

## Propiedades físicas y químicas del suelo bajo labranza de conservación y su relación con el rendimiento de tres cultivos

Agustín Navarro Bravo<sup>1§</sup>, Benjamín Figueroa Sandoval<sup>2</sup>, Dora Ma. Sangerman-Jarquín<sup>3</sup> y Esteban S. Osuna Ceja<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro Nacional de Estandarización de Maquinaria Agrícola (CENEMA). INIFAP. Carretera Los Reyes- Lechería, km 18.5. Texcoco, Estado de México. C. P. 56230. <sup>2</sup>Campus San Luis Potosí. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. Iturbide Núm. 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí. C. P. 78600. México. (benjamin@colpos.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental Valle de México. INIFAP. Carretera Los Reyes-Texcoco, km 13.5. Coatlinchán, Texcoco, Estado de México, C. P. 56250. (sangerman.dora@inifap.gob.mx). <sup>3</sup>Campo Experimental Pabellón. INIFAP. km 32.5. Carretera Aguascalientes-Zacatecas, Mpio. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. C. P. 20660. Tel: 01 465 958 01 86. (osuna.salvador@inifap.gob.mx). <sup>§</sup>Autor para correspondencia: navarro468@yahoo.com.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 que se relacionen con el rendimiento de los cultivos, en el Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Texcoco, Estado de México. 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; asimismo, 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 físicos del suelo que definen el rendimiento de los tres cultivos bajo labranza de conservación.

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

### 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 el rendimiento de la cosecha. Sin embargo, las consecuencias de la labranza intensiva son la compactación del suelo, la pérdida de la biodiversidad, la 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 es una alternativa de manejo productivo del suelo. Sus principales ventajas son: mejorar el contenido de materia orgánica en la superficie del suelo, mejorar 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, aun 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 ser 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 (Sanchez-Maranon *et al.*, 2002; Carter, 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 (Doran y Perkin, 1994; Lal, 1994; Larson y Pierce, 1991). 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 (Brejada *et al.*, 2000).

La hipótesis de este estudio fue que el rendimiento de los cultivos evaluados bajo el sistema de rotación que se implemento en labranza de conservación, se puede explicar mediante el comportamiento de las propiedades físicas y químicas del suelo. Por tanto, el objetivo del presente trabajo

fue: encontrar los indicadores físicos del suelo a través de las propiedades físicas y químicas de éste, y que se relacionen con el rendimiento del 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 Endoaquolls (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 \* 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 del dominio del tiempo (TDR), penetrómetro de ultrasonido (PU) y un simulador de lluvia móvil tipo ARS/USDA respectivamente. Además se uso 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  $2.6 \text{ Mg m}^{-3}$  (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  $\text{mm h}^{-1}$ . 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  $\text{mm h}^{-1}$  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 sortilidad ( $S_o$ ) 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  $\text{ha}^{-1}$  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  $f$  fueron cercanos a cero o con una distribución espacial uniforme. Para el rendimiento de grano del 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  $p \geq 0.05$  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. Por el contrario, la MO se correlacionó positivamente con  $\rho_a$ ,  $f$ ,  $K_s$ ,  $S_o$ ,  $\hat{Y}_h$  y  $\hat{Y}_m$  ( $R^2 > 0.70$ ), 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 Lm ( $R^2 = 0.75$ ) 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).

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

Propiedades	N	Mínimo	Máximo	Media	Mediana	DE	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
Ar (%)	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	11.2
$\theta_r$ (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	39.8
$S_o$ (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

DE= desviación estándar; 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.

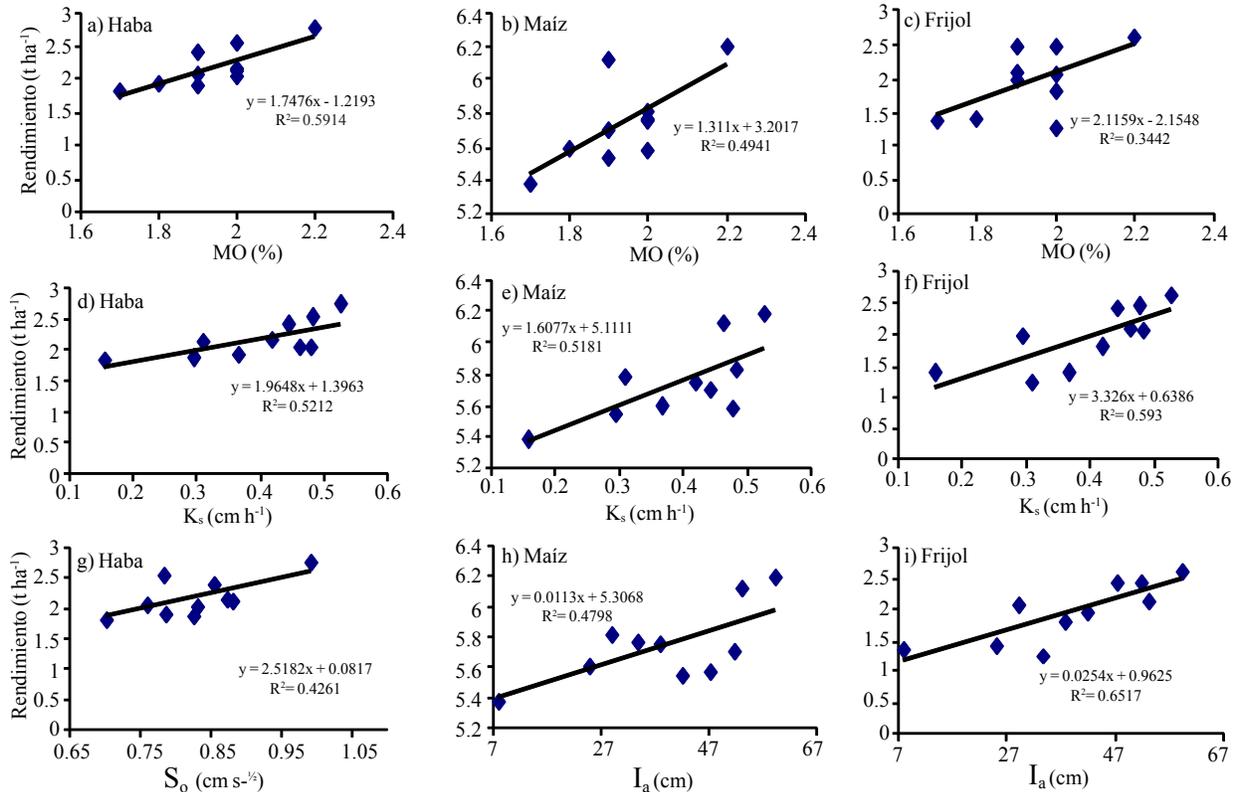
**Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre propiedades físicas y químicas del suelo Fluvaquentic Endoaquolls y el rendimiento de haba, maíz y frijol.**

	Rm	$\rho_a$	MO	CE	<i>f</i>	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													
<i>f</i>	-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

Rm= resistencia mecánica (kPa);  $\rho_a$ = densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>); MO= Materia orgánica (%); CE= Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>); *f*= Porosidad total (%); Ar= Arena (%); Li= Limo (%); Ac= Arcilla (%);  $\theta_a$ = Humedad aprovechable (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\theta_s$ = Humedad saturada (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $\theta_r$ = Humedad residual (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>);  $K_s$ = Conductividad hidráulica saturada (cm h<sup>-1</sup>);  $I_a$ = Infiltración acumulada (cm);  $S_o$ = Sorbilidad (cm s<sup>-1/2</sup>) y  $\hat{Y}_h$ ,  $\hat{Y}_m$ ,  $\hat{Y}_f$ = Rendimiento de haba, maíz y frijol (t ha<sup>-1</sup>) respectivamente.

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 ilustran que la MO y  $K_s$  se relacionaron con el rendimiento de

haba, maíz y frijol ( $R^2 < 0.60$ ; 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 1i-j).



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

Las propiedades del suelo que explican el rendimiento del haba de mayor a menor importancia son: MO,  $K_s$ ,  $S_o$ , Ac,  $\theta_r$ ,  $I_a$ , Lm, 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 del 12% (Figura 2a). En la misma figura se muestra la línea acumulativa del porcentaje de explicación de las propiedades del suelo sobre el rendimiento del 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 del 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 a 14.2% (Figura 2b). 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 un 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.

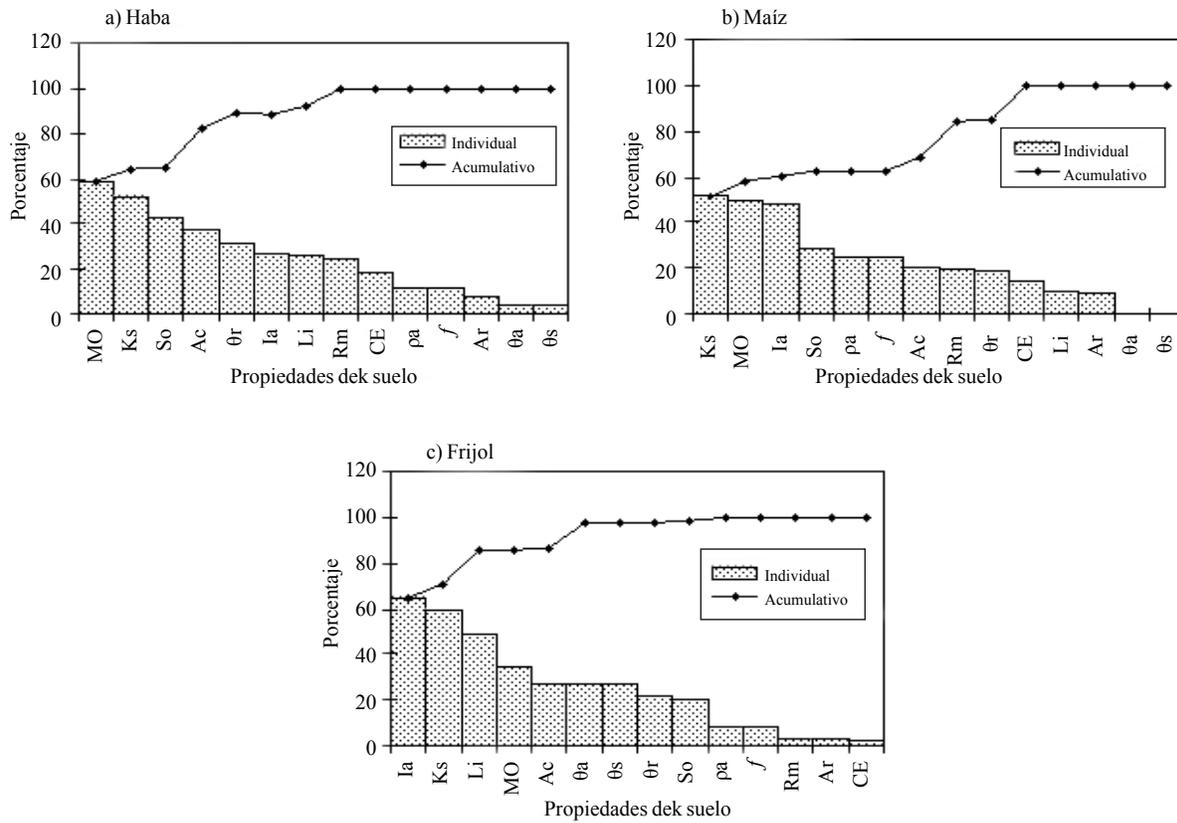
El rendimiento del frijol se debió a la  $I_a$ ,  $K_s$ , Lm, MO, Ac,  $\theta_a$ ,  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $S_o$  y  $\rho_a$ , con un rango de 65.2 a 8.5% y las variables restantes explican individualmente menos del 8% (Figura 2c). En la misma figura se muestra la línea del porcentaje acumulativo de las variables del suelo que explicaron el 100% el rendimiento del cultivo del frijol, en este caso existen pendientes marcadas, por ejemplo, de  $I_a$  a Lm 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 Lm 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  $R^2$  mejoró de 0.64 a 0.97. La MO,  $K_s$  y Ac,

explicaron 80% el rendimiento de haba, pero al incluir Rm y Ar se explicó 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% dicho rendimiento, pero al incluir la  $I_a$ , aumentó a 73% y

posteriormente al adherir a  $S_o$ , se alcanzó 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 71% el rendimiento, pero al incluir  $\theta_a$  a la ecuación, aumento a 88% y finalmente al adherir Ar se alcanzó 97% (Cuadro 3).



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

**Cuadro 3. Ecuaciones de regresión múltiple para el rendimiento ( $t\ ha^{-1}$ ) de haba, maíz y frijol.**

Núm.	Ecuación	R <sup>2</sup>
1	$\hat{Y}_h = 2.03MO - 1.09K_s - 0.09Ac + 1.67$	0.8
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
8	$\hat{Y}_f = 0.02I_a + 1.37K_s + 0.19MO + 3.61\theta_a - 0.64$	0.88
9	$\hat{Y}_f = 0.008I_a + 2.45K_s + 0.08MO + 4.28\theta_a - 0.13Ar + 1.22$	0.97

$\hat{Y}_h, \hat{Y}_m, \hat{Y}_f$ = 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.

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 del maíz, del mismo modo  $I_a$  y  $\theta_a$  en el rendimiento de frijol (Cuadro 3).

## 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 Biol. Biochem.* 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 Sci. Ame. J.* 64:2115-2124.
- Carter, R. 2002. Soil quality for sustainable land management: Organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron. J.* 94:38-47.
- Chong, S. K. 1983. Calculation of sorptivity from constant-rate rainfall infiltration measurement. *Soil Sci. Soc. Ame. J.* 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. (Ed.). SSSA. Spec. Publ. Núm. 35. SSSA/ASA, Madison, Wis. USA. 3-21 pp.
- Gregorich, E. G. and Carter, M. R. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. *Develop. Soil Sci.* 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, W. 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. 3-12 pp.
- 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., F. J. Pierce. 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. 37-51 pp.
- Li, Y.; and Lindstorm, M. J. 2001. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 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 Sci. Soc. Am. J.* 66:959-968.
- Norton, L. D.; Figueroa-Sandoval, B. and Oropeza-Mota, J. L. 1995. Comparison of runoff and erosion from 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. *Adv. Soil Sci.* 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 Sci. Soc. Am. J.* 66:948-958.

Statistical Analysis System (SAS V8.0). 1999. The SAS system for window. SAS Institute Inc. Cary, NC27513, USA. 100-120 pp.