, D. F. and Stewart, B. A. (eds.). SSSA. Spec. Publ. No. 35. SSSA/ASA, Madison, Wis. USA. p. 3-21.
- Gregorich, E. G. and Carter, M. R. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. *Development in Soil Science* 25:125-165.
- Gutiérrez-Castorena, Ma. C. y Ortiz-Solorio, C. A. 1999. Origen y evolución de los suelos del ex-lago de Texcoco, México. *Agrociencia*. 33:199-208.
- Hillel, D. 1980. *Fundamentals of Soil Physics*. Academic Press, Inc. New York, USA. 413 p.
- Jury, W. A.; Gardner, W. R. and Gardner, W. H. 1991. *Soil Physics*. John Wiley & Sons. New York. 328 p.
- Lal, R. 1994. *Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics*. Soil Management Support Services, USDA-NRCS, Washington. 57 p.
- Lal, R. 1998. Soil quality and agricultural sustainability. *In: Soil Quality and Agricultural Sustainability*. Lal R. (ed.). Ann Arbor Press, Chelsea, MI. p. 3-12.
- Lal, R.; Kimble, J. M.; Follett, R. F. and Cole, C. V. 1998. The potential of us cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. Ann Arbor Press, Chelsea, MI. 457 p.
- Larson, W. E., and Pierce, F. J. 1991. Conservation and enhancement of soil quality in evaluation for sustainable land management in the developing

- world. Vol. 2. IBSRAM Proc. 12(2). Int. Board for Soil Resource and Management, Bangkok, Thailand. p. 37-51.
- Li, Y. and Lindstorm, M. J. 2001. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep hillslope. *Soil Science Society of America Journal* 65:1500-1508.
- Mendham, D. S.; Smethurst, P. J.; Holz, G. K.; Menary, R. C.; Grove, T. S.; Weston, C. and Baker, T. 2002. Soil analysis as indicators of phosphorus response in young eucalyptus plantations. *Soil Science Society of America Journal* 66:959-968.
- Norton, L. D.; Figueroa-Sandoval, B. and Oropeza-Mota, J. L. 1995. Comparison of runoff and erosion form natural and reclaimed tepetate from the semiarid area East of Mexico city. *Water Research and Management in Semiarid Environments*. Tucson, Arizona. 15 p.
- Rawls, W. J.; Gish, T. J. and Brakensiek, D. L. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Advances in Soil Science* 16:213-234.
- Salchow, E. R.; Lal, R.; Fausey, N. R. and Ward, R. 1996. Pedotransfer functions for variable alluvial soils in southern Ohio. *Geoderma* 73:165-181.
- Sanchez-Maranon, M.; Soriano, M.; Delgado, G. and Delgado, R. 2002. Soil quality in mediterranean mountain environments: Effects of land use change. *Soil Science Society of America Journal* 66:948-958.
- Statistical Analysis System Institute (SAS-Institute) V8.0, 1999. The SAS system for window. SAS Institute Inc. Cary, NC27513, USA. p. 891-996.