

Intervalo de agua menos limitante en función de propiedades del suelo^a

Least Limiting Water Range as a function of soil properties

Maiby Y. Pérez¹, Adriana Florentino²

¹ Instituto de Ingeniería Agrícola. Facultad de Agronomía. Universidad Central de Venezuela (perezm@agr.ucv.ve) ²Instituto de Edafología. Facultad de Agronomía Universidad Central de Venezuela. (florentinoa@agr.ucv.ve)

RESUMEN

El Intervalo de agua menos limitante (IAML) es considerado un indicador de calidad física del suelo que muestra variaciones asociadas al tamaño de partículas, contenido de materia orgánica y condición estructural de los suelos. Esta investigación fue realizada en muestras superficiales de suelos de la Colonia Agrícola de Turen con el objetivo de caracterizar el IAML mediante el uso de relaciones de pedotransferencia y determinar su respuesta a cambios en la estructura. Los suelos fueron cultivados con maíz bajo diferentes condiciones de labranza (no labranza, convencional y convencional-barbecho) y no cultivados bajo bosque natural. De acuerdo a los resultados, tanto la degradación del suelo bajo labranza convencional como del alto contenido de arcilla suelo ejercieron el mayor impacto negativo sobre el IAML (suelo franco arcillo limoso). Esto debido al menor contenido de agua asociado a una pobre aireación y mayor contenido de agua en la condición de alta resistencia mecánica. Al contrario, en suelos no degradados y con alto contenido de arena (franco arenosos), el IAML fue el más alto, y se presentó entre los contenidos de agua a capacidad de campo y en el punto de marchitez permanente, que prevalecieron como límites críticos del IAML. En suelos franco limosos y francos el IAML descendió con incrementos en la densidad aparente y contenido de arcilla asociado a los contenidos de agua a capacidad de campo y a una alta resistencia mecánica.

Palabras clave: propiedades físicas; contenido de agua; resistencia mecánica, aireación; calidad del suelo; IAML

ABSTRACT

The least limiting water range (LLWR) is considered a soil physical quality index associated with variations of particles size, organic matter content and soils structural conditions. A study was carried out on soils located at the Colonia Agrícola of Turen with the aim to characterize the LLWR with the use of pedotransfer functions and the LLWR response to soil structural changes. The soils were cropped with maize under different tillage conditions (no tillage, conventional and conventional - resting period) and compared with a soil under native forest. According to the results, soil physical degradation under conventional tillage and high clay content had the highest negative impact on the LLWR for the silty clay loam soil. This is mainly due to the lower water content associated with poor aeration and the higher water content related to high mechanical resistance in this soil. In contrast, in non degraded soils with high sand content (sandy loam soils) the LLWR showed the highest values at field capacity at the permanent wilting point, which were the upper and lower critical limits of LLWR. In the silty loam and loam soils the LLWR declined with increasing bulk density and clay content associated to field capacity and high mechanical resistance.

Key words: physical properties; water content; mechanical resistance; aeration; soil quality; LLWR

INTRODUCCIÓN

La calidad del suelo es definida como la capacidad que tiene un tipo específico de suelo para funcionar dentro de un ecosistema natural o intervenido, manteniendo o mejorando la productividad de plantas o animales, la calidad del agua o aire y como soporte de estructuras para el hábitat y la salud humana (Karlen *et al.*, 2003). En la respuesta de la calidad del suelo intervienen factores físicos

^a Recibido: 24-01-13; Aceptado: 22-07-13

e interacciones más complejas, como son los relacionados con el balance agua-aire y propiedades físicas y mecánicas del suelo (Gómez *et al.*, 2002). En suelos compactados, el aumento de la densidad aparente y la reducción de la porosidad se integran para crear restricciones en la capacidad de aireación de la rizósfera asociada a los cultivos, aumentando la resistencia mecánica a la penetración de raíces y disminuyendo así la calidad física del suelo (Leao *et al.*, 2006). Estas variables físicas se incorporan en el denominado Intervalo de Agua Menos Limitante (IAML) para ayudar a explicar el rendimiento de los cultivos y árboles forestales frente a la compactación (Siegel-Issem *et al.*, 2005). El IAML se define como el intervalo de contenido de agua del suelo en el cual las limitaciones al crecimiento de la planta, asociadas con el potencial de agua, aireación y resistencia del suelo a la penetración de raíces, son mínimas (Tormena *et al.*, 1999). Da Silva *et al.* (1994) usaron el término IAML para reconocer que la respuesta del cultivo ocurría a lo largo de una continuidad de contenidos de agua en el suelo y que los límites críticos del IAML se encontraban asociados a los contenidos volumétricos de humedad en las siguientes condiciones: i) capacidad de campo y punto de marchitez permanente, potenciales de agua (ψ) -10 kPa y -1500 kPa, respectivamente; ii) porosidad de aireación igual al 10%, y iii) resistencia mecánica del suelo equivalente a 2000 kPa. La potencialidad del IAML como índice de calidad estructural del suelo es alta cuando se establece la naturaleza y el grado de relación con la productividad del cultivo y respuesta a las prácticas de manejo (Da Silva y Kay, 1996; Siegel-Issem *et al.*, 2005) y puede ser estimado a partir de propiedades del suelo de fácil medición y bajo costo que se integran en relaciones de pedotransferencia (Da Silva y Kay, 1996; Tormena *et al.*, 1999). Estudios relacionados con el IAML como indicador de la calidad física del suelo, referidos por Da Silva y Kay (1997 b) demostraron que el cultivo maíz resultó más vulnerable a los períodos de sequía o a alta precipitación al crecer en suelos con valores bajos del IAML. Por otra parte, Benjamín *et al.* (2003), reportaron que el IAML resultó ser un buen indicador de la calidad física de un suelo cultivado con trigo (*Triticum aestivum* L.) cuando el suelo alcanzó la máxima capacidad de retención de agua, presumiéndose una influencia positiva de la baja resistencia mecánica y adecuada aireación del suelo en esa condición. En sistemas de pastoreo intensivo de corta duración, la calidad física del suelo evaluada a través del IAML se mostró muy limitante para el desarrollo potencial de raíces, moderadamente limitante en el sistema continuo y mínimo en el pastoreo de sabana; el IAML se relacionó con la degradación que respondió a la carga animal en los sistemas (Leao *et al.*, 2006). El IAML es también considerado en la evaluación de la influencia de la compactación sobre las pérdidas de nitrógeno del suelo, a partir de lo cual se observó un incremento del IAML con el tiempo de incubación de residuos de leguminosas y con el descenso de la tasa de incorporación, en interacción con la degradación del suelo (Drury *et al.*, 2003). Debido a que el uso intensivo de la mecanización en los sistemas agrícolas de Venezuela ha conducido a la compactación creciente del suelo y a cambios en las propiedades físicas, se plantea la necesidad de cuantificar los niveles de afectación del rendimiento de los cultivos, la identificación de las propiedades del suelo que controlan el deterioro sucesivo de su calidad y la integración de variables del suelo en indicadores de calidad que resulten fáciles de usar y estimar. Esta investigación surge con el objetivo de integrar propiedades intrínsecas del suelo en el denominado IAML, estimándolo a partir de modelos de pedotransferencia para su utilización sobre una base rutinaria en el diagnóstico y evaluación de la calidad estructural de suelos de la Colonia Agrícola de Turen, estado Portuguesa.

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.-Características generales de la zona bajo estudio

La Colonia Agrícola de Turen se ubica al Oeste del Municipio Turen, estado Portuguesa, Venezuela entre los 09° 00' 16" y 09° 29' 04" de latitud Norte y los 68° 39' 50" y 69° 12' 17" de longitud Oeste (Fudeco, 2005) El clima corresponde a un bosque seco tropical con una temperatura media anual de 27°C; precipitación media anual de 1424 mm; evaporación media anual de 1975 mm; evapotranspiración media anual de 1481 mm y humedad relativa anual promedio de 46%. Se presentan 5 meses secos desde diciembre a abril y 6 meses lluviosos desde mayo hasta octubre y una altitud de 160 msnm y paisaje de topografía plana y pendiente menor al 4%. (http://www.enturen.com/vision_general.html) (2008).

2.2. Selección y muestreo de los suelos.

Se localizaron en el terreno las posiciones fisiográficas de eje, napa y cubeta y distintas unidades texturales de suelo correspondientes a estas posiciones en fincas de agricultores. Dentro de cada

clase textural se delimitaron subunidades representadas por áreas con usos y manejos diferentes (sistemas de producción desde convencional hasta sistemas alternativos y bajo bosque natural) que conformarían las distintas combinaciones de textura - materia orgánica - densidad aparente del suelo (**Cuadro 1**), en concordancia con los criterios seguidos por Da Silva *et al.*, 1994; Da Silva y Kay, 1997^a, Araujo *et al.*, 2007. Se seleccionaron 17 sitios y se tomaron muestras alteradas y no alteradas en la capa superficial del suelo a la profundidad de 0 -6 cm. Las muestras no alteradas se obtuvieron mediante un toma muestras tipo "Uhland" (cilindros de 5 cm de diámetro x 5 cm de altura), siguiendo la metodología descrita por Pla (1983). Se utilizó un diseño totalmente aleatorizado y se tomaron 10 cilindros de suelo no alterado a poca distancia uno de otro (± 10 cm) en cada sitio, para un total de 170 muestras. Las muestras alteradas de suelo (1 muestra/sitio), fueron recolectadas durante el inicio del período lluvioso 2006 y tamizadas en laboratorio para obtener fracciones de suelo < 2 mm. Los suelos bajo estudio se caracterizaron por ser predominantemente profundos y del orden Inceptisol, con topografía plana (Comerma *et al.*, 1992). El sistema maíz de siembra directa con una duración aproximada de 10 años continuos, consistió en el uso de segadoras rotativas para el corte de malezas en pre siembra (sin quema de residuos) y de sembradoras de siembra directa con herbicidas. El sistema maíz convencional consistió en pases sucesivos de rastra y aplicación de herbicidas pre y postemergentes para la siembra del cultivo en el período de secano, con algunas áreas sobre bancales para eliminar el exceso de humedad superficial. Los bosques naturales representaron áreas protegidas en fincas de agricultores que sirven como reservorio de madera y fauna, para delimitar linderos y como barrera rompe vientos. El maíz convencional con barbecho consistió en la producción de maíz bajo manejo convencional antecedido por un período de barbecho (descanso) de tres años.

La distribución del tamaño de partículas (DTP) fue realizada en las muestras alteradas de suelo por el método de hidrómetro (Gee y Bauder, 1986) y el contenido de materia orgánica (MO) por el método de Walkley y Black (1934) (óxido-reducción de la materia orgánica, determinado por espectrometría). La densidad aparente (Da) y la porosidad total (EPT) se determinaron en los cilindros no alterados del suelo (10/suelo) y el espacio poroso de aireación (EPA) se determinó a los potenciales mátricos de -10 kPa (suelos textura gruesa) y -33 kPa (texturas más finas) por duplicado, siguiendo la metodología descrita por Blake y Hartge (1986) y Pla (1983). Lo anterior permitió la caracterización del estado estructural de los suelos. También fue determinado el nivel de degradación física del suelo (DE) siguiendo a Florentino (1998). Los resultados de DTP, clase textural, MO, Da, EPT, EPA y DE fueron reportados por Pérez (2013). La curva de retención de humedad del suelo (CRH), se determinó directamente sobre las muestras no alteradas, sometiéndolas a los distintos potenciales mátricos de agua en el suelo (ψ_m), correspondientes a -3,3, -10, -33, -100, -500 y -1500 kPa, los cuales fueron establecidos en los cilindros de suelo no alterado mediante las técnicas estandarizadas de mesa de tensión y ollas de presión (Klute, 1986). Para ello, los 10 cilindros de suelo de cada sitio fueron divididos en cinco grupos de 2 cilindros cada uno, a los cuales les fueron asignados aleatoriamente los distintos ψ_m , siguiendo la metodología descrita por Da Silva y Kay (1997a). La humedad a capacidad de campo (θ_{CC}) se estimó a partir de la curva de retención de humedad a $\psi_m = -10$ kPa en suelos de textura arenosa y a $\psi_m = -33$ kPa en los suelos de textura más pesada. La humedad en el punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) se asoció a un $\psi_m = -1500$ kPa. Las curvas de resistencia del suelo (CRS) se obtuvieron posteriormente a la CRH en las muestras equilibradas a los ψ_m señalados hasta -1500 kPa y luego almacenadas durante 10-15 días a 4° C para evitar cualquier gradiente de agua dentro de la muestra. Siguiendo la metodología de Bradford (1986) se realizó la inserción de un penetrómetro de punta cónica (cono de 30° y 4 mm de diámetro basal), montado en una Máquina Universal para Ensayos, marca Galdabini. La velocidad de penetración fue similar a la usada por Betz *et al.* (1998) de 2 mm/min, en el centro y a lo largo de la profundidad del cilindro de suelo. Se obtuvieron graficas de resistencia del suelo (RS) en función del ψ_m (CRS). Los resultados de CRH y CRS fueron reportados por Pérez (2010).

Cuadro 1. Localización, tipos de uso y manejo de los suelos

Sitio/suelo ^a	Localidad/Finca	Uso y Manejo del suelo
AT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.
D1	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.
BT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.
CT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	SD: maíz bajo siembra directa control de malezas mecánico y químico. Sin quema de residuos ni cultivos en secuencia.
DT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva. Camellones de drenaje
ET	Asentamiento Mata e Palo (MP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva.
FT	Asentamiento Mata e Palo (MP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva
GT	Detrás del Aeropuerto (DA)	MB: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Barbecho en norte verano por tres años.
HT	Detrás del Aeropuerto (DA)	MC: maíz convencional preparación con rastra - cuatro a seis pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva
IT	Detrás del Aeropuerto (DA)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva
JT	El Ají EA)	BN: Bosque natural con diversidad de árboles gran tamaño
KT	El Palmar (EP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva
LT	El Palmar (EP)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva
MT	El Palmar (EP)	BN: Bosque natural con diversidad de arboles de mediano a gran tamaño
NT	El Palmar (EP)	BN: Bosque natural con diversidad de arboles de mediano a gran tamaño
ÑT	El Ají (EA)	MC: maíz convencional preparación con rastra - tres a cuatro pases-control de malezas químico. Cultivo (maíz o ajonjolí) en secuencia con preparación intensiva
OT	Detrás del Aeropuerto (DA)	BN: Bosque natural con diversidad de arboles de mediano a gran tamaño

2.3. Modelos de ajuste de las curvas de humedad y resistencia del suelo

Los valores utilizados para generar los modelos de pedotransferencia (FP) de CRH y CRS fueron sometidos a un análisis exploratorio de normalidad y homogeneidad de la varianza. Adicionalmente, se analizó la matriz de correlación de las variables del suelo: arena (a), limo (L), arcilla (A), arena muy fina (amf), arena fina (af) y de las combinaciones arena fina + arena media + arena gruesa + arena muy gruesa (afmg), limo + arena muy fina (Lamf), limo + arena muy fina + arena fina (Lamff), materia orgánica (MO), densidad aparente (Da), contenido de humedad volumétrica ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) y resistencia mecánica del suelo (kPa). La curva de retención de humedad fue ajustada empleando la función usada por Ross *et al.* (1991); Da Silva *et al.* (1994):

$$\theta = e^{(a+bDa)} \psi^m c \quad (\text{Ecuación 1})$$

ó alternativamente:

$$\ln \theta = a + bDa + c \ln \psi^m \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde θ , es el contenido volumétrico de humedad, ψ^m el potencial mátrico, Da es la densidad aparente y a, b y c son matrices constantes a ser determinadas estadísticamente.

Se incluyeron en la matriz de regresión valores positivos del potencial mátrico de agua en el suelo ($-\psi^m$), equivalente a la presión de extracción de agua del suelo. Los valores más altos de la presión de extracción de agua equivalen a potenciales mátricos más negativos en el suelo (suelos más secos). Las técnicas de regresión lineal múltiple y el método de selección de variables paso a paso se utilizaron para modelar la influencia de a, L, A, amf, af, afmg, Lamf, Lamff, MO, Da y ψ^m sobre el contenido de humedad volumétrica del suelo a los diferentes potenciales mátricos, siguiendo lo descrito por Williams *et al.* (1992) y usando el programa Statistix 8. El método stepwise permitió descartar las variables que afectaban la colinealidad del modelo y aportaban poco al explicarlo. De esta manera la ecuación 2 se expresó de acuerdo a:

$$\ln \theta = a_0 + a_1 p_1 + a_2 p_2 + \dots + a_i p_i + (b_0 + b_1 p_1 + b_2 p_2 + \dots + b_i p_i) Da + (c_0 + c_1 p_1 + c_2 p_2 + \dots + c_i p_i) \ln \psi^m \quad (\text{Ecuación 3})$$

donde p_i son las propiedades del suelo y a_i , b_i y c_i son constantes.

La información de la curva de resistencia del suelo fue ajustada en función de θ y Da, usando el modelo propuesto por Busscher (1990):

$$R = d \theta^e Da^f \quad (\text{Ecuación 4})$$

o alternativamente

$$\ln RS = \ln d + e \ln \theta + f \ln Da \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde d, e y f son matrices constantes, θ es el contenido volumétrico de agua y RS la resistencia del suelo. Las técnicas de regresión lineal múltiple y el método de selección de variables paso a paso se utilizaron para modelar la influencia de a, L, A, af, amf, afmg, lamf, lamff, MO, θ y Da, siguiendo el procedimiento usado para el ajuste de CRH. La expresión matemática que se obtuvo (Ecuación 6) siguió la forma:

$$\ln RS = d c_0 + d_1 p_1 + d_2 p_2 + \dots + d_i p_i + (e_0 + e_1 p_1 + e_2 p_2 + \dots + e_i p_i) \ln \theta + (f_0 + f_1 p_1 + f_2 p_2 + \dots + f_i p_i) \ln Da \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde p_i son las propiedades del suelo y labranza; d_i , e_i y f_i son matrices constantes.

2.4. Estimación de los límites críticos y del IAML

El límite superior del IAML representa el contenido volumétrico de humedad a capacidad de campo (θ_{CC}) o a la porosidad de aireación igual a 10% (θ_{pa}) (Grable y Siemer, 1968), mientras que el límite inferior es el contenido volumétrico de humedad en el punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) (Richards y Weaver, 1944) o a una resistencia del suelo igual a 2000 kPa (θ_{rs}) (Taylor *et al.*, 1966). El valor de θ_{pa} es igual a $\theta_{SATURACION} - 0,1$, es decir, a la porosidad total menos el 10%. La ecuación se expresa como sigue:

$$\theta_{pa} = \left[1 - \frac{D_a}{D_r} \right] - 0,1 \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde: D_a es la densidad aparente y D_r la densidad real del suelo.

Las FP seleccionadas (Ecuaciones 3 y 6) para distintas clases texturales del suelo fueron reportadas por Pérez (2010). Las mismas se usaron para estimar los contenidos volumétricos de agua asociados a los límites críticos del IAML para cada D_a medida, tal como lo hicieron Da Silva *et al.* (1994), Da Silva y Kay (1997a), Betz *et al.* (1998). En tal sentido, la humedad a capacidad de campo (θ_{CC}) y en el punto de marchitez permanente (θ_{pmp}) fueron estimados usando la FP de la curva de humedad (Ecuación 3); mientras que, la θ_{rs} fue estimada usando el modelo de la curva de resistencia del suelo (Ecuación 6). La θ_{pa} fue determinada para cada valor de densidad aparente del suelo mediante la ecuación 7 y el IAML se expresó como el resultado de la diferencia entre el límite crítico superior y el límite inferior. El límite superior es la humedad más baja de θ_{CC} o θ_{pa} , mientras que, el límite inferior es la humedad más alta entre θ_{pmp} y θ_{rs} . La determinación de los límites críticos superiores e inferiores del IAML se hizo para cada cilindro de suelo. Se usaron para ello las expresiones:

- $\theta_{pa} - \theta_{CC} > 0$; se consideró a θ_{CC} como límite crítico superior del IAML
- $\theta_{pa} - \theta_{CC} < 0$; se consideró a θ_{pa} como el límite crítico superior
- $\theta_{pmp} - \theta_{rs} < 0$; se consideró θ_{rs} como el límite inferior del IAML
- $\theta_{pmp} - \theta_{rs} > 0$, correspondió a θ_{pmp} como el límite crítico inferior.

La asignación de los límites críticos se hizo considerando el total de muestras (170 cilindros) y el análisis de la importancia relativa de los límites (%) se realizó posteriormente. De la misma manera se realizó la predicción de los límites críticos (θ_{pa} , θ_{CC} , θ_{pmp} , θ_{rs}) para distintas clases texturales del suelo a partir de las funciones de pedotransferencia de CRH y CRS seleccionadas y se graficó la respuesta obtenida, en función de la densidad aparente de los suelos de la Colonia Agrícola de Turen. En el procedimiento se utilizaron valores de densidad aparente del suelo dentro de un intervalo de variación preestablecido, así como también, se incorporaron en la FP los contenidos de materia orgánica y tamaño de partículas de cada clase textural de suelo representativa.

Los valores de densidad aparente (Mg m^{-3}) seleccionados para la predicción, de acuerdo a los grupos texturales de suelo fueron los siguientes:

1,40, 1,45, 1,50, 1,55, 1,60, 1,65, 1,70, 1,75, 1,80, 1,85 Mg m^{-3} para los grupos texturales F, FL y Fa.
1,20, 1,25, 1,30, 1,35, 1,40, 1,45, 1,50, 1,55, 1,60, 1,65 Mg m^{-3} para el grupo textural FA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Predicción de los límites críticos superiores e inferiores del Intervalo de Agua Menos Limitante (IAML).

En las Figuras 1 y 2, se observan los límites críticos del IAML asociados a la capacidad de campo (θ_{CC}), al punto de marchitez permanente (θ_{pmp}), porosidad de aireación igual al 10% (θ_{pa}) y resistencia mecánica del suelo ≥ 2000 kPa (θ_{rs}) en función de la densidad aparente, de suelos representativos de distintas clases texturales. En la predicción de los límites críticos se observaron relaciones con la densidad aparente similares para los suelos de distintas clases texturales (FAL, FL, F y Fa) que son: 1) negativa con θ_{pa} ; 2) marcadamente positiva con θ_{rs} y, 3) ligeramente negativa con θ_{CC} y θ_{pmp} .

Estas relaciones también investigadas por Da Silva *et al.* (1994) señalan que, tanto θ_{CC} como θ_{pmp} , se relacionaron negativamente con la densidad aparente en suelos FL y de manera positiva en suelos Fa (en un corto intervalo de densidades aparentes). De manera contraria, Betz *et al.* (1998) y Tormena *et al.* (1999) observan siempre un incremento de θ_{CC} y θ_{pmp} con la densidad aparente, que atribuyeron a la diferencia textural de los suelos bajo estudio (mas arcillosos que los suelos de Da Silva *et al.*, 1994). Adicionalmente, los resultados obtenidos revelan que el IAML presenta valores más reducidos con el incremento de la densidad aparente para los suelos con texturas FAL, FL y F. En cambio, el rango del IAML se amplía en suelos Fa.

De acuerdo a la predicción, el IAML estaría limitado por: 1) una cercanía de los límites críticos en el suelo FAL, 2) por el θ_{CC} y θ_{rs} en suelos F, FL y, 3) por el θ_{CC} y θ_{pmp} en suelos Fa. En los suelos de textura media- fina F, FL y FAL se observa un mayor impacto de la densidad aparente sobre el θ_{rs} y de éste sobre el IAML.

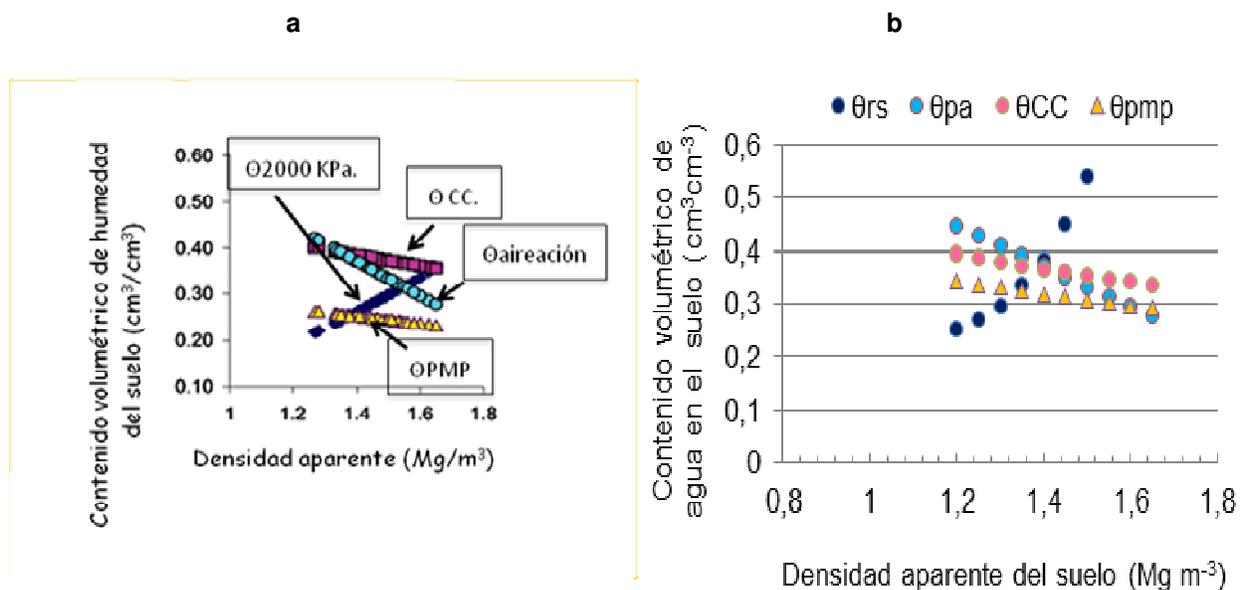


Figura 1. Variación del contenido volumétrico de agua en el suelo correspondiente a la predicción de los límites críticos θ_{CC} (capacidad de campo), θ_{pmp} (punto de marchitez permanente), θ_{pa} (humedad a una aireación igual al 10%) y θ_{rs} (humedad a una resistencia mecánica ≥ 2000 kPa) con la densidad aparente del suelo obtenidos por :a) Da Silva *et al.* (1994) y b) correspondiente al suelo KT con textura franco arcillo limosa (FAL) de la Colonia Agrícola de Turen.

Como resultado de lo anterior, en el suelo FAL se presentan limitaciones de θ_{rs} que hacen cero el IAML, a partir de una densidad aparente igual a $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ (donde coinciden las líneas de los límites críticos). De manera similar, se observa en suelos de texturas FL y F (Figura 2a y 2b) a densidades aparentes cercanas a $1,54$ y $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente. Por el contrario, en suelos Fa (Figura 2c) las limitaciones por el incremento de θ_{rs} (alta resistencia mecánica a alta humedad del suelo) y también por el descenso de θ_{pa} , prevalecen a partir de una mayor densidad aparente, alrededor de $1,64 \text{ Mg m}^{-3}$, hasta alcanzar un IAML igual a cero a $1,7 \text{ Mg m}^{-3}$.

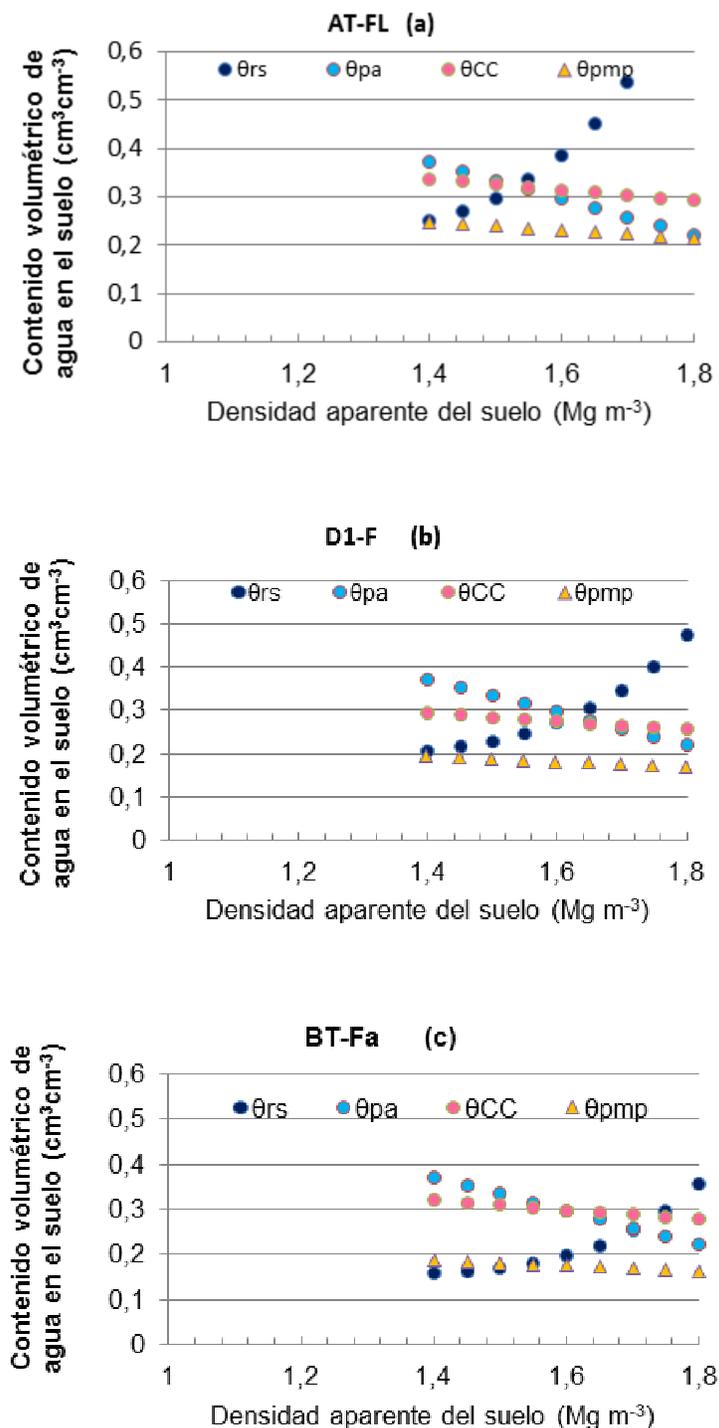


Figura 2. Variación del contenido de agua en el suelo correspondiente a la predicción de los límites críticos θ_{CC} (capacidad de campo), θ_{pmp} (punto de marchitez permanente), θ_{pa} (humedad a una porosidad de aireación igual al 10%) y θ_{rs} (humedad a una resistencia mecánica \geq 2000 kPa) con la densidad aparente del suelo a) suelo AT de textura franco limosa (FL); b) suelo D1 con textura franca (F) y, c) suelo BT con textura franco arenosa (Fa).

Caracterización de los límites críticos y del IAML general de los suelos

Las variaciones de los valores individuales de los límites críticos del IAML, θ_{CC} , θ_{pmp} y θ_{pa} en función de la densidad aparente de todos los suelos, se muestran en la Figura 3. Las variaciones del límite crítico θ_{rs} en función de la densidad aparente para todos los suelos, se muestra en la Figura 4.

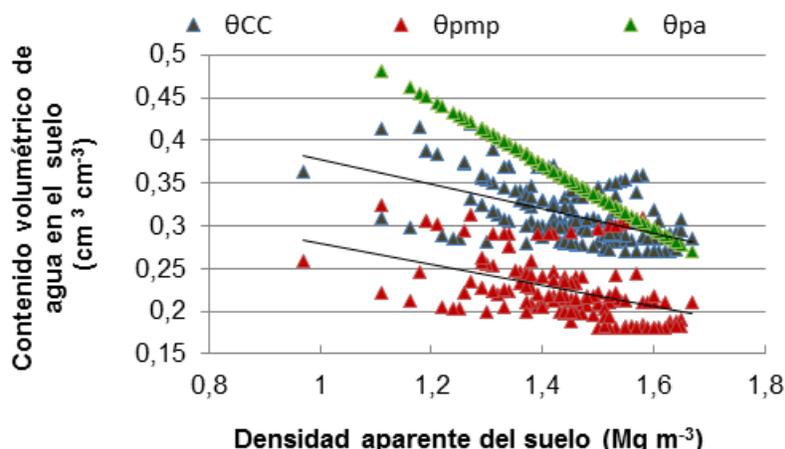


Figura 3. Variación de los límites críticos θ_{CC} (capacidad de campo), θ_{pmp} (punto de marchitez permanente) y θ_{pa} (humedad a una aireación igual al 10%) con la densidad aparente del suelo (valores individuales).

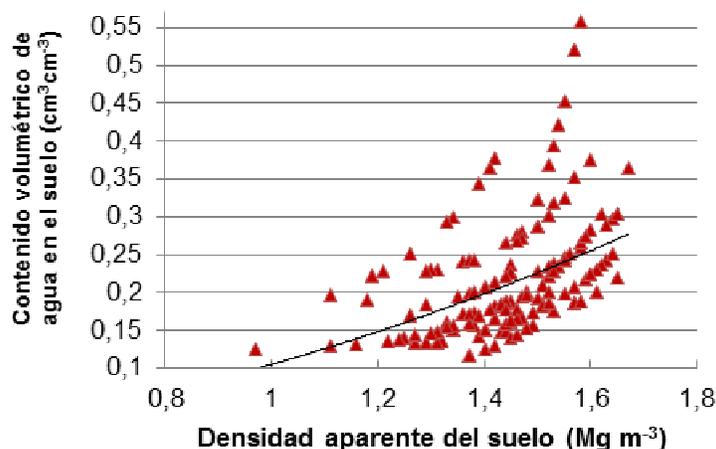


Figura 4. Variación del contenido volumétrico de agua en el suelo a una resistencia mecánica de 2000 kPa (θ_{rs}) con la densidad aparente del suelo (valores individuales).

Los resultados de las tendencias mostradas en las Figuras 3 y 4 revelaron: 1) un mayor impacto de la densidad aparente del suelo sobre θ_{pa} y θ_{rs} ; 2) una tendencia lineal negativa de la θ_{pa} con la densidad aparente del suelo, 3) una leve tendencia negativa de θ_{CC} y θ_{pmp} con la densidad aparente del suelo y, 3) una tendencia positiva de θ_{rs} con la densidad aparente.

Por otra parte, los valores promedios de los límites críticos del IAML obtenidos (**Cuadro 2**) reflejan que, el límite crítico inferior del IAML, correspondiente a θ_{rs} , se presentó aproximadamente en la mitad de los suelos, algunos de éstos con evidencias claras de degradación física (DT, D1, ET y KT). Adicionalmente, el límite crítico superior θ_{CC} , afectó a la mayoría de los suelos, excepto al suelo KT (FAL), que

el límite crítico inferior del IAML, correspondiente a θ_{rs} , se presentó aproximadamente en la mitad de los suelos, algunos de éstos con evidencias claras de degradación física (DT, D1, ET y KT). Adicionalmente, el límite crítico superior θ_{CC} , afectó a la mayoría de los suelos, excepto al suelo KT (FAL), que mostró como límite superior del IAML a θ_{pa} . Lo encontrado demuestra que la humedad del suelo no se reduce significativamente en la condición de escasa aireación (siendo menor θ_{CC}) en la mayoría de los suelos (94%), en cambio, la incidencia del aumento de θ_{rs} (41%) y de θ_{pmp} (59%), se presenta de manera similar sobre el IAML de los suelos.

También es posible observar que, los valores promedios del IAML van desde 0 hasta 0,14 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ (Cuadro 2) presentándose los valores más bajos en los suelos DT, ET, D1 y KT; superiores en BT, CT e intermedios en el resto. La mayor reducción del IAML se observa en los suelos de textura fina con evidencias de degradación física (DT, ET, D1 y KT), en algunos de los cuales, se presentan θ_{pa} y θ_{rs} como límites críticos del IAML (Cuadro 2). Particularmente, la humedad del suelo de textura FAL (KT), se muestra tan baja en la condición de aireación limitante al desarrollo de las raíces (θ_{pa}) y tan alta en la condición de alta resistencia mecánica (θ_{rs}) que ambos favorecen la reducción del intervalo de agua menos limitante promedio del suelo (hasta cero) y pone en evidencia un posible deterioro estructural del mismo. El suelo KT presenta un valor de densidad aparente promedio $>1,36 \text{ Mg m}^{-3}$, a partir del cual, es posible encontrar limitaciones de θ_{rs} , de acuerdo a los resultados obtenidos (Figura 1).

Cuadro 2. Intervalo de agua menos limitante (IAML) promedio, límites críticos del IAML, clase textural, contenido de arcilla y degradación estructural de los suelos de la Colonia Agrícola de Turen.

Suelo	Límites críticos del IAML ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	IAML promedio ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	Clase textural	A ($\text{kg}100\text{kg}^{-1}$)	DE	MO ($\text{kg}100\text{kg}^{-1}$)
AT	$\theta_{CC}-\theta_{rs}$	0,05	FL	10	N	6,65 (A)
DT	$\theta_{CC}-\theta_{rs}$	0,02	FL	19	A	3,82 (M)
HT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,09	FL	13	N	4,22 (A)
IT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,09	FL	12	N	3,73 (M)
JT	$\theta_{CC}-\theta_{rs} - \theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,06	FL	18	N	7,76 (MA)
OT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,09	FL	13	N	5,43 (A)
D1	$\theta_{CC}-\theta_{rs}$	0,02	F	12	A	5,34 (A)
ET	$\theta_{CC}-\theta_{rs}$	0,01	F	20	M	5,37 (A)
FT	$\theta_{CC}-\theta_{rs}$	0,05	F	18	A	3,28 (M)
GT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,09	F	8	N	2,95 (M)
MT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,08	F	15	N	4,35 (A)
NT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,09	F	12	N	4,22 (A)
ÑT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,08	F	12	N	3,23 (M)
BT	$\theta_{CC}-\theta_{rs} - \theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,12	Fa	7	M	3,59 (M)
CT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,14	Fa	6	B	1,71 (B)
LT	$\theta_{CC}-\theta_{pmp}$	0,09	Fa	9	B	2,64 (M)
KT	$\theta_{pa}-\theta_{rs}$	0	FAL	31	A	4,25 (A)

IAML: intervalo de agua menos limitante; **θ_{CC} :** contenido volumétrico de humedad a $\Psi^m = -10$ ó -33 kPa; **θ_{rs} :** contenido volumétrico de humedad a una resistencia mecánica del suelo de 2000 kPa; **θ_{pmp} :** contenido volumétrico de humedad en el punto de marchitez permanente (-1500 kPa); **θ_{pa} :** contenido volumétrico de humedad a aireación igual a 0,10; **MO:** materia orgánica, **A:** contenido de arcilla. **AT:** maíz siembra directa; **D1:** maíz siembra directa; **BT:** maíz siembra directa; **CT:** maíz siembra directa; **DT:** maíz convencional; **ET:** maíz siembra directa; **FT:** maíz convencional; **GT:** maíz con barbecho; **HT:** maíz convencional; **IT:** maíz convencional; **JT:** bosque natural; **KT:** maíz convencional; **LT:** maíz convencional; **MT:** bosque natural; **NT:** bosque natural; **ÑT:** maíz convencional; **OT:** bosque natural; **Fa:** textura franco arenosa; **F:** textura franca, **FL:** textura franco limosa, **FAL:** textura franco arcillo limosa. **DE:** degradación estructural (Florentino, 1998); **N:** ninguna limitación; **B:** baja limitación; **M:** moderada limitación; **A:** alta limitación; **MA:** muy alta limitación. Niveles de MO en el suelo: **MA:** muy alto; **A:** alto; **M:** moderado; **B:** bajo; **N:** ninguna

En contraste con los resultados encontrados por otros investigadores, Da Silva et al. (1994) señalaron que el IAML estuvo limitado por θ_{rs} y θ_{pa} en un suelo franco limoso, a través de la mayor parte del intervalo de densidades aparentes medidas ($>1,37 \text{ Mg m}^{-3}$). Por el contrario, el suelo franco arenoso no presentó a la θ_{pa} como límite superior, pero sí a θ_{rs} como límite inferior del IAML, en una pequeña parte del intervalo de densidades aparentes más altas ($>1,44 \text{ Mg m}^{-3}$). Estos autores refieren que el IAML fue más reducido cuando el límite superior estuvo determinado por el θ_{pa} y el límite inferior por θ_{rs} . Por otra parte, Tormena et al. (1999) refieren que el efecto de la densidad aparente fue marcado sobre un suelo arcilloso, sugiriendo que el IAML podría resultar más sensible a los efectos de la estructura sobre θ_{rs} , asociada a los valores de resistencia limitantes entre 1000 y 4000 kPa. Así mismo, Betz et al. (1998) indican que tanto el θ_{rs} como el θ_{pa} prevalecieron a lo largo del intervalo de densidades aparentes de un suelo arcilloso compactado bajo labranza cero.

En la Figura 5, se muestran los valores individuales del IAML estimados de cada suelo (10 cilindros/suelo) y su variación en función de la densidad aparente, mostrando una tendencia general inversa de los valores del IAML con la densidad aparente, a partir de densidades aparentes superiores a $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ en la gama de suelos estudiados. De manera particular, en suelos con los valores más altos del IAML, los mismos descienden por encima de densidades aparentes de $1,18$ y $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$.

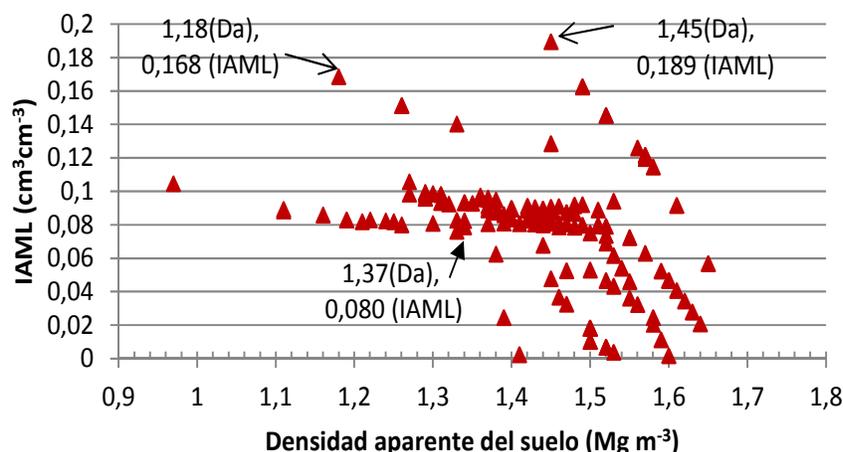


Figura 5. Intervalo de Agua Menos Limitante (IAML) en función de la densidad aparente de los suelos de la Colonia Agrícola de Turen (valores individuales)

La Figura 6 muestra los valores obtenidos del IAML de la diferencia entre las combinaciones de los límites críticos superiores e inferiores de este indicador, estimados en función de la densidad aparente del suelo. De acuerdo a lo encontrado, los efectos más importantes de la densidad aparente del suelo sobre el IAML se presentan en condiciones de compactación, donde el límite crítico inferior corresponde a una humedad del suelo $\geq 2000 \text{ kPa}$ de resistencia mecánica (θ_{rs}) y los límites críticos superiores corresponden a θ_{pa} o a θ_{CC} , es decir ($\theta_{pa}-\theta_{rs}$) o ($\theta_{CC}-\theta_{rs}$). Contrariamente, cuando el IAML proviene de la diferencia entre θ_{CC} y θ_{pmp} , es decir $\text{IAML} = \theta_{CC} - \theta_{pmp}$, el intervalo se muestra influenciado en menor grado por la densidad aparente; y por tanto, con menos variación frente a los cambios estructurales del suelo.

Al respecto, Da Silva et al. (1994); Da Silva y Kay (1997a); Betz et al. (1998) coinciden con la tendencia observada anteriormente en los suelos bajo estudio. Los mismos reportan que el $\text{IAML} = \theta_{pa} - \theta_{rs}$ manifiesta una mayor respuesta a la condición estructural del suelo (densidad aparente), que al agua disponible definida como la diferencia entre la humedad a capacidad de campo y el punto de marchitez permanente ($\theta_{CC} - \theta_{pmp}$). De manera similar, Carter et al. (1999) argumentan que el agua disponible se observó más relacionada a los constituyentes básicos del suelo (tamaño de partículas), mientras que el $\text{IAML} = \theta_{pa} - \theta_{rs}$ respondió a la estructura del suelo y, a los componentes básicos ya mencionados. Por esta razón, Kay y Grant (1996) cuestionan la utilidad del concepto de agua disponible ($\theta_{CC} - \theta_{pmp}$) al referir que la misma es fuertemente influenciada por la textura y carbono

orgánico del suelo, pero no responde a incrementos de la densidad del suelo. Debido a ello, podrían presentarse limitaciones al crecimiento de las plantas atribuidas a una pobre aireación y alta resistencia mecánica, aun cuando la humedad del suelo se encuentre entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente.

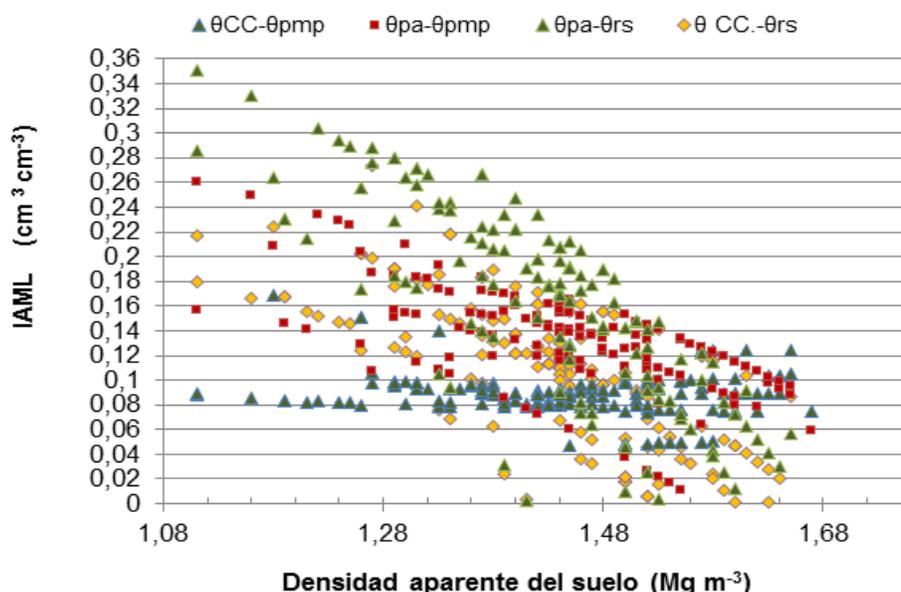


Figura 6. Variación del intervalo de agua menos limitante (IAML) derivado de los límites: ($\theta_{CC} - \theta_{pmp}$), ($\theta_{pa} - \theta_{pmp}$), ($\theta_{pa} - \theta_{rs}$) y ($\theta_{CC} - \theta_{rs}$) en función de la densidad aparente de los suelos de La Colonia Agrícola de Turen. θ_{CC} : capacidad de campo, θ_{pmp} : punto de marchitez permanente, θ_{pa} : humedad a una aireación igual al 10% y θ_{rs} : humedad a una resistencia mecánica ≥ 2000 kPa.

La respuesta del IAML de los suelos bajo estudio, se mostró muy poco relacionada con la MO del suelo ($r=0,2156$) posiblemente debido a la amplia diferenciación tanto textural como en la calidad de la MO asociada al cultivo de maíz bajo siembra directa. Por otro lado, los resultados del IAML mostraron un claro descenso con el incremento en el contenido de arcilla ($r=0,63$) hasta un valor igual a cero, coincidiendo con Da Silva y Kay (1997a). Estos autores refirieron un efecto preponderante de la arcilla independiente de la densidad aparente sobre el IAML. Contrariamente, Da Silva *et al.* (1994), evidenciaron un ligero incremento del IAML con el contenido de carbono orgánico del suelo, asociado a un intervalo menor de densidades aparentes y en respuesta al efecto indirecto del carbono orgánico sobre la modificación de la condición estructural. Adicionalmente al efecto de la textura, Chan *et al.* (2005) revelan un efecto adicional de la compactación sobre el IAML al encontrar que un suelo arcilloso compactado por la rueda del tractor, alcanzó un IAML (igual a 0) inferior al observado en la zona no compactada. Este efecto mencionado se observa relacionado con los valores muy bajos del IAML de los suelos con un importante contenido de arcilla y degradados estructuralmente (DT, ET, KT) en el área bajo estudio.

Caracterización del Intervalo de Agua Menos Limitante por clases texturales y tipos de uso y manejo del suelo

La Figura 7, muestra el comportamiento del IAML (desde 0 hasta $0,105 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) en función de la densidad aparente en suelos de textura **franco limosa** bajo maíz con siembra directa, maíz convencional y bosque natural. Es posible destacar el comportamiento del suelo OT (bajo bosque natural) con pocos cambios del IAML dentro del intervalo de densidades aparentes, en comparación al suelo JT (también bajo bosque) que muestra fuertes reducciones a partir de una densidad aparente $> 1,33 \text{ Mg m}^{-3}$. El IAML del suelo AT bajo siembra directa responde sensiblemente a pequeños cambios en la condición estructural del suelo (a partir de densidades aparentes $> 1,44 \text{ Mg m}^{-3}$), no obstante, la mayoría de los

puntos de muestreo (70%) revelan una mayor disponibilidad de agua en el suelo y señalan un posible efecto de recuperación progresiva debido a la aplicación de la siembra directa, con énfasis en la capa superficial, tal como lo señalan Palma *et al.* (2009).

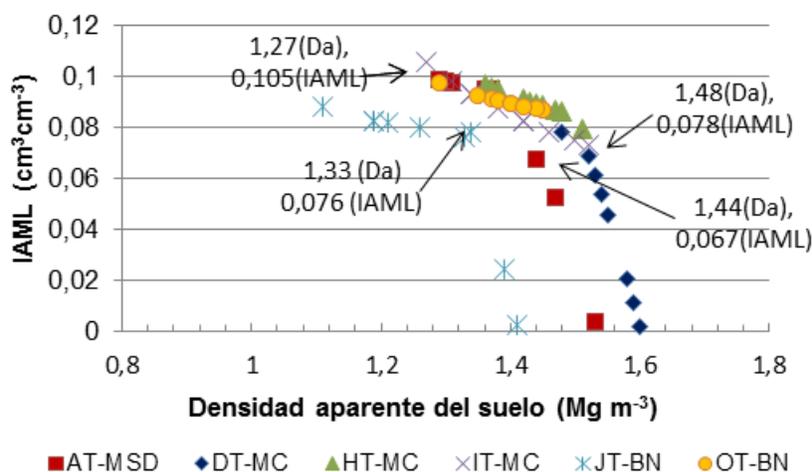


Figura 7. Intervalo de agua menos limitante (IAML) en función de la densidad aparente del suelo en suelos de textura franco limosa (AT, DT, HT, IT, JT, OT) bajo maíz siembra directa (MSD), maíz convencional (MC) y bosque natural (BN) en la Colonia Agrícola de Turen.

Da Silva *et al.* (2004), refieren que, en suelos cultivados bajo siembra directa la incidencia de una alta resistencia mecánica del suelo puede superarse, en buena parte, por la influencia de bioporos del suelo, que reducen el nivel de restricciones mecánicas a la penetración de raíces y benefician al cultivo. Así también, mediante el mantenimiento de una humedad más alta en la superficie del suelo bajo este sistema conservacionista (Betz *et al.*, 1998).

En los suelos como IT y HT, ambos bajo maíz convencional (Figura 7), las densidades aparentes se incrementan ligeramente sin ocasionar una caída brusca del IAML, en comparación con el suelo DT, cuya densidad aparente $>1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ pone de manifiesto el deterioro estructural de este suelo y un mayor impacto sobre la reducción del IAML. Se presume que el incremento en el contenido de arcilla en el suelo DT (Cuadro 2) contribuye a una mayor limitación mecánica a la penetración de las raíces en este suelo compactado y a una menor disponibilidad de agua en el suelo para los cultivos, tal como fue encontrado por Da Silva y Kay (1997a).

En la Figura 8, se muestra el IAML en función de la densidad aparente de suelos de textura **Franca** bajo maíz con siembra directa, maíz convencional y bosque natural en la Colonia Agrícola de Turen. El IAML presentó valores desde 0,007 hasta 0,105 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, de manera semejante que en suelos de la clase textural franco limosa (Figura 7). En los suelos MT, NT (bosques naturales) y GT, ÑT (maíz convencional) se determinó un menor impacto de la densidad aparente sobre el IAML. Contrariamente, el IAML se mostró más influenciado por cambios en la densidad aparente de los suelos FT, D1 y ET.

Los suelos FT (maíz convencional) y D1 (siembra directa) con mayores densidades aparentes, en comparación al resto de los suelos, mostraron un comportamiento similar entre ambos, mediante la reducción brusca del IAML a partir de una densidad aparente próxima a $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$. La alta degradación física presente en los suelos D1 y FT, podría explicar mayoritariamente, el descenso de los valores promedios del IAML, al prevalecer la influencia de θ_{rs} como límite crítico inferior del IAML en esta condición de compactación (Cuadro 2).

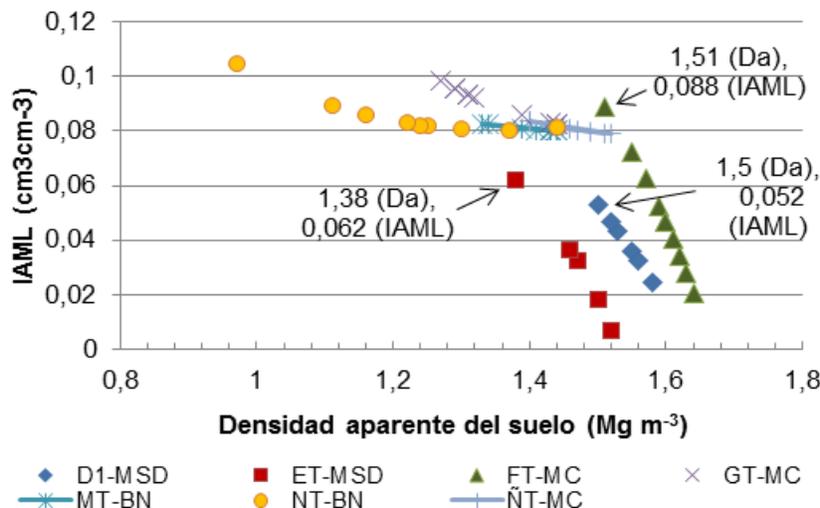


Figura 8. Intervalo de agua menos limitante en función de la densidad aparente del suelo en suelos de textura franca (D1, ET, FT, GT, MT, NT, ÑT) bajo los sistemas maíz siembra directa (MSD), maíz convencional (MC) y bosque natural (BN) en la Colonia Agrícola de Turen.

En el suelo ET, con alto contenido de materia orgánica, se observó una alta susceptibilidad a la reducción del IAML a partir de una densidad aparente inferior ($1,38 \text{ Mg m}^{-3}$) al resto de los suelos, que se atribuye al mayor contenido de arcilla (20%) aunado al efecto de la aplicación del sistema de siembra directa sobre el incremento abrupto de θ_{rs} en este suelo de textura fina (Cuadro 2), coincidiendo con Da Silva *et al.* (1994). En el suelo FT, a pesar de presentar un contenido de arcilla (18%) similar al de ET, la mayor proporción de arena (51%) pudo favorecer una respuesta menos sensible de reducción del IAML frente a incrementos de la densidad aparente. Lo mismo se explica en el suelo D1, debido al más bajo contenido de arcilla (12%) (Figura 8). Cabe destacar, que el alto contenido de MO presente en D1 (5,34%) bajo siembra directa no estaría ejerciendo la influencia esperada en relación a una mejor condición estructural superficial de este suelo. En general, los altos contenidos de MO de los suelos bajo siembra directa (D1, DT y FT), no estarían favoreciendo cambios de la densidad aparente en la dirección esperada, posiblemente como respuesta a la calidad de la misma y en relación al tiempo de recuperación bajo este sistema (Lozano *et al.*, 2011). Claramente, la densidad aparente resultó estar más correlacionada con cambios en la disponibilidad de agua en el suelo (IAML) e interactuando con otras fracciones del suelo como la arcilla.

Asimismo se evidenció que, en los suelos bajo estudio con un incremento considerable de la fracción de arcilla, los límites críticos θ_{rs} y θ_{pa} inciden notablemente en la reducción del IAML, tal como es referido por Da Silva y Kay (1997a). A su vez, serían éstos límites los restrictivos al desarrollo de raíces en suelos con capas compactadas (pisos de arado), que determinarían un reducido crecimiento de raíces bajo condiciones de inusual sequía o alta humedad del suelo durante el período crítico de desarrollo del cultivo (Betz *et al.*, 1998).

En la Figura 9, se observan los valores del IAML en función de la densidad aparente de suelos de textura **franco arenosa** bajo maíz siembra directa y maíz convencional en la Colonia Agrícola de Turen. El IAML presentó los valores más altos encontrados para los suelos bajo estudio ($0,06$ hasta $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), atribuido a los menores contenidos de arcilla y a su interacción con el manejo mecanizado del cultivo. Al respecto, Da Silva y Kay (1997a) obtuvieron valores más altos del IAML en suelos de textura franco arenosa ($0,07$ — $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) e indistintamente del sistema de labranza del suelo.

Adicionalmente, los resultados reflejaron una menor disponibilidad de humedad en el suelo LT, bajo maíz convencional, y un posible efecto positivo de la siembra directa sobre los valores del IAML (superiores) de los suelos BT y CT (Cuadro 2) como consecuencia de la variación de la densidad aparente en un estrecho intervalo de valores considerados no limitantes al desarrollo de los cultivos (Pérez, 2010). Así mismo, mediante la ausencia de restricciones mecánicas ($\theta_{rs} < \theta_{pmp}$) y de aireación y ($\theta_{pa} > \theta_{CC}$) reflejados por los límites críticos del IAML (Cuadro 2) además favorecida por la alta fracción de arena de estos suelos.

El suelo KT bajo maíz convencional con textura **franco arcillo limosa** presenta valores del IAML iguales a cero, en su mayoría, y un IAML promedio muy reducido (Figura 10), revelando una muy baja disponibilidad de humedad ($<IAML$) para los cultivos y una alta degradación de este suelo. Da Silva y Kay (1997a) muestran valores del IAML en suelos de textura fina franco arcillosa que pueden alcanzar el valor de cero ($0 - 0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$).

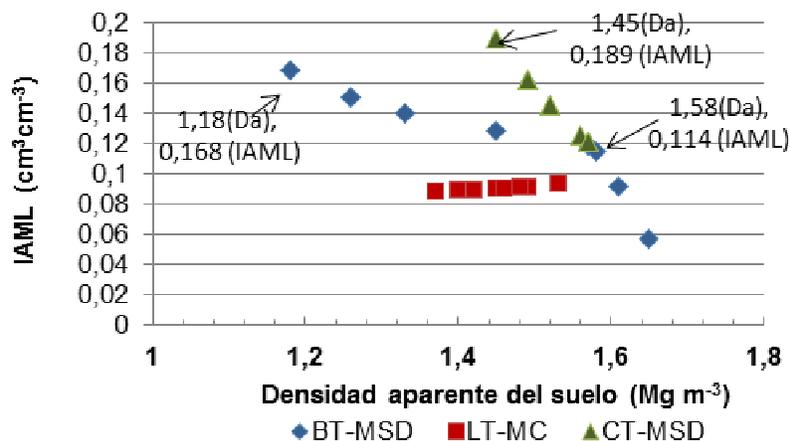


Figura 9. Intervalo de agua menos limitante (IAML) en función de la densidad aparente del suelo en suelos de textura **franco arenosa** (BT, CT, LT) bajo maíz siembra directa (**MSD**) y maíz convencional (**MC**) en la Colonia Agrícola de Turen

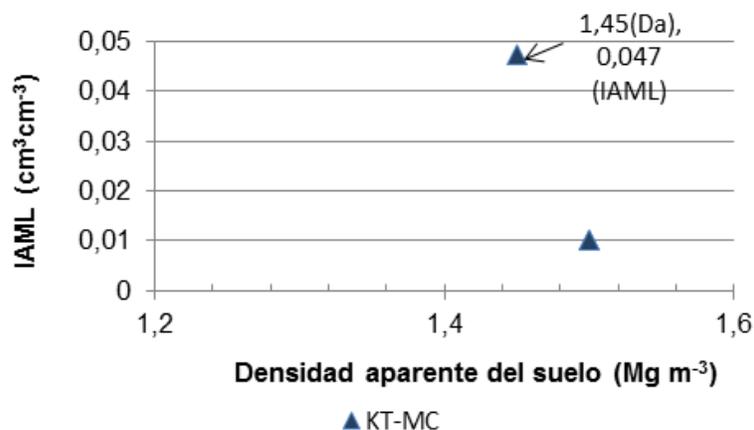


Figura 10. Intervalo de agua menos limitante (IAML) en función de la densidad aparente del suelo de textura franco arcillo limosa (KT) bajo maíz convencional (MC) en la Colonia Agrícola de Turen.

Por otra parte, el alto contenido de MO presente en KT no ejerció una influencia positiva sobre la densidad aparente, o bien, perdió importancia en la interacción con el contenido de arcilla. El descenso significativo del IAML pone de manifiesto el efecto combinado de un alto contenido de arcilla y una alta degradación estructural al imponer serias limitaciones a la resistencia del suelo ($\theta_{rs} > \theta_{pmp}$) y a la aireación ($\theta_{pa} < \theta_{CC}$), tal como lo demuestran los límites críticos del IAML (Cuadro 2).

En el Cuadro 3, se resumen algunas características resaltantes y el IAML de los suelos. Los resultados ponen de manifiesto que los valores del IAML más bajos, que se asocian a la alta y muy alta degradación física y al contenido de arcilla superior de los suelos en cada clase textural (Cuadro 2),

también lo hacen con aumento de la densidad aparente crítica. El tipo de uso y manejo no mostró en general una cercana correlación con la densidad aparente crítica, debido muy posiblemente a la naturaleza y tasa de cambios físicos y biológicos en la capa superficial del suelo, especialmente de aquellos suelos bajo siembra directa en la zona bajo estudio.

Cuadro 3. Valores del IAML promedio, uso y manejo y densidad crítica de los suelos de la Colonia Agrícola de Turen.

Textura suelo	Suelo	IAML promedio ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	Uso y manejo del suelo	Densidad crítica (Mg m^{-3})
FL	AT	0,0507	SD- MP	1,44
	DT	0,0227	MC-MP	1,48
	HT	0,0901	MC-DA	1,36
	IT	0,0870	MC-DA	1,27
	JT	0,0583	BN-EA	1,33
	OT	0,0902	BN-DA	1,30
F	D1	0,0162	SD-MP	1,50
	ET	0,0107	SD-MP	1,38
	FT	0,0492	MC-MP	1,51
	GT	0,0903	MB-DA	1,27
	MT	0,0807	BN-EP	No se observó
	NT	0,0855	BN-EP	No se observó
Fa	ÑT	0,0810	MC-EA	No se observó
	BT	0,1241	SD-MP	1,58
	CT	0,1434	SD-MP	1,45
	LT	0,0907	MC-EP	No se observó
FAL	KT	0	MC-EP	1,45

Densidad crítica: densidad aparente del suelo a partir de lo cual se inician descensos del IAML en el suelo; **IAML:** intervalo de agua menos limitante; **SD:** maíz siembra directa; **MC:** maíz convencional-ajonjolí/sorgo o girasol; **MB:** maíz convencional (dos años antes barbecho); **BN:** bosque natural; **DA:** Detrás Aeropuerto; **EA:** El Ají; **EP:** El Palmar; **MP:** Mata e palo. **AT:** maíz siembra directa; **D1:** maíz siembra directa; **BT:** maíz siembra directa; **CT:** maíz siembra directa; **DT:** maíz convencional; **ET:** maíz siembra directa; **FT:** maíz convencional; **GT:** maíz con barbecho; **HT:** maíz convencional; **IT:** maíz convencional; **JT:** bosque natural; **KT:** maíz convencional; **LT:** maíz convencional; **MT:** bosque natural; **NT:** bosque natural; **ÑT:** maíz convencional; **OT:** bosque natural; **Fa:** textura franco arenosa; **F:** textura franca, **FL:** textura franco limosa, **FAL:** textura franco arcillo limosa.

CONCLUSIONES

El intervalo de agua menos limitante (IAML) de muestras superficiales de los suelos de la Colonia Agrícola de Turen disminuyó notablemente debido al efecto combinado de un alto contenido de arcilla y una avanzada degradación estructural de los mismos. En estas condiciones el límite crítico superior del IAML se encontró asociado a la porosidad de aireación limitante (θ_{pa}) y el límite crítico inferior a una resistencia mecánica del suelo limitante a la penetración de raíces (θ_{rs}). La influencia más importante de la densidad aparente de los suelos sobre el IAML se presentó en condiciones de alta compactación,

donde el límite crítico inferior correspondió a una humedad del suelo ≥ 2000 kPa de resistencia mecánica (θ_{rs}) y los límites críticos superiores se presentaron a una porosidad de aireación limitante (θ_{pa}) o a la humedad a capacidad de campo (θ_{CC}). Los valores del IAML se asociaron también al aumento de la densidad aparente crítica de los suelos en cada clase textural. No se encontró una alta correlación directa entre el tipo de uso y manejo de los suelos con la densidad aparente crítica. La determinación clásica del agua aprovechable o disponible para las plantas, calculada como la diferencia entre θ_{CC} y θ_{mp} no es muy confiable en suelos con cierto nivel de degradación de sus propiedades físicas, ya que no refleja el efecto de la densidad aparente, mostrando el IAML una alta potencialidad para su determinación. La extrapolación del IAML a suelos de otras zonas agrícolas debe ser previamente investigada.

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.

LITERATURA CITADA

- Araujo, R.; W. Goedert; M. Pinto.** 2007. Qualidade do um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 31 (5). 1099-1108
- Benjamín, J.; D. Nielsen; M. Vigil.** 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116:137-148
- Betz, C; R. Allmaras; S. Copeland; G. Randall.** 1998. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62 (5):1384-1393.
- Blake, J.; L. Hartge.** 1986. Bulk Density. p. 349-378. *En A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI.
- Bradford, J.** 1986. Penetrability. p. 463 – 492. *En A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI.
- Busscher, W.** 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Transactions of the ASAE* 33:519-524.
- Carter M.; D. Angers; G. Topp.** 1999. Characterizing equilibrium physical condition near the surface of a fine sandy loam under conservation tillage in a humid climate. *Soil Science* 164 (2):101-110
- Chan, K.; A. Oates; A. Swam; R. Hayes; B. Dear; M. Peoples.** 2005. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. (on line): http://www.actfa.net/further_reading/SoilTillageResearch2005.pdf
- Comerma, J.; S. Torres; D. Lobo; N. Fernández; R. Delgado; L. Madero.** 1992. Aplicación del sistema de evaluación de tierras de la FAO 1985 en la zona de Turén, Venezuela. *Cuadernos de Agronomía.* Año 1 (1). 24p
- Da Silva, A.; B. Kay; E. Perfect.** 1994. Characterization of the least limiting water range of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:1775-1781.
- Da Silva, A.; B. Kay.** 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soil. *Plant and Soil Journal* 184: 323-329.
- Da Silva, A.; B. Kay.** 1997a. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 (3):877-883.
- Da Silva, A.; B. Kay.** 1997b. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61 (3):884-888
- Da Silva, A.; S. Imhoff; B. Kay.** 2004. Plant response to mechanical resistance and air- filled porosity of soils under conventional and no till system. *Journal of Agricultural Science* 61(4):451-456
- Drury, C.; T. Zhang; B. Kay.** 2003. The Non-Limiting Water Range for Soil Nitrogen Mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67 (5):1388-1399.

- 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. Mimeografiado. 8 p.
- FUDECO (2005):** Dossier Municipio Bruzual, estado Yaracuy. <http://www.fudeco.gob.ve/estados/yaracuy/municipios/pdf/MUNICIPIO%20BRUZUAL1.pdf> 2006
- Gee, R.; P. Bauder.** 1986. Particle size. *En* A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI., pp 443-461.
- Gable, A.; E. Siemer.** 1968. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 34: 20-25
- Gomez, A.; R. Powers; M. Singer; W. Horwath.** 2002. Soil compaction effects on Growth of Young Ponderosa Pine Following Litter Removal in California's Sierra Nevada. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66:1334-1343. http://www.enturen.com/vision_general.html 2008
- Karlen, D.; C. Ditzler; S. Andrews.** 2003. Soil Quality: why and how?. *Geoderma* 114: 145-156
- Kay, D.; C. Grant.** 1996. Structural aspects of soil quality. Proceedings of International Symposium on Advances in Soil Quality for Land Management. On line: [http://www.nre.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/0d08cd6930912d1e4a2567d2002579cb/807f0604adfa390eca2574c8002b107f/\\$FILE/KAY.pdf](http://www.nre.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/0d08cd6930912d1e4a2567d2002579cb/807f0604adfa390eca2574c8002b107f/$FILE/KAY.pdf)
- Klute, A. 1986.** Water relations: Laboratory methods. *En* A. Klute (ed.) Methods of soil analysis. Part 1. 2nd ed. Agron. Monogr. No. 9. ASA y SSSA, Madison, WI. . p. 635-662
- Leao, T.; A. Da Silva; M. Macedo; S. Imhoff; V. Euclides.** 2006. Least Limiting Water Range: A potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil & Tillage Research* 88: 279-285
- Lozano, Z ; C. Rivero, C. Bravo, R.M. Hernández.**2011. Fracciones de la materia organica del suelo bajo sistemas de siembra directa y cultivos de cobertura. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, 28: 35-56
- Palma, Z.; A. Florentino; M. Pérez; A. Ospina.** 2009. Evaluación de la calidad física y química del suelo después de 10 años bajo siembra directa de maíz en Turén, estado Portuguesa. XVI Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo. Sta. Bárbara - Venezuela. 6 p.
- Pérez, M.** 2010. Intervalo de agua menos limitante y trabajabilidad como indicadores de calidad física y manejo del suelo. Tesis Doctoral. Facultad de Agronomía, UCV. 266 p.
- Pérez, M ; A. Florentino.** 2013. Cambios en el contenido de humedad para labranza y del índice S de calidad física basados en propiedades del suelo. *Rev. Fac. Agron. (UCV)* 39(1):30-40.
- Pla, I.**1983. Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Revista de la Facultad de Agronomía Alcance* N° 37. 93 p.
- Richards, L.; L. Weaver.** 1944. Fifteen atmosphere percentage as related to the permanent point. *Soil Science* 56:331-339
- Ross, P.; J. Williams; K. Bristow.** 1991. Equations for extending water retention curves to dryness. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55:923-927
- Siegel-Issem, C.; J. Burger; R. Powers; F. Ponder; S. Patterson.** 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69:215-226.
- Taylor, H.; G. Robertson; J. Parker, Jr.** 1966. Soil strength root penetration relations for medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science* 102:18-22
- Tormena, C.; A. Da Silva; P. Libardi.** 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range. *Soil& Tillage Research* 52: 223-232
- 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.** 1992. Prediction of the Campbell water retention functions from texture, structure, and organic carbon. *En* M.Th, van Genuchten and L. J. Lund (ed) Indirect methods for estimating the hydraulic properties of unsaturated soils. University of California, Riverside. p 427 – 441.,