

ACTUALIZACIÓN DE LOS LÍMITES CRÍTICOS DEL INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO

MIGUEL ANGEL PILATTI¹; JORGE DE ORELLANA²; SILVIA DEL CARMEN IMHOFF³ y ÁLVARO PIRES DA SILVA⁴

Recibido: 03-01-12

Recibido con revisiones: 05-05-12

Aceptado: 05-06-12

REVIEW OF THE CRITICAL LIMITS OF THE OPTIMAL HYDRIC INTERVAL

ABSTRACT

The Optimal Hydric Interval (*IHO*) is the interval of easily available soil water for the crops, during which soil resistance and aeration do not limit root growth. In this paper, the upper and lower limits of the *IHO* are discussed. The upper limit is θ_{cc} (soil water content at *field capacity*) when air capacity (θ_a) is not restrictive for root respiration; otherwise, the limit is θ_a . The lower limit is determined by the variable of greater value between θ_{rp} (soil water content at which soil resistance reduces root elongation) and θ_{fu} (soil water easily available by crops below which water stress begins). The validity of the limits is analyzed, and methodological problems for their determination are discussed. Values of the *IHO* obtained by other authors with different critical limits are compared with those obtained using the values proposed in this study. Each agronomic situation (soil, climate, crops) requires specific values of the *IHO* that should be calculated for each region. For the northern Pampean Region (Argentina) and the usual crops, the following critical values are proposed: θ_{cc} = soil water content at -10 kPa, θ_a = 15%; θ_{rp} = 2,5 to 6 MPa (according to the clay content) and θ_{fu} = -0,17 MPa.

Key word. *IHO*, *NLWR*, *LLWR*, easy available water, soil physical quality indicator.

RESUMEN

El Intervalo Hídrico Óptimo (*IHO*) es la fracción de agua edáfica fácilmente utilizable por los cultivos, durante la cual el suelo puede ser penetrado por las raíces sin mayor resistencia y la aeración no limita la respiración radical. En este trabajo se discuten los límites superior e inferior del *IHO*. El primero es θ_{cc} –agua retenida en *capacidad de campo*– si garantiza una aceptable capacidad de aire (θ_a); de lo contrario, el límite se alcanza cuando θ_a no restringe la respiración radical. El límite inferior queda determinado por la variable de mayor valor entre θ_{rp} (contenido hídrico edáfico por debajo del cual las raíces restringen su crecimiento), y θ_{fu} (agua fácilmente utilizable por debajo del cual comienza el estrés hídrico). Se analiza y discute la validez de los límites, y las dificultades metodológicas que implican sus determinaciones. Se comparan valores del *IHO* obtenidos por otros autores, que utilizaron diferentes límites, con los calculados con los límites críticos aquí propuestos. Cada situación agronómica (combinación de suelos, clima, cultivo) requiere valores particulares de *IHO* que deberán ser determinados para cada región. Para el norte de la Región Pampeana (Argentina) y sus cultivos habituales proponemos los siguientes valores críticos: θ_{cc} = contenido hídrico a -10 kPa; θ_a = 15%; θ_{rp} = 2,5 a 6 MPa (según el porcentaje de arcilla) y θ_{fu} = -0,17 MPa.

Palabras clave. *IHO*, *NLWR*, *LLWR*, agua fácilmente utilizable, indicador de calidad física del suelo.

Lista de símbolos especiales

- θ_a Contenido hídrico por debajo del cual la aireación no es limitante.
- θ_{cc} Agua retenida en el suelo cuando éste se encuentra en Capacidad de Campo (*CC*)
- θ_{fu} Contenido mínimo de agua fácilmente utilizable, por debajo del cual comienza el estrés hídrico.
- θ_{rp} Contenido hídrico-edáfico por debajo del cual las raíces ya no pueden horadar el suelo.
- θ_s Contenido hídrico del suelo en estado saturado.
- CC*: Contenido hídrico de un suelo al equilibrarse por drenaje después de haber sido saturado.
- IHO*: Intervalo hídrico en el suelo dentro del cual las raíces respiran, absorben agua y se expanden sin restricciones que afecten su crecimiento.
- PMP*: Contenido hídrico del suelo a partir del cual las plantas ya no pueden extraer agua y se marchitan definitivamente.
- RP*: Resistencia que ofrece el suelo a la penetración radical medida en *MPa*

Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral. Kreder 2805, (3080) Esperanza (Santa Fe), Argentina. mpilatti@fca.unl.edu.ar

1 Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Litoral (UNL)

2 Profesor emérito UNL. jade_ore@arnet.com.ar

3 UNL, CONICET. simhoff@fcaunl.edu.ar

4 ESALQ/Universidad de San Pablo (Brasil). apsilva@esalq.usp.br

INTRODUCCIÓN

Antecedentes del *IHO*: agua útil y Non Limiting Water Range (*NLWR*)

Veihmeyer (1927) propuso el concepto de «agua útil», definiéndolo como «la máxima cantidad de agua que retiene un suelo entre «capacidad de campo» (*CC*) [Israelson & West, 1922] y «punto de marchitez permanente» (*PMP*) [Briggs & Shantz, 1912]. «Este concepto de agua útil sólo mostró su utilidad práctica en condiciones muy limitadas» (Hagan *et al.*, 1959); por eso se estableció una controversia, fundada experimentalmente, que afirmaba o negaba la existencia –entre ambos contenidos hídricos– de una creciente retención hídrica a medida que se consumía el agua comenzando a afectarse el crecimiento del cultivo antes de alcanzar el *PMP* (agua retenida a -1500kPa).

Con criterio superador, Letey (1985) propuso conceptual y cualitativamente la creación de una variable integradora que reflejara la influencia del agua edáfica y otras propiedades físicas sobre el crecimiento de los cultivos; la llamó *NLWR* (Non Limiting Water Range). Letey (1985) –al igual que Veihmeyer (1927)– limitó el agua disponible entre *CC* y *PMP* o el menor potencial hídrico que no reduzca el crecimiento del cultivo, aceptando así que el agua puede limitar a potenciales distintos al del *PMP*. Agregó, y es su mayor aporte, que esa disponibilidad puede verse reducida si la resistencia mecánica y/o la aireación afectan significativamente el crecimiento vegetal.

Como Letey no cuantificó al *NLWR*, Pilatti & Orellana (1993) presentaron la idea del *IHO* (Intervalo Hídrico

Óptimo) y el modo de calcularlo, definiéndolo como «el contenido hídrico del suelo tal que las raíces de las plantas superiores puedan respirar, absorber agua y expandirse sin restricciones que afecten su crecimiento». Para ellos fue muy importante el aporte de Norero (1969) quien había establecido el Límite Inferior del Agua Fácilmente Utilizable (*LIAFU*) y la forma de estimarlo. Así concretaron la propuesta de Letey, pero adoptando el *LIAFU* en vez de *PMP*.

Simultánea e independientemente, Topp *et al.* (1994) propusieron cómo evaluar el *NLWR* y Silva *et al.* (1994) también desarrollaron la propuesta de Letey como «Least Limiting Water Range» (*LLWR*) cuantificando los efectos de resistencia mecánica y aireación. Ambos grupos de investigadores coinciden en los límites críticos manteniendo al *PMP* como límite inferior de disponibilidad de agua. Luego, Tormena *et al.*, (1999) sugirieron que la denominación «Intervalo Hídrico Óptimo» (*IHO*) expresa mejor el concepto, tanto en idioma portugués como en castellano.

Aunque *IHO* y *LLWR* apuntan a un objetivo común, difieren en sus límites superior (el más húmedo) e inferior (el más seco) y con ello en su valoración final (Tabla 1). Pero, pese a diferir en el cálculo, ambos poseen la misma intención conceptual, de modo que autores de la Argentina, Australia, Brasil, Canadá, EE.UU., Indonesia y Nueva Zelanda usan *IHO* o *LLWR*.

El *IHO* en la Argentina

En la Argentina, el *IHO* sólo era utilizado por Pilatti & Orellana en Santa Fe, hasta que Wilson & Cerana (2004)

Tabla 1. Límites críticos y contenidos hídricos de referencia para determinar el intervalo hídrico óptimo (*IHO*, *LLWR* o *NLWR*) según distintos autores. Table 1. Critical limits and reference water contents for determining the optimal hydric interval (*IHO*, *LLWR* o *NLWR*) according to several authors.

Límite crítico y valores de referencia	Silva <i>et al.</i> (1994) Topp <i>et al.</i> (1994)	Cass <i>et al.</i> (1994)	Pilatti y Orellana (1993) Orellana <i>et al.</i> (1997)
Capacidad de campo	θ_{cc} (retenida a -10kPa)	θ_{cc} medida en campo	θ_{cc} (retenida a -6 kPa)
Porosidad de aireación	0,1 cm ³ /cm ³	0,1 cm ³ /cm ³	0,1 cm ³ /cm ³
Contenido hídrico límite	$\theta_a = \theta_s - 0,1\text{cm}^3/\text{cm}^3$	$\theta_a = \theta_s - 0,1\text{cm}^3/\text{cm}^3$	$\theta_a = \theta_s - 0,1\text{cm}^3/\text{cm}^3$
Límite de agua útil	-1500 kPa	Marchitamiento permanente, método biológico	Variable, frecuentemente entre -70 y -200 kPa
Ecuación de retención hídrica utilizada	$\theta = a \psi^b$		$\theta = \theta_s / (1 + \alpha \psi^b)$
Límite resistencia mecánica	2000 kPa	2500 kPa	6000 kPa
Relación resistencia mecánica: Cont. Hídrico	$RP = a \theta^b Ds^c$	$RP = a(\theta/\theta_s)^b$	$RP = a \exp(-c \theta/\theta_s)$

θ_a , θ_{cc} y θ_s : contenidos hídricos volumétricos cuando la aireación no es limitante, a capacidad de campo y saturación, respectivamente. ψ : potencial hídrico. Ds , densidad del suelo. RP resistencia a la penetración medido con penetrómetro. a , b , c , parámetros ajuste de ecuaciones.

lo aplicaron a suelos vérticos de Entre Ríos, Imhoff *et al.* (2006) a Argiudoles santafesinos, Uberto (2008) a suelos de Córdoba y Damiano & Moschini (2011) lo calculan para un Argiudol de la cuenca del río Carcaraña de Santa Fe lo que evidencia un creciente interés en el país.

Cabe advertir que la función del *IHO* no es sólo la de indicador de calidad física de un suelo, sino que sus límites pueden usarse en ensayos para: 1) controlar el riego de modo que el agua edáfica permanezca dentro de sus límites y el cultivo no sufra estrés hídrico, o 2) para monitorear el perfil hídrico de suelos cultivados y forestados y cuantificar cuándo y durante cuántos días el cultivo o la planta sufre estrés (Silva & Kay, 1996; Damiano & Moschini, 2011; respectivamente). En estos últimos casos la definición de los límites cobra especial relevancia, ya que si no son correctos el cultivo o plantación forestal cae en estrés o es mal juzgada su situación hídrica.

Sin embargo, no todos usan los mismos límites críticos para calcular el *IHO*, siendo imposible o al menos difícil cotejar resultados de distintas investigaciones. La aplicación del *IHO* plantea la necesidad de rever sus límites críticos para poder comparar resultados de distintos autores; prueba esa necesidad el trabajo de Mohammadi *et al.* (2010) que proponen redefinir el límite superior.

En el presente trabajo se presenta un análisis crítico de los límites del *IHO* y se proponen mejoras para: (1) precisar mejor los límites de acuerdo con los avances que se han hecho en la comprensión de los fenómenos. (2) estandarizar los límites y (3) proponer criterios para que cada uno pueda adaptarlo a una condición particular que le interese (flexibilidad).

REVISIÓN DE LOS LÍMITES DEL *IHO*

Las magnitudes que definen los límites del *IHO* son:

θ_{CC} : Agua retenida en el suelo cuando éste se encuentra en *CC*;

θ_a : Contenido hídrico en el cual la aireación no es limitante.

θ_{RP} : Contenido hídrico por debajo del cual las raíces ya no pueden horadar el suelo.

θ_{FU} : Contenido mínimo de agua fácilmente utilizable, por debajo del cual comienza el estrés hídrico y, al no poder mantener la tasa de evapotranspiración potencial porque la absorción no es suficiente, las plantas comienzan a cerrar sus estomas.

Entonces, *IHO* es el volumen de agua edáfica retenida entre θ_{CC} o θ_a (el de menor valor) y θ_{RP} o θ_{FU} (el de mayor valor) y caracteriza a la fracción de la trama porosa más útil para los cultivos.

Simbólicamente:

$$IHO = \text{Mín} (\theta_{CC}; \theta_a) - \text{Máx} (\theta_{RP}; \theta_{FU})$$

según Pilatti & Orellana (1993)

o bien

$$IHO = \text{Mín} (\theta_{CC}; \theta_a) - \text{Máx} (\theta_{RP}; \theta_{PMP})$$

según Silva *et al.* (1994)

Ejemplo: Si $\theta_{CC} = 0,42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; $\theta_a = 0,38 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; $\theta_{RP} = 0,12$ y $\theta_{FU} = 0,22 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $IHO = 0,16 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$.

El *IHO* varía entre horizontes de un mismo suelo y - en cada horizonte - si cambia la trama porosa, la consistencia o la textura.

1. Límite inferior del *IHO*

Se propone que dependa de dos variables limitantes: a) Disponibilidad de agua fácilmente utilizable y b) Resistencia mecánica a la penetración radical.

a) Limitación por disponibilidad de agua fácilmente utilizable (θ_{FU})

Cerana (1957) distinguió dos grupos de autores que disentían en cuanto a la disponibilidad de agua entre *CC* y *PMP*. unos concluían experimentalmente que el crecimiento de las plantas, el desarrollo radical, la transpiración o la germinación de las semillas no son afectados por la disminución del contenido hídrico del suelo antes de alcanzar el *PMP*; otros hallaban que la tasa de crecimiento, el desarrollo, la transpiración de las plantas o el tamaño de los frutos eran afectados desfavorablemente al disminuir el contenido hídrico, aún dentro del intervalo *CC-PMP*, existiendo un punto crítico a partir del cual las plantas reducen su crecimiento. Esa disparidad de criterios aún subsiste y muchos autores consideran «agua útil» a todo el intervalo *CC-PMP*.

La Figura 1 muestra curvas experimentales obtenidas en variadas condiciones de cultivos, demanda atmosférica y textura edáfica, con muy diferentes respuestas. Deanmed & Shaw (1962) fueron los primeros en advertir lo variable y complejo de la disponibilidad de agua para las plantas, destacando el carácter dinámico de la extracción de agua del suelo por los cultivos, en claro contraste con la idea de

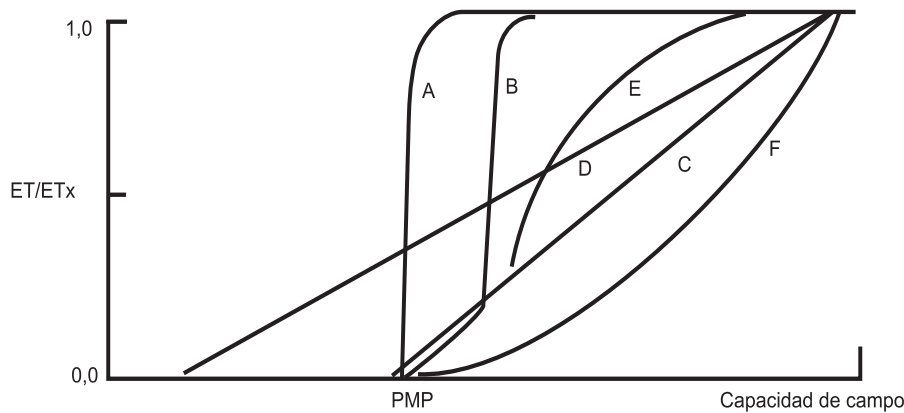


Figura 1. Modelos empíricos propuestos para describir la relación entre la evapotranspiración relativa (ET/ETx) de las plantas y la humedad del suelo. (A) Veihmeyer & Hendrickson (1955), (B) Penman (1949), (C) Thornthwaite & Mather (1955), (D) Havens (1956), (E) Pierce (1958), (F) Bahrani & Taylor (1961). PMP, punto de marchitez permanente.

Figure 1. Empirical models proposed for describing the relationship between relative evapotranspiration (ET/ETx) in plants and soil moisture. A) Veihmeyer & Hendrickson (1955), (B) Penman (1949), (C) Thornthwaite & Mather (1955), (D) Havens (1956), (E) Pierce (1958), (F) Bahrani & Taylor (1961). PMP, wilting point.

una utilización estática durante todo el intervalo *CC-PMP* (Cowan, 1965; Gardner & Ehlig, 1963). Pero fue Norero (1969, 1980) quien logró cuantificar el punto crítico en que el agua deja de estar fácilmente disponible: lo llamó *Límite Inferior del Agua Fácilmente Utilizable (LIAFU)*, que cambia para cada cultivo, suelo y situación climática, y estableció un protocolo de cálculo utilizando información meteorológica, datos edáficos y rasgos específicos del cultivo en cuestión, mostrando cómo cuantificarlo.

Se propone entonces que, para delimitar el *IHO*, se diferencie agua fácilmente utilizable de agua aprovechable. Se llamará «aprovechable» al total de agua retenida entre los límites de *CC* y *PMP*. El calificativo «fácilmente utilizable» se refiere sólo al agua que pueden utilizar las plantas (entre *CC* y *LIAFU*) sin limitar la evapotranspiración. Varios autores han utilizado el *PMP* para cuantificar este límite (curva A en Figura 1; Silva *et al.*, 1994; Tormena *et al.*, 1999; Imhoff *et al.*, 2006), debido a que θ_{PMP} (agua retenida a $-1,5$ MPa) es un dato de laboratorio de rutina, aunque el valor de *PMP* dista mucho del *LIAFU*. Si bien *PMP* es fácil de estimar, calculándolo a partir del tenor de arcilla (Pilatti, 1989), no advierte sobre la etapa previa, de disminución gradual del crecimiento vegetal, la cual queda identificada a partir del *LIAFU*.

En la práctica de riego se considera agua aprovechable a toda la retenida entre *CC* y *PMP*. Pero, reconociendo que no toda es fácilmente utilizable, como solución práctica

adoptan un 50 o 66% del total aprovechable en la zona de enraizamiento como de uso irrestricto (o fácilmente utilizable).

Por lo tanto, determinar el *LIAFU* es de gran importancia, ya que por debajo de ese límite el cultivo cae en estrés hídrico: primero incipiente y luego más grave, con el ulterior cierre parcial de estomas y disminución del ingreso de gas carbónico para la fotosíntesis. A partir del *LIAFU* comienza a reducirse el crecimiento de los cultivos por déficit hídrico.

Norero (1969, 1980) dedujo la ecuación [1] para conocer hasta qué potencial hídrico edáfico el agua es utilizada sin restricción por el cultivo, ψ_{max} ,

$$\psi_{max} + \left(\frac{0,95 \cdot A}{L \cdot D} \right) T_{max} \psi_{max}^n = \psi_h - 0,95 \cdot I \cdot T_{max} \quad [1]$$

ψ_{max} depende del potencial hídrico foliar al cual los estomas comienzan a cerrarse, ψ_h . El valor de ese potencial fluctúa entre $-0,3$ y -2 MPa, según la especie vegetal (Brix, 1962; Gardner & Ehlig, 1963; Mériaux, 1964; Millar *et al.*, 1970). ψ_{max} también depende de las condiciones meteorológicas, manifestadas en T_{max} y la evapotranspiración máxima (mm/día). *A* es un parámetro relacionado con la geometría del flujo del suelo a las raíces y su determinación experimental ha indicado valores alrededor de $4,21 \text{ cm}^3 \text{ día}^{-1}$; el

valor de I , un factor de resistencia al flujo de agua a través de la planta, fluctúa entre 0,05 y 0,11 $MPa \cdot \text{día} \cdot \text{mm}^{-1}$ (Gardner, 1966; Endrodi & Rijtema, 1969); L es la densidad radical, (cm cm^{-3}), la mayoría de las veces se encuentra entre 0,5 y 5 cm/cm^3 . D (zona de enraizamiento) abarca desde menos de 30 cm hasta 180 cm, o más, según los cultivos, aunque la mayor parte de las raíces de muchas plantas se localiza entre 40 y 90 cm; el valor de n (coeficiente relacionado con la conductividad hidráulica del suelo) oscila entre 1,5 y 2 en suelos arcillosos, 3 en suelos francos y 4 o más en los de textura gruesa (Gardner, 1958).

En la Tabla 2 se muestra la variación de ψ_{max} para distintas condiciones de clima, cultivo y suelo. Se ha considerado: 1) tres demandas de agua atmosférica desde bajas hasta elevadas: 3,5 y 7 mm d^{-1} , 2) dos texturas de suelos contrastantes: arenosa y arcillosa: « n » igual a 4 y 1,5; y 3) tres cultivos contrastantes: (i) «poco resistente al estrés hídrico» con enraizamiento de 40 cm, densidad de raíces de 0,5 cm cm^{-3} , y potencial hídrico al que comienza a cerrarse los estomas igual a -0,6 MPa; (ii) «resistencia normal al estrés hídrico» con una profundidad de enraizamiento de 100 cm, una densidad de raíces de 1,5 cm cm^{-3} , y un ψ_{h} de -1 MPa; (iii) «resistente al estrés hídrico» con enraizamiento profundo (180 cm), alta densidad de raíces (3 cm cm^{-3}) y ψ_{h} de -1,5 MPa. Se observa que la variación es muy amplia, desde valores inferiores a -0,01 MPa hasta superiores a -1 MPa. Esto le da una gran versatilidad a este límite del IHO pudiendo adaptarse a las condiciones específicas que sean de interés en un uso determinado.

Si el interés fuera estandarizar el cálculo del $LIAFU$ se propone considerar como referencia: 1 un cultivo de maíz con profundidad de raíces de 150 cm, una densidad de raíces de 1 cm cm^{-3} , un potencial foliar de -1 MPa al inicio del cierre

de estomas, un valor de A de 4,21 $\text{cm}^3 \text{día}^{-1}$ e I de 0,11 $MPa \cdot \text{día} \cdot \text{mm}^{-1}$; (2) un suelo franco, con $n = 3$; y (3) una demanda atmosférica de 7 mm d^{-1} . Aplicando la ecuación [1] para esas condiciones, el ψ_{max} es igual a -0,17 MPa. Es decir que cuando la tensión hídrica en el suelo llega a 0,17 MPa el agua deja de estar fácilmente utilizable. Se propone usar dicho valor como estándar en el cálculo del IHO. Con él, y utilizando la curva de retención hídrica (Tabla 1), puede calcularse θ_{FU} , que es el agua retenida en el $LIAFU$.

b) Limitación por resistencia mecánica (θ_{RP})

Las raíces se expanden a través de huecos preexistentes y horadando la matriz del suelo. Para que la primera alternativa sea factible, el diámetro de los poros o fisuras debe ser mayor que el de la cofia o piloriza (por lo general superior a 100 μm) y la conectividad entre esos huecos debe carecer de angostamientos que impidan su elongación. Esta vía de penetración aún no ha sido incorporada para definir el IHO.

La ocupación del suelo depende principalmente de la impedancia mecánica que éste opone, comparada con la que la raíz puede superar. Esto ya es contemplado en el IHO, aunque debe revisarse si, para estandarizar, se acepta que la resistencia mecánica (RP_{crit}) es crítica cuando la elongación radical: 1) se detiene, 2) comienza a reducirse o 3) hay algún requisito intermedio; e.g. cuando la elongación es inferior al 50%. En su mayoría los autores optaron por la alternativa (1).

Silva & Kay (1996) optaron por un valor crítico de 2 MPa en el suelo, teniendo en cuenta las experiencias de Taylor *et al.* (1966), resistencia a partir de la cual se reduce notablemente la elongación radical y también afecta el

Tabla 2. Variación del potencial hídrico edáfico (ψ_{max} , MPa) a partir del cual comienzan a cerrarse los estomas y el agua deja de estar fácilmente utilizable, según condiciones de cultivo, suelo y clima (detalles en el texto).

Table 2. Variation in soil water potential (ψ_{max} , MPa) from which stomata close and water becomes less easily available depending on crop, soil and climate (see text for details).

Cultivo	Textura	Evapotranspiración (mm/d)		
		3	5	7
Poco resistente al estrés hídrico	arenosa	0,13	0,07	<0,01
	arcillosa	0,16	0,05	<0,01
Resistencia normal al estrés hídrico	arenosa	0,27	0,21	0,16
	arcillosa	0,58	0,38	0,21
Resistente al estrés hídrico	arenosa	0,43	0,36	0,31
	arcillosa	1,11	0,88	0,68

crecimiento de la parte aérea según Weaich *et al.* (1992) y Tardieu (1994); Cass *et al.*, (1994) adoptan un valor cercano de 2,5 MPa.

Pilatti & Orellana (1993) usan una impedancia mayor, dado que el penetrómetro debe ejercer presiones 2 a 8 veces mayores que las raíces para horadar el suelo (Stolzi & Barley, 1968; Eavis *et al.*, 1969; Taylor & Ratcliff, 1969; Dexter, 1978; Whiteley *et al.*, 1981; Bengough, 1991), siendo más frecuente entre 3 y 4 veces. Como las raíces realizan presiones máximas de 0,9 a 1,5 MPa (Eavis *et al.*, 1969; Stolzy & Barley, 1968; Taylor & Ratcliff, 1969) los autores adoptan un RP crítico de 1,5 MPa; y, al medir el penetrómetro (término medio) 4 veces más que lo que realizan las raíces, aplican un valor crítico de 6 MPa.

Atento a la gran diferencia entre los límites usados (van desde 2 hasta 6 MPa) se revisó nuevamente la información disponible, hallándose que la relación entre la presión efectuada por las raíces y lo medido con penetrómetros depende del contenido de arcilla, según se infiere de los datos aportados por Gerard *et al.* (1982, citado por Glinski & Lipiec, 1990) [Tabla 3] y se ajusta a la siguiente ecuación:

$$RP \text{ crítico} = 24x \text{ Arc}^{-0.6}$$

donde, RP crítico es la resistencia mecánica, medida con penetrómetro, a partir de la cual las raíces no elongan (MPa) y Arc es el porcentaje de arcilla.

Nótese que si se divide RP crítico por la presión máxima que pueden realizar las raíces (valor adoptado: 0,9 MPa) se obtiene el número de veces que el penetrómetro mide de más con respecto a lo que efectivamente hace la raíz (τ , Tabla 3).

También Sene *et al.* (1985) consideran valor crítico para la penetración entre 6 y 7 MPa para texturas arenosas y 2,5 MPa para arcillosa lo que coincide estrechamente con lo presentado en la Tabla 3

Por lo tanto RP crítico no es un valor constante (ver Tabla 3) varía entre 2,4 y 7,2 MPa para texturas arcillosas y arenosas, respectivamente.

2. Límite superior del IHO

Hasta el presente el límite más húmedo del IHO se determina por elección entre θ_{cc} y el contenido hídrico que asegura un 10% de espacio aéreo: $\theta_a = \theta_s - 0,1$, donde θ_s es el contenido hídrico en saturación.

a) Capacidad de campo (θ_{cc})

Si se define a θ_{cc} como el mayor contenido hídrico que permanece en el suelo suficiente tiempo como para ser utilizado por el cultivo—es decir, el límite superior de agua fácilmente disponible—, el agua contenida entre θ_s y θ_{cc} no está disponible para la raíces si el drenaje por gravedad no está impedido. Colman (1947) la midió en laboratorio para 120 suelos de California (EE.UU.) y propuso un valor de -33 kPa. Este valor apareció luego en varios libros de texto y fue adoptado por el Soil Taxonomy. Miller & Klute (1967) sugirieron considerar como θ_{cc} al estado hídrico a partir del cual la tasa de drenaje es muy lenta, reconociendo que es una propiedad dinámica del agua edáfica y que el avivamiento interno (drenaje) no cesa bruscamente. Lo cierto es que aún no hay consenso de cuán lento debe ser el movimiento. Lejos de ser una característica intrínseca del suelo, θ_{cc} es una propiedad dinámica (Reichardt, 1988; Nachabe, 1998) y adoptar un valor de agua retenida a -10, -33 o -60 kPa es arbitrario. A fin de normalizar una tensión para θ_{cc} como aún no hay una solución generalizada, se propone mantener el límite de -10 kPa (Silva *et al.*, 1994).

b) Contenido hídrico con 10% de porosidad aérea (θ_a)

Tradicionalmente se adoptó, como mínimo estado de aireación del suelo, una porosidad aérea de 0,1 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$; esto fue propuesto en 1957 por Wesseling & van Wijk

Tabla 3. Relación entre el contenido de arcilla (%), la resistencia crítica para la penetración radical medida con penetrómetro (RP_{crit} en MPa) y número de veces (τ) que el penetrómetro mide más de lo que hace la raíz. Fuente: Glinski & Lipiec, 1990.

Table 3. Relationship between clay content in soil (%), critical resistance to root penetration measured with a penetrometer (RP_{crit} in MPa) and number of times that penetrometry measurements are greater than root (τ). Source: Glinski & Lipiec, 1990.

% arcilla	5 a 10	10 a 15	15 a 20	20 a 25	25 a 30	30 a 35	35 a 40	40 a 45	45 a 50
RP_{crit}	7,2	5,3	4,3	3,7	3,3	3,0	2,7	2,5	2,4
τ	8,0	5,9	4,8	4,1	3,7	3,3	3,0	2,8	2,6

(1983) tras revisar numerosas experiencias—entre 1920 y 1950— que sugerían que la difusión prácticamente cesa cuando sólo el 10% de poros está lleno de aire. Nótese que no se referían a respuesta de las raíces, sino a la difusión del oxígeno dentro del suelo. Topp *et al.* (1994) informan que los cultivos muestran limitaciones por deficiente aireación a ese valor en suelos arcillosos y también en francos.

Jones *et al.* (1991) reunieron evidencias de diversas fuentes que estudiaron directamente el crecimiento radical de varios cultivos en texturas desde arenosas hasta arcillosas (Fig. 2). Se denomina *aireación relativa* a la relación entre el volumen de poros con aire respecto de la porosidad total. Se observa que cuando la *aireación relativa* es $\leq 38\%$ el crecimiento relativo de las raíces disminuye a valores inferiores al 80%, nótese que algunos casos son aún más exigentes comenzando a disminuir aún en condiciones de mayor aireación. Aceptando que las raíces comienzan a verse afectadas a partir del 38% de aireación relativa; un suelo arenoso cuya porosidad total sea del 40% la porosidad de aireación para que no haya limitaciones debería ser de 15%; en uno arcilloso con porosidad total de 50% ese límite asciende hasta 19%. Imhoff *et al.* (2010)

encontraron que valores de 15-20% aireación permitieron alcanzar las máximas tasas de crecimiento de tallos y hojas para el cultivo de maíz. Reynolds *et al.* (2009), experimentalmente, hallaron satisfactorio un 15 % para este límite. **Por lo tanto, el límite superior del IHO debería incrementarse —al menos— del 10 al 15% para la mayoría de los cultivos, 20% para cultivos sensibles y/o altas demandas respiratorias.**

Sin embargo cabe reconocer que tal límite no es una característica intrínseca del suelo e invariable, cambia en función de: 1) la demanda de O_2 por las raíces y la biota edáfica, dependientes a su vez de la temperatura y la masa radical; 2) de la profundidad a la cual se estudia el intercambio gaseoso y 3) de la trama porosa interconectada, libre de agua. Mohammadi *et al.* (2010) indican cómo realizar la estimación de ese límite tomando en cuenta todos esos factores. Descartan decididamente el 10% indicando que, bajo ciertas condiciones hasta el 15% puede ser limitante; al igual que Bartholomeus *et al.* (2008). Nótese que al calcular así este límite del IHO se incorpora otro factor físico del suelo que hasta ahora no se había tenido en cuenta: la temperatura; ella controla la intensidad de la respiración de la biota edáfica y con ello la demanda de oxígeno.

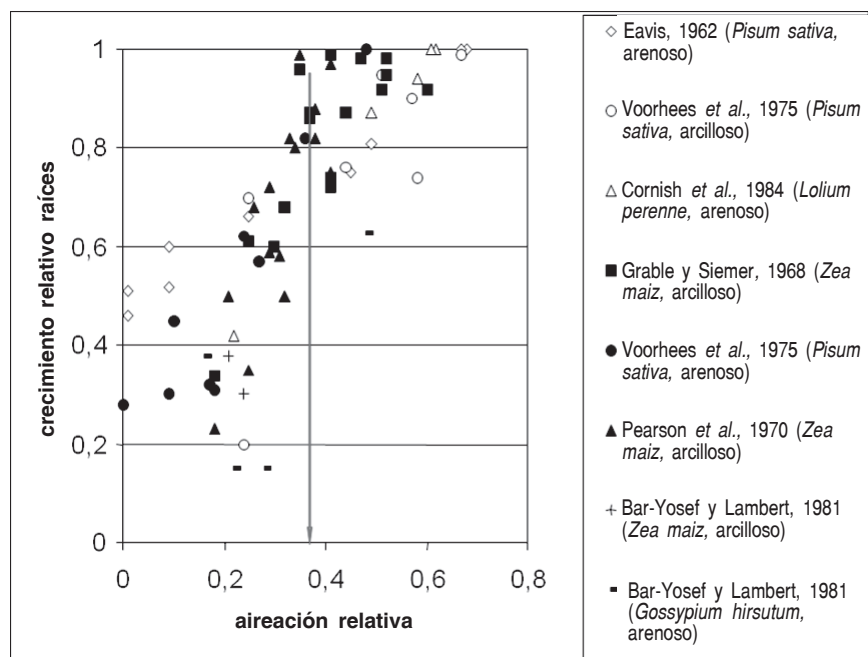


Figura 2. Crecimiento relativo de raíces de varios cultivos, sobre suelos con texturas contrastantes, respecto de la aireación relativa del suelo (poros con aire/porosidad total). Elaborado a partir de la Figura 6-1 de Jones *et al.* (1991).

Figure 2. Relative root growth of various crops on soils with contrasting textures as a function of the relative soil aireation (air pores/total porosity). Elaborated from Figure 6-1 in Jones *et al.* (1991).

Comparación del IHO con diferentes límites

Se comparan los límites aquí propuestos y los usados por Silva *et al.* (1994) [Tabla 1].

A priori, en la nueva propuesta el límite más húmedo del IHO es igual si está definido por CC, o más exigente si está determinado por la aireación, ya que requiere un 15% de aireación vs. 10%. Por su parte el límite más seco es variable ya que si está determinado por la retención hídrica, al pasar de -1,5 MPa (PMP) a -0,17 MPa el «piso» del IHO aumenta siendo más exigente. Pero si el que lo limita es el contenido hídrico definido por la resistencia mecánica aquí la situación es inversa ya que el «piso» desciende

porque RP pasa de 2 MPa a una resistencia mayor –variable según el % de arcilla– entre 2,5 y 6 MPa.

Por lo tanto el límite superior e inferior variará según quién lo defina.

Para apreciar esas diferencias se analizaron ambos métodos tomando suelos de textura franco arenosas hasta arcillo limosas; y horizontes A con grados de deterioro físico contrastantes: uno corresponde a un Argiudol natural representativo del centro de Santa Fe (Argentina), sin laboreo y el otro al mismo suelo con más de 50 años de labranza no conservacionista (Tabla 4).

Tabla 4. Principales propiedades de los suelos estudiados y comparación del intervalo hídrico óptimo (IHO) y sus límites críticos según lo propuesto por Silva *et al.* (1994) y en este trabajo, para diferentes texturas e intensidad de uso del suelo. (IHO y θ en $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Table 4: Main properties of studied soils and comparison of optimal hydric interval (IHO) and critical limits between Silva *et al.* (1994) and the present study for soils with different textures and use intensities (IHO and θ in $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

Datos básicos y resultados	Casos evaluados				
	Arenoso (1)	A Ultisol (3)	A Natural (2)	Ap laboreado (2)	Bt (2)
% arcilla	11	19	23	24	49
% arena	83	73	13	14	3
densidad (Mg/m^3)	1,64	1,62	1,18	1,39	1,36
RP crítico (MPa)	6	4	4	4	2,4
θ_s	0,369	0,392	0,502	0,449	0,477
Límites Críticos					
Silva <i>et al.</i> (1994)	este trabajo				
θ_{cc}	0,197 - 0,197	0,178 - 0,178	0,356 - 0,356	0,363 - 0,363	0,435 - 0,435
θ_a	0,269 - 0,219	0,292 - 0,242	0,402 - 0,352	0,349 - 0,299	0,377 - 0,327
θ_{RP}	0,192 - 0,131	0,156 - 0,120	0,262 - 0,196	0,340 - 0,290	0,460 - 0,444
θ_{PMP} θ_{FU}	0,054 - 0,104	0,098 - 0,128	0,140 - 0,232	0,151 - 0,251	0,223 - 0,343
Límite superior					
Silva <i>et al.</i> (1994)	este trabajo				
	0,197 - 0,197	0,178 - 0,178	0,356 - 0,352	0,349 - 0,299	0,377 - 0,327
Límite inferior					
Silva <i>et al.</i> (1994)	este trabajo				
	0,192 - 0,131	0,156 - 0,128	0,262 - 0,232	0,340 - 0,290	0,460 - 0,444
IHO					
Silva <i>et al.</i> (1994)	este trabajo				
	0,005 - 0,066	0,022 - 0,050	0,094 - 0,120	0,009 - 0,009	0 - 0
Máxima agua fácilmente utilizable $\theta_{cc} - \theta_{FU}$	0,093	0,050	0,124	0,112	0,092

(1) Entisol, datos no publicados (2) Pilatti *et al.*, 2009, correspondientes a Argiudoles del centro de Santa Fe, pampa llana santafesina ecoregión del Espinal (3) Ultisol de Brasil, Imhoff *et al.*, 2010

Nota: En «Límites Críticos» el primer valor corresponde al que se obtiene usando los criterios propuestos por Silva *et al.* (1994) y el segundo valor al propuesto en este trabajo.

En la Figura 3 se presentan los resultados de los dos métodos evaluados. Comparativamente donde el *IHO* es mayor que cero, los nuevos límites dan un *IHO* mayor a pesar de que θ_{FU} es más exigente que θ_{PMP} y que el requisito de aireación también lo es. Queda en evidencia así la importancia de la definición de θ_{RP} , menos exigente que la utilizada por Silva *et al.* (1994). Este hecho resulta ventajoso porque, de algún modo, no se castiga tanto por resistencia mecánica. Recuérdese que en el *IHO* no se tiene en cuenta que las raíces elongan por grietas y bioporos; además se elige una resistencia mecánica en que las raíces detendrían totalmente su exploración del suelo. Sin embargo cuando las condiciones físicas son muy desfavora-

bles para las raíces ambos criterios conducen a un *IHO* igual a cero: caso del horizonte muy arcilloso *Bt*. Lo mismo encontraron Damiano & Moschini (2011) en un *Bt1* (56% de arcilla) de un Argiudol abruptico.

Como era de esperar no hay coincidencia en el valor numérico tanto del límite superior como del inferior, esto resulta crucial al momento de conducir experiencias en las que con el manejo del agua se pretende que las raíces no tengan limitaciones; o bien cuando se desea evaluar durante cuántos días un cultivo a estado sujeto a restricciones hídricas—es decir fuera del *IHO*—tal como lo hicieron para cultivos Silva & Kay (1996) y Benjamín *et al.* (2003), y Damiano & Moschini (2011) en suelos con uso forestal.

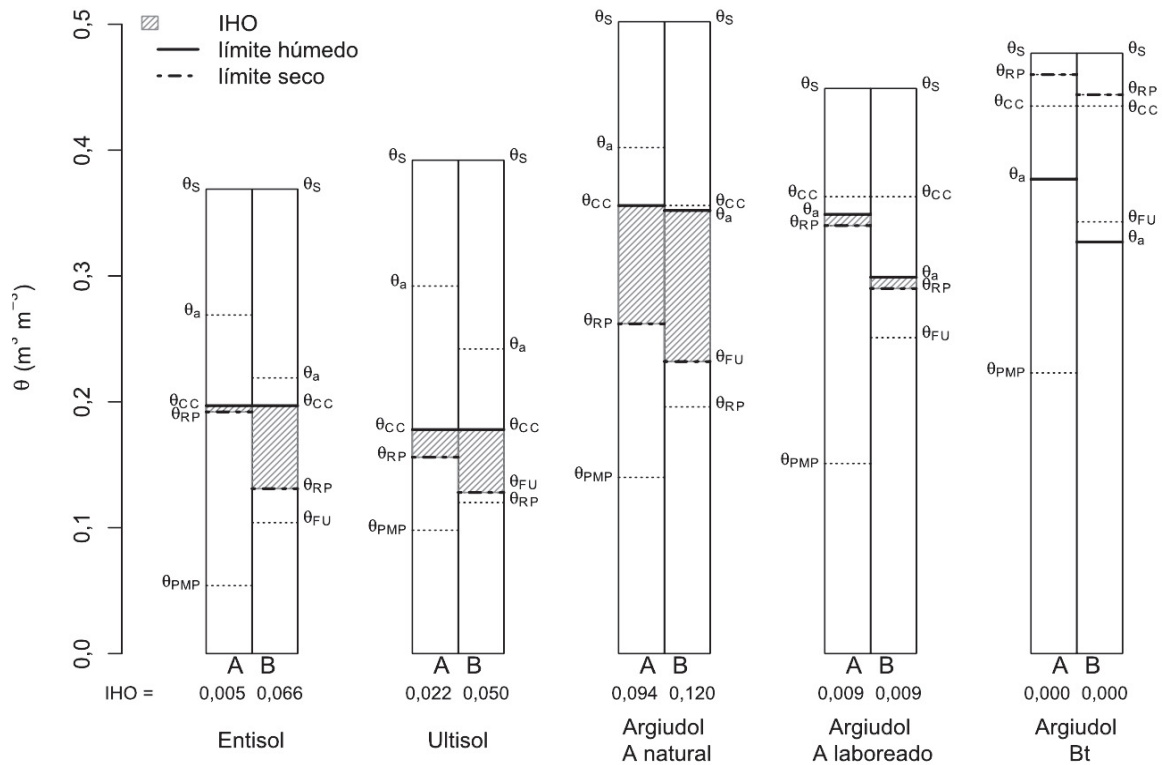


Figura 3. Comparación del intervalo hídrico óptimo (*IHO*) y sus límites críticos según lo propuesto por A: Silva *et al.* (1994) y B: Pilatti *et al.* en este trabajo, para diferentes texturas e intensidad de uso del suelo.

(*IHO* $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). $\theta_a, \theta_{cc}, \theta_{fu}, \theta_{pmp}, \theta_{rp}$ representan, respectivamente, el contenido hídrico volumétrico cuando hay suficiente Porosidad de Aeración, a Capacidad de Campo, en el Límite de Agua Fácilmente Utilizable, Punto de Marchitez permanente y cuando limita la Resistencia a la Penetración)

Nota: Cuando el límite seco se encuentra por encima del límite húmedo esto indica que el *IHO* es cero, es decir, en todos los estados hídricos de ese horizonte las raíces tienen estrés.

Figure 3. Comparison of optimal hydric intervals (*IHO*) and their critical limits as proposed by A: Silva *et al.* (1994) and B: Pilatti *et al.* in the present study, for soils with different textures and use intensities. (*IHO* $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$). $\theta_a, \theta_{cc}, \theta_{fu}, \theta_{pmp}, \theta_{rp}$ represent the water volumetric content when there is enough aeration porosity, field capacity, soil water easily available to crops below which water stress begins, wilting point soil water and content at which soil resistance reduces roots elongation, respectively. Note: When the dry limit is located above the humid limit, this indicates that the *IHO* is zero, meaning that roots in that horizon are under stress under all the hydric conditions.

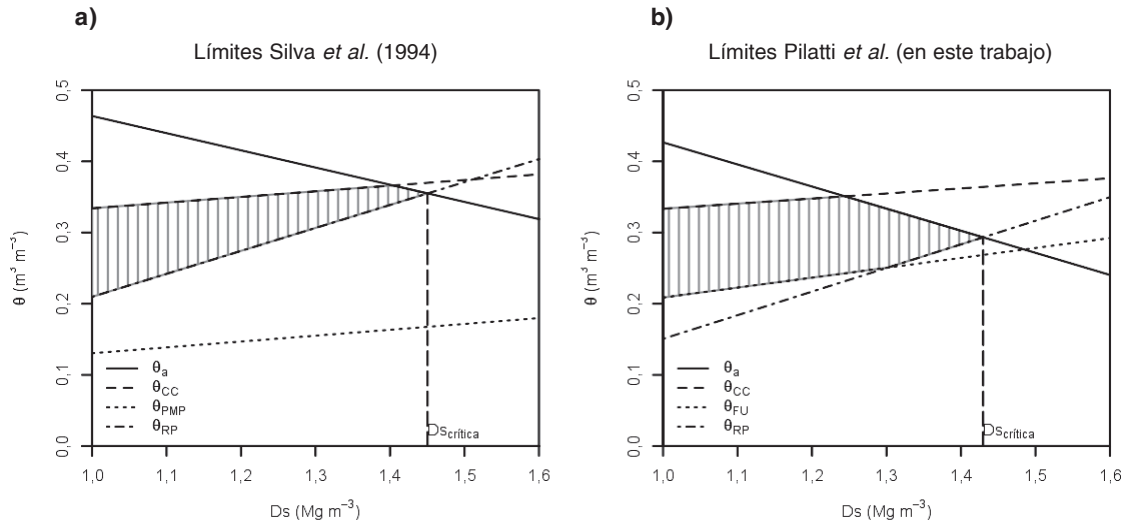


Figura 4. Variación de los límites críticos del Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) con la densidad del suelo (D_s) según (a) lo propuesto por Silva *et al.* (1994) y (b) por Pilatti *et al.* en este trabajo. Horizonte A de un Argiudol típico (Pilatti *et al.*, 2009) ($\theta_a, \theta_{CC}, \theta_{FU}, \theta_{PMP}, \theta_{RP}$ es respectivamente el contenido hídrico volumétrico cuando hay suficiente Porosidad de Aeración, a Capacidad de Campo, en el Límite de Agua Fácilmente Utilizable, Punto de Marchitez permanente y cuando limita la Resistencia a la Penetración. D_s crítica es la densidad a la que el IHO se hace cero).

Figure 4. Variation in the critical limits of the optimal hydic interval (IHO) in relation with soil density (D_s) as proposed by (a) Silva *et al.* (1994) and (b) Pilatti *et al.* in this study in a A horizon of a typical Argiudol (Pilatti *et al.*, 2009). $\theta_a, \theta_{CC}, \theta_{FU}, \theta_{PMP}, \theta_{RP}$ are water volumetric content when there is enough aeration porosity, field capacity, soil water easily available for crops below which water stress begins, wilting point soil water and content at which soil resistance reduces roots elongation, respectively. Critical D_s is the density at which IHO becomes zero.

En la Figura 4 a (método Silva *et al.*, 1994) y Figura 4 b (método «Este trabajo») se puede observar cómo cambian los límites críticos del IHO con la densidad del suelo (D_s) en un horizonte A franco limoso: D_s varía entre 1,08 y 1,52 Mg/m^3 (Argiudol típico, Pilatti *et al.*, 2009). En el método de Silva *et al.* (1994) el límite superior está definido siempre por CC; en cambio en el método propuesto en este trabajo la aireación lo limita a partir de una densidad aparente de 1,24 Mg/m^3 . El límite inferior en Silva *et al.*, 1994 siempre está definido por la resistencia mecánica. En la nueva propuesta se pueden distinguir dos situaciones, cuando la densificación es menor de 1,3 Mg/m^3 la limitación está dada por la retención hídrica (θ_{FU}), luego es la resistencia mecánica la que restringe. En ambos métodos la densidad crítica, es decir cuando el IHO se hace cero, estuvo alrededor de 1,4 Mg/m^3 .

El IHO, para D_s , inferiores a 1,35 Mg/m^3 es siempre superior en la propuesta actual; luego es similar. Por lo tanto, si bien en ambos casos el IHO disminuye con D_s , los nuevos límites tienden a calificar mejor el estado físico del suelo.

CONSIDERACIONES FINALES

El agua un recurso vital, cada vez más escaso, contaminado o de difícil obtención. Muchas regiones del mundo

carecen de agua potable y en otras es críticamente escasa. Millones de personas, animales y plantas lo padecen. Entonces... ¿Por qué desperdiciarla o derrocharla? El IHO apunta a mejorar el uso racional del agua edáfica, optimizando dosis de riego o aprovechando eficientemente el agua de lluvia.

En este trabajo se propone

I. Para los investigadores que deseen estandarizar los límites del IHO:

- Condicionar el límite superior al menor valor entre θ_{CC} (agua retenida a -0,01 MPa) y θ_a considerando una porosidad aérea del 15%.
- Mantener el límite inferior determinado por el mayor valor del contenido mínimo de agua fácilmente utilizable (θ_{FU}). Aquí el agua está retenida a -0,17 MPa y θ_{RP} donde RP crítico varía con el tenor de arcilla: menos del 15% de arcilla 6 MPa; entre 15 y 25% 4 MPa; entre 25 y 40% 3 MPa y mayor de 40% 2,5 MPa.

II. Para aquellos que deseen usarlos para un caso específico:

- Condicionar el límite superior al menor valor entre θ_{CC} (agua retenida a -0,01 MPa) y θ_a considerando una

porosidad aérea del 15% para cultivos normales, 20% para cultivos sensibles, o 25% para muy sensibles.

- b) Mantener el límite inferior determinado por el mayor valor entre (1) θ_{FU} Contenido mínimo de agua fácilmente utilizable, la tensión a la cual está retenida ese agua se calcula con la ecuación 1 o se adopta del Tabla 2 y (2) θ_{RP} , ídem l b).

Si bien el IHO ha comenzado a utilizarse en la Argentina mucho trabajo falta aún destacándose algunas líneas de estudio e investigación como:

1. Confirmar para nuestras condiciones, si se afecta el crecimiento del cultivo—especialmente el rendimiento— cuando el contenido hídrico en el suelo está fuera del IHO. Ejemplo de este tipo de estudio se encuentra en Silva & Kay (1996), Benjamín *et al.* (2003) y en Damiano & Moschini (2011)
2. ¿Qué proporción del sistema radical y durante cuánto tiempo debe estar en un contenido hídrico fuera del IHO para que se afecte al cultivo?
3. ¿Cómo incluir—además de la resistencia mecánica— el efecto de macroporos, grietas, bioporos sobre la exploración radical? Consultar lo sugerido por Jones *et al.* (1991).
4. Proponer criterios para interpretar los valores del IHO y calificar el estado físico de un horizonte edáfico. Ver, por ejemplo, lo propuesto por Pilatti *et al.* (2008).
5. Generar la relación ente el IHO y la densidad del suelo para los horizontes más enraizados de los principales suelos de interés, abarcando desde valores bajos de D_s hasta elevados. De este modo será posible estimar el IHO en cada caso sólo a partir de la D_s y calificar el estado físico. Para detalles ver Pilatti *et al.* (2009).
6. Usar el IHO para evaluar físicamente los suelos forestales y guiar su recuperación después que han sido deteriorados.
7. Usar el IHO para preparar y evaluar la calidad física de diversos sustratos. Ver Felli *et al.* (1997).
8. Usar el IHO para decidir el momento de aplicación de riego complementario y la lámina a utilizar.

Agradecimientos. Al ingeniero Agustín Alesso por su permanente colaboración en la elaboración de Tablas y Figuras.

BIBLIOGRAFÍA

- Bahrani, B & SA Taylor. 1961. Influence of soil moisture potential and evaporative demand on the actual evapotranspiration from an alfalfa field. *Agron. J.* 53(4): 233-237.
- Bartholomeus, RP; PJM Wite; PM van Bodegom; JC van Dam & R Aerts. 2008. Critical conditions for oxygen stress to plant roots: substituting the Feddes-function by a process-based model. *J. Hydrol.* 360: 147-165.
- Bengough, G. 1991. The Penetrometer in Relation to Mechanical Resistance to Root Growth. *Soil Analysis. Physical Methods.* 431-445.
- Benjamín, JG; DC Nielsen & MF Vigil. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma*, 116: 137-148.
- Briggs, LJ & HL Shantz. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. USDA Bureau of Plant Industry Bull 230. U. S. Gov. Printing Office, Washington, DC.
- Brix, H. 1962. The effect of water stress on the rates of photosynthesis and respiration in tomato plants and loblolly pine seedlings. *Plant Physiol.* 15: 10-20.
- Cass, A.; S Gusli & DA MacLeod. 1994. Sustainability of soil structure quality in rice paddy-soya-bean cropping systems in South Sulawesi, Indonesia. *Soil & Tillage Research* 31: 339-352.
- Cerana, L A. 1957. Estudio experimental sobre el porcentaje de marchitamiento permanente. Clasificación de los suelos salinos. Santa Fe, Min. Agr. y Gan., D.G. Suelos y Quím. Agr. 73 pp.
- Colman, EA. 1947. A laboratory procedure for determining the field capacity of soils. *Soil Sci.* 63: 277-283.
- Cowan, IR. 1965. Transport of Water in the Soil-Plant-Atmosphere System. *J of Applied Ecology*, 2(1): 221-239.
- Damiano, F & RC Moschini. 2011. Intervalo hídrico óptimo en suelos Argiudoles plantados con *Eucaliptus dunni* Maiden. *Ci. Suelo (Argentina)* 29(1): 1-11.
- Deanmead, OT & RH Shaw. 1962. Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54(5): 385-390.
- Dexter, AR. 1978. A stochastic model for the growth of root in tilled soils. *J. Soil Sci* 29(1): 102-116.
- Eavis, BW; LE Ratcliff & HM Taylor. 1969. Use of dead load technique to determine axial root growth pressure. *Agronomy Journal* 61: 640-643.
- Endrodi, G & PE Rijtema. 1969. Calculation of evapotranspiration from potatoes. *Neth. J. Agric. Sci.* 17(4): 283-299.
- Felli, O.; N. Gariglio & M.A. Pilatti. 1997. Caracterización física del aserrín de salicáceas para su uso como sustrato en cultivos hortícolas sin suelo. XX Congreso Argentino de Horticultura. Bahía Blanca.
- Gardner, WR. 1958. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil. Sci.* 85: 228-232.
- Gardner, WR. 1966. Soil water movement and root absorption. En: Plant environment and efficient water use (Pierre, W.H. *et al.* eds.). Amer. Soc. of Agron. and Soil Sci. Soc. of Amer. Madison Wisconsin.
- Gardner, WR & CF Ehlig. 1963. The influence of soil water on transpiration by plants. *J. Geophys. Res.* 68: 5719-5724.

- Gerard, CJ; P Sexton & G Shaw. 1982. Physical Factors Influencing Soil Strength And Root Growth. *Agron. J.* 74: 875; Citado Por Glinski J y J Lipiec 1990. Soil Physical Conditions And Plant Roots. Crc Press. 250pp.
- Glinski, J & J Lipiec. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press. 250pp.
- Hagan, RM; Y Badia & MB Russell. 1959. Interpretation of Plant Response to Soil Moisture Regimes. *Adv. Agron.* 11: 77-97.
- Havens, AV. 1956. Using climatic data to estimate water in soil. *New Jersey Agr.* 38: 6-10.
- Hillel, D. 1998. Environmental soil physics. Academic Press. 771 pp.
- Imhoff, S; JP Gay; A Grioni & PJ Ghiberto. 2006. Calidad física de Argiudoles de Santa Fe determinada por medio del Intervalo Hídrico Óptimo. XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y I Reunión de suelos de la región andina, 2006, Salta. Resúmenes.
- Imhoff, S; BD Kay; A Pires Da Silva & MA Hajabbasi. 2010. Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil & Till. Res.* 106: 303-310.
- Israelson, OW & FL West. 1922. Water holding capacity of irrigated soils. *Utah State Agricultural Experiment Station Bull* 183: 1-24.
- Jones, CA; WL Bland; JT Ritchie & JR Williams 1991. Simulation of Root Growth. Cap. 6 de «Modeling Plant and Soil Systems», *Agronomy Monograph* 3: 91-123.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Mériaux, S. 1964. Essai d'interpretation des mesures de pression de succion des feuilles. *En : L'eau et la production vegetale.* Inst. Nat. Rech. Agron. 349-356.
- Millar, AA; ME Duysen & EB Norum. 1970. Relationships between the leaf water status by barley and soil water. *Can. J. Plant Sci.* 50: 363-370.
- Miller, EE & A Klute. 1967. The dynamics of soil water. I: Mechanical forces. Irrigation of agricultural lands. *En: Hagan RM, et al. (eds.) Am. Soc. Agron., Madison, Wisconsin.* p.209 a 244.
- Mohammadi, MH; F Asadzadeh & M Vanclooster. 2010. Refining and unifying the upper limits of the least limiting water range using soil and plant properties. *Plant Soil* 334(1-2): 221-234.
- Nachabe, MH. 1998. Refining the definition of field capacity in the literature. *J. Irrigation y Drainage Eng. ASCE.* 124(4): 230 a 232.
- Norero, A. 1969. A formula to express evapotranspiration as a function of soil moisture and evaporative demands of the atmosphere. Ph.D. Thesis. Utah State University. Logan, UTA.
- Norero, A, 1980. Concepto dinámico de «humedad disponible» y su estimación para fines técnicos. CIDIAT, Venezuela. 26 pp.
- Orellana, JA de; MA Pilatti & DA Grenón. 1997. Soil Quality: an approach to the physical state assessment. *J. Sustainable Agriculture*, 9(2-3):91-108.
- Penman, HL. 1949. The dependence of transpiration on water and soil conditions. *J. Soil Sci.* 1: 74-89.
- Pierce, LT. 1958. Estimating seasonal and short-term fluctuations in evapotranspiration from meadow crops. *Amer. Met. Soc. B.* 39(2): 73-78.
- Pilatti, MA 1989. Estimación del punto de marchitez permanente en Molisoles santafesinos. *Ciencia del Suelo* 7(1-2): 103-106.
- Pilatti, MA; O Felli; S Imhoff; R Marano & A Alesso. 2009. Cambios en un Argiudol típico con siembra directa del centro este de Santa Fe: 2) Propiedades físicas. X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur; Rosario (Santa Fe), Argentina. 8 pp.
- Pilatti, MA; S Imhoff & J. de Orellana. 2008. Propuesta de interpretación del IHO para evaluar calidad del suelo. 21° Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo San Luis, Argentina. 6 pp.
- Pilatti, MA & JA de Orellana. 1993. Posibles indicadores de sostenibilidad. II El Intervalo Hídrico Óptimo. XIV Cong. Arg. de la C. del Suelo. Resúmenes. Mendoza (Argentina.).
- Reichert, K. 1988. Capacidade de campo. *Campinas. R Bras. C. Solo.* 12: 211-216.
- Reynolds, WD; CF Drury; CS Tan; CA Fox & XM Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263.
- Sene, M; MJ Vepraskas; GC Naderman & HP Denton. 1985. Relationships of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49: 422-427.
- Silva, AP da; BD Kay & E Perfect. 1994. Characterisation of the least limiting water range of soil. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1775-1781.
- Silva, AP da & BD Kay. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. *Plant and Soil* 184: 323-329.
- Stolzy, LH & KP Barley. 1968. Mechanical resistance encountered by roots entering coMPact soils. *Soil Sci.* 105: 297-301.
- Tardieu, F. 1994. Growth and functioning of roots and to root systems subyected to soil coMPaction. Towards a system with multiple signaling. *Soil Tillage. Research*, 30: 217-243.
- Taylor, HM & LF Ratcliff. 1969. Root growth pressures of cotton, peas, and peanuts. *Agronomy Journal*, 61: 398 402.
- Taylor, HM; GM Roberson & JJ Parker. 1966. Soil strength-root penetration relations to coarse textured materials. *Soil Science*, 102: 18-22.
- Thornthwaite, CW & JR Mathers. 1955. The water budget and its use in irrigation, p.346-358. *In: Alfred Stefferud (ed.) Water, the yearbook of agriculture, 1955.* U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.
- Topp, GC; YT Galganov; KC Wires & JLB Culley. 1994. Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure. Technical report N° 2. Soil Quality Evaluation Program. Centre for Land and Biological Resources Research, Agriculture and Agri-Food Canadá. 36 pp.
- Tormena, CA; AP da Silva; ACA Gonçalves & MV Folegatti. 1999. Intervalo ótimo de potencial da agua no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da agua na agricultura irrigada. *Rev. Bras. De Engenharia Agrícola Ambiental* 3(3) 286-292.
- Uberto, ME. 2008. Calibración y validación de un modelo de simulación para el cultivo de maní en el área centro sur de Córdoba. Tesis Maestría en Producción Vegetal (FAV, UNRC) 125 pp.

- Veihmeyer, FJ. 1927. *Hilgardia* 2: 125 (Según Wild, 1992, *Op. cit.*).
- Veihmeyer, FJ & AH Hendrickson. 1955 Does transpiration decrease as soil moisture decreases? *Amer. Geophys. Union Trans.* 36: 425-448.
- Weaich, K; KL Bristow & A Cass. 1992. Preemergent shoot growth of maize under different drying conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 56: 1272-1278.
- Wesseling, J & WR van Wijk. 1983. Drenaje de terrenos agrícolas en relación con los suelos y las plantas de cultivo. En: Luthin, J.N. (ed.). *Drenaje de tierras agrícolas*. Ed. Limusa, México. 684 pp.
- Whiteley, GM; MV Utomo & AR Dexter. 1981. A comparison of penetrometer pressures and the pressures exerted by roots. *Plant and Soil* 61: 351-364.
- Wild, A. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Mundi-Prensa, Madrid, 1045 pp.
- Wilson, MG & J Cerana. 2004. Mediciones físicas en suelos con características vérticas. *Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 11-22.