

EFFECTO DE LA LABRANZA PRIMARIA EN LA CALIDAD FÍSICA DEL SUELO, EVALUADA MEDIANTE PERMEÁMETRO DE DISCO

• Armando López-Santos •
Universidad Autónoma Chapingo, México

• Guillermo González-Cervantes •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

• Martín Cadena-Zapata •
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, México

• José Luis González-Barrios •
Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México

Resumen

Se evaluó el efecto de la labranza primaria sobre la conductividad hidráulica y porosidad de un suelo arcilloso. El experimento se realizó en el rancho "Los Ángeles", municipio de Saltillo, Coahuila, México (latitud 25.1108° N y longitud -100.9902° O). La conductividad hidráulica *in situ* (K_c) fue medida con permeámetro de discos a tensión en la superficie (K_{c_0}) y a 8 cm de profundidad (K_{c_8}), mediante un diseño de tratamientos al azar para dos sistemas de labranza, arado de discos (*LAD*), multiarado (*LM*) y un testigo (*NL*), y cuatro tensiones de humedad: -150 (T1), -100 (T2), -50 (T3) y -10 (T4) mm. El movimiento del agua en perfil del suelo hasta el punto de saturación (K_{sc}) se relacionó con la porosidad. La labranza se realizó en junio y julio del 2009, y la K_c se midió dos meses después. Con las lecturas de abatimiento del agua y el tiempo se calcularon las tasas instantáneas de infiltración en cm h^{-1} , para K_c y K_{sc} . *NL* tuvo los valores más altos de K_{sc} para los dos niveles en que se realizaron las mediciones; mientras que en la superficie, K_{sc_0} en *LM* tuvo valores más bajos; *LAD* tuvo el mismo comportamiento a 8 cm de profundidad en T4-10. Se observó también que cuando la tensión fue a -10 mm se expresa el funcionamiento de macroporos ($> 30 \mu\text{m}$). Las velocidades para K_{sc_0} en los cuatro niveles de tensión no presentó diferencia significativa, mientras que para K_{sc_8} , las diferencias fueron altamente significativas ($\alpha = 0.05$), cuyas velocidades promedio fueron de 87, 37 y 54 cm h^{-1} para *NL*, *LAD* y *LM*, respectivamente.

Palabras clave: porosidad edáfica, permeámetro de carga variable, multiarado.

Introducción

En suelos agrícolas, la estructura de la capa arable es la propiedad física que más se modifica por el laboreo mecánico, afectando con ello el almacenamiento y la disponibilidad de agua, nutrientes y oxígeno en la zona radicular, que es controlada por el espacio poroso del suelo (Buczko *et al.*, 2006; Peth *et al.*, 2010). Evaluaciones de la estructura en términos de los cambios en la

densidad aparente (D_a), distribución del tamaño de poros, y la conductividad hidráulica saturada y no saturada son variables aceptadas como indicadores para valorar el efecto del laboreo en el estado físico del suelo (Buczko *et al.*, 2006; Peth *et al.*, 2010); por ejemplo, Schwärzel *et al.* (2011) encontraron que la abundancia de poros modificados por el laboreo son inestables y terminan colapsados como consecuencia de los ciclos de humedecimiento y secado.

Como parte de la labranza primaria, el multiarado es un implemento alternativo al arado de discos o de vertedera, usado actualmente en varias zonas de importancia agrícola de Latinoamérica y el Caribe, debido a que está orientado a la conservación de suelos y del agua (Ventura *et al.*, 2003; Martínez-Gamiño y Jasso-Chavarría, 2006), pero el efecto de este implemento sobre las propiedades físicas del suelo, en particular en su comportamiento hidrodinámico, en la actualidad presenta muchas interrogantes, pues la mayor parte de las evaluaciones realizadas se han concentrado en su desempeño mecánico (Gutiérrez *et al.*, 2004) y sobre la producción de cosechas (Martínez-Gamiño y Jasso-Chavarría, 2006).

La conductividad hidráulica es una propiedad del suelo que indica la movilidad del agua y depende del grado de saturación y la naturaleza del mismo (Gómez-Tagle *et al.*, 2008; Del Valle *et al.*, 2009; Peth *et al.*, 2010), puesto que el movimiento del agua del suelo tanto en su estado transitorio como en el estacionario es un buen reflejo de la estructura del sistema poroso, resultante de la yuxtaposición de las partículas de suelo y de los agregados (Elrick y Reynolds, 1992). Entre las propiedades hidráulicas que permiten cuantificar el tamaño, la distribución y la continuidad del sistema poroso son la conductividad hidráulica saturada, el potencial mátrico (ψ_m) y la sortividad del suelo, siendo posible medir estas propiedades directamente en campo mediante el uso del permeámetro de disco, instrumento ampliamente usado en la actualidad (Perroux y White, 1988; Regalado *et al.*, 2003; Moret y Arrúe, 2007; Gómez-Tagle *et al.*, 2008; Schwärzel *et al.*, 2011).

Con base en el punto anterior, el objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de la labranza primaria en la calidad física de un suelo arcilloso, utilizando las propiedades hidrodinámicas, como conductividad hidráulica y porosidad.

Materiales y métodos

Características ecológico-geográficas del área de estudio

Localización

El experimento fue establecido en el rancho "Los Ángeles", municipio de Saltillo, Coahuila, ubicado al noreste de México (latitud 25.1108° N y longitud 100.9902° O), en la subprovincia denominada Gran Sierra Plegada, en la parte norte de la Región Fisiográfica Sierra Madre Oriental. El clima es semiárido [BWhw(x') (e)], con una precipitación media anual de 350 mm, y una temperatura media anual de 21 °C (García, 2003). Los suelos del lugar están formados principalmente por suelos del tipo luvisol en un 40% de la superficie total (INEGI, 1976).

Caracterización de las parcelas experimentales

El trabajo se realizó dentro de una sección de 35 ha del rancho "Los Ángeles", dedicado al uso agrícola desde hace poco más de 25 años, el cual había permanecido en descanso en los cinco años anteriores a la presente investigación. Antes de realizar los tratamientos de labranza, las características edáficas se determinaron en campo y laboratorio (cuadro 1). La vegetación predominante en las parcelas experimentales fue herbácea, compuesta principalmente por las siguientes familias: *Laminaceas*, *Chenopodaceas*, *Euphobaceas* y *Asteraceas*.

Medición de la densidad aparente

Los valores de la D_a inicial (D_{a_i}) fueron determinados por gravimetría a partir de muestras extraídas con una barrena de núcleos a cuatro profundidades (5, 10, 20 y 25 cm) y la D_a final (D_{a_f}) fue calculada por el método de la cadena para medir rugosidad en la superficie del suelo, técnica descrita por Saleh (1993), la cual también ha sido utilizada para medir depresiones, erosión del suelo (Kamphorst *et*

Cuadro 1. Caracterización de las parcelas experimentales.

| Profundidad | pH | CE | Arcilla | Limo | Arena | D_a | Clase | N | M.O. | CaCO ₃ total |
|-------------|-----|------|---------|------|-------|-------|---------|-----|------|-------------------------|
| cm | | ds/m | % | | | g/g | textura | % | | |
| 0-30 | 8.3 | 2.1 | 44 | 24 | 32 | 900 | Arcilla | 0.2 | 4.2 | 37.3 |
| 30-60 | 8.3 | 0.51 | 58 | 28 | 14 | 1 100 | Arcilla | 0.1 | 2.8 | 37.7 |

Fuente: Laboratorio de Calidad de Agua y Suelo del Departamento de Riego y Drenaje, UAAAN; pH = potencial hidrógeno; CE = conductividad eléctrica en desisimens (ds/m) a 25 °C; D_a = densidad aparente (kg m⁻³); N = nitrógeno (%); M.O. materia orgánica (%); CaCO₃ Tot. = carbonatos totales en %; clase textural de acuerdo con el Sistema de Clasificación de la USDA.

al., 2000; Merrill *et al.*, 2001) y variaciones en la D_a por efecto de la labranza (Cadena *et al.*, 2004).

Diseño experimental y análisis de datos

Tratamientos

El trabajo de investigación fue diseñado bajo un sistema completamente al azar, con tres repeticiones, considerando como fuentes de variación los siguientes tratamientos: 1) testigo sin laboreo mecánico, *NL*; 2) labranza con arado de discos, *LAD*; 3) labranza con multiarado, *LM*, y cuatro niveles de tensión: -150, -100, -50 y -10 mm. El control de las tensiones se realizó de acuerdo con lo descrito por Moret y Arrúe (2007).

La descripción de los tratamientos de labranza es la siguiente:

1. *LAD* (figura 1a). Se realizó la labor a 0.25 m de profundidad con un arado de tres discos de acero cóncavos de 60 pulgadas de diámetro, utilizando como fuente de potencia un tractor John Deere modelo 3200 de 84 HP. El resultado de la labor es corte, mezcla e inversión de los estratos del suelo, lo que resulta en un mayor cambio de los agregados del suelo en el perfil.
2. *LM* (figura b1). Se llevó a cabo con un multiarado, que es una combinación de varios implementos agrícolas. Presenta un timón tipo subsuelo, pero con la punta de un arado "ranchero". Las aletas posteriores permiten trozar las raíces. El multiarado

está diseñado para roturar el perfil del suelo en forma vertical sin invertirlo o mezclarlo. La profundidad de trabajo también se estableció a 0.25 m. Para esta labor se utilizó como fuente de potencia un tractor New Holland modelo 6810 de 95 HP (Martínez-Gamiño y Jasso-Chavarría, 2006).

El testigo fue el tratamiento de no labranza, *NL*.

Instrumentación y técnica de medición

En cada tratamiento se establecieron puntos de muestreo en forma aleatoria para las pruebas de infiltración a nivel de la superficie (0 cm) y a 8 cm de profundidad, utilizando un permeámetro de disco, el cual ha sido usado (Perroux y White, 1988) para medir propiedades hidráulicas de suelo en campo, permitiendo con ello identificar macroporos y rutas de flujo preferencial derivado de cambios por el majo de suelos, dispositivo utilizado en la presente investigación (figura 2) siguiendo el protocolo de campo descrito por Moret y Arrúe (2007).

Análisis de datos y métodos de cálculo

Las ecuaciones empleadas para determinar los flujos dinámicos y estacionarios partieron de la representación del modelo empírico propuesto por Kostiakov-Lewis (Kostiakov, 1932), el cual ha sido ampliamente usado en estudios de hidrología (Landini *et al.*, 2007; Parhi *et al.*, 2007; Dashtaki *et al.*, 2009), en particular por los

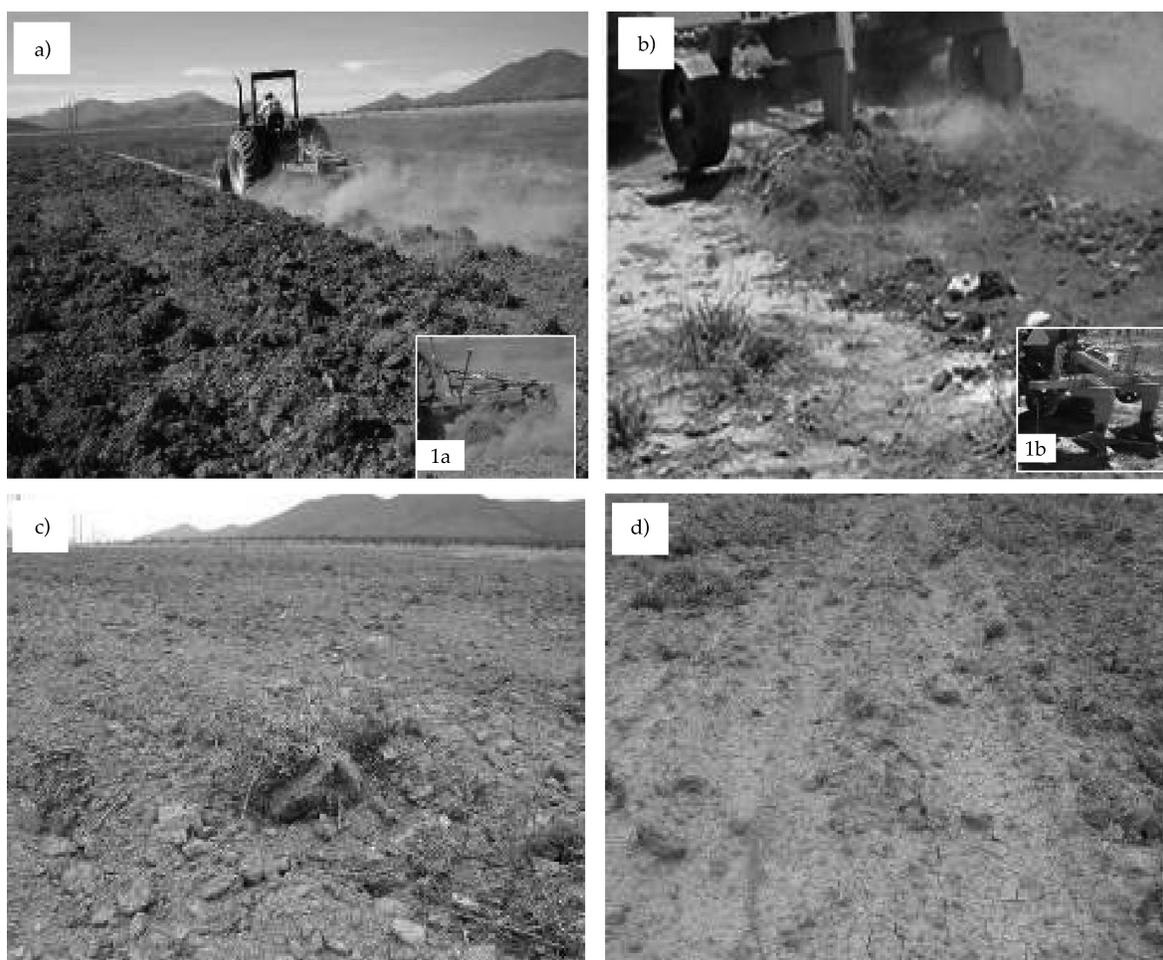


Figura 1. Laboreo del suelo e implementos utilizados por medio de LAD (a, 1a) y LM (b, 1b), y efecto de cada implemento sobre la rugosidad de la superficie del suelo y la vegetación (c) y (d), respectivamente.

buenos resultados reportados (Dashtaki *et al.*, 2009) en suelos arcillosos, cuya expresión es la siguiente:

$$I = Kt^{-n} \quad (1)$$

Donde I es la velocidad de infiltración en cm h^{-1} ; t , el tiempo en minutos; K representa la velocidad de infiltración durante el intervalo inicial, cuando $t = 1$; n , el parámetro que indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo y varía de -1 a 0 .

Los parámetros del modelo se obtuvieron mediante el cálculo de las tasas de infiltración a partir del gradiente de abatimiento o lecturas

instantáneas del reservorio con respecto al tiempo ($\partial I / \partial t$), lecturas que fueron leídas y registradas en una plantilla cada minuto durante un promedio de 150 minutos para las 18 pruebas realizadas. Los dos tipos de flujo del fenómeno estudiado —flujo transitorio (Ft) y flujo estacionario (Fe)— se identificaron mediante los cambios en la pendiente de las curvas de infiltración, I , y la lámina acumulada, z (figura 3).

Una vez identificados los grupos de valores para Ft y Fe de cada ensayo, se separaron los que correspondieron al flujo estacionario representando Ksc , los cuales, en teoría, se presentan cuando la diferencia entre la tensión

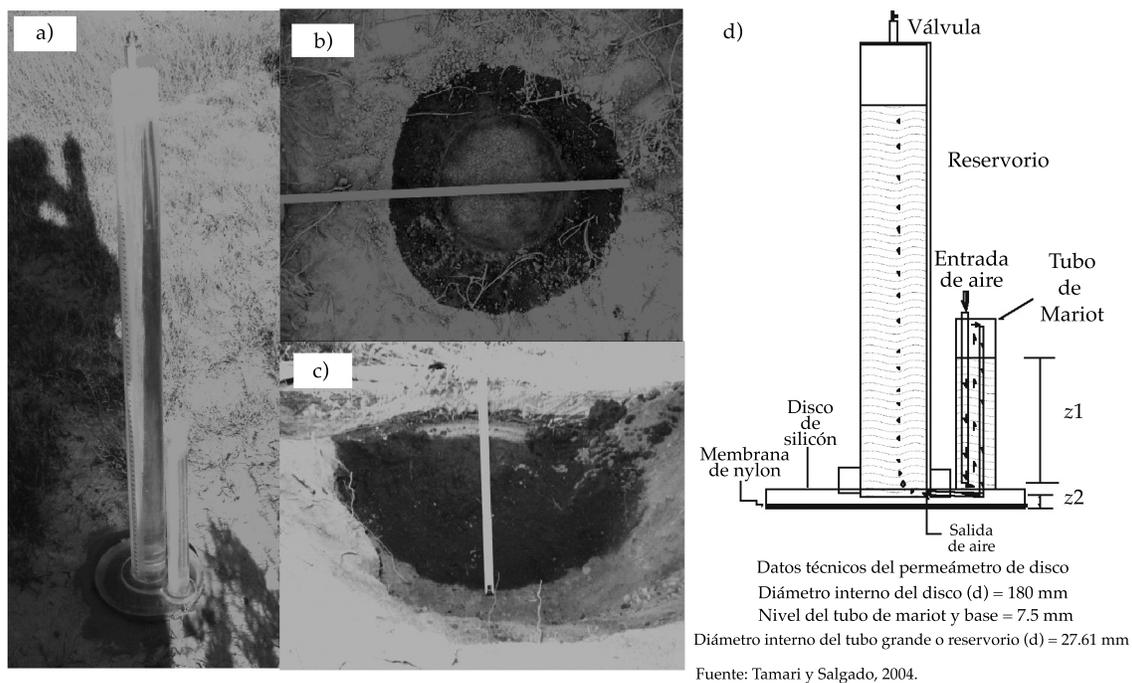


Figura 2. Permeámetro de disco (a), diámetro de humedad en la superficie (b) y profundidad del bulbo de humedad sobre el perfil de suelo (c), y modelo del permeámetro de disco usado (d).

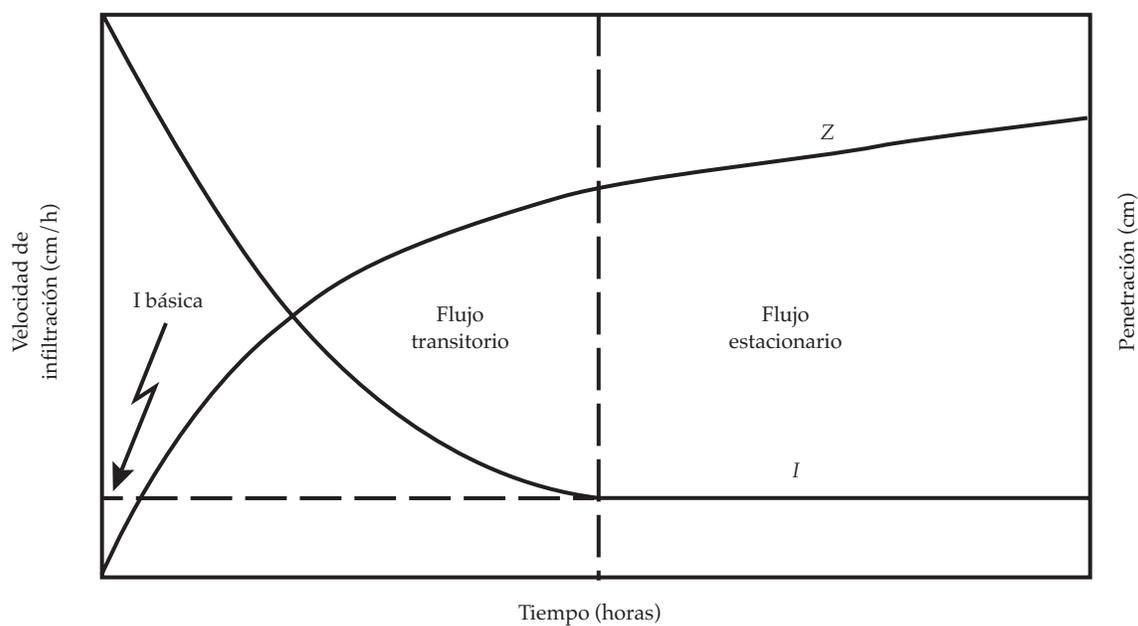


Figura 3. Modelo clásico que representa el fenómeno de infiltración e identificación de momentos de flujo (F_t y F_e).

en el tubo de Mariot y fuerza de succión de los poros es igual a cero. Los valores de K_{sc} fueron sometidos a una prueba estadística (PROC ANOVA) y Prueba del Rango Estudentizado de Tukey (HSD) en SAS, para cada una de las variables de respuesta estudiadas con un nivel de significancia de 0.05 (SAS, 2004).

Resultados y discusión

Cambios en la densidad aparente y porosidad total

Densidad aparente (D_a)

La caracterización edáfica en cuanto a D_a es coincidente con las características de suelo analizadas y clasificados con base en el triángulo de texturas, ya que en la literatura se reporta (Narro, 1994) que para la clase textural denominada: "Arcilla en agregados", la densidad aparente se encuentra en el rango de 900 a 1 100 kg m^{-3} , pues de acuerdo con el análisis mecánico de suelo (Hidrómetro de Bouyoucos) de muestras tomadas en las parcelas experimentales, en la profundidad 0-30 cm, las proporciones de arena, limo y arcilla fueron de 320, 240 y 440 g kg^{-1} , respectivamente (cuadro 2).

De acuerdo con ello (cuadro 2), los resultados indican dificultad para observar diferencias importantes en la D_a , aun cuando la

labranza es la principal fuerza que ejerce cambios en esta propiedad del suelo (Fuentes *et al.*, 2004; Udawatta *et al.*, 2008a y 2008b). En este caso se parte de una condición inicial de densidad muy baja, por lo que el efecto de la labranza en reducir la densidad es marginal, inclusive habría que considerar que se ha encontrado una relación directa entre la D_a y la resistencia mecánica (Blanco-Sepúlveda, 2009), en cuyo caso, aun dentro del límite crítico de D_a para este tipo de suelo, LM podría ser interpretado como un efecto de compactación en la capa superficial de suelo.

Porosidad

En complemento a lo anterior, también se calculó la porosidad total (P_t), que teóricamente se puede estimar como resultado de la diferencia unitaria y la relación D_a /densidad real, D_r [$P_t = 1 - (D_a/D_r)$], donde D_r se tomó con un valor constante igual a 2.65 g cm^{-3} (Eynard *et al.*, 2004). De acuerdo con esto, y con base en los valores D_a antes y después de haber aplicado los tratamientos de labranza, se calculó la P_t , observando que ésta se encuentra entre 63 y 69%, donde NL es el tratamiento que presenta los valores más altos (figura 4).

Con la información mostrada (cuadro 2 y figura 5) se observa un efecto muy parecido al reportado por varios autores al evaluar el manejo de suelos agrícolas (Rasmussen, 1999;

Cuadro 2. Densidad aparente (D_a) y porosidad total (P_t), inicial y final por tratamiento.

| Trat. | D_a por estrato (cm) | | | | | P_t por estrato (cm) | | | |
|---------------|------------------------|-----|-----|-----|--|------------------------|------|------|------|
| | 5 | 10 | 20 | 25 | | 5 | 10 | 20 | 25 |
| | kg m^{-3} | | | | | % | | | |
| D_a inicial | | | | | | | | | |
| NL | 904 | 923 | 816 | 955 | | 65.8 | 65.1 | 69.2 | 63.9 |
| LM | 916 | 863 | 956 | 973 | | 65.4 | 67.4 | 63.9 | 63.3 |
| LAD | 973 | 939 | 915 | 915 | | 63.3 | 64.6 | 65.5 | 65.5 |
| D_a final | | | | | | | | | |
| NL | 904 | 923 | 816 | 955 | | 65.8 | 65.1 | 69.2 | 63.9 |
| LM | 905 | 852 | 944 | 961 | | 65.8 | 67.8 | 64.4 | 63.7 |
| LAD | 921 | 888 | 866 | 866 | | 65.2 | 66.5 | 67.3 | 67.3 |

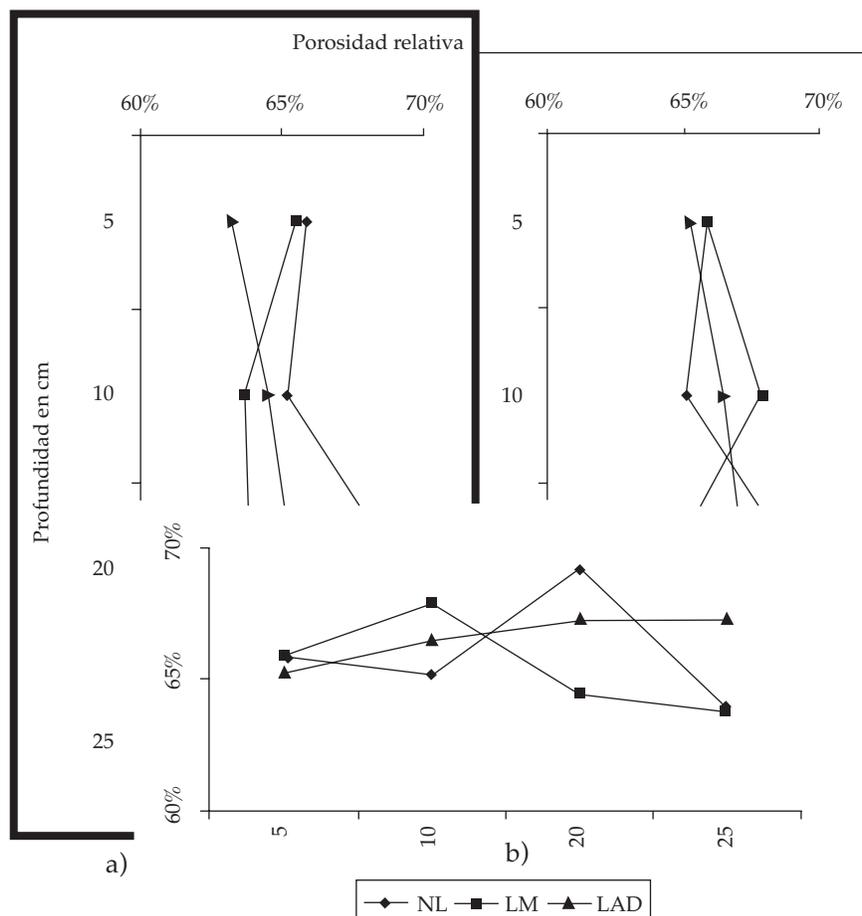


Figura 4. Perfil de porosidad por tratamiento antes (a) y después de la labranza (b).

Lipiec *et al.*, 2005; Cervinka *et al.*, 2009; Lozano *et al.*, 2010), puesto que la porosidad depende más de la organización de partículas que del tamaño de las mismas (Peth *et al.*, 2010; Schwärzel *et al.*, 2011).

Además, se observa que P_t en LM para las cuatro profundidades analizadas tiene un incremento promedio de $1.4\% \pm 1.9\%$, aunque en la segunda profundidad (10 cm) se presenta un aumento de 4.2% , mientras que LAD tiene un incremento promedio de $1.9\% + 0.1\%$, lo cual, evidentemente, indica cambios más uniformes en el perfil del suelo; asimismo, se observa también que la labranza en ambos métodos (LM y LAD) tiene el mayor impacto

en la capa superior del suelo (0-10 cm) que en el resto del perfil.

Conductividad hidráulica en el suelo

Tasa de infiltración

Para determinar el efecto de los tratamientos sobre la porosidad edáfica, en los 18 sitios elegidos al azar se realizaron los ensayos fijando el permeámetro con tensiones equivalentes en mm de agua (Z1) en un gradiente de menos a más en el siguiente orden: -150 (T1), -100 (T2), -50 (T3) y -10 (T1), condición que se mantuvo hasta que cada ensayo llegó a un

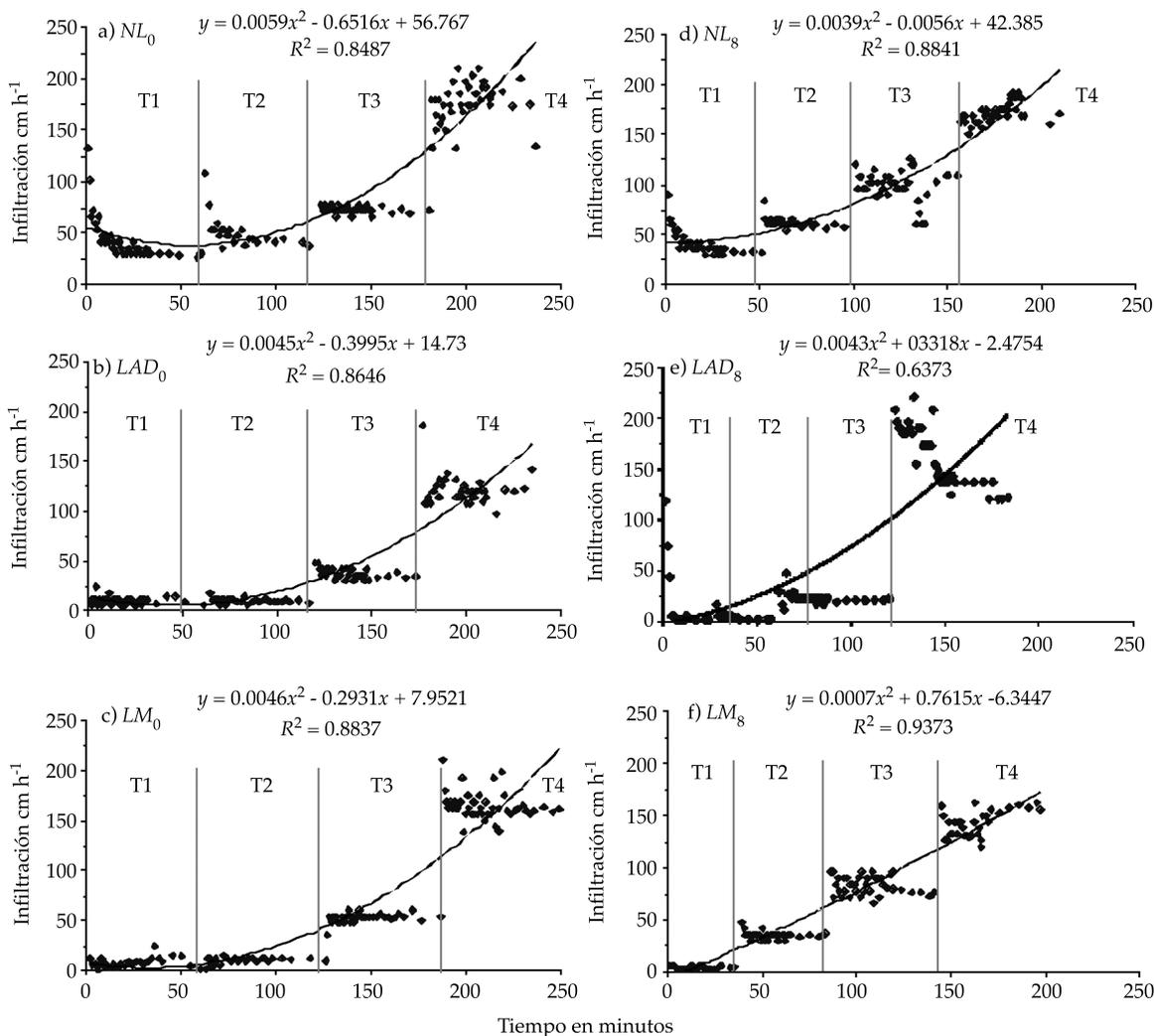


Figura 5. Velocidad de infiltración calculada en cm h^{-1} y ajuste de polinomios de segundo grado obtenidos a partir de las tasas de infiltración calculadas con datos de campo medidos en la superficie (a, b y c) y a 8 cm de profundidad (d, e y f) para cada tratamiento de labranza (NL, LAD y LM) y cuatro tensiones en mm: -150 (T1), -100 (T2), -50 (T3) y -10 (T4).

flujo estable. El movimiento del agua a través del suelo desde su fase dinámica hasta su fase estacionaria en términos generales se presenta bajo la siguiente descripción: la primera con sucesiones de puntos de rápido cambio, y la segunda con puntos con tendencia asintótica sobre el eje del tiempo; una vez calculadas las tasas instantáneas de infiltración con los valores del tiempo acumulado como variable independiente, se obtuvieron líneas de tendencia polinómicas de segundo grado,

cuyos modelos, considerando los coeficiente de correlación de Pearson (R^2), podrían ser, con excepción de LAD_8 , como aceptables, por ser en su mayoría mayores a 0.85 (figura 5).

Modelación K-L para representar el fenómeno de infiltración

Los datos obtenidos en campo fueron analizados mediante el modelo ya descrito, Kostiakov-Lewis (K-L), con lo cual fue posible

detectar los momentos Ft y Fe , en los que se presentó el valor de la infiltración a saturación en campo K_{sc} en cada una de los dos niveles donde se realizaron las pruebas. Es así que el Ft en ambos niveles del suelo y las velocidades obtenidas fueron de 16 a 240 cm h^{-1} , y de 6 a 240 cm h^{-1} , para K_{c_0} y K_{c_s} , respectivamente; los tiempos promedio a los que se alcanzó la saturación y por tanto el Fe fue en el primero y el segundo fue a los 143 y 106 min (cuadro 3).

Otras observaciones que se desprenden del análisis de los datos (cuadro 3) son: 1) toda la estructura de poros, desde los de menor

diámetro, probablemente $< 30 \mu\text{m}$ (microporos) hasta > 30 (macroporos), sufren modificaciones en su morfología y, por ende, en su función de transporte de agua y procesos asociados, como intercambio gaseoso suelo-atmósfera y movimiento vertical de solutos; 2) los ensayos realizados a nivel de la superficie del suelo para la tensión T2 muestran tendencias muy semejantes para los tratamientos de labranza. Tanto LAD_0 como LM_0 alcanzan valores de K_{sc} entre 9 y 10 cm h^{-1} , pero los que se realizaron a 8 cm de profundidad indican que LAD_8 afectó la porosidad, que funcionan en rangos de tensión

Cuadro 3. Tasas de infiltración inicial y final para Ft y Fe , medidos en campo y estimados con base en 18 modelos K-L, con diferentes valores de R^2 .

| Trat. | Tensión mm | Modelo K-L | R^2 | Medidos | | | Estimados | | | | |
|---------|------------|---------------------------|--------|---------|-------------------------|---------|-----------|-----------|------------|------|------|
| | | | | t min | Kc cm h^{-1} | t min | K_{sc} | K_{c_e} | K_{sc_e} | Ft | Fe |
| | | | | | | | | | | | |
| NL_0 | T1-150 | $I = 120.2 t^{0.406}$ | 0.878 | 1 | 132 | 29 | 30 | 120 | 31 | 2.08 | 1.49 |
| | T2-100 | $I = 481.61 t^{0.524}$ | 0.6748 | 66 | 54 | 117 | 37.9 | 54 | 40 | 1.73 | 1.60 |
| | T3-50 | $I = 810.08 t^{0.493}$ | 0.6079 | 125 | 77 | 141 | 72 | 75 | 71 | 1.87 | 1.85 |
| | T4-10 | $I = 8\ 523 t^{0.747}$ | 0.1089 | 182 | 180 | 237 | 134 | 175 | 143 | 2.24 | 2.16 |
| LAD_0 | T1-150 | $I = 22.516 t^{0.272}$ | 0.499 | 1 | 30 | 61 | 6.6 | 23 | 7 | 1.35 | 0.87 |
| | T2-100 | $I = 279.15 t^{0.744}$ | 0.5406 | 65 | 18 | 117 | 84 | 13 | 10 | 1.10 | 1.01 |
| | T3-50 | $I = 1\ 647 t^{0.768}$ | 0.4648 | 120 | 48 | 173 | 33 | 42 | 31 | 1.62 | 1.50 |
| | T4-10 | $I = 22\ 273 t^{0.988}$ | 0.3015 | 177 | 180 | 211 | 114 | 134 | 113 | 2.13 | 2.05 |
| LM_0 | T1-150 | $I = 13.879 t^{0.283}$ | 0.4252 | 1 | 24 | 63 | 2 | 14 | 4 | 1.14 | 0.63 |
| | T2-100 | $I = 64.886 t^{0.409}$ | 0.2973 | 64 | 16 | 128 | 8 | 12 | 9 | 1.07 | 0.95 |
| | T3-50 | $I = 2\ 633.9 t^{0.799}$ | 0.2313 | 127 | 65 | 187 | 30 | 55 | 40 | 1.74 | 1.61 |
| | T4-10 | $I = 3\ 182.2 t^{0.553}$ | 0.2001 | 188 | 240 | 249 | 150 | 176 | 151 | 2.25 | 2.18 |
| NL_8 | T1-150 | $I = 75.369 t^{0.241}$ | 0.8117 | 1 | 90 | 51 | 32.4 | 75 | 29 | 1.88 | 1.47 |
| | T2-100 | $I = 182.37 t^{0.26}$ | 0.2608 | 52 | 84 | 95 | 57.6 | 65 | 56 | 1.81 | 1.75 |
| | T3-50 | $I = 7\ 796.2 t^{0.918}$ | 0.2762 | 101 | 120 | 134 | 84 | 116 | 89 | 2.06 | 1.95 |
| | T4-10 | $I = 28\ 229 t^{0.995}$ | 0.2052 | 157 | 240 | 179 | 174 | 184 | 162 | 2.27 | 2.21 |
| LAD_8 | T1-150 | $I = 254.06 t^{0.979}$ | 0.6053 | 1 | 120 | 24 | 2 | 254 | 11 | 2.40 | 1.05 |
| | T2-100 | $I = 122.48 t^{0.878}$ | 0.2065 | 28 | 18 | 57 | 3 | 7 | 4 | 0.82 | 0.55 |
| | T3-50 | $I = 1\ 643.92 t^{0.757}$ | 0.2626 | 61 | 50 | 97 | 22 | 73 | 52 | 1.86 | 1.71 |
| | T4-10 | $I = 19\ 680 t^{0.98}$ | 0.8133 | 123 | 210 | 183 | 122 | 176 | 119 | 2.25 | 2.08 |
| LM_8 | T1-150 | $I = 4.5416 t^{0.109}$ | 0.2081 | 1 | 6 | 35 | 3 | 5 | 3 | 0.66 | 0.49 |
| | T2-100 | $I = 170.25 t^{0.404}$ | 0.3645 | 40 | 40 | 83 | 25 | 38 | 29 | 1.58 | 1.46 |
| | T3-50 | $I = 320.12 t^{0.297}$ | 0.3649 | 86 | 96 | 141 | 70 | 85 | 74 | 1.93 | 1.87 |
| | T4-10 | $I = 1\ 601.6 t^{0.486}$ | 0.2255 | 145 | 160 | 198 | 120 | 143 | 123 | 2.15 | 2.09 |

Trat. = tratamiento; I = tasa de infiltración en cm h^{-1} ; t = tiempo; min= minutos; Kc = conductividad hidráulica inicial medida *in situ*; K_{sc} = conductividad hidráulica a saturación medida *in situ*; \log = logaritmo con base 10; K_{c_e} = conductividad hidráulica estimada; K_{sc_e} = conductividad hidráulica saturada estimada.

equivalente a T2 y T3; y 3) los ensayos realizados a 8 cm de profundidad para las tensiones T3 y T4, con excepción de LAD_g , también muestran tendencias de comportamiento muy semejantes, aunque las velocidades más altas son para NL_0 y NL_g , ya que van desde 180 y 240 $cm\ h^{-1}$, respectivamente, hasta llegar un flujo estable entre 134 y 174 $cm\ h^{-1}$, comportamiento que de manera evidente contrasta con lo mostrado para los tratamientos de labranza en ambas profundidades.

Efecto de la labranza y la succión del suelo sobre K_{sc}

Cada uno de los ensayos de infiltración inició poniendo el tubo de Mariot a las alturas (Z1), equivalentes a la succión del suelo. Para encontrar K_{sc} , considerando que durante un ensayo la tasa instantánea de infiltración inicialmente es alta y decrece en el tiempo hasta un valor constante llamado clásicamente como infiltración básica controlada por la conductividad hidráulica saturada (Gómez-Tagle *et al.*, 2008; Del Valle *et al.*, 2009), se establecieron los siguientes supuestos: 1) las cuatro fuerzas de succión del suelo desde T4 hasta T1 son representativas de cuatro grandes grupos de poros; 2) en el perfil de suelo hay estratos uniformes en contenidos de humedad; y 3) además, existe el mismo tipo y distribución de partículas que conforman la capa de suelo estudiada.

La interpretación de las tasas instantáneas de K_{sc} permite ver el efecto negativo de la labranza en la velocidad promedio para los ensayos realizados, principalmente a 8 cm de profundidad. Con respecto al tratamiento de referencia (NL_g), las tasas de infiltración en LAD_g en T3 y T2 fueron 20 y 4.7 veces más bajas que las registradas en NL_g ; mientras que para LM , la diferencia fue de 1.7 y 1.4 veces, respectivamente (figura 6).

Los resultados de Kung *et al.* (2005) indican que el flujo saturado (K_{sc}) describe el movimiento de agua a través de poros grandes ($\varnothing \geq 1 \times 10^{-3}$), sin embargo, habría que considerar que K_{sc} ocurre cuando el 95%

del espacio poroso total está lleno con agua y el 5% restante está lleno de aire atrapado, por lo cual se presume que en este caso el laboreo mecánico, además de los macroporos, también impactó microporos.

ANOVA para K_c y K_{sc} , expresados como índices Fe/Ft

Para detectar el impacto de la labranza sobre las tasa de infiltración para flujo transitorio y flujo estacionario, representado por las tasa de infiltración inicial y final, respectivamente, se estimaron índices Fe/Ft , por considerar que la labranza tiene un efecto proporcional sobre ambos tipo de flujo, ya que durante toda la prueba de infiltración, Ft es gobernado principalmente por los cambios que produce la labranza sobre los macroporos, y Fe por estar dominado por el funcionamiento de mesoporos y microporos ($\varnothing \leq 1 \times 10^{-3}$), los cuales ejercen succiones en la matriz del suelo equivalentes a las tensiones del permeámetro establecidas entre -100 y -150 mm.

Del análisis de varianza (ANOVA) resultaron diferencias altamente significativas entre los promedios de los índices Fe/Ft para las estimaciones de los flujos ($\log I$), transitorio y estacionario, que se derivaron de las mediciones realizadas a 8 cm de profundidad, en tanto que para las comparaciones entre los dos niveles (a 0 cm *versus* 8 cm), no hubo diferencia estadística (cuadro 4), aunque es importante mencionar que a este mismo nivel del suelo, aun cuando el efecto del laboreo estadísticamente no es significativo, las diferencias aritméticas indican que LM_0 tiene un mayor impacto en macroporos, ya que la velocidad inicial en T4-10 fue 1.3 veces mayor que NL_0 (240/180), y para esta misma tensión, la conductividad hidráulica saturada o K_{sc_0} fue 1.1 veces mayor que NL_0 (150/134).

A 8 cm de profundidad, en los tratamientos de labranza sobre la conductividad hidráulica se observan diferentes efectos para cada nivel de tensión (T4 a T1) y condiciones de humedad

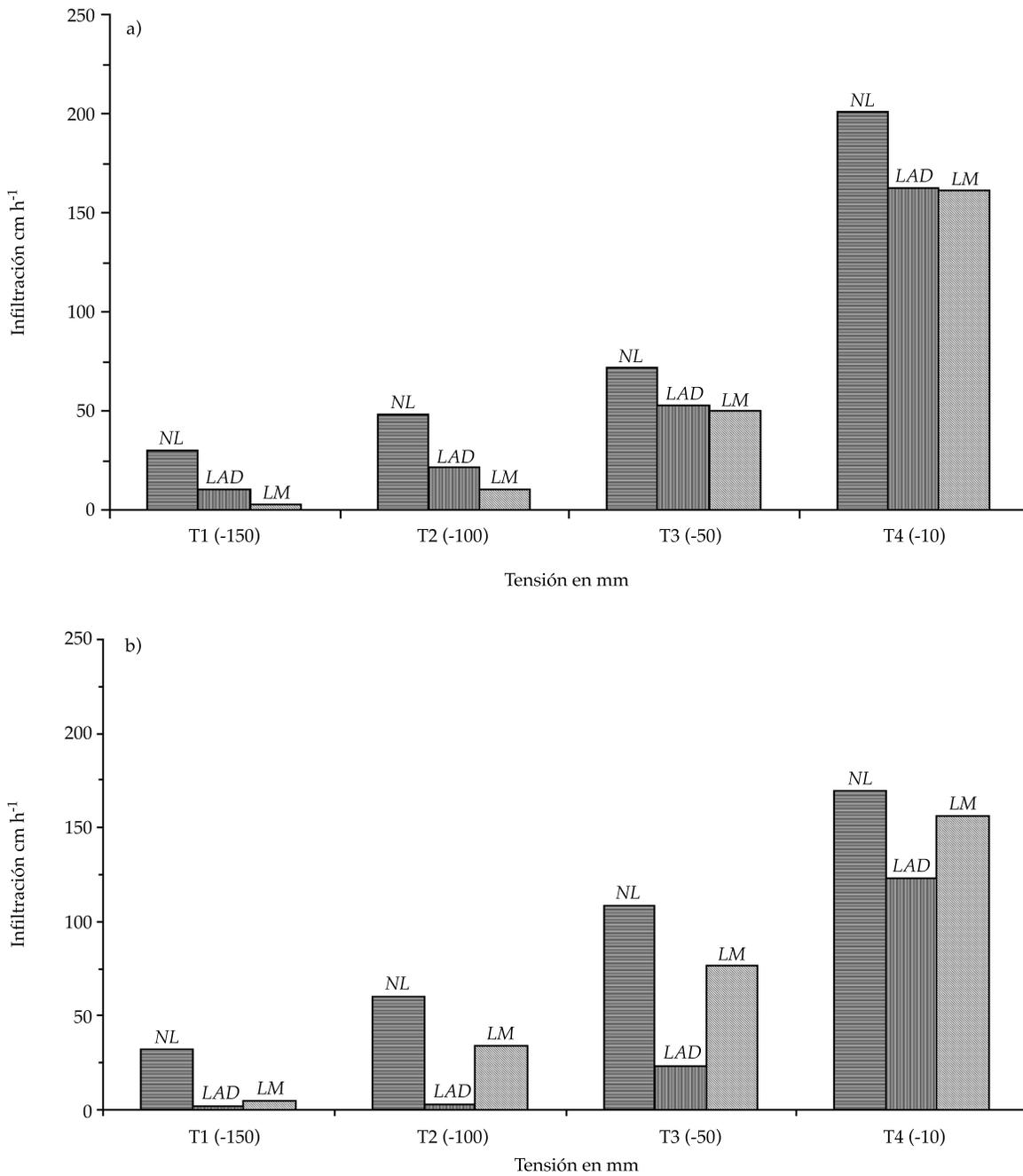


Figura 6. Tasa de infiltración para cuatro tensiones en los ensayos realizados a nivel de la superficie (a) y a 8 cm de profundidad (b).

en el suelo, de tal manera que de los valores medidos en campo de la conductividad hidráulica inicial (K_c) y final (K_{sc}) destaca lo siguiente (cuadro 3):

1. En T1-150, mientras que el F_t inicial en NL_8 fue de 90 cm h^{-1} , para LAD_8 y LM_8 las velocidades fueron de 120 y 6 cm h^{-1} , respectivamente; el F_e LAD_8 y LM_8

- presentaron valores muy semejantes. En T2-50, mientras Ft inicial para LAD_8 y LM_8 fue 4.6 y 2.1 veces menor que NL_8 para Fe en LAD_8 y LM_8 fue 19.2 y 2.3 veces menor que la velocidad registrada para el testigo. En T3-100, mientras el Ft inicial para LAD_8 y LM_8 son 2.4 y 1.25 menores que NL_8 , el Fe en LAD_8 y LM_8 fue 3.8 y 1.2 veces menor que la velocidad que alcanzó el testigo.
- En T4-10, mientras el Ft inicial para los tratamientos de labranza NL_8 , LAD_8 y LM_8 fue de 240, 120 y 160 cm h^{-1} , respectivamente, el Fe NL_8 presentó 174 cm h^{-1} , y para LAD_8 y LM_8 las velocidades presentaron valores muy cercanos entre ambos con 122 y 120 cm h^{-1} , respectivamente.
 - Los tiempos en que se presenta el flujo estable para las mediciones realizadas tanto en la superficie como a 8 cm de profundidad varían aproximadamente en la misma proporción en que se mueve K_{sc} , cuyas características son las siguientes: a) para la primera profundidad, NL_0 tiene el tiempo más corto con 29 min y el más largo, con 249 min, y corresponde a LM_0 para T1-150 para el primero, y el segundo en el cambio de T3 a T4, respectivamente; b) en la segunda profundidad, NL_8 se logra en 24 min y en los siguientes cambios, de T2 a T3 y de T3 a T4, tiene un promedio de 22 min.

Estos resultados sobre los tiempos en que se logra el flujo estable tienden a estar cerca a

lo reportado por otros autores para distintos tipos de suelos. La mayor parte los establecen en rangos de 30 a 60 min (Kosak y Ahuja, 2005), aunque Dashtaki *et al.* (2009) reportan un máximo de 270 min; asimismo, en cuanto a las tasas de K_{sc} , Gómez-Tagle *et al.* (2008) mencionan que para un suelo arcilloso con $Da = 1.3 \text{ g/g}$, las tasas de infiltración promedio fueron de 223.1 cm h^{-1} , mientras que Pikul y Aase (2003) previamente habían reportado tasas en un rango de 100 a 200 cm h^{-1} ; más recientemente, Schwärzel *et al.* (2011), mediante el uso del permeámetro de disco, reportan valores semejantes de conductividad hidráulica saturada para determinar el efecto a 7.5 cm de profundidad para dos años de laboreo en diez sitios con diferentes características edáficas.

Conclusiones

Aunque los pequeños cambios en la densidad aparente (Da) no clarificaron el efecto de la labranza sobre las propiedades físicas del suelo, es evidente que las distintas tasas de infiltración tanto para flujo dinámico como para flujo estable demostraron que el manejo del suelo mediante los implementos de labranza primaria utilizados en esta investigación producen cambios importantes en el funcionamiento del sistema poroso en la capa de suelo a 8 cm de profundidad, zona de almacenamiento del agua donde el agricultor pone mayor énfasis en la preparación de la cama de raíces para sus cultivos.

Cuadro 4. ANOVA para los índices Fe/Ft con base en las tasas de infiltración estimadas mediante el modelo K-L de los ensayos realizados a nivel de la superficie y a 8 cm de profundidad.

| Trat./prof. | Tensión en mm | | | |
|-------------|---------------|----------|----------|----------|
| | -150 | -100 | -50 | -10 |
| NL_0 | 0.7145 a | 0.9246 a | 0.9862 a | 0.9618 a |
| LAD_0 | 0.6409 a | 0.9244 a | 0.9246 a | 0.9646 a |
| LM_0 | 0.5542 a | 0.8853 a | 0.9228 a | 0.9699 a |
| NL_8 | 0.7808 a | 0.9625 a | 0.9454 a | 0.9749 a |
| LAD_8 | 0.4381 b | 0.6684 b | 0.9182 b | 0.9247 b |
| LM_8 | 0.7439 c | 0.9191 c | 0.9670 c | 0.9695 c |

Letras distintas en una misma columna indican diferencia estadística (Alpha = 0.05).

Suponiendo una capa homogénea y tomando como referencia el comportamiento hidrodinámico que presenta el tratamiento testigo, se confirma que el multiarado es un implemento de labranza alternativo al uso de arado de discos, ya que tiene menos impacto sobre la estructura del suelo y el movimiento del agua a través del perfil bajo condiciones saturadas.

La técnica empleada en la presente investigación es un buen recurso para evaluar cambios inducidos por el laboreo mecánico, o por cualquier otro medio, ya que el movimiento del agua en el suelo está íntimamente relacionado con las funciones primordiales de la porosidad edáfica; en cuanto a su densidad, forma y distribución en el perfil del suelo, es un tema para seguir incursionando en este campo de la investigación científica.

Recibido: 10/06/11

Aceptado: 15/02/12

Referencias

- BLANCO-SEPÚLVEDA, R. La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*. Vol. 43, 2009, pp. 231-239.
- BUCZKO, U., BENS, O., and HÜTTL, R.F. Tillage effects on hydraulic properties and macroporosity in silty and sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 70, 2006, pp. 1998-2007, doi: 10.2136/sssaj2006.0046.
- CADENA, Z.M., MUÑIZ, G.T. y ZERMEÑO, G.A. Desempeño de implementos en términos de consumo de energía y calidad de trabajo. *Agraria Nueva Época*. Vol. I, núm. 3, 2004, pp. 12-18.
- CERVINKA, J., POKORNY, E., and BADALIKOVA, B. Penetration resistance during different kinds of soil cultivation when growing sugar beet. *ISTRO 18th Triennial Conference Proceedings*. June, 15-19, Izmir Turkey, 2009, pp. T4-029: 1-5.
- DASHTAKI, S.G., HOMAEE, M., MAHDIAN, M.H., and KOUCHAKZADEH, M. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resour. Manag.* Vol. 23, 2009, pp. 2777-2790, doi: 10.1007/s11269-009-9408-3.
- DEL VALLE, P.R., ARJONA, E., BUENO, G. y OLESCHKO, L.K. Modelación de procesos del régimen hídrico del suelo. *Terra Latinoamericana*. Vol. 27, 2009, pp. 161-168.
- ELRICK, D.E. and REYNOLDS, W.D. Infiltration from constant-head well permeameters and infiltrometers. *Advances in measurements properties: bringing theory into practice. SSSA Special Publication*. Vol. 30, 1992, pp. 1-24.
- EYNARD, A., SCHUMACHER, T.E., LINDSTROM, M.J., and MALO, D.D. Porosity and pore-size distribution in cultivated Ustolls and Usters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 68, No. 6, 2004, pp. 1927-1934.
- FREY, S.K., RUDOLPH, D.L., and PARKIN, G.W. Spatial and temporal influences on hydraulic properties in macroporous tile-drained soil. *SSSAJ*. Vol. 76, No. 2, 2012, pp. 350-360, doi: 10.2136/sssaj2011.0194.
- FUENTES, J.P., FLURY, M., and BEZDICEK, D.F. Hydraulic properties in a silt loam soil under Natural Prairie, conventional till, and no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 68, 2004, pp. 1679-688.
- GARCÍA, E. Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*. UNAM. Vol. 50, 2003, pp. 67-76, <http://redalyc.uaemex.mx/pdf/569/56905009.pdf>.
- GÓMEZ-TAGLE, CH.A., GÓMEZ-TAGLE, R.A.F., BATLLE-SALES, J., ZEPEDA, C.H., GUEVARA, S.M.A., MALDONADO, L.S. y PINTOR, A.J. Conductividad hidráulica saturada de campo: uso de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo. *Terra Latinoamericana*. Vol. 26, 2008, pp. 287-297.
- GUTIÉRREZ, R.F., GONZÁLEZ, H.A. y SERRATO, C.R. Evaluación tecnológica-explotativa del conjunto multiarado-tractor J.D. Modelo 4235, en labor de preparación primaria de un suelo Vertisol. *Ciencia Ergo Sum*. UAEM. Vol. 11, núm. 2, 2004, pp. 171-176.
- INEGI. *Cartografía de los temas: Edafológica, Geológica, Topográfica y Vegetación y Uso del Suelo. Cubrimiento: Agua Nueva (G14-C43) y Huachichil (G14-C44)*. Escala 1:50,000. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1976.
- KAMPHORST, E.C., JETTEN, V., GUÉRIF, J., PITKÄNEN, J., IVERSEN, B.V., DOUGLAS, J.T., and PAZ, A. Predicting depression storage from soil surface roughness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 64, 2000, pp. 1749-1758.
- KOSAK, J.A. and AHUJA, L.R. Scaling of infiltration and redistribution of water across soil textural classes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 69, 2005, pp. 816-827.
- KOSTIAKOV, A.N. *On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from a dynamic view for the purpose of amelioration*. *Trans. 6th Congr. Int. Soc. Sci. (Russian part A)*, pp. 17-21.
- KRAVCHENKO, A.N., WANG, A.N.W., SMUCKER, A.J.M., and RIVERS, M. L. Long-term differences in tillage and land use affect intra-aggregate pore heterogeneity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 75, 2011, pp. 1658-1666, doi: 10.2136/sssaj2011.0096

- KUNG, K.J., HANKE, M., HELING, C.S., KLADIVKO, E.J., GISH, T.J., STEENHUIS, a T.S., and JAYNES, D.B. Quantifying pore-size spectrum of macropore-type preferential pathways. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 69, No. 4, 2005, pp. 1196-1208.
- LANDINI, A.M., MARTÍNEZ, D., DÍAS, H., SOZA, E., AGNES, D. y SAINATO, C. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. *Cl. Suelo. Argentina.* Vol. 25, núm. 2, 2007, pp. 123-131.
- LIPIEC, J., KUŚB, J., SŁOWIŃSKA-JURKIEWICZC, A., and NOSALEWICZA, A. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil and Tillage Research.* Vol. 89, No. 2, 2005, pp. 210-220.
- LOZANO, Z., ROMERO, H. y BRAVO, C. Influencia de los cultivos de cobertura y el pastoreo sobre las propiedades físicas de un suelo de sabana. *Agrociencia.* Vol. 44, 2010, pp. 135-146.
- MARTÍNEZ-GAMIÑO, M.A. y JASSO-CHAVARRÍA, C. *El multirado, una herramienta en la agricultura de conservación en el Altiplano y Zona media de San Luis Potosí.* Desplegable para productores núm. 22. Soledad de Graciano Sánchez, México: SAGARPA-INIFAP-CIRNE, Fundación Produce, Campo Experimental San Luis-Matehuala, 2006.
- MERRIL, S.D., HUANG, C., ZOBECK, T.M., and TANAKA, D.L. *Use of the Chain set for Scale-Sensitive and Erosion-Relevant Measurement of Soil Surface Roughness.* Sustainable Global Farm. Stott, D.E., Mohtar, R.H., and Steinhard, G.C. (editors). Purdue University and USDA-ARS, National Soil Erosion Research Laboratory, 2001, pp. 594-600.
- MORET, D. and ARRÚE, J.L. Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 71, 2007, pp. 500-506. doi: 10.2136/sssaj2006.0128.
- NARRO, F.E. *Física de suelos con enfoque agrícola.* México, D.F.: Editorial Trillas-UAAAN, 1994, 195 pp.
- PARHI, P.K., MISHRA, S.K., and SINGH, R. A modification to Kostiakov and modified Kostiakov infiltration models. *Water Resour. Manag.* Vol. 21, 2007, pp. 1973-1989, doi: 10.1007/s11269-006-9140-1.
- PERROUX, K.M. and WHITE, I. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Am. J.* Vol. 52, 1988, pp. 1205-1215.
- PETH, S., ROSTEK, J., ZINK, A., and HORN, M.R. Soil testing of dynamic deformation processes of arable soils. *Soil & Tillage Research.* Vol. 106, 2010, pp. 317-328.
- PIKUL, J.L. and AASE, J.K. Water infiltration and storage affected by subsoiling and subsequent tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol. 67, 2003, pp. 859-866.
- RASMUSSEN, K.J. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality: A Scandinavian review. *Soil and Tillage Research.* Vol. 53, No. 1, 1999, pp. 3-14.
- REGALADO, C.M., RITTER, A., ÁLVAREZ, J.B. y MUÑOZ, R.C. *Medida de la sortividad del suelo con el permeámetro de Philip-Dunne.* Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. VI. Álvarez-Benedí, J. y Marinero, P. (editores). 2003, pp. 119-124.
- SALEH, A. Soil roughness measurement, chain method. *J. Soil Water Conservation.* Vol. 48, 1993, pp. 527-592.
- SAS. SAS Institute Inc., SAS® 9.1.2. *Software and qualification tools user's guide.* Cary, NC-USA. México, D.F.: SAS Institute Inc., 2004.
- SCHWÄRZEL, K., CARRICK, S., WAHREN, A., FEGER, K.-H., BODNER, G., and BUCHAN, G. Soil hydraulic properties of recently tilled soil under cropping rotation compared with two-year pasture. *Vadose Zone J.* Vol. 10, 2011, pp. 354-366, doi: 10.2136/vzj2010.0035.
- TAMARI, S. y SALGADO, M. *Datos de la caracterización geométrica del DiPer (Disc Permeámetro).* Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2004.
- UDAWATTA, R.P., ANDERSON, S.H., GANTZER, C.J., and GARRET, H.E. Influence of prairie restoration on measured soil pore characteristics. *J. Environ. Qual.* Vol. 37, 2008a, pp. 219-228.
- UDAWATTA, R.P., GANTZER, C.J., ANDERSON, S.H., and GARRETT, H.E. Agroforestry and grass buffer effects on pore characteristics measured by high-resolution X-ray computed tomography. *SSSAJ.* Vol. 72, No. 2, 2008b, pp. 295-304.
- VENTURA, E., NORTON, L.D., WARD, K., LÓPEZ-BAUTISTA, M., and TAPIA-NARANJO, A. *A new reservoir tillage system for crop production in semiarid areas.* Paper number 032315. ASAE Annual Meeting, 2003.

Abstract

LÓPEZ-SANTOS, A., GONZÁLEZ-CERVANTES, G., CADENA-ZAPATA, M. & GONZÁLEZ-BARRIOS, J.L. *Effect of primary tillage on the physical quality of soil, as evaluated by disk permeameter*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. III, No. 4, October-December, 2012, pp. 127-141.

The effect of primary tillage on the hydraulic conductivity and porosity of clay soil was evaluated. The experiment was conducted in the "Los Angeles" ranch, Saltillo, Coahuila, Mexico (latitude 25.1108° N & length -100.9902° O). The hydraulic conductivity (Kc) was measured in situ with a tension disc permeameter at the surface (Kc₀) and at a depth of 8 cm (Kc₈). A random design treatment for two tillage systems was used, with disk plow (LAD), multi-plow (LM) and a control (NL), and four tension moistures: -150 (T1), -100 (T2), -50 (T3) & -10 (T4) mm. The movement of water in the soil profile up to the saturation point (Ksc) was associated with porosity. Tillage was conducted in June and July 2009, and Kc was measured two months later. Based on readings of water depletion and time, instantaneous infiltration rates were calculated in cm h⁻¹ for Kc and Ksc. NL had the highest values of Ksc for the two levels at which measurements were made; while on the surface in LM₀, Kc₀ had lower values; LAD₀ had the same behavior at a depth of 8 cm in T4-10. It was also noted that the functioning of macropores (> 30 μm) is expressed when the voltage is -10 mm. Ksc₈ speeds for the 4 voltage levels showed no significant difference, while for Kc₈ the differences were highly significant (alpha = 0.05), with average speeds of 87, 37 and 54 cm h⁻¹ for NL, LAD, and LM, respectively.

Keywords: *edaphic porosity, variable head permeameter, multi-plow.*

Dirección institucional de los autores

Dr. Armando López-Santos

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas
Universidad Autónoma Chapingo
Domicilio conocido s/n
35230 Cd. Bermejillo, Durango, México
Miembro de la Red Temática del Agua del Conacyt
Teléfono: +52 (872) 7760 160
Fax: +52 (872) 7760 043
armando.lopezsantos@gmail.com
alopez@chapingo.uruza.edu.mx

Dr. Guillermo González-Cervantes

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas
y Pecuarias
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera
km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
35071 Gómez Palacio, Durango, México
Teléfono: +52 (871) 1590 105
gonzalez.guillermo@inifap.gob.mx

Dr. Martín Cadena-Zapata

Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN)
Departamento de Maquinaria Agrícola
Blvd. Antonio Narro s/n
25315 Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Teléfono: +52 (844) 4110 200
Fax: +52 (844) 4110 200
martincadena@uaaan.mx

Dr. José Luis González-Barrios

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas
y Pecuarias
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación
Agua-Suelo-Planta-Atmósfera
km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
35071 Gómez Palacio, Durango, México
Teléfono: +52 (871) 1590 105
gonzalez.barrios@inifap.gob.mx