

## INTERVALO HÍDRICO ÓPTIMO EN SUELOS ARGIUDOLES PLANTADOS CON *Eucalyptus dunnii* MAIDEN

FRANCISCO DAMIANO\* & RICARDO CARLOS MOSCHINI

Instituto de Clima y Agua. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Dr Repetto y De Los Reseros s/n°. Hurlingham (B1686WAA), provincia de Buenos Aires.

\*Autor para correspondencia: fdamiano@cni.inta.gov.ar

Recibido: 09-02-10

Aceptado: 15-12-10

### RESUMEN

El Intervalo Hídrico Óptimo (IHO) es el rango de agua del suelo dentro del cual el crecimiento de la planta está menos limitado por el potencial de agua, la aireación y la resistencia del suelo a la penetración de raíces. El IHO es a menudo determinado en cultivos, pero su aplicación en estudios de plantaciones forestales son escasos. Los objetivos fueron: a) estimar el IHO del suelo en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* joven y adulto usando funciones de edafo-transferencia; b) relacionar funcionalmente la frecuencia de humedad observada localizada fuera del IHO ( $p_{fuera}$ ) con el IHO y determinar si la relación es influenciada por el tipo de suelo y las condiciones meteorológicas del período de crecimiento. Se estimó el IHO en suelos Argiudoles Típico y Abrúptico, usando funciones de edafo-transferencia (FT) de retención hídrica y resistencia del suelo. La frecuencia de humedad observada fuera del rango del IHO ( $p_{fuera}$ ) fue evaluada estadísticamente usando el modelo PROC CATMOD. El IHO aumentó de  $0,009 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (horizonte Bt arcillo limoso) a  $0,207 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (horizonte C franco limoso). El modelo de regresión logística muestra que  $p_{fuera}$  se relacionó negativamente con el IHO ( $R^2 = 0,83^{***}$ ). La pendiente del modelo ( $b_1 = -30,5475$ ) no varió por condiciones climáticas pero la ordenada al origen resultó influenciada por este parámetro ( $b_o \text{ seco} = 5,0083$ ;  $b_o \text{ húmedo} = 3,5207$ ). El modelo fundamental-empírico sostuvo al IHO como un indicador de calidad física del suelo apto para evaluar factores climáticos que inciden sobre el consumo de agua en eucaliptos.

**Palabras clave.** Curva de retención hídrica, resistencia del suelo, funciones edafo-transferencia, regresión logística, región pampeana.

### LEAST LIMITING WATER RANGE IN ARGIUOLL SOILS UNDER *Eucalyptus dunnii* MAIDEN

#### ABSTRACT

The Least Limiting Water Range (LLWR) integrates water potential, aeration and mechanical resistance conditions that can be limiting to plant growth. The LLWR was often determined in field crops, but studies performed under tree plantations are scarce. In this study, soil LLWR was determined in young and mature *Eucalyptus dunnii* plantations using pedo-transfer functions. Frequency of soil moisture values falling outside the LLWR ( $p_{out}$ ) was statistically evaluated using the PROC CATMOD model. LLWR increased from  $0.009 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  in silty clay Bt horizons to  $0.207 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  in silty loam C horizons. The  $p_{out}$  was negatively related to LLWR ( $R^2 = 0.83^{***}$ ). The slope of the fitted model ( $b_1 = -30.5475$ ) was not altered by climatic conditions, but its intercept varied from dry ( $b_o = 5.0083$ ) to wet ( $b_o = 3.5207$ ) years. From this empirical-fundamental model, it can be concluded that LLWR is a suitable index to indicate the best soil physical conditions for the growth of eucalyptus plantations.

**Key words.** Water retention curve, soil resistance, pedo-transfer functions, logistic regression, pampean region.

### INTRODUCCIÓN

Actualmente la Argentina presenta una tendencia creciente hacia la explotación de áreas cultivadas con bosques. La plantación de especies forestales exóticas como eucalipto en la Región Pampeana plantea incertidumbre sobre la conservación del agua y el suelo. El dilema es general y real, pero las soluciones y las valoraciones deben ser específicas para cada caso y basarse en una apreciación exacta (FAO, 1990; Lima, 1997). Esta perspectiva, y la posibilidad de lograr la certificación forestal (SAGPyA Forestal, 2001), determinan la necesidad de contar con indicadores edáficos capaces de evaluar la productividad forestal y la sustentabilidad de los nuevos ambientes

productivos. Según Nambiar (1996), un indicador sustentable es aquel que permite relacionar cambios en las propiedades del suelo con procesos del ecosistema y el nivel de producción de la unidad de paisaje. Un indicador físico muy utilizado es el denominado rango de agua no limitante del suelo (NLWR) introducido por Letey (1985). Más adelante, da Silva *et al.* (1994) desarrollaron el concepto NLWR cuantitativo, renombrándolo como el rango de agua menos limitante (LLWR). Este rango integra, en un único parámetro, el contenido de agua, el potencial mátrico, la resistencia mecánica y la porosidad llena de aire, todos ellos que se relacionan directamente con el crecimiento vegetal. Se conoce el uso de LLWR en Nue-

va Zelanda (Zou *et al.*, 2000) y Estados Unidos (Siegel-Issem *et al.*, 2005), en plantaciones con diferentes especies de pinos, sujetas a suelos y prácticas de manejo diversas.

Dado la dificultad de disponer de toda la información requerida para poder calcular LLWR, se recurre a menudo al uso de funciones de edafo-transferencia (FT). Por ejemplo, da Silva & Kay (1997 a y b) llegaron así a evaluar la respuesta del maíz al LLWR ya sea a) directamente con la magnitud del LLWR o b) con la frecuencia durante el ciclo del cultivo que la humedad observada cae fuera del LLWR, denominándolo  $p_{out}$ . A nivel local Orellana *et al.* (1997), definieron un concepto análogo a LLWR, que es el Intervalo Hídrico Óptico (IHO). Este sólo difiere de LLWR en los límites y técnicas de medición. Siguiendo la metodología propuesta por Orellana *et al.*, Valenzuela & Wilson (2002) usaron el IHO para comparar diferentes sistemas de labrazas en suelos Argiudoles vérticos de Entre Ríos cultivados con trigo. El presente estudio tiene por objetivos: a) estimar el IHO del suelo en plantaciones de *Eucalyptus dunnii* joven y adulto usando funciones de edafo-transferencia; b) relacionar funcionalmente la frecuencia de humedad observada localizada fuera del IHO ( $p_{fuera}$ ) con el IHO y determinar si la relación es influenciada por el tipo de suelo y las condiciones meteorológicas del período de crecimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación y características del sitio

El estudio se realizó en lotes comerciales de *Eucalyptus dunnii* Maiden plantados a 2,5 x 2,5 m en estado juvenil (plantines 1997), con predecesor pino seguido de dos años de barbecho desnudo, y monte adulto (rebrote 1992). El campo se ubica en la cuenca inferior del río Carcaraña de la provincia de Santa Fe (32°32'08'' S y 60°48'18'' O). El clima de la región es templado húmedo sin estación seca y con un verano cálido. La temperatura media es de 17°C, con máximas y mínimas absolutas de 42,1°C y -7,0°C, respectivamente. La precipitación media anual es 1.016 mm, concentrados en la época primavera-estival. La evapotranspiración media anual (Penman) es 1.100 mm. Los suelos son Argiudoles Típico y Abruptico profundos y bien drenados (Tabla 1 a y b, respectivamente) [Proyecto Forestal de Desarrollo: PIA 02/97, SAGPyA-BIRF], ubicados en un paisaje plano con pendientes inferiores a 0,1%.

### Muestreo y determinaciones

Se extrajeron muestras de suelos con barreno (200 g; n = 3) y cilindro muestreador (226 cm<sup>3</sup>; n = 2) de 7 y 6 horizontes hasta dos metros de profundidad (Tabla 1 a y b, respectivamente). A esas

muestras se les determinó el contenido de agua gravimétrico (W) y la densidad aparente (DA), a partir de las cuales se calculó la humedad volumétrica ( $\Theta$ ). En total se midieron 9 perfiles hídricos entre junio 1999 y enero 2000 (año 1) y 5 perfiles entre junio 2000 y enero 2001 (año 2), obteniéndose 182 valores de humedad promedio. Las lluvias fueron registradas con un pluviómetro estándar ubicado en la línea de árboles adultos a 1,3 m de altura (Fig. 1 a y b, respectivamente). Se tomaron también muestras por horizonte sin perturbar (cilindros de acero 59 cm<sup>3</sup>; n = 2) para determinar su contenido volumétrico de agua a saturación, -33, -80 y -1.500 kPa, usando olla y membrana de presión según Dane & Hopmans (2002). Estos contenidos hídricos fueron usados como datos de entrada de los modelos de retención hídrica y resistencia del suelo, empleados en el cálculo del IHO.

### Cálculos usando funciones de edafo-transferencia (FT)

Para determinar la curva de retención hídrica (CRH) se utilizó el modelo uni-paramétrico elaborado por Damiano (1999), que usa la función:

$$\Theta = \Theta_s e^{0,571 + \left( \frac{-1,753 - \ln \Psi_m}{b_i} \right)} \quad (1)$$

donde  $\Theta$  es el contenido volumétrico de agua, en cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $\Theta_s$  contenido volumétrico de agua a saturación, en cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>;  $\Psi_m$  es el potencial mátrico, en kPa; ' $b_i$ ' es la pendiente escalar específica por horizonte, calculada por derivación en (1):

$$b_i = \left[ \frac{\ln \Psi_{m_{-33kPa}} + 1,753}{0,571 - \ln \left( \frac{\Theta_{-33kPa}}{\Theta_s} \right)} \right]$$

y un  $\Theta$  medido a -33 kPa

La resistencia del suelo R (kPa) se calculó con el modelo PENETR de Canarache (1990) [Tabla 2] programado en SAS (1991), para cuatro contenidos de agua gravimétrico W (%) determinados con equipo de presión entre 0 y -1.500 kPa, y utilizando como variables de regresión el porcentaje de arcilla y la DA (Tabla 1 a y b). Luego, la relación discreta R-W fue transformada en continua por análisis de regresión (<http://curveexpert.webhop.net>).

Para el cálculo del rango de agua menos limitante, se adoptaron para cada horizonte los valores nominales del IHO calculados con la ecuación (1), que corresponden a los límites de agua disponible para el vegetal (CAD) retenida a -33 kPa y -1.500 kPa (Soil Survey Division Staff, 1993). Dado que el límite superior o capacidad de campo ( $\Theta_{cc}$ ) puede disminuir por efecto de una posible anaerobiosis, y el límite inferior o marchitez permanente ( $\Theta_{mp}$ ) puede aumentar por incrementos de la resistencia del suelo, se adoptaron los valores arbitrarios usados por Zou *et al.* (2000) en raíces de pino. La aireación limitante es cuantitativamente representada por la porosidad llena de aire ( $\Theta_a$ ), restando al  $\Theta_s$  un volumen de agua de 0,10 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. El contenido de humedad (W) equivalente a una fuerza de 3.000 kPa se obtuvo resolviendo la ecuación seleccionada  $R = f(W)$ .

Tabla 1. Principales propiedades físicas y químicas del suelo (a) Argiudol Típico y (b) Argiudol Abruptico.  
Table 1. Main physical and chemical properties of soil (a) Typic Argiudoll and (b) Abruptic Argiudoll.

a. Argiudol Típico: <i>Eucalyptus dunnii</i> joven							
Horizonte	Ap	A	BA	Bt1	Bt2	BC	C
Profundidad (cm)	0-11	11-22	22-44	44-89	89-116	116-152	152-200
Carbono orgánico (%)	2,50	1,73	0,87	0,48	0,23	0,11	0,10
pH en agua (relación 1:2,5)	5,9	5,7	6,0	6,4	6,5	6,5	6,3
Arcilla (% < 0,002 mm)	27,5	29,1	34,0	51,2	40,0	30,0	25,0
Limo (% 0,002-0,050 mm)	66,6	65,2	60,1	44,4	53,9	62,2	65,2
Arena (% 0,050-2 mm)	5,9	5,7	5,9	4,4	6,1	7,8	9,8
Saturación ( $\Theta_s$ , cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,515	0,452	0,498	0,588	0,633	0,605	0,635
Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	1,02	1,26	1,29	1,25	1,37	1,43	1,28
b. Argiudol Abruptico: <i>Eucalyptus dunnii</i> adulto							
Horizonte	Ap	BA	Bt1	Bt2	BC	C	
Profundidad (cm)	0-16	16-28	28-64	64-107	107-156	156-193	
Carbono orgánico (%)	1,41	1,02	0,54	0,21	0,10	0,08	
pH en agua (relación 1:2,5)	5,7	5,7	6,3	6,7	6,9	6,9	
Arcilla (% < 0,002 mm)	23,8	31,1	56,3	43,4	34,9	28,6	
Limo (% 0,002-0,050 mm)	68,6	63,0	40,2	51,8	58,7	63,9	
Arena (% 0,050-2 mm)	7,6	5,9	3,5	4,8	6,4	7,5	
Saturación ( $\Theta_s$ , cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )	0,514	0,507	0,623	0,632	0,566	0,569	
Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )	1,16	1,25	1,34	1,43	1,27	1,33	

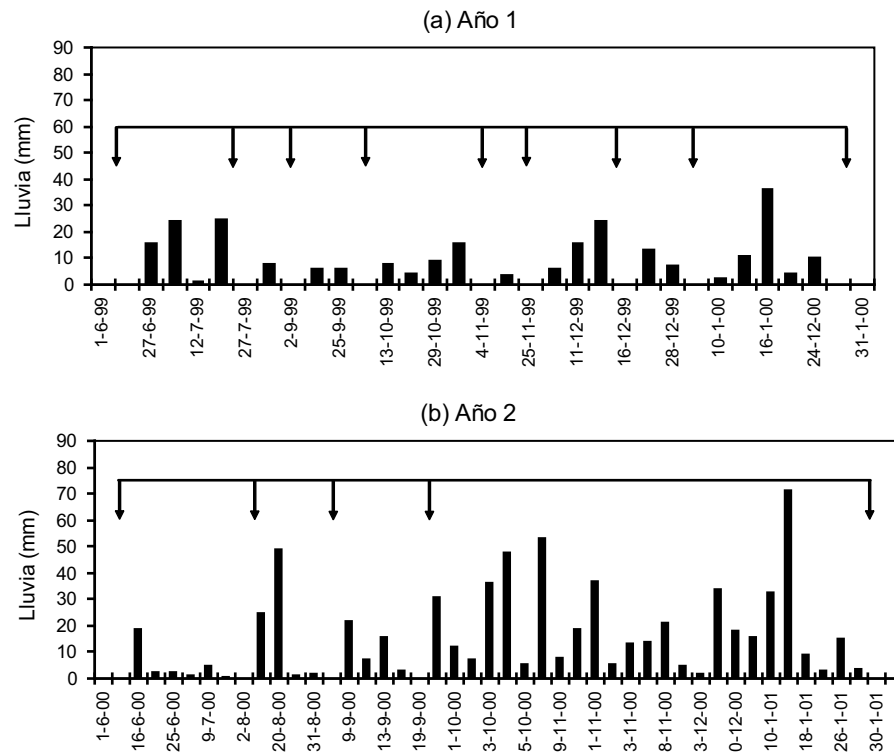


Figura 1. Registro de lluvia diaria y momento de muestreo de humedad del suelo en *Eucalyptus dunnii* joven y adulto (▼) del año 1 (a) junio 1999 a enero 2000 y año 2 (b) junio 2000 a enero 2001.

Figure 1. Daily rainfall and soil moisture sampling in young and mature *Eucalyptus dunnii* trees date during (a) the year one (▼) June 1999 January 2000 and (b) the year two June 2000 January 2001 periods.

Tabla 2. Ecuaciones y algoritmos del modelo «PENETR» Canarache.

Table 2. Model equations and algorithms «PENETR» Canarache.

Variable	Algoritmo
RP <sub>s</sub>	0,055 * 1,047 <sup>C</sup> * DA <sup>7,53</sup>
S	[100 * (1 - 0,38 * DA)] / DA
PT	100 * (1 - DA / 2,65)
PT <sub>m</sub>	44,9 + 0,163 * C
GC	100 (PT <sub>m</sub> - PT) / PT <sub>m</sub>
f	0,875 + 0,0032 * GC
W <sub>r</sub>	(100 * W) / (S * f)
m	-(0,36 * 1,0026 <sup>C</sup> * DA <sup>1,27</sup> * DA <sup>0,0267</sup> )
RP	RP <sub>s</sub> * [2W <sub>r</sub> / (S * f)] <sup>m</sup>

Donde RP<sub>s</sub>, resistencia a la penetración estándar (al 50% en w/w de cuasi saturación) en MPa; C, arcilla < 2 μm en % de w/w; DA, densidad aparente en Mg m<sup>-3</sup>; S, contenido de agua a saturación en % de w/w; PT, porosidad total en % de v/v; PT<sub>m</sub>, porosidad total mínima en % de v/v; GC, grado de compactación en %; f, factor empírico; W<sub>r</sub>, contenido de humedad relativo en % de w/w (del contenido de humedad a cuasi saturación); W, contenido de humedad en % de w/w; m, constante; RP, resistencia a la penetración en MPa.

### Desarrollo de un modelo empírico

Se dispuso de un total de 182 registros de humedad de suelo correspondientes a los años 1 y 2 y a los horizontes de los suelos Argiudoles Típico y Abrúptico. Por horizonte de suelo y año (N = 26) se calculó la proporción de casos medidos (o frecuencia) de Θ que cayeron fuera del IHO ( $p_{fuera}$ ). La relación entre la variable respuesta ( $p_{fuera}$ ) y las variables clasificatorias tipo de suelo y año y continua IHO, fue analizada mediante la técnica de regresión logística (PROCCATMOD; SAS, 1991) indicada por da Silva & Kay (1997 b). La forma linearizada de la relación entre  $p_{fuera}$  (rango 0 a 1) y el IHO fue descripta por una función logística:

$$\ln\left(\frac{p_{fuera}}{1 - p_{fuera}}\right) = b_0 + b_1 IHO$$

donde  $b_0$  y  $b_1$  son los coeficientes de regresión. La ecuación definitiva se expresa como:

$$p_{fuera} = \frac{e^{(b_0 + b_1 IHO)}}{1 + e^{(b_0 + b_1 IHO)}} \quad (2)$$

La significancia de los efectos suelo, año y IHO se evaluó mediante el test de Chi cuadrado ( $\chi^2$ ) y los parámetros  $b_0$  y  $b_1$  por el método de máxima verosimilitud. Para el modelo final seleccionado se calculó el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ).

### Análisis estadístico

La exactitud del modelo uni-paramétrico (1) fue evaluado por la raíz del error cuadrático medio (RMSE, [3]) y una medida de la eficiencia del modelo (EF, [4]) [Donatelli *et al.*, 2004]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{N}} \quad (3)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

donde  $E_i$  y  $M_i$  son los valores de Θ estimados por el modelo y medidos con equipo de presión a  $\Psi_m$  de -80 y -1.500 kPa en los suelos Argiudoles Típico (N = 14) y Abrúptico (N = 12) respectivamente, y  $\bar{M}$  el promedio de los valores medidos.

La lluvia total medida en el monte forestal durante dos períodos de crecimiento de ocho meses (años 1 y 2) fue relacionada con los percentiles de la serie histórica (1971-2000) de lluvia acumulada en el mismo lapso en la EEA INTA, en Oliveros distante 5 km.

El contenido de humedad observado en los suelos Argiudoles Típico y Abrúptico durante los dos años de crecimiento, fueron comparados por análisis de media y test de Tukey (SAS, 1991).

## RESULTADOS

### Estimación de las CRH y resistencia del suelo con FT

El modelo uni-paramétrico (1), versión más sencilla del modelo de Campbell (citado por Damiano, 1999), estimó adecuadamente las CRH para los suelos Argiudoles Típico y Abrúptico. La inversa de la pendiente ' $b_i$ ' (Tabla 3 a y b, respectivamente) es equivalente al índice de distribución de tamaño de poros (DTP). El rango de dicha pendiente disminuyó desde texturas franco limosa (C) a arcillo limosa (Bt1). En el mismo sentido aumentó la fuerza matricial del suelo, *i.e.* a menores gradientes de DTP y para un mismo potencial mátrico ( $\Psi_m$ ), texturas más finas retienen más agua (Θ). Consideramos que la validación obtenida a partir de un conjunto de datos independientes (de aquellos usados para el «ajuste» [Damiano, 1999]) brindará una visión más realista del desempeño, utilidad y aplicabilidad del modelo en situaciones reales. En la Figura 2 (a) y (b) se presenta la relación entre los valores de Θ estimados por el modelo uni-paramétrico y los medidos a -80 kPa y -1.500 kPa en los suelos Argiudoles Típico y Abrúptico, respectivamente. Gráficamente se observa que los valores se distribuyen alrededor de la línea de 45°. En términos cuantitativos la precisión (RMSE) y eficiencia (EF) del modelo

a. Argiudol típico: <i>Eucalyptus dunnii</i> joven				
Coeficientes de las ecuaciones de edafo-transferencia				
Horizonte	(1)	(2)		
	$b_i$	$a$	$B$	$c$
Ap	5,11	177,31	-0,86	1.646,7
A	6,15	620,59	-4,99	11.690,2
BA	5,49	746,92	-5,88	19.479,8
Bt1	7,00	918,64	-6,06	42.786,0
Bt2	5,84	603,96	-4,11	49.856,1
BC	5,51	630,51	-4,92	38.379,9
C	4,84	515,21	-3,28	11.107,3

b. Argiudol Abruptico: <i>Eucalyptus dunnii</i> adulto				
Coeficientes de las ecuaciones de edafo-transferencia				
Horizonte	(1)	(2)		
	$b_i$	$a$	$b$	$c$
Ap	5,33	352,4	-2,47	3.909
BA	5,11	670,2	-5,60	11.889
Bt1	6,49	340,5	-2,35	105.329
Bt2	5,95	181,4	-1,46	84.998
BC	5,58	718,4	-5,45	18.187
C	5,52	667,2	-5,14	18.967

Tabla 3. Parámetros de ajuste de los modelos de retención de agua y resistencia del suelo (a) Argiudol Típico y (b) Argiudol Abruptico.

Table 3. Fitted regression coefficients for water retention and soil resistance models for (a) Typic Argiudoll and (b) Abruptic Argiudoll.

Donde (1)  $b_i$ , pendiente modelo uni-paramétrico; (2)  $a$ ,  $b$  y  $c$ , coeficientes función polinomio.

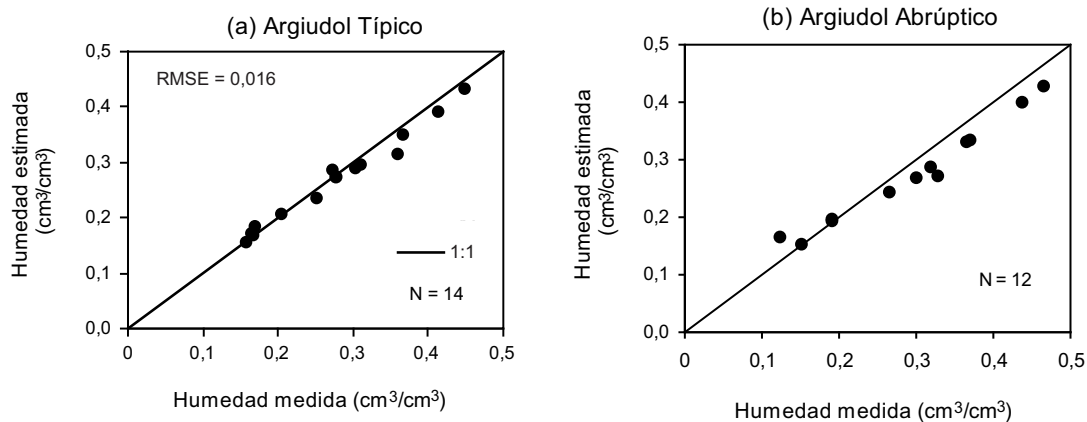


Figura 2. Relación lineal entre el contenido de humedad ( $\Theta$ ) estimado por el método uni-paramétrico y el medido en potenciales mátricos -80 kPa y -1500 kPa para (a) Argiudol típico y (b) Argiudol Abruptico.

Figure 2. Linear relationship between moisture content ( $\Theta$ ) estimated by uni-parametric method and measured in matric potential -80 kPa and -1500 kPa for (a) Typic Argiudoll and (b) Abruptic Argiudoll.

fue de  $0,016 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $0,97$  en el suelo Argiudol Típico y  $0,031 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  y  $0,91$  en el suelo Argiudol Abruptico, respectivamente.

Con el modelo PENETR (Canarache, 1990) se calcularon cuatro valores de R que cubren el rango de humedad de la CRH. La resistencia del suelo Argiudol

Típico osciló entre  $174 \text{ kPa}$  ( $W_{-0\text{kPa}}$ ) y  $3.253 \text{ kPa}$  ( $W_{-1500\text{kPa}}$ ) en los horizontes Ap y Bt2, respectivamente. El Argiudol Abruptico resultó con valores de resistencia ligeramente superiores para los mismos horizontes y contenidos hídricos ( $349 \text{ kPa}$  y  $4.724 \text{ kPa}$ ). La función exponencial que mejor ajustó los pares de valores de R-W en todos los

horizontes fue ( $R^2=0,999$ ; Error Estándar= $0,088$  a  $2,379$ ;  $N = 52$ ):

$$R = a + bW + \frac{1}{W}c \quad (5)$$

donde  $a$ ,  $b$  y  $c$  son los coeficientes de regresión hallados para los suelos Argiudoles Típico y Abrúptico (Tabla 3 a y b, respectivamente). Las curvas de resistencia del suelo (CRS) fueron reconstruidas aplicando en la ecuación (5) los contenidos de humedad ( $W$ ) estimados por (1) entre  $-10$  kPa y  $-1.500$  kPa ( $N = 9$ ). Las curvas CRH y CRS mostraron un comportamiento opuesto, *i.e.* con el incremento de la succión mátrica (eje x) aumenta la resistencia y disminuye el contenido de agua (ejes y) [curvas no presentadas].

#### IHO-integración del potencial mátrico, aireación y resistencia del suelo

Los componentes físicos del suelo que intervienen en el cálculo del IHO fueron estimados usando las ecuaciones (1) y (5) y un valor arbitrario de la porosidad de aire limitante (Tabla 4 a y b). La capacidad de agua óptima del suelo (CAD), calculada por diferencia entre el límite superior e inferior se vio reducida por drenaje deficiente y por la resistencia del suelo. La porosidad llena de aire ( $\Theta_a < 0,10$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) sólo redujo el  $\Theta_{cc}$  en el horizonte Bt1 del Argiudol Típico. El contenido de humedad ( $W$ ) re-

suelto a  $3.000$  kPa incrementó, en términos volumétricos, el  $\Theta_{mp}$  en los horizontes Bt2 y BC del Argiudol Típico y en Bt1 y Bt2 del Argiudol Abrúptico. El potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) correspondiente al límite crítico de resistencia de la raíz difirió entre suelos. En el suelo Abrúptico, el límite de resistencia del horizonte Bt1 se alcanzó a  $-27$  kPa ( $\Theta = 0,514$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) y el del Bt2 a  $-56$  kPa ( $\Theta = 0,423$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>). Debido a que en el Bt1 el  $\Theta$  equivalente a  $3.000$  kPa superó al  $\Theta_{cc}$ , se asumió el valor  $\Theta_a$ . En los horizontes Bt2 y BC del suelo Argiudol Típico, la resistencia de  $3.000$  kPa se correspondió con un potencial de  $-652$  kPa ( $\Theta = 0,276$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) y  $-976$  kPa ( $\Theta = 0,223$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) respectivamente. Integrando los tres procesos físicos, los valores de IHO oscilaron entre  $0,158$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> y  $0,207$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>. La excepción fue el horizonte Bt del Argiudol Abrúptico (menor a  $0,040$  cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>).

#### IHO- dinámica de agua del suelo

Durante los dos periodos de crecimiento junio 1999 a enero 2000 (año 1) y junio 2000 a enero 2001 (año 2), el *E. dunnii* tuvo ofertas hídricas diferentes (Fig. 1 a y b, respectivamente). La lluvia total registrada en el año 1 fue de  $258$  mm ( $22$  días de lluvia), que coincidió con el percentil inferior al 5 de la serie histórica de los últimos 30 años, indicando una condición de extrema sequía. En cambio, el año 2 registro  $675$  mm ( $38$  días de lluvia), equivalente a un percentil del 75% y condición húmeda. Cabe destacar que el período bajo estudio fue precedido

Tabla 4. Contenidos volumétricos de agua ( $\Theta$ ) críticos del IHO para *Eucalyptus dunnii* (a) joven y (b) adulto.

Table 4. Critic volumetric water contents ( $\Theta$ ) of the Least Limiting Water Range (LLWR) for (a) young and (b) mature *Eucalyptus dunnii* trees.

##### a. Argiudol Típico: *Eucalyptus dunnii* joven

Horizonte	Ap	A	BA	Bt1	Bt2	BC	C
	$\Theta$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )						
$\Psi_m = -33$ kPa ( $\Theta_{cc}$ )	0,326	0,341	0,339	0,492	0,456	0,413	0,380
$\Psi_m = -1.500$ kPa ( $\Theta_{mp}$ )	0,155	0,183	0,169	0,285	0,203	0,207	0,173
$\Theta_a = 0,10$ (límite de aireación)	0,415	0,352	0,398	0,488 <sup>A</sup>	0,533	0,505	0,535
$R = 3.000$ kPa (límite de fuerza)	s/d	s/d	s/d	s/d	0,276 <sup>B</sup>	0,223 <sup>B</sup>	s/d
IHO	0,171	0,158	0,170	0,237	0,180	0,190	0,207

##### b. Argiudol Abrúptico: *Eucalyptus dunnii* adulto

Horizonte	Ap	BA	Bt1	Bt2	BC	C
	$\Theta$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )					
$\Psi_m = -33$ kPa ( $\Theta_{cc}$ )	0,340	0,321	0,491	0,463	0,391	0,389
$\Psi_m = -1.500$ kPa ( $\Theta_{mp}$ )	0,166	0,152	0,273	0,244	0,197	0,195
$\Theta_a = 0,10$ (límite de aireación)	0,414	0,407	0,523 <sup>A</sup>	0,532	0,466	0,469
$R = 3.000$ kPa (límite de fuerza)	s/d	s/d	0,514 <sup>B</sup>	0,423 <sup>B</sup>	s/d	s/d
IHO	0,174	0,169	0,009	0,040	0,195	0,194

A,  $\Theta$  donde el límite más alto de IHO es mejor determinado por la porosidad llena de aire ( $\Theta_a$ ) que por la capacidad de campo ( $\Theta_{cc}$ ); B,  $\Theta$  donde el límite más bajo de IHO es mejor determinado por la resistencia del suelo ( $R$ ) que por la marchitez permanente ( $\Theta_{mp}$ ); s/d, resistencia menor a  $3.000$  kPa.

por cuatro años con lluvias inferiores entre 11 y 23% respecto del registro histórico anual medio (1.016 mm). Dentro de cada período de crecimiento no se detectaron diferencias de media (test de Tukey al 5%) entre el  $\Theta$  medido en el suelo Argiudol Típico y Abrúptico (Tabla 5). Si la hubo entre año seco y húmedo. Lo mismo aconteció cuando aplicamos el IHO. El porcentaje de casos observados fuera del rango óptimo de humedad en el período seco y húmedo fue 45% y 25%, respectivamente. La mayoría de los casos fuera del IHO (59%) estuvieron relacionados con el límite inferior dado por la resistencia crítica del horizonte Bt argílico (Tabla 4 a y b). La falta de mediciones en los meses de octubre a diciembre del segundo año (Fig. 1 b), coincidente con el 50% de la lluvia total del período, podría haber incrementado en más de dos los casos registrados por anaerobiosis temporal. Por otra parte, además del contenido de humedad se necesita conocer la energía con que el agua es retenida y su movimiento dentro del perfil. Los perfiles hídricos e IHO del monte joven y adulto transformados por el modelo (1) en  $\Psi_m$  ( $pF = \log \Psi_m$  en cm de columna de agua) para la fecha inicial y final del año seco y húmedo, son mostrados en la Figura 3 (a) y (c) y (b) y (d), respectivamente. Para determinar el sentido del flujo (indicado por flechas) se calculó la diferencia de potencial  $\left(\Delta\Psi = \frac{d\Psi}{dz}\right)$  por la relación entre los gradientes de potencial hidráulico ( $\Psi_h = \Psi_m + \Psi_g$ ) y espesor ( $z$ ) del suelo, asumiendo la superficie del suelo como nivel de referencia y la napa freática fuera de la zona de control. En ningún caso los perfiles hídricos estuvieron en equilibrio ( $\Delta\Psi = 0$ ). Durante el período seco (Fig. 3 a y b), el horizonte superficial (A) tuvo flujo ascendente ( $\Delta\Psi$  negativo) y los horizontes profundos BC y C descensos por drenaje ( $\Delta\Psi$  positivo). El horizonte subsuperficial Bt1 argílico actúa como catalizador de la humedad tanto por descenso del BA como por ascenso del Bt2. La misma dirección de flujo se mantuvo en el segundo período de crecimiento del árbol (año húmedo). La excepción fue el horizonte superficial

del Argiudol Típico (Fig. 3 c). Desde el punto de vista del consumo de agua por la planta, el suelo Argiudol Típico se diferenció fundamentalmente del Argiudol Abrúptico por el comportamiento del horizonte Bt. En el primer suelo (monte joven), la variación de humedad durante el año seco se debió principalmente a la absorción radical, ya que el perfil disponía de agua almacenada en el rango del IHO (Fig. 3 a). Las lluvias del período húmedo (año 2) no alcanzaron a reponer el agua consumida con anterioridad (Fig. 3 c). Hecho que si sucedió en el perfil del monte adulto (Fig. 3 d). Pero la variación de humedad se debió más a una redistribución interna que a la absorbida por la raíz.

### IHO-Modelización de la proporción de humedad observada fuera del IHO ( $p_{fuera}$ )

Considerando el conjunto de horizontes (Tabla 4 a y b), la proporción de casos observados con Q que caen fuera del IHO ( $p_{fuera}$ ) durante la anomalía de seca (año 1), oscilaron mayoritariamente entre 0,2 y 0,6 para un rango estrecho de IHO (0,207 a 0,158  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , respectivamente) [Fig. 4]. Contrariamente, el año húmedo tuvo casi todos los  $p_{fuera}$  por debajo de 0,2. Fuera de este rango de  $p_{fuera}$  se ubicó el horizonte Bt del suelo Argiudol Abrúptico con una proporción superior a 0,9 (IHO < 0,040  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) en los dos años. La Figura 4 muestra una tendencia negativa entre  $p_{fuera}$  e IHO, *i.e.* la frecuencia de casos fuera del rango óptimo aumenta en la medida que el IHO se hace más estrecho.

El modelo de regresión logística (2) seleccionó significativamente el efecto de las variables año e IHO (Tabla 6). La variable suelo no fue significativa. El modelo muestra que  $p_{fuera}$  se relacionó negativamente con el IHO, explicando el 83% de la variación en  $p_{fuera}$  y el  $p_{fuera}$  fue altamente significativo ( $P > 0,001$ ) considerando el IHO en los dos años (Fig. 4). La pendiente del modelo logístico ( $b_1 = -30,5475$ ) no varió por las condiciones climáticas, pero la ordenada al origen resultó influenciada por este parámetro ( $b_0 \text{ seco} = 5,0083$ ;  $b_0 \text{ húmedo} = 3,5207$ ). Para el año seco una reducción del IHO

Tabla 5. Contenido de humedad observado en suelos Argiudoles Típico y Abrúptico y número de casos fuera del IHO en año seco y húmedo.

Table 5. Observed soil moisture contents in Typic and Abruptic Argiudolls and number of cases falling out of LLWR for dry and wet year.

Año	Suelo	Humedad observada ( $\Theta$ , $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	Casos observados sobre totales en % (IHO < $\Theta$ < IHO)	n
Seco	Argiudol Típico	0,228 a(0,124-0,352)	35	63
	Argiudol Abrúptico	0,218 a(0,135-0,308)	57	54
Húmedo	Argiudol Típico	0,271 b(0,178-0,359)	11	35
	Argiudol Abrúptico	0,254 b(0,173-0,388)	40	30

Entre paréntesis contenido de humedad mínimo y máximo.

Letras distintas indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre medias.

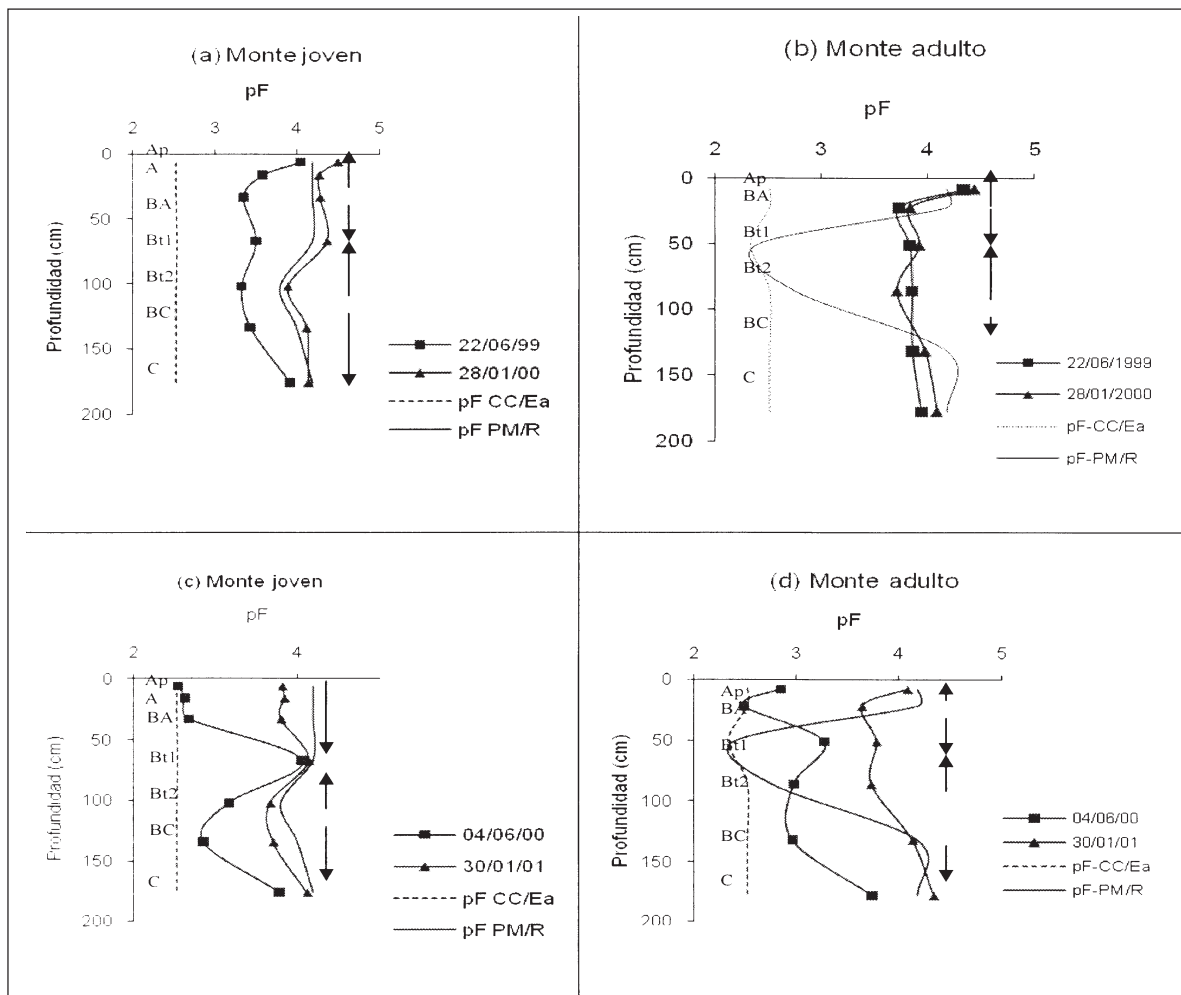


Figura 3. Perfiles hídricos y límite superior e inferior del rango de agua menos limitante en pF ( $\log \Psi_m$  en cm de columna de agua) del suelo Argiudol Típico monte joven período seco (a) y húmedo (c) y Argiudol Abruptico monte adulto período seco (b) y húmedo (d). [Sólo se muestra la fecha inicial y final del muestreo de humedad en cada período de crecimiento].

Figure 3. Water profiles and upper and lower limit of least limiting water range in pF ( $\log \Psi_m$  in cm water column) of young forest on soil Típico Argiudol during dry (a) and wet (c) periods and Abruptic Argiudol for mature forest during dry (b) and humid (d) periods. [It only shows the start and the end dates of the moisture sampling period at each growth stage].

Tabla 6. Resultados del modelo de regresión logística<sup>#</sup>

Table 6. Results of the logistic regression model.

Variable	GL	$\chi^2$	$P > \chi^2$
Intercepción	1	14,12	0,0002
Año	1	10,38	0,0013
IHO	1	22,17	0,0000
Tasa verosimilitud	23	65,55	0,0000

<sup>#</sup>  $R^2 = 0,83$ ;  $N = 26$ .

del suelo de 0,207 a 0,158  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$  significa un incremento de  $p_{fuera}$  de 0,33 (rango 0,21 a 0,54, respectivamente). En cambio, en el año húmedo la proporción es de 0,15 (rango 0,06 a 0,21, respectivamente).

## DISCUSIÓN

El modelo uni-paramétrico (1) estimó la pendiente de la distribución de tamaño de poros ( $DTP = b_i^{-1}$ ) del suelo Argiudol Típico plantado con *Eucalyptus dunnii* joven y del Argiudol Abruptico con árboles adultos (Tabla 3 a y b, respectivamente), en concordancia con los valores tabulados y ajustados experimentalmente por clase textural por Rawls *et al.* (1991) y Zou *et al.* (2000) respectivamente. La precisión de la relación  $\Theta$ - $\Psi_m$  medida y estimada estuvo por debajo del límite superior de  $\pm 0,030 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , normalmente aceptada para el propósito de esta estimación (Williams & Ahuja 1993).



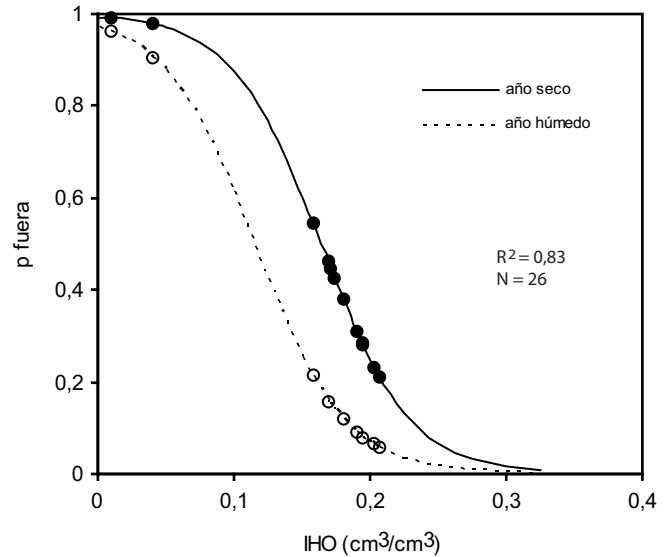


Figura 4. Proporción del contenido de agua del suelo que cae fuera del rango de agua menos limitante ( $p_{fuera}$ ) bajo condiciones climáticas contrastantes [puntos graficados de IHO de la Tabla 4 a y b]. Ecuación 2:  $b_1 = -30,5475$ ;  $b_0 \text{ seco} = 5,0083$ ;  $b_0 \text{ húmedo} = 3,5207$ .

Figure 4. Proportion of soil moisture falling outside LLWR for dry and wet years [LLWR data from Table 4 a y b]. Equation 2:  $b_1 = -30.5475$ ;  $b_0 \text{ dry} = 5.0083$ ;  $b_0 \text{ wet} = 3.5207$ .

La función polinomio (5), derivada del modelo PENETR ajustado y validado para una amplia gama de suelos, contenidos hídricos y manejo cuantificado por la densidad aparente (Canarache, 1990), expresó un incremento de resistencia con un decrecimiento del contenido de humedad ( $>$  succión matricial) hacia horizontes de textura más fina. La misma tendencia lograron Zou *et al.* (2000) y Wilson *et al.* (2000) ajustando experimentalmente un modelo logarítmico y exponencial, respectivamente. En términos de valores de resistencia, la ecuación estimó dentro del rango medido con penetrómetro por Taboada *et al.* (1998) en dos suelos representativos de la Pampa Ondulada.

Mayoritariamente el IHO fue usado para evaluar el efecto de diferentes prácticas de manejo en una amplia variedad de tipos de suelos bajo distintos cultivos y pasturas (da Silva *et al.*, 1994; Tormena *et al.*, 1999; Leão *et al.*, 2006; entre otros autores). Su aplicación en sistemas forestales cuenta con menos adeptos (Zou *et al.*, 2000; Siegel-Issem *et al.*, 2005). Los suelos plantados con Eucalipto joven (Argiudol Típico) y monte adulto (Argiudol Abruptico) poseen altos IHO acorde con su capacidad de uso agrícola (Tabla 4 a y b, respectivamente). Es decir, las raíces presentan un medio físico favorable al crecimiento y a la absorción de agua demanda por evapotranspiración. La excepción fue el horizonte Bt argílico del Argiudol Abruptico. Pilatti & Orellana (1993) hallaron similares IHO en un Argiudol de Santa Fe con horizonte superficial Ap franco limoso bajo diferentes tratamientos (rango 0,119 a 0,188  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) y horizonte subsuperficial Bt2 arcillo limoso (0,013  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). Según da Silva & Kay (1996, 1997 b), Orellana & Pilatti (1998) y Zou *et al.* (2000) suelos con altos IHO presentan resiliencia al estrés ambiental, *i.e.* condiciones físicas más favorables para el crecimiento de la planta. Por el contrario, rangos estrechos manifiestan casi siempre restricciones al sistema radical,

tanto por déficit como por exceso de agua. Suelos de la Pampa Ondulada con horizontes B argílicos con elevados porcentajes de arcilla afectaron la velocidad de elongación de las raíces de cultivos de maíz y soja, limitando el desarrollo y consecuentemente el aporte de agua y nutrientes (Pecorari & Balcaza, 1988; Otegui *et al.*, 1995; Micucci & Taboada, 2006). Esta limitación se manifiesta particularmente cuando el suelo se encuentra húmedo y no cuando está seco y con grietas (Prystupa & Lemcoff, 1998; Wilson *et al.*, 2000). Esto concuerda con los resultados del horizonte Bt del Argiudol Abruptico (monte adulto), donde la resistencia crítica de las raíces se alcanza con un contenido de humedad cercano a capacidad de campo (-33 kPa).

En plantaciones forestales, Lima (1997) y Bonomelli & Bonilla (1999) indicaron que la variabilidad climática, el rango de agua útil del suelo y el manejo se destacan entre los factores condicionantes del consumo de agua y por ende del rendimiento maderable. Por ello, la aplicación del IHO en el cálculo del agua edáfica es de capital importancia, ya que incorpora al agua útil retenida entre -33 kPa (CC) y -1.500 kPa (PM) las limitantes físicas intrínsecas y las adquiridas por manejo (Zou *et al.*, 2000; Mac Donagh, 2001). Por otra parte, Zou *et al.* (2000) y Siegel-Issem *et al.* (2005) hallaron que la compactación tiene un comportamiento disímil, en algunos suelos disminuye el rango de agua menos limitante y en otros lo amplía. El clásico balance hídrico vertical calculado a partir de los límites ideales del suelo, afectaría el verdadero valor de transpiración. En nuestro caso, el ejemplo más conspicuo sería el suelo Argiudol Abruptico (Fig. 3 b y d), donde el aporte de agua del horizonte Bt al sistema radical es prácticamente nulo por las razones enunciadas más arriba.

El modelo logístico integra los principales componentes físicos del suelo que hacen al hábitat de la raíz, juntamente con los aportes de agua meteórica. Este mode-

lo fundamental empírico puede ser usado como indicador genérico de procesos físicos del suelo, conociendo atributos edáficos disponibles o fáciles de medir. También tiene la ventaja de facilitar el monitoreo permanente de plantaciones forestales en sitios difíciles de acceder. El modelo estima la frecuencia de estrés edáfico de la planta para un amplio rango de IHO y condiciones ambientales de excesos y déficit hídrico, con aplicación en suelos Argiudoles santafesinos plantados con Eucaliptos. La extrapolación del modelo a otros ambientes productivos debe ser investigado (Schoenholtz *et al.*, 2000), dado la variabilidad espacial y la anisotropía vertical de los suelos de la región pampeana (Atlas de Suelos de la República Argentina, INTA). Esto también debe hacerse extensivo a los cambios en la estructura del suelo por efecto del manejo (Greacen & Sands, 1980; Zou *et al.*, 2000; Mac Donagh, 2001). La relación entre IHO y productividad forestal no ha sido aún testeada en condiciones de campo (Siegel-Issem *et al.*, 2005). La tasa de crecimiento del tallo de maíz fue correlacionada con el IHO (da Silva & Kay, 1996) y esto justifica adicionales estudios para determinar la relación entre el crecimiento de la plantación forestal e IHO.

## CONCLUSIONES

En función de los objetivos planteados en el trabajo se concluye:

- Las funciones de edafo-transferencia estimaron aceptablemente el intervalo hídrico óptimo (IHO) del suelo, a partir de un mínimo de información edáfica de fácil obtención y/o disponible en la cartografía de suelos.
- Los valores estimados de IHO variaron por tipo de suelo y clase textural: i) Argiudol Típico > Argiudol Abruptico, y ii) franco limosa > franco arcillo limosa > arcillo limosa.
- La resistencia crítica del suelo a las raíces sólo redujo el IHO de los horizontes Bt argílico del Argiudol Típico y Abruptico, con potenciales mátricos cercanos a capacidad de campo (-33 kPa) en este último suelo.
- La marcha de la humedad del suelo observada fuera del IHO en plantaciones de Eucaliptos joven y adulto no difirió entre suelos Argiudoles Típico y Abruptico, si lo hizo en años con ofertas hídricas contrastantes.
- El modelo de regresión logística relacionó negativamente el aumento de la frecuencia del estrés hídrico de la planta con la disminución del IHO. Usado conjuntamente con técnicas de balance hídrico vertical se podría monitorear el riesgo hídrico de plantaciones forestales.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Proyecto Forestal de Desarrollo: PIA 02/97, SAGPyA-BIRF.

## BIBLIOGRAFÍA

- Bonomelli, de PC & M Bonilla. 1999. Efecto de las propiedades físicas del suelo en la retención de humedad de tres suelos forestales del sur de Chile. Comisión VII. 13 pp. 14. Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Chile.
- Canarache, A. 1990. PENETR- a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. *Soil and Tillage Research* 16: 51-70.
- Damiano, F. 1999. Estimación de la retención hídrica en suelos agrícolas de la Pampa Ondulada usando una función uniparamétrica. Tesis M Sc. Facultad de Agronomía UBA. 195 pp.
- Dane, JH & JW Hopmans. 2002. Pressure plate extractor. In: Dane, JH & C Topp. (eds.) Methods of soil analysis: Physical methods. Madison. *Soil Science Society of American Society of Agro-nomy*, Part 4. Pp. 688-690.
- Da Silva, AP; BD Kay & E Perfect. 1994. Characterization of the Least Limiting Water Range of Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1775-1781.
- Da Silva, AP & BD Kay. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soil. *Plant and Soil* 184: 323-329.
- Da Silva, AP & BD Kay 1997a. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 877-883.
- Da Silva, AP & BD Kay. 1997 b. Effect of soil water content variation on the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 884-888.
- Donatelli, M; JHM Wösten & G Belocchi. 2004. Methods to evaluate pedotransfer functions. In: Pachepsky, Ya., WJ Rawls (eds.). Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Development in Soil Science. Volume 30. Elsevier. Chapter 20, p. 357-411.
- Greacen, EL & R Sands. 1980. Compaction of forest soils a review. *Australian Journal of Soil Research* 18: 163-188.
- Leão, TP; AP da Silva; MCM Macedo; S Imhoff & VPB Euclides. 2006. Least limiting water range: A potencial indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil & Tillage Research* 88: 279-285.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.* 1: 277-294.
- Lima, W de P. 1997. Indicadores hidrológicos do manejo sustentável de plantações de eucalipto. Anais da Conferência IUFRO sobre Silvicultura e Melhoramiento de Eucaliptos. v4: Impactos sociais e ambientais de plantações de eucalipto. EM-BRAPA Colombo. Pp.12-29.
- Mac Donagh, P. 2001. La compactación de suelos inducida por el tránsito de la maquinaria forestal. Revista SAGPyA Forestal N° 19 junio. 5 pp.

- Micucci, FG & MA Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max* Merrill) root abundance in conventionally-and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 86: 152-162.
- Nambiar, EKS. 1996. Sustained productivity of forests is a continuing challenge to soil science. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1629-1642.
- Orellana, JA de & MA Pilatti. 1998. Indicadores Edáficos en Agricultura Sostenible. I) Selección de variables relevantes. Actas XVI Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Pp. 233-224. Villa Carlos Paz, Córdoba.
- Orellana, JA de; MA Pilatti & DA Grenon. 1997. Soil quality: An approach to physical estate assessment. *Journal of Sustainable Agriculture* 9(2/3): 91-108.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 1990. El dilema del eucalipto. Roma. 26 p.
- Otegui, ME; EH Andrade & EE Suero. 1995. Growth, water use, and kernel absorption of maize subjected to drought at silking. *Field Crops Research* 40: 87-94.
- Pecorari, C & LF Balcaza. 1988. Influencia de los horizontes B2 sobre el consumo de la reserva de agua útil en suelos del área maicera típica. Informe técnico N° 215. EEA Pergamino. 28 pp.
- Pilatti, MA & JA de Orellana. 1993. Posibles indicadores edáficos de estabilidad: II. El intervalo hídrico óptimo. Comisión I. Actas XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pp. 21-22. Mendoza, Argentina.
- Prystupa, P & JH Lemcoff. 1998. Increased root density of maize crops under drought in Typic Argiudoll. *Maydica* 43: 271-276.
- Rawls, WJ; TJ Gish & DL Brakensiek. 1991. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristic. *Advances in Soil Science* 16: 213-234.
- SAGPyA (Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación) Forestal. 2001. Forestación y certificación forestal. Volumen 18. 6 pp.
- SAS Institute. 1991. SAS/STAT procedure guide for personal computers. Version 5 ed. SAS Inst., Cary, NC.
- Schoenholtz, SH; H van Miegroet & JA Burger. 2000. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management* 138(1-3): 335-356.
- Siegel-Issem, CM; JA Burger; RF Power; F Ponder & SC Patterson. 2005. Seedling root growth as a function of soil density and water content. *Soil Science Society of America Journal* 69: 215-226.
- Soil Survey Division Staff. 1993. Soil survey manual. USDA-SCS Agric. Handb. 18. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Taboada MA; FG Micucci; DJ Cosentino & RS Lavado. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research* 49: 57-63.
- Tormena, CA; AP da Silva & PL Libardi. 1999. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the limiting water range approach. *Soil & Tillage Research* 52: 223-232.
- Valenzuela, OR & MG Wilson. 2002. Efecto de las propiedades físicas del suelo sobre el desarrollo de raíces. Actas XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Pp. 26. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.
- Williams, RD & LR Ahuja. 1993. Using a one-parameter model to estimate the soil water characteristic. In: Sam SY Wang (ed.). «Advances in Hydro-Science and Engineering». Volume I, pp. 485-490.
- Wilson, MG; OR Valenzuela; MA Pilatti & O Felli. 2000. Relación entre el contenido hídrico y la resistencia a la penetración en un suelo con características vérticas. *Revista Facultad Agronomía UBA* 20(1): 69-73.
- Zou, C; R Sands; G Buchan & I Hudson. 2000. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.* 38: 947-958