

Cambios en el contenido de humedad para labranza y del índice S de calidad física basados en propiedades del suelo

Maiby Pérez^{1*} y Adriana Florentino²

¹Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Apdo. 4579. Maracay 2101, Aragua. Venezuela

²Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela. Maracay 2101, Aragua. Venezuela

RESUMEN

La predicción de los cambios en los contenidos de humedad para la labranza basados en la dinámica de las propiedades y calidad física del suelo es de gran importancia para orientar la labranza y evitar procesos de degradación. Este estudio fue realizado en suelos de la Colonia Agrícola de Turén en el estado Portuguesa, Venezuela, para predecir los cambios en la trabajabilidad (contenido óptimo de humedad para labranza) del suelo en función del contenido de arcilla, materia orgánica y densidad aparente, utilizando para ello ecuaciones de pedotransferencia. Adicionalmente, se estudió la influencia de las propiedades del suelo sobre el intervalo de humedad para la labranza (R) y el índice de calidad física (S), estimados de la curva de retención de humedad ajustada en las 17 condiciones de suelo estudiadas. Los resultados mostraron niveles de degradación del suelo de ninguna a alta, con una degradación física alta presente en suelos de texturas franco limosa, franca y franco arcillo limosa. La trabajabilidad de suelos de textura franca mostró una tendencia a disminuir con el incremento de la densidad aparente y, a aumentar con el incremento en los contenidos de arcilla y materia orgánica, respectivamente. El valor de R mostró una tendencia al descenso con el avance del deterioro estructural en el conjunto de suelos con texturas franca y franco limosa. El índice S presentó valores más bajos en suelos de textura franca altamente degradados. No se observó diferenciación de S relacionada con el nivel de degradación para el resto de las clases texturales.

Palabras clave: calidad física del suelo, funciones de pedotransferencia, intervalo de humedad para labranza, trabajabilidad.

Changes in water content for tillage and physical quality index S based on soil properties

ABSTRACT

The prediction of moisture contents changes for tillage based on the dynamics of physical properties and soil physical quality is of great importance to guide tillage practices and to avoid degradation processes. This study was conducted in soils of the Colonia Agrícola of Turén, Portuguesa state, Venezuela, to predict changes in soil workability (optimum water content for tillage) in function of the clay content, organic matter and bulk density, using pedotransfer equations. Additionally, the influence of soil properties on the water content range for tillage (R) and physical quality index (S) was studied. These parameters were estimated from the water retention curve fitted in all of the 17 soils of the area. The results showed different levels of soil degradation from none to high. The highly degraded soils were included in the silty loam, loam and silty clay loam textural groups. The workability of loamy soils showed a tendency to decrease with the increase in bulk density and to increase with increments in clay and organic matter contents, respectively. The value of R showed a downward trend with the advance of structural deterioration in the overall group of loam and silty loam soils. The lowest values for S were found in loamy soils highly degraded. No differentiation of S was observed related to the degradation level for other textural classes.

Key words: pedotransfer functions, soil physical quality, tillage water range, workability.

*Autor de correspondencia: Maiby Pérez

E-mail: perezma@agr.ucv.ve

INTRODUCCIÓN

La trabajabilidad del suelo es definida como el contenido óptimo de humedad del suelo en el cual la labranza produce el menor nivel de degradación. Su valor corresponde al contenido de agua en el suelo en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad. Este parámetro exhibe cambios en función del manejo y propiedades del suelo, que ameritan ser establecidos para determinar los riesgos de degradación física y orientar el manejo del suelo (Dexter y Bird, 2001). El intervalo de humedad para la labranza (R) es considerado aquel que proporciona una adecuada condición para proteger al suelo de la degradación por compactación o deformación permanente, cuando es labrado. Este indicador de labranza desciende con descensos en la calidad física del suelo (Dexter *et al.*, 2005).

Por otra parte, el índice S definido como la pendiente de la curva de humedad en el punto de inflexión ($d\theta/d(\ln h)$), es referido como un buen indicador de la calidad física y microestructura del suelo (Dexter, 2004b) que se muestra correlacionado positivamente tanto con el intervalo de humedad para labranza (Dexter *et al.*, 2005) como con el grado de estructuración y superficie específica de los agregados en la condición de trabajabilidad (Keller *et al.*, 2007) y crecimiento de raíces (Osuna-Ceja *et al.*, 2006). Los métodos convencionales para estimar indicadores de labranza de suelos disturbados y que pueden ser moldeados, tales como el 0,9 del límite inferior de plasticidad, el índice de consistencia y el potencial mátrico en el valor de la trabajabilidad, son lentos y laboriosos (Mueller *et al.*, 1990; Cadena-Zapata *et al.*, 2002; Mueller *et al.*, 2003). En el caso de suelos no moldeables (arenosos) y aquellos no intervenidos en condiciones naturales, la curva de retención de humedad en la condición del suelo no disturbado provee una mejor base para la predicción de indicadores de labranza del suelo (Dexter y Bird, 2001).

Las ecuaciones de pedotransferencia contribuyen a la obtención rápida, confiable y menos laboriosa de la curva ajustada de humedad (Goncalvez *et al.*, 1997; Bonilla y Cancino, 2001; Wösten y van Genuchten, 1988) al proporcionar la mejor combinación de las variables del suelo de fácil medición (Dexter *et al.*, 2005). A partir de ello, los indicadores de labranza y el índice S pueden predecirse por estar relacionados con las propiedades de retención de humedad de los suelos (Dexter y Bird, 2001; Dexter y Birkas, 2004).

Este estudio se realizó para: 1) determinar la influencia de propiedades del suelo sobre el intervalo de humedad para la labranza y el índice S de calidad física del suelo, y 2) determinar la tendencia de los cambios en la trabajabilidad del suelo, en función de los valores

de densidad aparente, materia orgánica y arcilla en suelos de textura franca.

MATERIALES Y METODOS

Selección, muestreo y determinaciones de características y propiedades del suelo

El experimento se realizó en suelos de la Colonia Agrícola de Turen, estado Portuguesa, Venezuela, cuyas características son contrastantes desde el punto de vista de los contenidos de arena, limo, arcilla, materia orgánica y densidad aparente del suelo. Para el muestreo del suelo en campo se seleccionaron 17 sitios ubicados en suelos con texturas y condiciones de manejo diferentes, en fincas de agricultores. Los suelos además de presentar diferencias en las fracciones del tamaño de partículas, mostraron variaciones de materia orgánica y densidad aparente asociadas al manejo (Cuadros 1 y 2). De esta manera, la investigación incorporó una importante variación en las propiedades y características del suelo para estudiar la influencia de las mismas sobre indicadores de trabajabilidad.

Durante el procedimiento, se tomaron 10 cilindros de suelo no disturbado en cada sitio a la profundidad de 0 - 6 cm en el suelo, separados ± 3 cm unos de otros. Las 17 muestras disturbadas de suelo fueron recolectadas sobre el área de los cilindros, posterior a la toma de muestras no disturbadas y a la misma profundidad (0-6 cm). En el laboratorio, la curva de retención de humedad se determinó en los cilindros de suelo no disturbado. Los distintos potenciales mátricos de agua en el suelo (ψ) en la curva de retención de humedad correspondieron a -3, -10, -33, -100, -500 y -1500 kPa, siguiendo la metodología de Klute (1986). Para ello, los 10 cilindros de suelo de cada sitio fueron divididos en cinco grupos de dos cilindros cada uno, a los cuales les fueron asignados los distintos ψ al azar. Los suelos de textura arenosa fueron equilibrados a -10 kPa y los suelos de textura más fina a -33 kPa. En las muestras disturbadas de suelo, se determinaron la distribución del tamaño de partículas por el método del hidrómetro (Gee y Bauder, 1986) y la materia orgánica por el método de Walkley y Black (1934). La densidad aparente (D_a) fue determinada en los cilindros de suelo no disturbado por el método de Blake y Hartge (1986) y Pla (1983), después de obtenerse las curvas de retención de humedad. Se determinó el espacio poroso total (EPT) en todos los cilindros de suelo, y de aireación del suelo (EPA) en los cilindros equilibrados a -10 y -33 kPa de acuerdo a la textura del suelo y por duplicado, siguiendo la metodología propuesta por Pla (1983). Se calificaron las variables estructurales (D_a ,

Cuadro 1. Distribución del tamaño de partículas de los suelos de la Colonia Agrícola de Turén, estado Portuguesa, agrupados de acuerdo a sus clases texturales.

Suelo	Distribución del tamaño de partículas								Clase textural
	Fracciones arena (μm)						Limo (μm)	Arcilla (μm)	
	Arena (μm)	Muy fina	Fina	Media	Gruesa	Muy gruesa			
50-2000	50-100	100-250	250-500	500-1000	1000-2000	50-2	< 2		
JT	16	11	2	1	1	1	66	18	FL†
AT	32	18	10	3	1	1	57	10	FL
HT	35	22	11	1	0	0	53	13	FL
IT	30	19	10	1	0	0	58	12	FL
OT	30	19	9	1	0	1	57	13	FL
DT	28	19	8	1	0	0	52	19	FL
BT	60	18	26	11	3	2	33	7	Fa
LT	58	22	30	5	0	0	33	9	Fa
CT	69	10	18	25	11	6	25	6	Fa
ÑT	44	25	18	1	0	0	44	12	F
GT	51	23	22	5	0	0	41	8	F
NT	51	21	23	5	1	1	37	12	F
MT	37	21	14	1	0	0	47	15	F
D1	43	26	13	3	1	1	45	12	F
ET	41	11	12	9	3	5	40	20	F
FT	51	13	19	13	3	2	31	18	F
KT	12	8	3	1	0	0	57	31	FAL

† FL: franco limoso, F: franco, FAL: franco arcillo limoso, Fa: franco arenoso

Cuadro 2. Propiedades físicas, materia orgánica, uso y manejo y nivel de degradación de los suelos de la Colonia Agrícola de Turén agrupados de acuerdo a sus clases texturales.

Suelo	Propiedades físicas				Uso y manejo	DF	Clase textural
	Da† (Mg/m^3)	EPT (%)	EPA (%)	MO (%)			
JT	1,28	52	14	7,76	BN _{EA}	N	FL
AT	1,41	47	18	6,65	SD _{MP}	B	FL
HT	1,43	46	14	4,22	LC _{DA}	M	FL
IT	1,40	47	13	3,73	LC _{DA}	M	FL
OT	1,40	47	10	5,43	BN _{DA}	M	FL
DT	1,57	41	12	3,82	LC _{MP}	A	FL
BT	1,45	45	12	3,59	SD _{MP}	B	Fa
LT	1,45	45	17	2,64	LC _{MP}	B	Fa
CT	1,52	43	21	1,71	SD _{EP}	M	Fa
ÑT	1,46	45	18	3,23	LC _{EA}	MB	F
GT	1,35	49	24	2,95	MB _{DA}	MB	F
NT	1,23	54	28	4,22	BN _{EP}	B	F
MT	1,41	47	16	4,35	BN _{EP}	B	F
D1	1,58	40	13	5,34	SD _{MP}	A	F
ET	1,50	43	11	5,37	SD _{MP}	M	F
FT	1,59	40	12	3,28	LC _{MP}	A	F
KT	1,53	42	8	4,25	LC _{EP}	A	FAL

† Da: densidad aparente; EPT: espacio poroso total; EPA: espacio poroso de aireación; MO: contenido de materia orgánica; FL: franco limoso; F: franco; FAL: franco arcillo limoso; Fa: franco arenoso; SD_{MP}: maíz siembra directa- Asentamiento Mata e palo; LC_{MP}: maíz convencional-Asentamiento Mata e palo; MB_{DA}: maíz con barbecho- Detrás Aeropuerto; LC_{DA}: maíz convencional - Detrás Aeropuerto; BN_{DA}: bosque natural- Detrás Aeropuerto BN_{EA}: bosque natural- El Ají; LC_{EA}: maíz convencional- El Ají; LC_{EP}: maíz convencional- El Palmar; BN_{EP}: bosque natural- El Palmar. DF: degradación física del suelo superficial (A: alto; MA: muy alto; M: moderado; B: bajo; N: ninguna).

EPT, EPA) por su grado de limitación física y se determinó el nivel de degradación física (DF) del suelo superficial, siguiendo los valores de referencia sugeridos por Florentino (1998).

Predicción de los cambios en la trabajabilidad de suelos de textura franca

En un estudio previo realizado por Pérez (2008), se reportan los parámetros de van Genuchten (1980) n , α y el contenido de humedad residual del suelo (θ_r) derivados del ajuste de las curvas de retención de humedad para distintos grupos texturales de los 17 suelos bajo estudio (franco arenoso, franco limoso, franco y franco arcillo limoso). Adicionalmente, se reportan las funciones de pedotransferencia (FP) que mostraron la mayor dependencia de θ_r y n en función de las propiedades del suelo para los grupos texturales.

Para el grupo de suelos de textura franca, el estudio de Pérez (2008) refiere las siguientes FP:

$$\theta_r = 0,42348 - 0,00318A - 0,08366Da + 0,03061MO - 0,00261lamf \quad (1)$$

$$\text{Logn} = 0,3571 - 0,00649A + 0,05649Da - 0,06917MO + 0,00288lamf \quad (2)$$

donde lamf: limo+arena muy fina, A: arcilla (kg/100 kg), Da: densidad aparente (Mg/m³) y MO: materia orgánica (kg/100 kg).

La predicción de los cambios de la trabajabilidad en función de la densidad aparente, materia orgánica y arcilla se realizó únicamente sobre los suelos de textura franca identificados como ET, FT, MT y NT (Cuadro 1) utilizando las FP de suelos de textura franca (ecuaciones 1 y 2).

En el caso de la densidad aparente del suelo (Mg/m³) se usaron los valores preestablecidos: 1,40; 1,45; 1,50; 1,55; 1,60; 1,65; 1,70; 1,75; 1,80 y 1,85. Las propiedades intrínsecas de los suelos fueron incorporadas con cada valor de densidad aparente en las ecuaciones 1 y 2 para generar los parámetros de las curvas de humedad ajustadas (θ_r , n). Los valores θ_r y n se incorporaron en las ecuaciones 3 y 4, para el cálculo de la trabajabilidad, estimada mediante las siguientes ecuaciones:

$$\theta_{\text{inflex}} = (\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{1}{m} \right)^{-m} + \theta_r \quad (3)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (4)$$

siendo θ_{inflex} : contenido volumétrico de agua en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad (cm³/cm³), θ_r : humedad residual de la curva ajustada de humedad (cm³/cm³), θ_s : contenido de humedad a saturación de cada cilindro de suelo (cm³/cm³), m : restricción de Mualem (1976) y n : parámetro de van Genuchten (1980).

De la misma manera, se procedió a determinar el efecto de la materia orgánica sobre la trabajabilidad, usando valores del contenido de materia orgánica (kg/100 kg) preestablecidos (0,75; 1,25; 1,5; 2,0; 2,25; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5) e incorporando el resto de las propiedades del suelo en las FP. Para investigar el efecto de la arcilla se varió el contenido de arcilla (kg/100 kg) según los valores: 8; 12; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30. Se consideró que por cada valor de arcilla incorporada en las FP, los contenidos de limo y de arena se presentaban en proporciones iguales, la materia orgánica de acuerdo a lo determinado en cada suelo y la densidad aparente igual a 1,4 Mg/m³. Los valores de la estimación θ_{inflex} se graficaron en función de las variaciones del contenido de arcilla, densidad aparente del suelo y materia orgánica de los suelos. El procedimiento descrito es referido por Dexter *et al.* (2005) en un estudio sobre predicción de la trabajabilidad de los suelos.

Estimación del intervalo de humedad para la labranza y del índice S de calidad del suelo

El intervalo de humedad para la labranza se calculó de acuerdo a la expresión $R = r * 100$, siendo el valor de r igual a la diferencia entre el límite húmedo (LHL) y límite seco para la labranza (LSL), ambos expresados en kg/kg. El valor de R se expresó en kg/100 kg. Se calcularon los contenidos volumétricos de humedad en los límites húmedos y secos para labranza (θ_{LHL} y θ_{LSL}) para los 17 suelos bajo estudio a partir de los parámetros de van Genuchten (θ_r , α , n) derivados del ajuste de las curvas de retención humedad por van Genuchten reportados por Pérez (2008). Se utilizaron directamente los parámetros θ_r , α , n en las ecuaciones correspondientes para obtener θ_{LHL} y θ_{LSL} (ecuaciones 5, 6 y 7). Los valores de LSL y LHL (kg/kg) se calcularon a partir de θ_{LSL} y θ_{LHL} , una vez afectados por la densidad aparente del suelo. La estimación del límite húmedo para la labranza (θ_{LHL}) se hizo mediante la siguiente ecuación:

$$\theta_{\text{LHL}} = \theta_{\text{inflex}} + 0,4(\theta_s - \theta_{\text{inflex}}) \quad (5)$$

siendo θ_{inflex} : contenido volumétrico de agua en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad (cm³/cm³), θ_r : contenido volumétrico residual de la curva ajustada de humedad (cm³/cm³); θ_s : contenido

volumétrico a saturación del suelo (cm^3/cm^3), m : restricción de Mualem (1976) y n : parámetro de van Genuchten (1980)).

El θ_{LSL} correspondió al calculado en este trabajo siguiendo el procedimiento propuesto por Dexter *et al.* (2005), que consiste en lo siguiente: 1) calcular directamente en la curva ajustada de humedad el potencial de presión mátrico (h_{LSL}) correspondiente al LSL, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$h_{\text{LSL}} = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left[\left(\frac{1}{\alpha}\right)^{1/n} \right] n^{1-1/n} \quad (6)$$

siendo α : aproximadamente al inverso del potencial de presión en el punto de inflexión ($1/\text{cm}$) y h : potencial de presión mátrico (cm) y 2) incorporar el valor de h_{LSL} en la ecuación de van Genuchten, en sustitución de h , para el cálculo de θ_{LSL} como sigue:

$$\theta_{\text{LSL}} = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|)^m} \quad (7)$$

En este sentido, Dexter *et al.* (2005) refieren que la fórmula para el cálculo de θ_{LSL} fue generada para suelos con valores de n de van Genuchten entre 1,069 y 2,50 y que los resultados se aproximan notablemente a los de Dexter y Bird (2001) generados mediante un programa interactivo más difícil de resolver. El parámetro n de van Genuchten de los suelos de la Colonia Agrícola de Turén varió entre 1,50 y 2,50 (Pérez, 2008). El valor del índice S de calidad física del suelo, que representa la pendiente en el punto de inflexión de la curva de retención de humedad (θ vs $\ln h$), fue calculado a partir de la ecuación propuesta por Dexter *et al.* (2005), utilizando los parámetros θ_r y n (Pérez, 2008) y el θ_s de los 17 suelos bajo estudio. La ecuación utilizada para calcular S es:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left(1 + \frac{1}{m}\right)^{-(1+m)} \quad (8)$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de la distribución del tamaño de partículas y condición estructural del suelo

En el Cuadro 1 puede observarse la distribución del tamaño de partículas y las clases texturales de los suelos de la Colonia Agrícola de Turén bajo estudio. En cuanto al contenido de arcilla, el mayor contenido se presenta en KT (31%) con texturas FAL, los menores contenidos están presentes en los suelos de BT, CT,

GT y LT (6 -9%) con texturas F y Fa y los contenidos intermedios en AT, DT, ET, FT, HT, IT, JT, D1, MT, NT, NT Y OT (10 -20%) de texturas FL y F.

Se destaca la alta proporción de arena fina y muy fina en la mayoría de los suelos de texturas FL y F, lo cual indica un riesgo de alta separabilidad de estos suelos y, por lo tanto, de formación de sello y costra superficial (Florentino, 1998).

El Cuadro 2 muestra las propiedades y nivel de degradación física del suelo superficial. La diversidad de sistemas de uso y manejo comprendidos en el estudio se muestra representada por los sistemas maíz convencional, maíz convencional-barbecho, maíz bajo siembra directa y bosques naturales en los distintos suelos. De los suelos de textura FL, el suelo del sitio DT bajo maíz con labranza convencional presenta la mayor densidad aparente del suelo ($> 1,4 \text{ Mg/m}^3$) y los menores valores de espacio poroso total y de aireación, que reflejan una alta limitación por degradación física del suelo (Florentino, 1998).

En el resto de los suelos de textura FL se evidencia una degradación estructural de moderada a baja. En especial, el suelo JT bajo bosque natural muestra las mejores propiedades físicas del suelo. En los suelos de textura F la mayor densidad aparente y los valores menores de espacio poroso total y de aireación se observan en los sitios D1 y FT, que reflejan la alta compactación en estos suelos. Las menores densidades aparentes se observan en los sitios GT y NT (el suelo NT bajo bosque natural), de los suelos con textura F mostrando ninguna limitación por degradación física. En los suelos BT, CT y LT con texturas Fa se observan valores de densidad aparente y espacios porosos total y de aireación revelan una moderada a baja limitación por degradación física. El sitio CT presenta el mayor espacio poroso de aireación de los suelos de textura Fa (24 %), asociado posiblemente a la distribución de las arenas con $>$ arena gruesa y media (Cuadro 2). El suelo del sitio KT con la textura más fina (FAL) de todos los suelos, evidencia una alta degradación superficial del suelo. Se presume por esta razón que la compactación del suelo KT podría ocasionar problemas de exceso de humedad en el cultivo y una mayor dificultad para la labranza del suelo.

En cuanto a los niveles de materia orgánica, estos no aportaron en la calificación del nivel de degradación del suelo dada la baja correlación del contenido de materia orgánica con la densidad aparente del suelo ($r = 0,10$) para las distintas clases texturales. Esta relación no refleja lo esperado en cuanto al descenso de la densidad aparente del suelo con el incremento de la materia orgánica. Las calificaciones del grado de limitación física indicada por la densidad aparente

coincidieron en su mayoría con las calificaciones del nivel de degradación del suelo superficial.

Cambios en la trabajabilidad de los suelos con textura franca

En la Figura 1 se puede observar la relación de la densidad aparente con la trabajabilidad del suelo correspondientes al conjunto de suelos de textura franca. En la misma, se visualiza la tendencia notable al descenso de los valores de trabajabilidad con el incremento de la densidad aparente del suelo, cuyos resultados concuerdan con los obtenidos por Dexter y Bird (2001) y Dexter *et al.* (2005) mediante el uso de las FP de Wosten *et al.* (1999), desarrolladas sobre una base de 5521 muestras de suelo para predecir indicadores de labranza. Lo encontrado es indicativo de que el suelo se hace más seco en la condición óptima para la labranza (trabajabilidad) con el avance de la compactación.

Particularmente, Dexter *et al.* (2005) destacan que la densidad aparente del suelo puede ser considerada por separado (sin la interacción de otros componentes del suelo) en la determinación de su efecto directo sobre la trabajabilidad, al mostrarse esta variable estructural independiente de los cambios en la distribución del tamaño de partículas del suelo (por ser el suelo susceptible a la compactación por el uso y manejo inadecuado). El análisis de los valores de trabajabilidad (Figura 1) revela que en ET se presentan valores de trabajabilidad superiores al resto, posiblemente influenciado por los contenidos de arcilla y materia orgánica más altos en este suelo (Cuadros 1 y 2), coincidiendo con lo observado por Zhang *et al.*

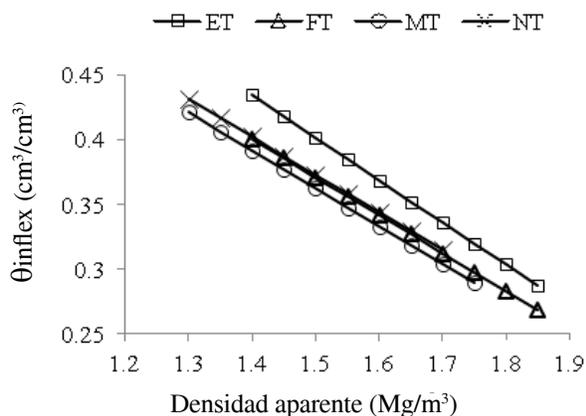


Figura 1. Cambios en la trabajabilidad (θ_{inflex}) en función de la densidad aparente de los suelos de textura franca. Leyenda. ET: Mata e palo- maíz siembra directa; FT: Mata e palo- maíz convencional; MT: El Palmar-bosque natural; NT: El Palmar-bosque natural

(1997), Mosaddeghi *et al.* (2000) y Dexter y Bird (2001). Estos autores mencionan el efecto positivo del incremento de la materia orgánica y la arcilla sobre la trabajabilidad y los límites secos y húmedos para la labranza del suelo. Es necesario considerar que el tipo de arcilla predominante en estos suelos es la biotita, con una baja fracción de montmorillonita, por lo cual no es posible predecir un efecto diferencial de la misma en la respuesta de la trabajabilidad.

En la Figura 2 se evidencia que el incremento del contenido de arcilla afecta positivamente y de manera gradual los valores de trabajabilidad. A medida que aumenta el contenido de arcilla, el contenido de humedad óptimo para la labranza también es ligeramente mayor, lo cual coincide con lo obtenido por Dexter y Bird (2001) y Dexter *et al.* (2005). Estos últimos autores enfatizan que el efecto menos notable del contenido de arcilla observado sobre la trabajabilidad podría estar basada en que la arcilla y materia orgánica se presentan, en muchos casos, altamente correlacionadas con la densidad aparente. Por ello, el estudio por separado de dichos contenidos podría no revelar una clara influencia directa sobre la trabajabilidad, sino más bien, un efecto indirecto de ambos sobre la estructuración y densidad aparente del suelo.

Adicionalmente, el efecto del contenido de arcilla podría variar en función del nivel correspondiente de materia orgánica del suelo (Wosten *et al.*, 1999) y de la actividad de distintos tipos de minerales de arcilla y de cationes intercambiables asociados a la misma (Williams *et al.*, 1993) que influyen en las diferentes respuestas de la interacción agua-suelo. En el análisis de la predicción para estos suelos (Figura 2), es posible resaltar solamente

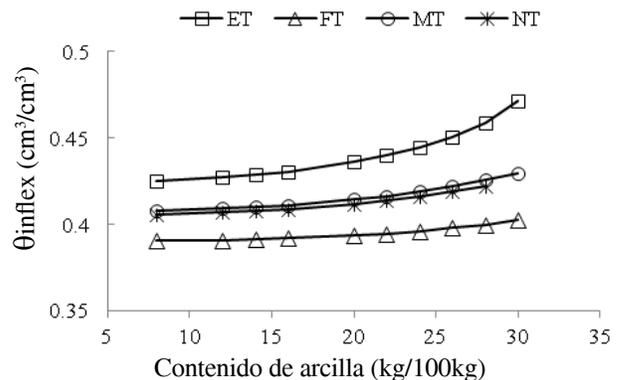


Figura 2. Cambios en la trabajabilidad (θ_{inflex}) en función del contenido de arcilla de los suelos de textura franca. Leyenda. ET: Mata e palo- maíz siembra directa; FT: Mata e palo- maíz convencional; MT: El Palmar-bosque natural; NT: El Palmar-bosque natural

el efecto positivo de los mayores contenidos de materia orgánica en MT, NT y ET sobre la trabajabilidad, en comparación al suelo FT, considerando que la densidad aparente se mantuvo constante en el procedimiento de predicción ($1,4 \text{ Mg/m}^3$).

El análisis de los cambios en la trabajabilidad con variaciones de la materia orgánica (Figura 3) revela que en suelos de textura franca se produce un incremento de la trabajabilidad con el aumento en el contenido de materia orgánica del suelo, de manera similar a lo encontrado por Dexter *et al.* (2005). En este sentido, Dexter y Bird (2001) encontraron que la predicción del efecto de la materia orgánica por sí sola no fue significativa sobre los indicadores de labranza derivados de las funciones de pedotransferencia de la curva de humedad y que el efecto combinado de la materia orgánica sobre la densidad aparente y de ésta en relación inversa sobre la trabajabilidad, fue la evidencia más resaltante.

Relación del intervalo de humedad para la labranza derivado de la curva de humedad con el índice S de calidad física del suelo

El límite húmedo para labranza se encuentra normalmente asociada al límite inferior de plasticidad (LIP), por encima de lo cual se produce daño por deformación del suelo, mientras que el LSL representa el contenido de agua del suelo que origina en el mismo una fuerza mecánica igual a dos veces la fuerza en la condición de trabajabilidad (Dexter y Bird (2001)). El LSL se muestra también en función a la máxima energía

y tiempo que puede ser invertidos para labrar el suelo seco; esta energía en relación inversa con la humedad del mismo se selecciona a discreción del productor en la mayoría de las veces (Dexter *et al.*, 2005).

En la Figura 4 se muestran los valores obtenidos de los LSL y LHL para la labranza de los suelos bajo estudio, calculados a partir de la curva de retención de humedad ajustada de van Genuchten, de acuerdo a Dexter *et al.* (2005). Se destaca que el mayor descenso de LSL respecto a LHL en el suelo KT, con alto contenido de arcilla, se contrapone a lo señalado por Dexter y Bird (2001), quienes predicen un incremento sustancial de LSL bajo la influencia del aumento en el contenido de arcilla para otros suelos.

En el Cuadro 3 se observan los valores de R. En los suelos de textura franco limosa el valor de R fue más alto en el suelo del bosque natural JT ($17,5 \text{ kg}/100 \text{ kg}$) y más bajo en el suelo DT altamente degradado ($2,92 \text{ kg}/100 \text{ kg}$). De manera similar, los suelos de textura franca que muestran valores de R menores, a su vez exhiben evidencias de degradación física (D1, ET, FT) y, posiblemente obedecen a esta condición estructural, los valores de R más bajos observados ($< 5 \text{ kg}/100 \text{ kg}$). El resto de los suelos con calificaciones de moderada a muy baja limitación física dentro de las distintas clases texturales presentan valores intermedios ($5-8 \text{ kg}/100 \text{ kg}$). De este grupo de suelos, se excluye al suelo de textura franco arcillo limosa KT, cuyo valor de LSL muy bajo influyó sobre el valor de R superior resultante ($10,91 \text{ kg}/100 \text{ kg}$). Esto difiere de lo esperado en cuanto al aumento significativo de la dureza del suelo a un contenido de agua superior en LSL y, consecuentemente, a una reducción de R, a medida que se incrementa el contenido de arcilla del suelo (Dexter y Bird, 2001).

La Figura 5 muestra la tendencia a la disminución de R con la degradación de la condición estructural en el conjunto de los suelos con texturas franco y franco limosos (a través del aumento de la densidad aparente) con una clara excepción del valor atípico del suelo JT, cuyo valor de R exhibe un salto exponencial. Esto sugiere la influencia sobre R del alto contenido de materia orgánica y muy baja densidad aparente en JT, bajo bosque altamente preservado, cuyos valores contrastan con el resto de los suelos.

Los resultados hacen posible presumir, a partir de valores de R más altos en suelos con moderada a ninguna limitación física (indistintamente de la clase textural) que el intervalo de humedad para la labranza pudo ser afectado por las propiedades del suelo en el área bajo estudio. Es posible además señalar, que la ampliación

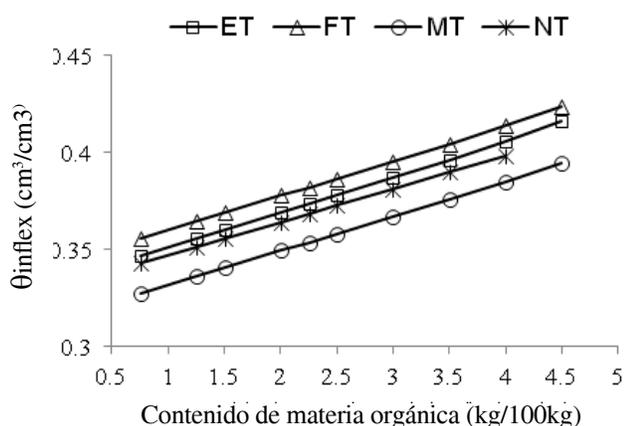


Figura 3. Cambios en la trabajabilidad (θ_{inflex}) en función del contenido de materia orgánica de los suelos de textura franca. Leyenda. ET: Mata e palo-maíz siembra directa; FT: Mata e palo-maíz convencional; MT: El Palmar-bosque natural; NT: El Palmar-bosque natural

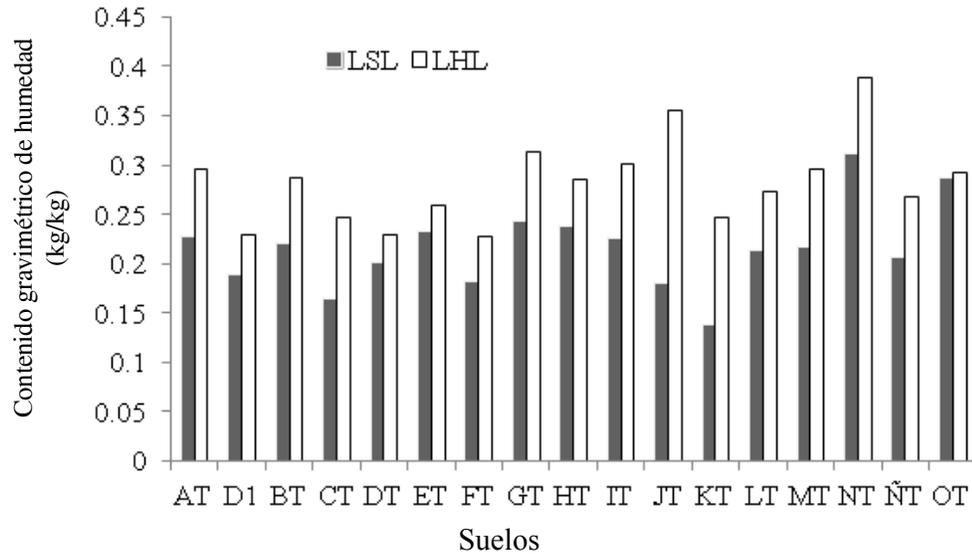


Figura 4. Límites seco (LSL) y húmedo (LHL) para la labranza de los suelos.

Cuadro 3. Intervalo de humedad para la labranza (R), grado de limitación física de los suelos agrupados de acuerdo a la clase textural.

Suelo	Clase textural	R(kg/100 kg)	DF
JT	FL†	17,52	N
AT	FL	6,80	B
HT	FL	4,72	M
IT	FL	7,56	M
OT	FL	6,61	M
DT	FL	2,92	A
BT	Fa	6,66	B
LT	Fa	5,98	B
CT	Fa	8,22	M
ÑT	F	6,12	MB
GT	F	7,00	MB
NT	F	7,62	B
MT	F	7,82	B
D1	F	3,95	A
ET	F	2,68	M
FT	F	4,48	A
KT	FAL	10,91	A

† FL: franco limoso; F: franco; FAL: franco arcillo limoso; Fa: franco arenoso; SD: maíz siembra directa; LC: maíz convencional-ajonjolí o maíz en secuencia; MB: maíz convencional (dos años antes barbecho); BN: bosque natural; Da: densidad aparente de campo; EPT: espacio poroso total; EPA: espacio poroso de aireación; MO: contenido de materia orgánica; DF: degradación física del suelo superficial. MA: muy alto; A: alto; M: moderado; B: bajo; MB: muy bajo; N: ninguna.

del valor de R podría llevar implícito el descenso de LSL, al disminuir la dureza del suelo a un contenido de humedad menor en LSL. Con ello, se presenta la posibilidad de labrar el suelo más seco sin ocasionar efectos negativos por una excesiva pulverización o una alta de energía de mecanización (alto consumo de combustible) derivada del uso de tractores de alta potencia para ejercer tracción. No obstante, es necesario considerar la limitación que una baja resistencia mecánica del suelo húmedo impondría a la traficabilidad y al alcance de adecuados niveles de eficiencia de tracción y consumo de combustible de los tractores que efectúan las operaciones de labranza (Linares, 1996). Así también, el aumento de R permitiría disponer de mayores

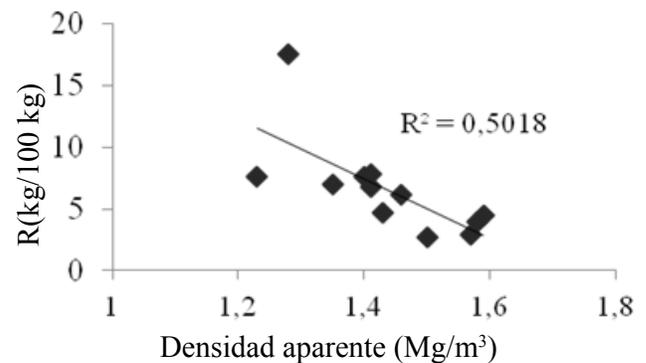


Figura 5. Relación del intervalo de humedad para la labranza (R) con la densidad aparente de suelos de textura media (franco y franco limoso).

contenidos de agua que incrementen la probabilidad de coincidencia de la trabajabilidad con el balance hídrico típico de la zona.

En el Cuadro 4 se muestran los valores del índice S de calidad física de los suelos agrupados en clases texturales. Se evidencia un descenso del índice S de calidad física con el incremento del nivel de degradación para los suelos dentro de la clase textural franca. De esta manera, se obtienen los valores más bajos de S en los suelos de textura franca con alta degradación física. En el resto de las clases texturales, la diferenciación de los valores del índice S de calidad física de los suelos no muestra relación con los niveles de degradación física de los suelos, A pesar de que Dexter (2004a) señala que el límite entre un suelo considerado de pobre y otro de buena calidad física es coincidente con un valor aproximado de $S = 0,035$. Este valor de S, o menor a este, no se presentó en ninguno de los suelos bajo estudio. Por otra parte, Dexter y Birkas (2004) refieren que una buena condición física del suelo se asocia a valores de $S > 0,035$, en la cual no se producen grandes terrones debido a la labranza (> 50 mm) y, paralelamente, se obtiene una alta proporción de pequeños agregados a la siembra y un buen desarrollo del cultivo. Adicionalmente, Dexter (2004b) hace referencia a valores de $S = 0,027$ como típico de suelos bajo mecanización convencional y

Cuadro 4. Índice S de calidad física, grado de limitación física de los suelos agrupados de acuerdo a la clase textural.

Suelo	S [†]	DF	Clase textural
JT	0,082	N	FL
AT	0,057	B	FL
HT	0,052	M	FL
IT	0,046	M	FL
OT	0,071	M	FL
DT	0,089	A	FL
BT	0,062	B	Fa
LT	0,139	B	Fa
CT	0,169	M	Fa
ÑT	0,141	MB	F
GT	0,139	MB	F
NT	0,070	B	F
MT	0,063	B	F
D1	0,046	A	F
ET	0,038	M	F
FT	0,048	A	F
KT	0,052	A	FAL

[†] S: pendiente de la curva de retención de humedad (índice de calidad física del suelo). FL: franco limoso; F: franco; FAL: franco arcillo limoso; Fa: franco arenoso; DF: degradación física del suelo superficial. MA: muy alto; A: alto; M: moderado; B: bajo; MB: muy bajo; N: ninguna.

$S = 0,058$ como el correspondiente a suelos sin impacto de la maquinaria (suelos no degradados).

CONCLUSIONES

Este estudio permitió predecir el efecto positivo de una buena condición estructural y del incremento en los contenidos de materia orgánica y arcilla sobre el aumento de la trabajabilidad de suelos de textura franca de la Colonia Agrícola bajo estudio. Esto favorece el menor riesgo de deterioro de los suelos frente al manejo mecanizado. En efecto, en estos suelos, el contenido óptimo de humedad para la labranza aumentó en proporción directa con el contenido de arcilla y materia orgánica del suelo, pero disminuyó con el aumento de la densidad aparente del suelo.

El intervalo de humedad para la labranza mostró una tendencia al descenso con el avance del deterioro estructural en el conjunto de suelos de texturas franca y franco limosa, algunos de los cuales presentaron niveles de degradación física altos.

El índice S de calidad física es más bajo en suelos de textura franca altamente degradados estructuralmente, con una tendencia a disminuir con el nivel de degradación de estos suelos. No existe diferenciación de S atribuida al nivel de degradación para el resto de las clases texturales.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela y al FONACIT por el apoyo financiero brindado a través de los proyectos N° PI 00-6225-06 y G-2002000557, respectivamente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blake J.; L. Hartge. 1986. Bulk Density. In Klute A. (Ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2^{da} ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, EUA. pp. 349-378.
- Bonilla, C.; J. Cancino. 2001. Estimación del contenido de humedad del suelo mediante el empleo de funciones de pedotransferencia. *Agric. Téc. (Chile)* 61:326-338.
- Cadena- Zapata, M.; W. Hoogmoed; U. Perdok. 2002. Field studies to assess the workable range of soils in the Tropical zone of Veracruz, Mexico. *Soil Till. Res.* 68:83-92.

- Dexter, A.; A. Bird. 2001. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. *Soil Till. Res.* 57:203-212.
- Dexter, A. 2004a. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of texture, density and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Dexter, A. 2004b. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, tith and hard- setting. *Geoderma* 120: 215-225.
- Dexter, A.; M.Birkas. 2004. Prediction of the soil structure produced by tillage. *Soil Till. Res.* 79:233-238.
- Dexter, A.; E. Czyz; M. Birka's; E. Diaz-Pereira; E. Dumitrud; R. Enache; H. Fleige; R. Horn; K. Rajkaj; D. de la Rosa; C. Simota. 2005. SIDASS project. Part 3. The optimum and the range of water content for tillage – further developments. *Soil Till. Res.* 85:29-37.
- Florentino, A. 1998. Guía para la evaluación de la degradación del suelo y de la sostenibilidad del uso de la tierra: selección de indicadores físicos y valores críticos. Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía – Universidad Central de Venezuela. Maracay, Venezuela. 8 p.
- Geer R.; P. Bauder. 1986. Particlesize. *In Klute A. (Ed.) Methods of soil analysis. Parte 1. 2^{da} ed. Agron. Monogr.No. 9.ASA y SSSA, Madison, EUA. pp. 443-461.*
- Goncalvez, M.; L. Pereira; F. Leij. 1997. Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of Portuguese soils. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 387-400.
- Keller, T.; J. Arvidsson; A. Dexter. 2007. Soil structures produced by tillage as affected by soil water content and the physical quality of soil. *Soil Till. Res.* 92: 45-52.
- Klute, A. 1986. Water relations: Laboratory methods. *In Klute A. (Ed.) Methods of soil analysis. Parte 1. 2^{da} ed. Agron. Monogr. No. 9.ASA y SSSA, Madison, EUA. pp. 635-662.*
- Linares, P. 1996. Teoría de la tracción de los tractores agrícolas. Monografías. Universidad Politécnica de Madrid. ETSIA. Madrid. España. 157 p.
- Mosaddeghi, M.; M. Hajabbasi; A. Hemmat; M. Afyuni. 2000. Soil compatibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil Till. Res.* 55: 87-97.
- Mualem, Y. 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Res. Res.* 12: 513-522.
- Mueller, L.; P. Tiller; H. Kretschmer. 1990. Workability of alluvial soils in response to drainage status. *Soil Till. Res.* 16: 273-287.
- Mueller, L.; U. Schindler; N. Fausey; R. Lal. 2003. Comparison of methods for estimating maximum soil water content for optimum workability. *Soil Till. Res.* 72: 9-20.
- Osuna –Ceja E.; B. Figueroa; K. Oleschko; M. Flores; M. Martínez; F. González. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia* 40: 27-38.
- Pla, I. 1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Alcance UCV* 37. 93 p.
- Pérez, M. 2008. Relación de la trabajabilidad con la curva de humedad y propiedades del suelo. *Rev. Fac. Agron. UCV* 34: 141-164.
- Van Genuchten, M. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892-898.
- Walkley, A.; I. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37: 29-38.
- Williams, J.; P. Ross; K. Bristow. 1993. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure, and organic carbon. *In van Genuchten, M.; L.J. Lund (Eds.) Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. Univ. California, Riverside, EUA. pp. 427 – 441.*
- Wosten, J.; M. Van Genuchten. 1988. Using texture and other properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52:1762-1770.

Wosten, J.; A. Lilly; A. Nemes; C. Le Bas. 1999. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma* 90: 169-185.

Zhang, H.; K. Hartge; H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 239-245.